

## Analisis Pengaruh *Sloof* terhadap Penurunan Fondasi Telapak dengan Simulasi Numeris

(Analysis the effect of Sloof on Footings Settlement by Numerical Simulation)

MUH. HANDY DWI ADITYAWAN, AGUS DARMAWAN ADI, ASHAR SAPUTRA

### ABSTRAK

*Sloof* yang menghubungkan dua kolom selama ini diperhitungkan sebagai balok ikat (*tie beam*) agar kolom tidak bergeser. *Sloof* diasumsikan menggantung atau tidak bertumpu di atas tanah. Sehingga *sloof* murni sebagai pengikat antar dua kolom. Namun, kenyataan di lapangan *sloof* bertumpu di atas tanah atau di atas pasangan batu. Oleh karena itu *sloof* akan menerima beban vertikal dari bangunan. Desain *sloof* perlu diubah karena kondisi ini. Analisis dilakukan dengan menggunakan program SAP2000. Tanah dan pasangan batu dimodelkan sebagai *spring* dengan input parameter modulus reaksi tanah dasar ( $k_s$ ). Hasil analisis menunjukkan bahwa penurunan fondasi telapak pada kondisi *sloof* bertumpu di atas tanah atau di atas pasangan batu lebih kecil dibandingkan kondisi *sloof* menggantung. Selisih penurunan rata-rata sekitar 26%. Beda penurunan dan *angular distortion* antara dua kolom menjadi lebih kecil ketika *sloof* bertumpu di atas tanah atau di atas pasangan batu dibandingkan kondisi *sloof* menggantung. Momen lapangan yang bekerja pada *sloof* menggantung adalah positif sedangkan momen tumpuan adalah negatif. Sebaliknya, momen lapangan yang bekerja pada *sloof* bertumpu di atas tanah maupun di atas pasangan batu adalah negatif, sedangkan momen tumpuan adalah positif.

**Kata kunci:** *sloof* bertumpu, penurunan, *angular distortion*, momen

### ABSTRACT

*Sloof* connecting two columns has been calculated as a tie beam to keep them from moving apart. It was assumed as the hanging sloof or not rested on the ground. Hence it was purely as a tie between two columns. However, in the field, sloof is rested on the ground or the stone foundation. Therefore the sloof will receive the vertical load of the building. The sloof design need to be changed due to this condition. An analysis was conducted using SAP2000. The ground and the stone foundation were modeled as springs at which the modulus subgrade reaction ( $k_s$ ) was the input parameters. The results showed that the settlement of footing when the sloof resting on the ground or the stone foundation was smaller than the hanging sloof. The difference of the settlement was about 26% on average. Differential settlement and angular distortion between two column footings became smaller when the sloof was rested on the ground or the stone foundation compared to the hanging sloof. The field bending moment that occurred on the hanging sloof was positive, while the restraint moment was negative. In contrary, the field bending moment that occurred on the sloof rested on the ground or the stone foundation was negative, while the restraint moment was positive.

**Keywords:** Resting sloof, settlement, angular distortion, moment

### PENDAHULUAN

Fondasi adalah bagian dari bangunan yang berfungsi untuk meneruskan beban bangunan

ke tanah atau batuan yang ada di bawahnya. Hal-hal yang harus diperhatikan dalam perencanaan fondasi adalah daya dukung dan penurunan fondasi tersebut. Fondasi yang terletak di tanah pasir lebih dipertimbangkan

terhadap penurunan dari pada kapasitas dukungnya.

Penurunan tidak seragam adalah salah satu penyebab tingginya tegangan pada salah satu elemen struktur bangunan, dan diklasifikasikan sebagai alasan utama terjadinya kegagalan struktur (Al-Masri dan Taqieddin, 2012). Penurunan yang tak seragam antara dua fondasi dapat didefinisikan sebagai penyimpangan sudut (*angular distortion*), dimana nilai *angular distortion* yang terlalu besar dapat berakibat berbahaya bagi struktur bangunan.

Al-Masri dan Taqieddin (2012) menyatakan *tie beam* telah lama digunakan untuk meningkatkan integritas sistem fondasi. Pengaruhnya dalam meningkatkan ketahanan fondasi dari penurunan akibat beban statis dan dinamis. Hasilnya menunjukkan bahwa *tie beam* dapat mengurangi penurunan total dan perbedaan penurunan akibat beban statis dan dinamis.

Farouk dan Farouk (2014) melakukan analisis 2D untuk mengetahui pengaruh rigiditas *tie beam* yang menghubungkan dua fondasi telapak. *Tie beam* dimodelkan dengan dimensi penampang yang bervariasi dan kondisi *tie beam* yang menggantung (tidak menyentuh tanah). Dari hasil analisis diketahui peningkatan ketebalan *tie beam* mengakibatkan *angular distortion* antar fondasi mengecil.

Perencanaan *sloof* yang menghubungkan dua kolom selama ini diperhitungkan sebagai balok ikat (*tie beam*) agar kolom tidak bergeser. Secara umum perencana mengasumsikan bahwa *sloof* menggantung sehingga murni sebagai pengikat antar dua kolom. Namun kenyataan di lapangan *sloof* terletak di atas tanah yang padat atau diletakkan di atas fondasi pasangan batu. Oleh karena itu *sloof* yang semula direncanakan sebagai balok ikat, akan ikut menerima beban vertikal. Dengan demikian perencanaan balok *sloof* dapat berubah dan dalam penelitian ini akan dianalisis lebih lanjut.

Berdasarkan uraian di atas timbul pertanyaan bagaimana penurunan dan *angular distortion* yang terjadi pada gedung dalam kondisi *sloof* menggantung dan pada kondisi *sloof* bertumpu di atas pasangan batu maupun di atas tanah. Lalu bagaimana perbandingan momen yang terjadi pada *sloof*, dalam kondisi *sloof* menggantung dan pada kondisi *sloof* yang bertumpu di atas pasangan batu maupun di atas tanah padat.

Untuk menjawab pertanyaan tersebut, dilakukan analisis terhadap penurunan, *angular*

*distortion* dan momen yang terjadi pada *sloof* berdasarkan model perencanaan gedung bedah sentral dan rawat inap Rumah Sakit Islam Persatuan Djama'ah Haji Indonesia (PDHI) Yogyakarta

## METODE PENELITIAN

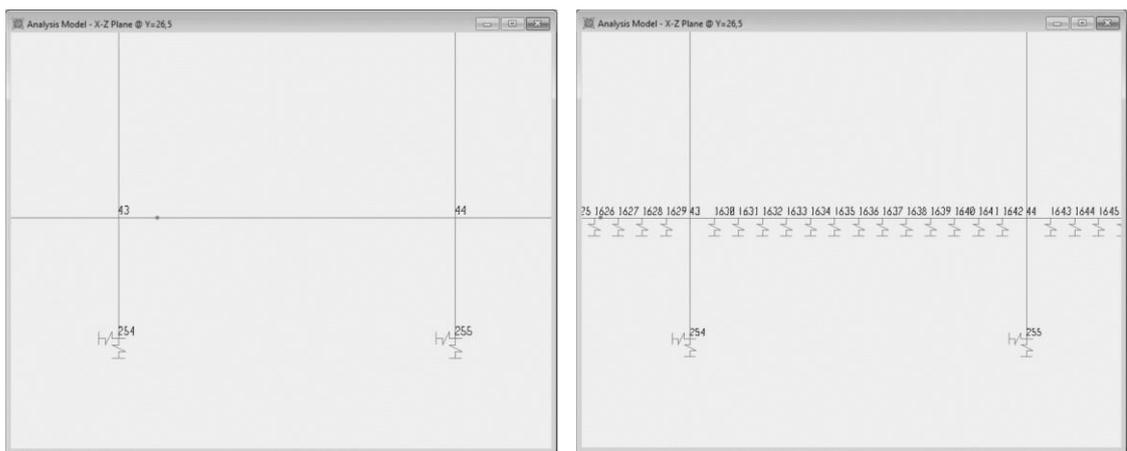
Analisis untuk memperoleh besar penurunan gedung, *angular distortion* serta momen pada balok *sloof* dalam penelitian ini adalah melakukan simulasi dengan menggunakan program SAP2000. Simulasi terdiri atas dua kondisi yaitu pemodelan gedung dengan kondisi *sloof* menggantung. Pada kondisi ini, *sloof* tidak bertumpu di atas tanah sehingga di asumsikan menggantung. Kondisi kedua pemodelan gedung dengan *sloof* yang bertumpu di atas pasangan batu, atau di atas tanah (Gambar 1). Selain itu pada penelitian ini juga diberikan variasi jenis tanah dasar dengan kekakuan yang berbeda-beda. Analisis penurunan dan *angular distortion* terdiri atas dua keadaan yakni keadaan beban permanen dan keadaan beban gempa.

### 1. Pemodelan Struktur dengan SAP2000

Pemodelan geometrik struktur gedung dalam program SAP2000 berdasarkan pada data struktur atas, struktur bawah bangunan dan interpretasi data tanah yang ada. Pemodelan komponen-komponen struktur terdiri atas balok, kolom, dan rangka atap dimodelkan sebagai elemen *frame*. Untuk komponen pelat dan tangga dimodelkan sebagai elemen *plate*, dan untuk tanah, pasangan batu dan fondasi dimodelkan sebagai *joint spring*. Komponen struktur seperti dinding, keramik, atap genteng, tidak dapat dimodelkan sebagai model elemen, sehingga dimodelkan sebagai beban. Geometrik model struktur gedung dapat dilihat pada Gambar 2.

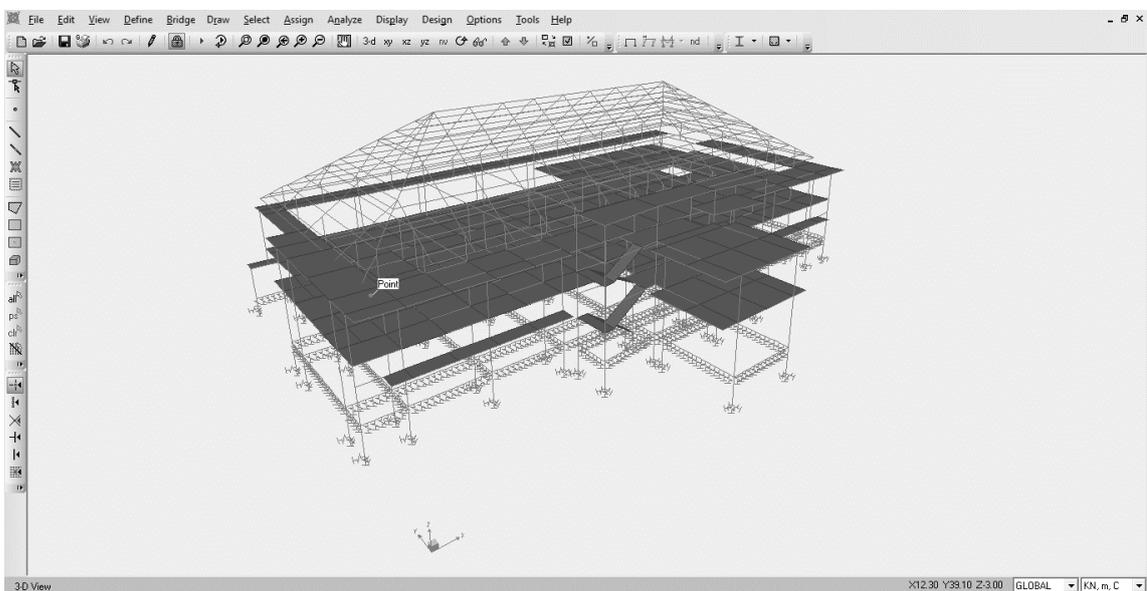
### 2. Input Parameter Struktur Atas

Jenis material untuk komponen gedung baik itu berupa balok, kolom, pelat lantai, pelat dak atap, pelat tangga, pelat kantilever adalah beton dengan parameter; modulus elastisitas ( $E_c$ ) sebesar  $2,2 \times 10^7$  kN/m<sup>2</sup> (SNI 2847:2013), parameter berat volume ( $\gamma$ ) sebesar 25 kN/ m<sup>3</sup> (Satyarno et al. 2012) dan kuat tekan beton ( $f'_c$ ) sebesar 22,5 MPa (data). Gere (2004) menyarankan angka *poisson ratio* ( $\nu$ ) sebesar 0,2.

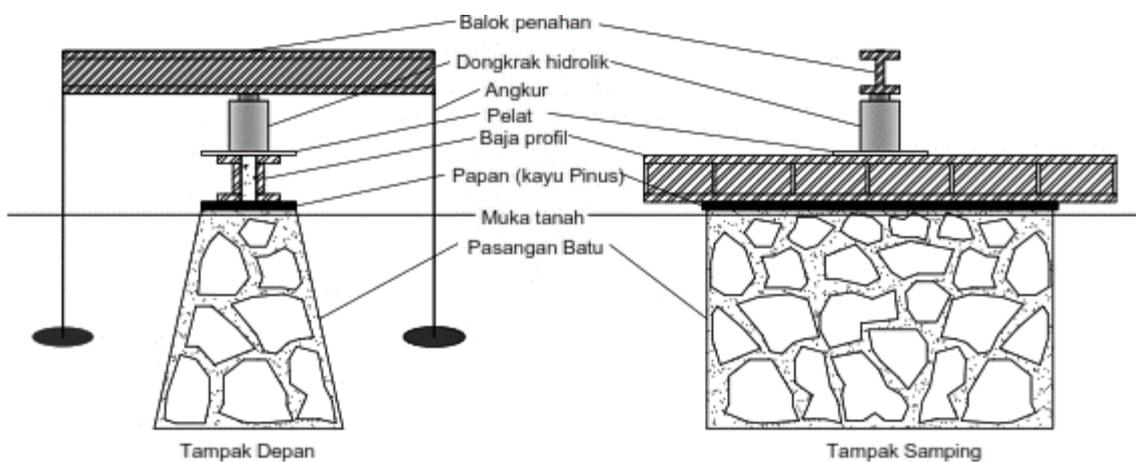


(a) (b)

GAMBAR 1. (a) Pemodelan sloof kondisi menggantung dan (b) Pemodelan sloof kondisi bertumpu dalam program SAP2000



GAMBAR 2. Model gedung 3D view dalam program SAP2000



GAMBAR 3. Modifikasi pelat dalam uji beban pelat pada pasangan batu

### 3. Input Parameter Struktur Bawah

*Modulus subgrade reaction* atau modulus reaksi tanah dasar ( $k_s$ ) adalah sebuah konstanta matematis yang mewakili kekakuan tanah dasar; didefinisikan sebagai rasio dari tekanan ( $q$ ) terhadap penurunan ( $\delta_p$ ) pada titik yang ditinjau (Lee, 2016). Nilai modulus reaksi tanah dasar pada pemodelan struktur dengan program berbasis elemen hingga (*finite element*), digunakan sebagai nilai kekakuan tumpuan *spring* yang diletakkan pada setiap elemen yang berinteraksi dengan tanah, dan penempatannya sesuai arah pergerakan struktur sehingga terdapat elemen yang diberi tumpuan vertikal ( $k_v$ ), tumpuan horizontal ( $k_h$ ).

Dalam program SAP2000 komponen pasangan batu dan tanah dasar dimodelkan sebagai *spring*. Untuk mendapatkan kekakuan *spring*, nilai modulus reaksi tanah dasar dikalikan dengan luas area fondasi yang didukung oleh *spring* tersebut. Modulus reaksi tanah dasar ditentukan dari serangkaian pengujian berikut.

#### a. Penentuan klasifikasi tanah

Modulus reaksi tanah dasar diperoleh dari uji beban pelat pada tanah dasar dan pada pasangan batu. Lokasi uji beban pelat, terletak di halaman Laboratorium Mekanika Tanah Universitas Gadjah Mada. Sebelum melakukan uji beban pelat, terlebih dahulu dilakukan uji laboratorium untuk mengetahui klasifikasi tanah dasar.

Klasifikasi tanah dasar diperoleh dari pengamatan langsung dan pengujian sifat fisik serta mekanis tanah. Berdasarkan pengamatan langsung tanah dasar berupa tanah pasir sedangkan parameter sifat fisik tanah terdiri atas; berat jenis sebesar 2,84, kepadatan tanah ( $\gamma_d$ ) 1,41 gr/cm<sup>3</sup> pada kadar air 5,86%.

Gradasi ukuran butiran menunjukkan tanah pasir terdiri atas 2,59% kerikil, 96,09% pasir dan 1,32% lanau. Sifat mekanis diperoleh dari uji geser langsung didapatkan parameter sudut gesek dalam ( $\phi$ ) adalah 36,29° dan kohesi ( $c$ ) 0 kN/m<sup>2</sup>. Berdasarkan hasil uji sifat fisik dan sifat mekanis dapat diklasifikasi bahwa tanah dasar berdasarkan klasifikasi AASHTO adalah A-1-b sedangkan berdasarkan sistem klasifikasi Unified tanah dasar dapat dikelompokkan kedalam simbol SP.

#### b. Uji beban pelat tanah dasar

Sebelum uji beban pelat dilakukan pada model pasangan batu, terlebih dahulu dilakukan uji beban pelat pada tanah dasarnya. Tanah digali sedalam 0,7 m. pelat yang digunakan pada pengujian ini adalah pelat baja berdiameter 0,3 m. Uji beban pelat pada tanah dasar dilakukan dengan memberikan tekanan awal sebesar 5 Psi (34,47 kPa). Kemudian tekanan ditambah secara bertahap setiap 5 Psi sampai mencapai 30 Psi. Penurunan tanah dicatat setiap penambahan beban.

AASHTO T-222 dalam Hardiyatmo (2017) menyarankan penentuan modulus reaksi tanah dasar ( $k_s$ ) didasarkan pada tekanan pada pelat 10 psi (69 kPa). Prosedur ini didasarkan pada hasil penelitian dari banyak pengujian beban pelat yang menyimpulkan bahwa  $k_s$  yang mewakili adalah diambil pada intensitas beban 10 psi (69 kPa). Dari hasil pengujian diperoleh nilai modulus reaksi tanah dasar ( $k_s$ ) sebesar 40.557,41 kN/m<sup>3</sup>. Dari nilai  $k_s$  yang diperoleh, diketahui jenis tanah dasar adalah pasir dengan kepadatan sedang (Bowles, 1992).

#### c. Uji beban pelat modifikasi pada pasangan batu

Setelah uji beban pelat pada tanah dasar, model pasangan batu di buat dengan dimensi panjang 1,1 m, lebar atas 0,3 m, lebar bawah 0,6 m dan tinggi 0,7 m.

Uji beban pelat pada pasangan batu dilakukan berdasarkan AASHTO T-222. Untuk menyesuaikan bentuk permukaan pasangan batu dan beban yang diterapkan pada pengujian digunakan pelat yang sudah dimodifikasi. Modifikasi pelat dengan menggunakan papan selebar 0,3 m panjang 1,1 m dengan harapan beban yang diterapkan dapat terdistribusi merata pada permukaan pasangan batu yang kurang rata. Baja profil diletakkan di atas papan untuk mendistribusikan beban di sepanjang pasangan batu. Untuk lebih jelasnya modifikasi pelat dalam pengujian ini dapat dilihat pada Gambar 3. Papan yang digunakan sebagai pelat adalah jenis kayu pinus. Menurut Hadjib (2009) kayu pinus memiliki modulus elastisitas ( $E$ ) sebesar 5.964 MPa. Milosevic et al (2013) memperoleh modulus elastisitas pasangan batu sebesar 1.640 MPa. Dengan demikian diharapkan pada saat beban bekerja maka penurunan terbesar akan dialami tanah kemudian pasangan batu.

Dari hasil pengujian beban pelat pada pasangan batu, pada tekanan  $68,9 \text{ kN/m}^2$  didapatkan penurunan rata-rata sebesar  $0,00117 \text{ m}$  (Gambar 4). Perhitungan untuk mencari nilai modulus reaksi tanah dasar pasangan batu ( $k'$ ) dari uji beban pelat adalah sebagai berikut:

$$k' = \frac{68,9}{\delta} = \frac{68,9}{0,00117} = 59.097,9 \text{ kN/m}^3$$

Selain analisis menggunakan  $k_s$  yang didapatkan dari hasil pengujian utama, variasi jenis tanah juga diberikan dengan nilai  $k_s$  yang berbeda. Variasi nilai  $k_s$  yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebesar;  $8.000 \text{ kN/m}^3$ ,  $20.000 \text{ kN/m}^3$ , dan  $30.000 \text{ kN/m}^3$ .

#### 4. Input Beban yang Bekerja

Salah satu hal penting yang perlu diketahui dalam menganalisis penurunan suatu fondasi, ialah beban yang akan dipikul oleh fondasi tersebut. Jenis beban yang akan diterima oleh struktur umumnya adalah beban mati, beban hidup, beban gempa dan beban angin. Karena lokasi gedung pada penelitian ini terletak jauh dari pantai, beban angin dianggap kecil dan diabaikan.

##### a. Beban Mati

Beban mati adalah semua bagian dari struktur yang bersifat tetap termasuk segala unsur tambahannya. Beban mati dari suatu struktur bangunan gedung terdiri atas berat pelat lantai, atap, balok, kolom, tangga dan beban mati tambahan.

##### b. Beban Hidup

Beban hidup struktur bangunan gedung rumah sakit adalah beban manusia, dinding-dinding partisi serta beban perlengkapan ruang rumah sakit. Beban hidup merata untuk rumah sakit

terbagi atas  $2,87 \text{ kN/m}^2$  untuk ruang operasi dan laboratorium,  $1,92 \text{ kN/m}^2$  untuk ruang pasien dan  $3,83 \text{ kN/m}^2$  untuk koridor di atas lantai pertama (SNI 1727:2013). Beban ini dimodelkan sebagai beban *uniformly distributed load* untuk analisis pembebanan dengan program SAP2000.

##### c. Beban Gempa

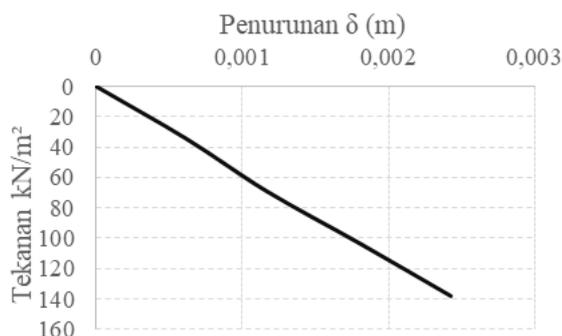
Analisis pembebanan gempa yang digunakan adalah analisis dinamik yaitu menggunakan *respon spectrum* yang diperoleh dari website Desain Spektra Puskim (2011). Faktor-faktor yang mempengaruhi besarnya beban gempa antara lain:

- 1) Faktor keutamaan struktur ( $I$ ) untuk gedung rumah sakit masuk dalam kategori risiko IV dengan faktor keutamaan gempa 1,5 (SNI 1726:2012).
- 2) Faktor reduksi beban gempa ( $R$ ) diambil nilai 3 (SNI 1726:2012).
- 3) Penentuan jenis tanah pada lokasi penelitian adalah tanah sedang (SNI 1726:2012)

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### 1. Penurunan

Analisis penurunan gedung didasarkan pada empat nilai modulus reaksi tanah dasar ( $k_s$ ) yang terdiri atas  $40.557 \text{ kN/m}^3$  (diperoleh dari hasil pengujian),  $30.000 \text{ kN/m}^3$ ,  $20.000 \text{ kN/m}^3$ , dan  $8.000 \text{ kN/m}^3$ . Analisis terdiri atas dua kondisi dengan kondisi pertama *sloof* menggantung dan kondisi kedua *sloof* bertumpu baik bertumpu di atas pasangan batu ( $k' = 59.097,9 \text{ kN/m}^3$ ) maupun di atas tanah ( $k_s$  sama dengan tanah dasarnya). Selain itu terdapat dua keadaan analisis yakni analisis pada keadaan beban permanen dan pada keadaan jika terjadi gempa.



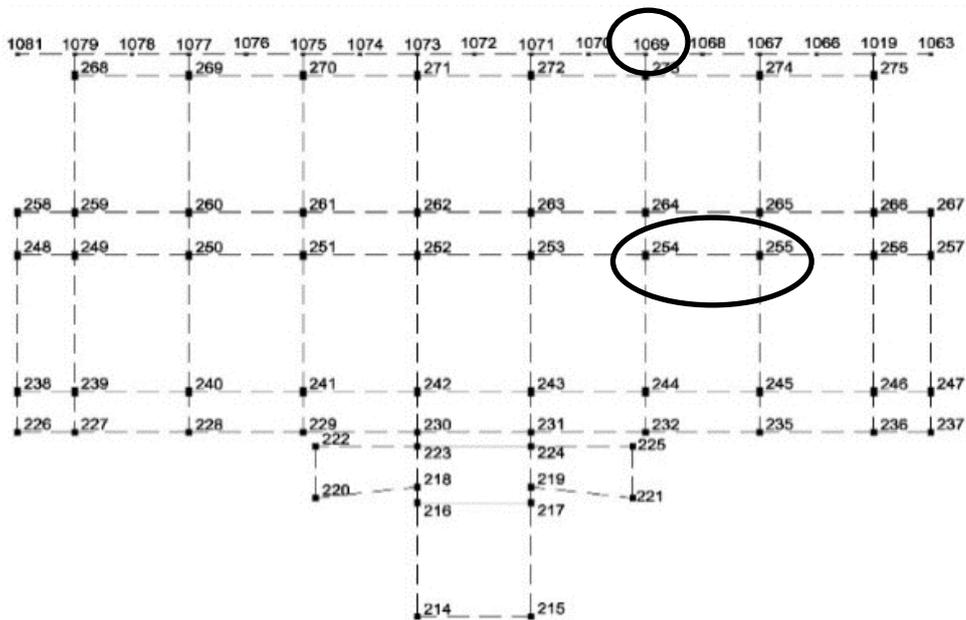
GAMBAR 4. Hasil uji beban pelat pada pasangan batu

Dari hasil analisis menggunakan program SAP2000 diketahui bahwa penurunan terbesar terjadi pada fondasi dengan label joint 1069 (Gambar 5).

Persentase selisih penurunan dihitung berdasarkan nilai selisih penurunan fondasi yang terjadi antara kondisi *sloof* bertumpu dan kondisi *sloof* menggantung, dibagi dengan nilai penurunan pada kondisi *sloof* menggantung dan dikalikan 100%. Berdasarkan hasil analisis selisih penurunan dalam keadaan beban permanen untuk *sloof* yang bertumpu di atas pasangan batu ( $k' = 59.097,9 \text{ kN/m}^3$ ) diperoleh nilai sebesar 35%. Selisih penurunan untuk

*sloof* yang bertumpu di atas tanah dengan nilai  $k_s = 30.000 \text{ kN/m}^3$ ,  $20.000 \text{ kN/m}^3$  dan  $8.000 \text{ kN/m}^3$  masing-masing adalah sebesar 29%, 30%, 30%. Persentase selisih penurunan secara ringkas dapat dilihat pada Tabel 1.

Dalam keadaan gempa selisih penurunan dengan *sloof* bertumpu di atas pasangan batu diperoleh nilai sebesar 27%. Selisih penurunan untuk *sloof* yang bertumpu di atas tanah dengan nilai  $k_s = 30.000 \text{ kN/m}^3$ ,  $20.000 \text{ kN/m}^3$  dan  $8.000 \text{ kN/m}^3$  masing-masing adalah sebesar 22%, 23%, 27%. Persentase selisih penurunan pada keadaan gempa secara ringkas dapat dilihat pada Tabel 2.



GAMBAR 5. Denah fondasi dengan label joint yang ditinjau

TABEL 1. Penurunan dan selisih penurunan pada keadaan beban permanen

Jenis Tanah $k_s$ (kN/m <sup>3</sup> )	Menggantung (mm)	Bertumpu (mm)	Selisih (%)
40.557	5,22	3,371	35
30.000	6,792	4,809	29
20.000	9,786	6,896	30
8.000	23,041	16,072	30

TABEL 2. Penurunan dan selisih penurunan pada keadaan gempa

Jenis Tanah $k_s$ (kN/m <sup>3</sup> )	Menggantung (mm)	Bertumpu (mm)	Selisih (%)
40.557	9,104	6,627	27
30.000	11,038	8,571	22
20.000	14,562	11,164	23
8.000	29,639	21,751	27

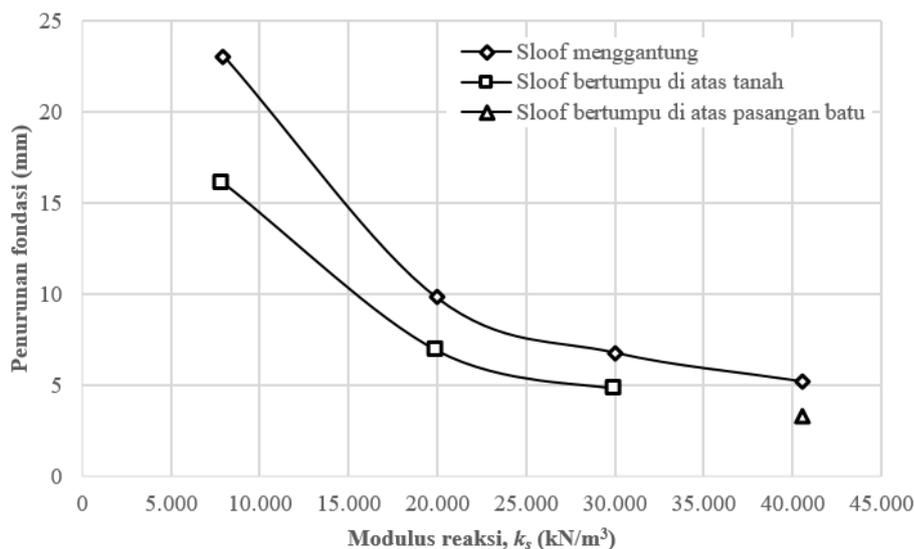
Secara umum, seluruh fondasi pada bangunan gedung untuk semua variasi jenis  $k_s$  diperoleh selisih penurunan rata-rata sebesar 26%.

Gambar 6 menunjukkan grafik hubungan antara nilai modulus reaksi ( $k_s$ ) dan penurunan pada keadaan beban permanen. Secara umum dari grafik terlihat bahwa penurunan fondasi dengan kondisi *sloof* menggantung lebih besar dibanding dengan fondasi pada kondisi *sloof* bertumpu. Hal ini dikarenakan pada kondisi menggantung, ketika beban bekerja pada fondasi mengakibatkan penurunan pada fondasi dan *sloof*. Ketika *sloof* bertumpu di atas pasangan batu atau di atas tanah transfer beban vertikal ke arah bawah ikut didukung oleh *sloof* yang terhubung pada kolom.

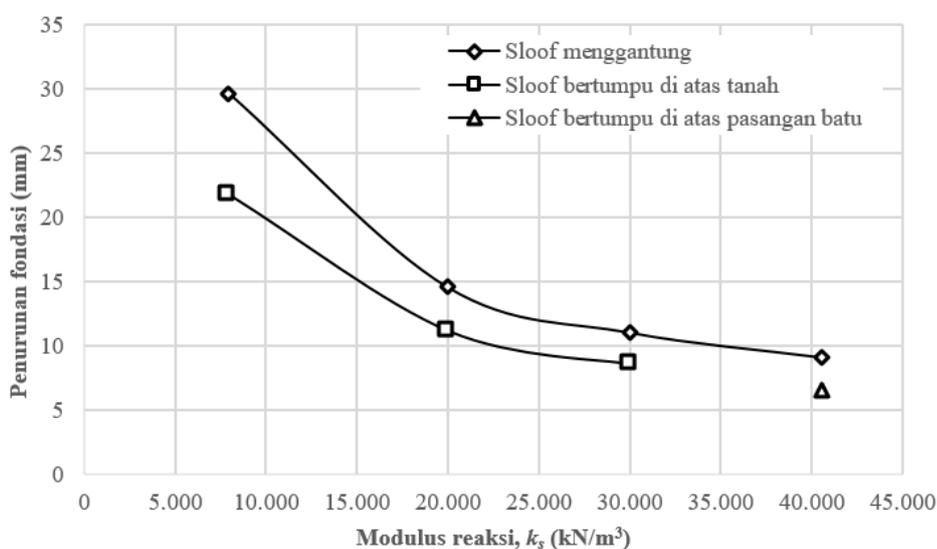
Gambar 7 menunjukkan grafik hubungan antara nilai modulus reaksi ( $k_s$ ) dan penurunan pada

keadaan gempa. Dari grafik terlihat bahwa penurunan fondasi dengan kondisi *sloof* menggantung lebih besar dibanding dengan fondasi pada kondisi *sloof* bertumpu. Dari grafik diketahui bahwa pada keadaan gempa memiliki tipikal selisih penurunan yang sama dengan pada keadaan beban permanen, namun dengan penurunan yang lebih besar dibandingkan pada keadaan beban permanen.

Dari grafik pada Gambar 6 dan 7 dapat dilihat bahwa semakin padat tanah maka penurunan fondasi menjadi semakin kecil. Kemiringan grafik penurunan untuk tanah dengan  $k_s$  lebih dari 20.000 kN/m<sup>3</sup> lebih landai dibandingkan kemiringan grafik penurunan untuk tanah dengan  $k_s$  kurang dari 20.000 kN/m<sup>3</sup>.



GAMBAR 6. Penurunan fondasi berdasarkan  $K_s$  tanah pada keadaan beban permanen



GAMBAR 7. Penurunan fondasi berdasarkan  $K_s$  tanah pada keadaan gempa

Gambar 8 menunjukkan grafik hubungan antara modulus reaksi ( $k_s$ ) dan persentase selisih penurunan fondasi dengan *sloof* yang bertumpu di atas pasangan batu dan bertumpu di atas tanah pada keadaan beban permanen dan keadaan gempa. Dari grafik dapat dilihat selisih penurunan pada keadaan beban permanen lebih besar dibandingkan selisih penurunan pada keadaan gempa.

Dari grafik dalam Gambar 8 dapat dilihat bahwa pada keadaan beban permanen selisih penurunan untuk *sloof* yang bertumpu di atas tanah cenderung sama untuk jenis tanah dengan  $k_s = 30.000 \text{ kN/m}^3$ ,  $20.000 \text{ kN/m}^3$  dan  $8.000 \text{ kN/m}^3$ . Sedangkan dalam keadaan gempa semakin kecil nilai  $k_s$  maka selisih penurunan semakin besar, namun dengan peningkatan yang tidak terlalu signifikan. Sehingga pada keadaan gempa menunjukkan kecenderungan yang sama seperti pada keadaan beban permanen. Hal ini menunjukkan bahwa perbandingan penurunan antara kondisi *sloof* menggantung dan pada kondisi *sloof* bertumpu tidak berpengaruh besar pada variasi nilai  $k_s$ . Meskipun begitu pada jenis tanah dengan nilai  $k_s$  sebesar  $40.557 \text{ kN/m}^3$ , dengan *sloof* bertumpu di atas pasangan batu menunjukkan

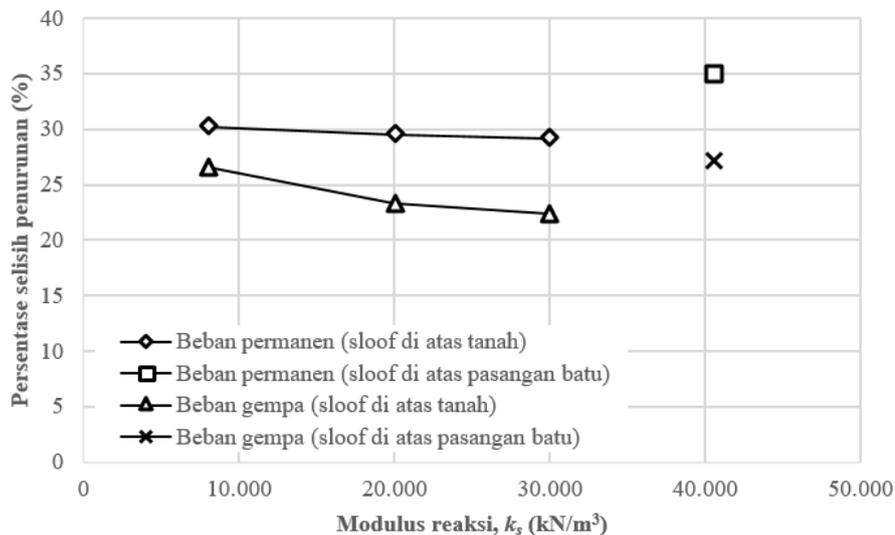
selisih penurunan yang cukup besar dibandingkan jika *sloof* hanya bertumpu di atas tanah.

## 2. Beda Penurunan dan Angular Distortion

Analisis beda penurunan dan *angular distortion* berdasarkan pada fondasi 254 dan fondasi 255 yang dihubungkan langsung oleh *sloof* (Gambar 5). Fondasi yang ditinjau dalam analisis berdasarkan kesamaan kondisi *sloof* disekitar titik yang ditinjau dan kesamaan jenis fondasi. Hal ini dilakukan untuk mengurangi variabel antara dua fondasi yang ditinjau agar dapat lebih fokus kepada perbandingan beda penurunan antara kondisi *sloof* menggantung dan kondisi *sloof* bertumpu. Analisis beda penurunan dan *angular distortion* antara dua fondasi dengan variasi jenis  $k_s$  tanah dan dalam keadaan beban permanen maupun keadaan gempa, hasil analisis diuraikan sebagai berikut.

### a. Beda penurunan antara fondasi 254 dan 255

Beda penurunan antar fondasi dalam keadaan beban permanen dan dalam keadaan beban gempa dapat dilihat pada Tabel 3.



GAMBAR 8. Persentase selisih penurunan pada keadaan beban permanen dan keadaan beban gempa

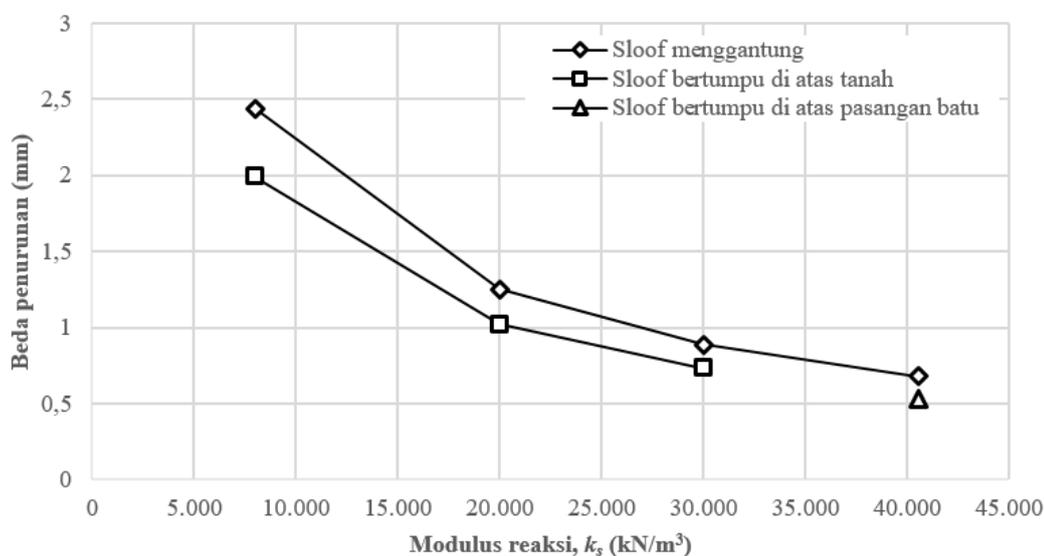
TABEL 3. Beda penurunan antar fondasi 254 dan 255

Jenis Tanah (kN/m <sup>3</sup> )	Keadaan beban permanen		Keadaan beban gempa	
	Menggantung	Bertumpu	Menggantung	Bertumpu
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
40557	0,681	0,535	0,762	0,61
30000	0,889	0,732	0,974	0,818
20000	1,25	1,021	1,333	1,113
8000	2,44	1,993	2,466	2,069

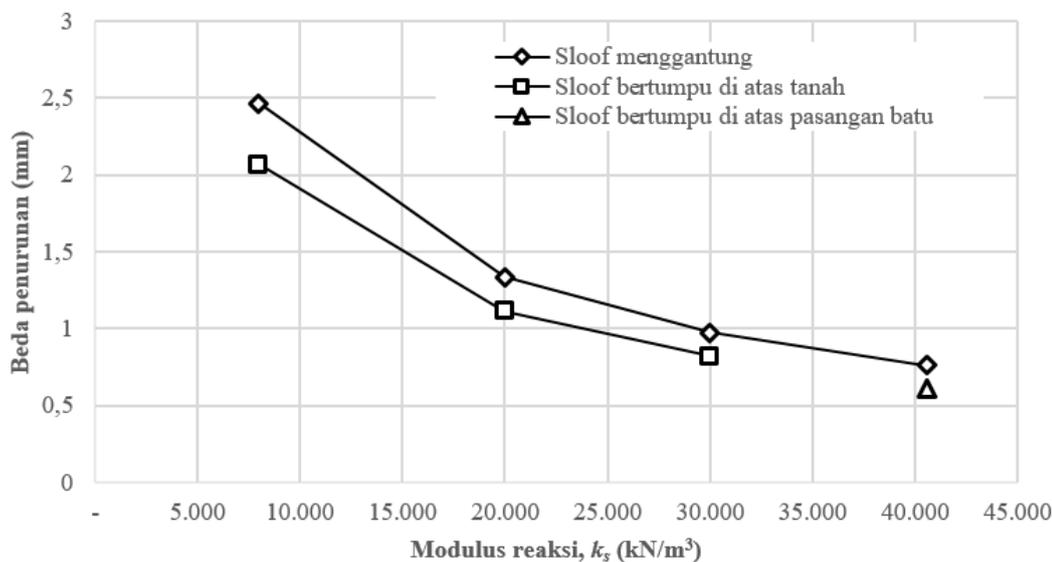
Dari Tabel 3, pada keadaan beban permanen antara fondasi 254 dan fondasi 255 untuk semua jenis tanah, diperoleh bahwa beda penurunan pada kondisi *sloof* bertumpu lebih kecil dibandingkan ketika pada kondisi *sloof* menggantung. Beda penurunan dalam keadaan gempa untuk semua jenis tanah, juga diperoleh bahwa pada kondisi *sloof* bertumpu beda penurunan antar fondasi lebih kecil dibandingkan ketika pada kondisi *sloof* menggantung. Hal ini menunjukkan bahwa untuk fondasi 254 dan 255 dengan kondisi *sloof* yang sama dan jenis fondasi yang sama, beda penurunan antar fondasi pada kondisi *sloof* bertumpu lebih kecil dibandingkan pada kondisi *sloof* menggantung. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 9 dan Gambar 10.

Gambar 9 menunjukkan grafik hubungan antara nilai modulus reaksi ( $k_s$ ) dan beda penurunan antar fondasi 254 dan 255 dalam keadaan beban permanen. Dari grafik terlihat bahwa beda penurunan antar fondasi, pada kondisi *sloof* bertumpu di atas pasangan batu lebih kecil dibanding dengan kondisi *sloof* menggantung.

Gambar 10 menunjukkan grafik hubungan antara nilai modulus reaksi ( $k_s$ ) dan beda penurunan antar fondasi 254 dan 255 dalam keadaan gempa. Dari grafik terlihat bahwa pada keadaan gempa, beda penurunan fondasi pada kondisi *sloof* bertumpu lebih kecil dibandingkan kondisi *sloof* menggantung. Hal ini menunjukkan kecenderungan yang sama dengan keadaan beban permanen.



GAMBAR 9. Beda penurunan antara fondasi 254 dan fondasi 255 keadaan beban permanen



GAMBAR 10. Beda penurunan antara fondasi 254 dan fondasi 255 keadaan gempa

Dari Gambar 9 dan 10 diketahui bahwa kemiringan grafik beda penurunan menunjukkan kesamaan dengan grafik penurunan. Kemiringan grafik beda penurunan untuk tanah dengan  $k_s$  lebih dari 20.000 kN/m<sup>3</sup> lebih landai dibandingkan kemiringan grafik beda penurunan untuk tanah dengan  $k_s$  kurang dari 20.000 kN/m<sup>3</sup>.

b. *Angular distortion* antara fondasi 254 dan 255

*Angular distortion* adalah tangen dari sudut yang terbentuk akibat beda penurunan antara dua fondasi. Dengan demikian, untuk mendapatkan nilai *angular distortion* maka beda penurunan ( $\delta$ ) antar dua fondasi dibagi dengan jarak ( $L$ ) antara dua fondasi tersebut. *Angular distortion* antara fondasi 254 dan fondasi 255 dengan jarak antar fondasi sebesar 7,2 m disajikan dalam Tabel 4.

Dari Tabel 4 pada keadaan beban permanen maupun pada keadaan gempa antara fondasi 254 dan fondasi 255 untuk semua jenis tanah, diperoleh bahwa *angular distortion* pada

kondisi *sloof* bertumpu lebih kecil dibandingkan ketika pada kondisi *sloof* menggantung.

### 3. Perbandingan Momen

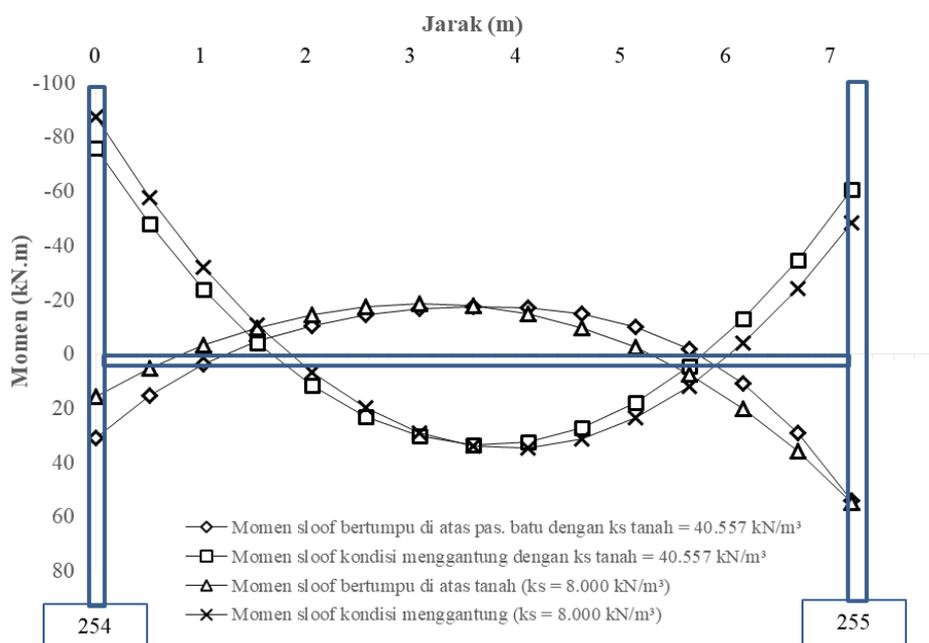
a. Momen pada kondisi *sloof* menggantung dan bertumpu di atas pasangan batu.

Perbandingan momen yang terjadi pada *sloof* pada kondisi menggantung dan pada kondisi bertumpu di atas pasangan batu dapat dilihat pada Gambar 11.

Dari Gambar 11 untuk tanah dengan  $k_s = 40.557$  kN/m<sup>3</sup> diketahui pada kondisi *sloof* menggantung, momen lapangan yang terjadi pada *sloof* adalah positif, sedangkan pada tumpuan adalah momen negatif. Hal ini dikarenakan *sloof* yang menghubungkan antara fondasi 254 dan fondasi 255, selain memikul beban sendiri juga memikul beban dinding pasangan batu bata di atasnya. Beban-beban yang bekerja sepanjang balok *sloof* hanya didukung oleh kolom pada ujung *sloof* saja.

TABEL 4. *Angular distortion* antara fondasi 254 dan 255

tanah berda-sarkan nilai $k_s$	Keadaan beban permanen		Keadaan gempa	
	Meng-gantung	Bertumpu	Meng-gantung	Bertumpu
kN/m <sup>3</sup>	radians	radians	radians	radians
40557	0,00009	0,00007	0,00011	0,00008
30000	0,00012	0,0001	0,00014	0,00011
20000	0,00017	0,00014	0,00019	0,00015
8000	0,00034	0,00028	0,00034	0,00029



GAMBAR 11. Momen pada *sloof* antara fondasi 254 dan 255

Dari Gambar 11 diketahui pada kondisi *sloof* bertumpu di atas pasangan batu, momen lapangan yang terjadi pada balok *sloof* adalah momen negatif, sedangkan pada tumpuan adalah momen positif. Pada kondisi *sloof* bertumpu di atas pasangan batu, *sloof* tidak hanya memikul beban sendiri dan beban dinding di atasnya, namun juga memikul beban kolom. Hal ini dikarenakan *sloof* yang bertumpu di atas pasangan batu terikat dengan kolom-kolom yang memikul beban dari struktur atas. Beban-beban tersebut diteruskan ke pasangan batu yang terletak di bawah *sloof*.

Pengaruh beban struktur yang bekerja pada *sloof* lebih besar pada daerah tumpuan dan berkurang seiring menuju ke tengah bentang *sloof*, dimana pada tengah bentang *sloof* yang didukung pasangan batu memiliki dukungan lebih besar dari beban-beban yang bekerja. Oleh karena itu momen yang terjadi pada daerah tumpuan adalah momen positif, sedangkan pada daerah tengah *sloof*, momen lapangan adalah momen negatif.

b. Momen pada kondisi *sloof* menggantung dan bertumpu di atas tanah.

Perbandingan momen yang terjadi pada balok *sloof* pada kondisi *sloof* menggantung dan pada kondisi *sloof* bertumpu di atas tanah dapat dilihat pada Gambar 11.

Dari Gambar 11 untuk tanah dengan  $k_s = 8.000 \text{ kN/m}^3$  diketahui pada kondisi *sloof* menggantung, momen lapangan yang terjadi pada balok *sloof* adalah momen positif, sedangkan pada tumpuan adalah momen negatif. Hal ini dikarenakan *sloof* yang menghubungkan antara fondasi 254 dan fondasi 255, selain memikul beban sendiri juga memikul beban dinding pasangan batu bata di atasnya. Beban-beban yang bekerja sepanjang balok *sloof* didukung oleh kolom hanya pada ujung *sloof*.

Dari Gambar 11 diketahui pada kondisi *sloof* bertumpu di atas tanah, momen lapangan yang terjadi pada balok *sloof* adalah momen negatif, sedangkan momen tumpuan adalah momen positif. Pada kondisi *sloof* bertumpu di atas tanah, *sloof* tidak hanya memikul beban sendiri dan beban dinding di atasnya, namun juga memikul beban kolom. Beban-beban tersebut diteruskan pada tanah yang terletak di bawah *sloof*. Pengaruh beban struktur yang bekerja pada *sloof* lebih besar pada daerah tumpuan dan berkurang seiring menuju ke tengah bentang

*sloof*, dimana pada tengah bentang *sloof* dukungan tanah lebih besar dari beban-beban yang bekerja. Oleh karena itu momen yang terjadi pada daerah tumpuan adalah momen positif, sedangkan pada daerah tengah *sloof*, momen lapangan adalah momen negatif.

## KESIMPULAN

Kesimpulan dari penelitian ini adalah: (a) pada fondasi 1069 dalam keadaan beban permanen selisih penurunan untuk *sloof* yang bertumpu di atas pasangan batu ( $k_s = 59.097,9 \text{ kN/m}^3$ ) sebesar 35%. Selisih penurunan untuk *sloof* yang bertumpu di atas tanah dengan nilai  $k_s = 30.000 \text{ kN/m}^3$ ,  $20.000 \text{ kN/m}^3$  dan  $8.000 \text{ kN/m}^3$  masing-masing adalah sebesar 29%, 30% dan 30%; (b) dalam keadaan gempa selisih penurunan fondasi 1069 untuk *sloof* yang bertumpu pada pasangan batu sebesar 27%. Selisih penurunan fondasi untuk *sloof* yang bertumpu di atas tanah dengan nilai  $k_s$  sebesar  $30.000 \text{ kN/m}^3$ ,  $20.000 \text{ kN/m}^3$  dan  $8.000 \text{ kN/m}^3$  masing-masing adalah sebesar 22%, 23% dan 27%; (c) dari hasil analisis, *sloof* yang bertumpu di atas pasangan batu maupun di atas tanah dalam keadaan beban permanen maupun gempa, diketahui penurunan yang terjadi lebih kecil dibandingkan dengan kondisi *sloof* menggantung. Selisih penurunan rata-rata sebesar 26%. Hal ini berlaku untuk semua jenis tanah dengan nilai  $k_s$  terkecil sampai nilai  $k_s$  terbesar yang digunakan dalam penelitian ini; (d) beda penurunan dan *angular distortion* antara fondasi 254 dan fondasi 255 pada kondisi *sloof* bertumpu lebih kecil dibandingkan pada kondisi *sloof* menggantung. Hal ini berlaku untuk semua jenis tanah dan dalam keadaan beban permanen maupun beban gempa; (e) pada kondisi *sloof* menggantung, momen lapangan adalah momen positif dan momen tumpuan adalah momen negatif. Pada kondisi *sloof* bertumpu, momen lapangan yang bekerja pada balok *sloof* adalah momen negatif, dan momen tumpuan adalah momen positif. Hal tersebut berlaku untuk semua jenis tanah

## DAFTAR PUSTAKA

- Al-Masri, A.H dan Taqieddin, Z.N. (2012). Finite element study of using concrete tie beams to reduce differential settlement between footings. *Proceedings of 13th*

WSEAS International Conference on Mathematical and Computational Methods in Science and Engineering, 112-116.

- Bowles, J.E. (1992). *Analisis dan Desain Pondasi 1 & 2*. Jakarta: Erlangga.
- Farouk, H. dan Farouk, M. (2014). Effect of tie beam rigidity on strip footings. *Recent Advances in Material, Analysis, Monitoring, and Evaluation in Foundation and Bridge Engineering*, 86-93.
- Gere, J.M. (2004). *Mechanics of Materials*. USA: Thomson Learning.
- Hardiyatmo, H.C. (2017). *Perancangan Perkerasan Jalan & Penyelidikan Tanah*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Hadjib, N. (2009). Daur teknis pinus tanaman untuk kayu pertukangan berdasar sifat fisis dan mekanis. *Jurnal Penelitian Hasil Hutan*, 27(1), 76-87.
- Lee, J. dan Jeong, S. (2016). Experimental study of estimating the subgrade reaction modulus on jointer rock foundations. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49(6), 2055-2064..
- Milosevic, J., Gago, A.S., Lopes, M. dan Bento, R. (2013). Experimental assessment of shear strength parameters on rubble stone masonry specimens. *Construction and Building Materials*, 47, 1372-1380.
- Puskim. (2011). [Online] Available at : [http://www.puskim.pu.go.id/Aplikasi/desa\\_in\\_spektra\\_indonesia\\_2011](http://www.puskim.pu.go.id/Aplikasi/desa_in_spektra_indonesia_2011). [Accessed pada 2 December 2018]
- Satyarno, I., Nawangalam, P., Pratomo R. I. (2012). *Belajar SAP2000*. Yogyakarta: Zamil Publishing.
- SNI 1726-2012. (2012). Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung. Badan Standarisasi Nasional, Jakarta.
- SNI 1727-2013. (2013). Beban Minimum Untuk Perancangan Bangunan Gedung dan Struktur Lain. Badan Standarisasi Nasional, Jakarta.
- SNI 2847:2013. (2013). Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung. Badan Standarisasi Nasional, Jakarta.

---

PENULIS:

Muh. Handy Dwi Adityawan

Mahasiswa S2 Geoteknik Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Sleman.

Email: muhhdadityawan@gmail.com

Agus Darmawan Adi

Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Sleman.

Ashar Saputra

Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Sleman