

Pengaruh Penurunan Fondasi Terhadap Kolom Akibat Likuifaksi pada Gedung Bertingkat Beton Bertulang

Influence of Foundation Settlement Due To Liquefaction Against Column In Multistory RC Building

Ilham Khomani, M. Ibnu Syamsi

Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta

Abstrak. Gempa merupakan bencana alam yang tidak bisa diduga kapan akan terjadi. Salah satu dampak gempa adalah adanya potensi terjadinya likuifaksi, yaitu penurunan kekuatan daya dukung tanah pasir akibat. Pada gedung hal ini berakibat fatal karena kolom sebagai struktur utama mengalami penurunan. Penelitian ini membahas tentang pengaruh variasi besarnya sudut penurunan terhadap kondisi kolom dengan analisis penampang 4 sisi. Data gedung yang digunakan penelitian ini adalah gedung perkuliahan K.H Ibrahim di Universitas Muhammadiyah Yogyakarta dengan kondisi tanah pada area tersebut yaitu tanah berpasir. Hasil penelitian menunjukkan bahwa besarnya penurunan berbanding lurus dengan simpangan bangunan. Sementara itu nilai tekan aksial kolom cenderung tidak mengalami perubahan yang signifikan. Momen yang terjadi mengalami peningkatan, semakin besar penurunan maka momen yang dihasilkan semakin besar. Keruntuhan kolom terjadi pada penurunan 0,04 derajat di kolom K3 sebesar 1,03 % sedangkan pada penurunan 0,1 derajat kolom tipe K2, K3, K7 adalah sebesar 0,6%, 2,1% dan 33,33% secara berurutan.

Kata kunci: Gempa, Penurunan, Likuifaksi, Momen, Diagram Interaksi.

Abstract. Earthquake is a natural disaster which cannot be precisely predicted. One of the impact of the earthquake is the potential for liquefaction, namely the decrease in soil bearing capacity of the sand soil. In this case building is fatal because the column as the main structure decreases It could be more dangerous if building due to liquefaction occur that can affect the condition to column. This study discusses about the influence of angle variation settlement against the condition column using 4 sides cross section analysis. Building data used the research is building K. H. Ibrahim as educational building at the Universitas Muhammadiyah Yogyakarta with the soil conditions in the area namely in general is sand soil. The results showed that the building settlement is directly proportional to the building displacement While axial force in column tend not significantly change. On the other hand the moments forces occurred are increase along with the raise settlement angle. The collapse occurred on settlement 0,04 in columns type K3 are 1,03% and than K2, K3 and K7 percentage of collapse are 0,6%, 2,1% and 33,33% in sequence

keywords: Earthquake, Settlement, Liquefaction, Moment. Interaction diagram.

1. Pendahuluan

Gempa bumi merupakan bencana alam yang tidak dapat dihindari. Bangunan bertingkat maupun rumah sederhana runtuh akibat dari gempa bumi dimana gempa bumi tersebut menimbulkan pada kejadian yang disebut likuifaksi. Likuifaksi dapat berimbas pada penurunan tanah dan berpengaruh pada fondasi dari gedung, menurunnya fondasi berpengaruh terhadap bagian atas struktur seperti tiang - tiang penyangga atau kolom yang

mengalami kerusakan dan mengakibatkan runtuhnya suatu bangunan. Beberapa penelitian yang dilakukan untuk mengetahui pengaruh penurunan tanah terhadap bangunan Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi pengaruh yang diakibatkan oleh penurunan fondasi akibat adanya likuifaksi terhadap kondisi kolom.

Likuifaksi dapat dipengaruhi oleh gempa bumi atau bahkan kedua faktor tersebut merupakan penyebab terjadinya awal kerusakan dari sebuah bangunan namun juga

bisa dikatakan bahwa kedua faktor tersebut adalah penyebab terjadinya keruntuhan bangunan (Ishihara, 1993). Keruntuhan bangunan dapat terjadi salah satunya jika guncangan pada bangunan diikuti dengan likuifaksi. Beberapa penyebab terjadinya likuifaksi antara lain ketidak pastian gerakan tanah dan sifat tanah yang ada, pada dasarnya potensi yang terjadi adalah deterministik.



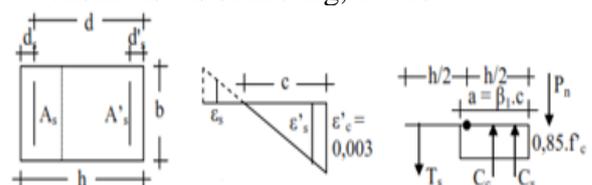
Gambar 1 Penurunan gedung (Bird, 2016)

Penurunan dapat terjadi pada salah satu sisi bangunan saja serta pada sisi liannya tetap sehingga dapat membentuk sudut besarnya penurunan ataupun besarnya penurunan sebesar Δ_v (Bird, 2006). Likuifaksi terjadi karena meningkatnya tekanan pori secara tiba-tiba pada lapisan longgar yang tidak mengalami kompresi sehingga menyebabkan hilangnya dukungan atau bantalan kapistas (Sarah dan Soebowo, 2013). Likufaksi yang terjadi di Indonesia terutama pada wilayah yang mengalami gempa besar seperti Yogyakarta mendapatkan hasil bahwa percepatan yang diakibatkan oleh gempa dapat mengakibatkan penurunan tanah sebesar 1 % (Muntohar, 2014). Gedung UMY (Univesitas Muhammadiyah Yogyakarta) hampir keseluruhan berada di atas tanah berpasir. Gempa melanda daerah Yogyakarta mengakibatkan kerusakan di UMY (Univesitas Muhammadiyah Yogyakarta). Kerusakan terjadi dikarenakan terjadinya likuifaksi yang menyebabkan penurunan tanah berkisar antara 2,5 cm sampai 13,5 cm pada zona bahaya (Muntohar, 2010). Kemiringan bangunan dan arah kemiringan bangunan dipengaruhi oleh fungsi bangunan serta fondasi yang digunakan selain itu berat struktur serta kondisi tanah pada bangunan tersebut, sehingga tingkat kerusakan yang terjadi pada bangunan yang ada berbeda-beda (Setiawan dkk., 2017). Diagram interkasi dapat dijadikan sebagai salah satu cara dalam mendesain tulangan kolom selain itu diagram interaksi dapat digunakan juga dalam mendesain penampang kolom

supaya lebih efektif dan efisien (Asroni dan Muntafi, 2013). Penampang kolom dengan tulangan 4 sisi menggunakan metode diagram interaksi, didapat bahwa hasil dan grafik yang diperoleh merupakan pendekatan dari keadaan yang sesungguhnya (Arfiadi, 2016). Posisi atau penempatan tulangan dengan 2 sisi menjadi 4 sisi dapat mengurangi aksial dan momen pada penampang kolom tersebut. Selain itu merubah bentuk penampang kolom yang pada awalnya berbentuk persegi panjang menjadi persegi dan tidak merubah posisi dari tulangan akan lebih mengurangi kapasitas momen dari penampang tersebut namun pada tekan aksial, tidak mengalami perubahan yang signifikan (Guspari, 2011). Penampang kolom persegi dan persegi panjang memiliki kapasitas aksial kolom yang lebih kecil dibandingkan dengan bentuk penampang lainnya tetapi pada kolom persegi dapat menerima momen 2 arah yang lebih baik dibandingkan dengan kolom persegi panjang yang hanya dapat menerima momen yang besar dari 1 arah (Krisnamurti dkk., 2013).

Analisis Penampang Kolom pada SPRMK menggunakan diagram interkasi sebagai batasan atau kapasitas dari sebuah penampang kolom. Dalam penelitian Asroni dan Muntafi (2013) analisis penampang kolom dibagi menjadi 5, yaitu :

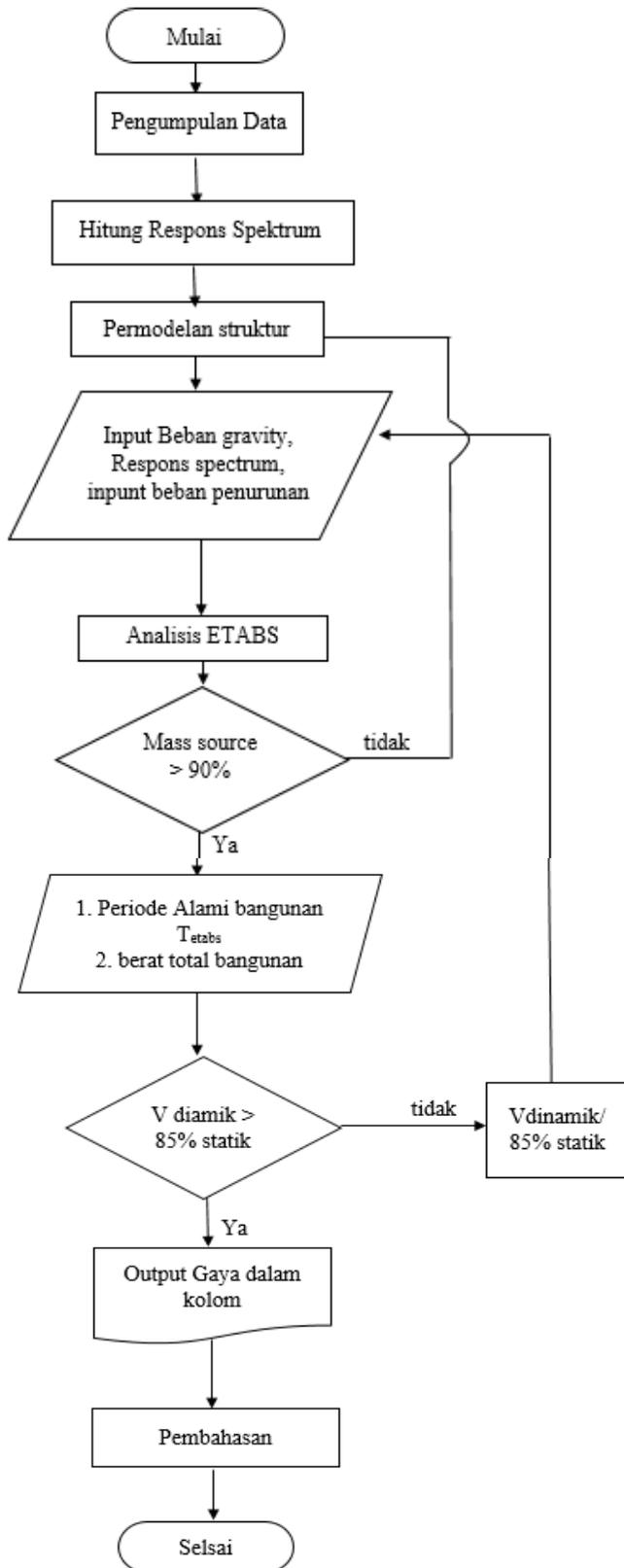
1. Kondisi beban tekan murni / dengan eksentrisitas kecil
2. Keadaan ketika tulangan tarik sudah mencapai leleh (untuk $f_y = 400$ MPa, dengan $\epsilon_t = 0,002$) dan ketika regangan beton mencapai $\epsilon_t = 0,003$
3. kondisi ketika tegangan baja tekan belum mencapai leleh dan baja tarik sudah atau pada saat nilai $P_n = 0$.
4. Kondisi saat eksentrisitas melampaui eksentrisitas seimbang, $e > e_b$
5. Kondisi saat eksentrisitas kurang dari eksentrisitas seimbang, $e < e_b$



Gambar 2 Kesetimbangan gaya dan momen (Asroni dan Muntafi, 2013)

2. Metode Penelitian

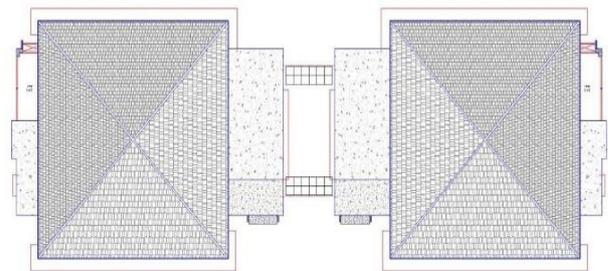
Alur penelitian ditunjukkan pada Gambar 3



Gambar 3 Bagan alir penelitian

Data struktur Gedung

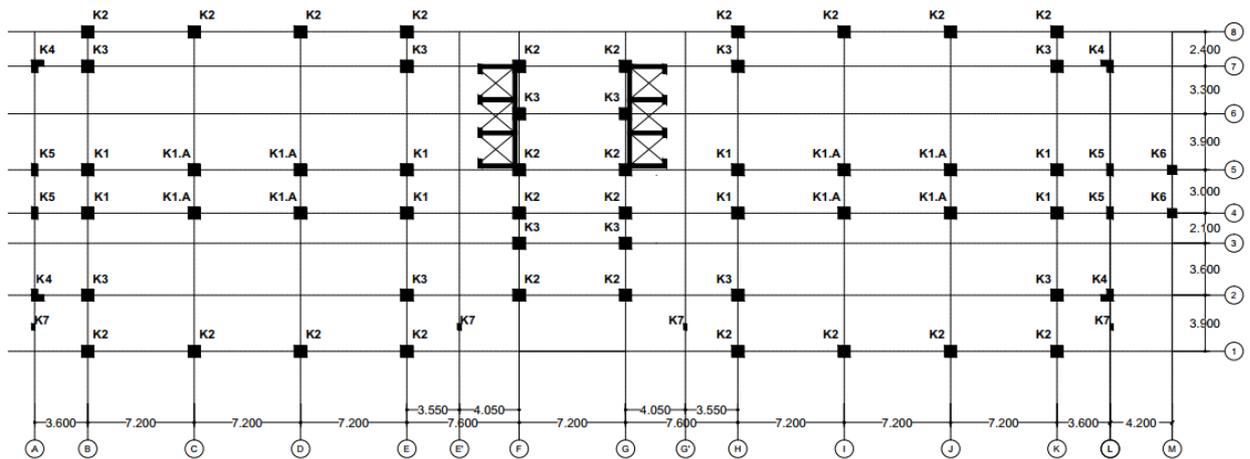
Pada penelitian ini gedung yang digunakan adalah bangunan *twin buliding* K.H Ibrahim yang berada di Universitas Muhammadiyah Yogyakarta yang berlokasi di provinsi D.I Yogyakarta. Fungsi bangunan yaitu sebagai gedung perkuliahan yang terdiri dari area parkir pada tiap lantai dasar gedung kembar tersebut, terdapat ruangan – ruangan sebagai ruang kuliah kemudian terdapat ruangan yang diperutukkan sebagai ruang seminar atau pun ruang pertemuan dengan sistem struktur yang digunakan yaitu dual sistem SPRMK dan dinding geser. Ketinggian gedung mencapai kurang lebih 30 m dengan jumlah total lantai yaitu 7. Tinggi lantai semi basement 3,2 m dan tinggi lantai tipilkan 4 m serta pada lantai 5 ketinggianya 6 m kemudian untuk lantai ruang mesin ketinggianya adalah 2 m. Kondisi tanah pada bangunan tersebut termasuk dalam kategori tanah sedang yang berdasarkan analisis nilai N_{sPT} pada pengujian tanah. tampak bangunan ditunjukkan pada Gambar 4 Tampak atas dan Gambar 5 Tampak depan. Denah kolom bangunan ditunjukkan pada



Gambar 4 Tampak atas



Gambar 5 Tampak depan

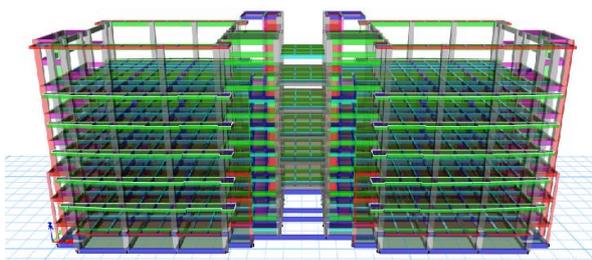


Gambar 6 Denah Kolom

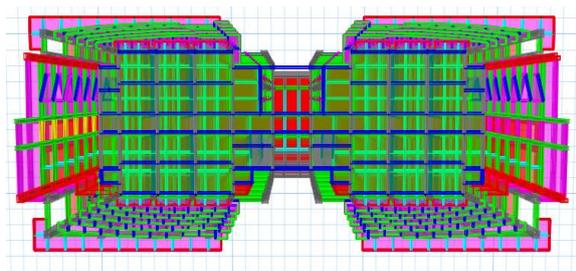
Beton yang digunakan yaitu $f_c' 25 \text{ Mpa}$ dengan modulus elastisitas beton sebesar 23500 Mpa . Baja tulangan yang digunakan yaitu $f_y 400 \text{ Mpa}$ dan $f_u 520 \text{ Mpa}$ pada diameter lebih dari 12 mm sedangkan pada diameter kurang dari 12 mm nilai f_y yang digunakan adalah sebesar 240 dengan nilai $F_u 370 \text{ Mpa}$. Modulus elastisitas baja $E_s 200000 \text{ Mpa}$.

Tabel 1 Tipe dan Dimensi Kolom

Tipe/Kode Kolom	Dimensi, $b \times h$ (mm)
K1	800x800
K1A	800x800
K2	800x800
K3	800x800
K5	400x800
K7	200x400



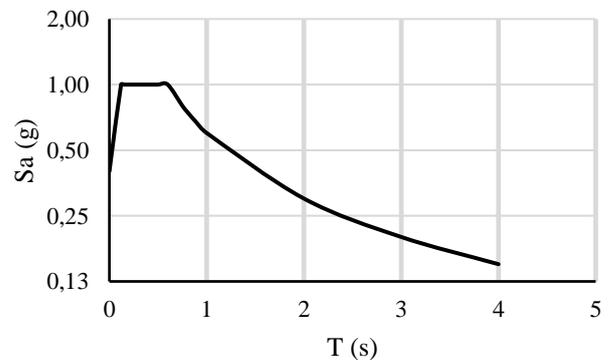
Gambar 7 Pemodelan ETABS tampak depan



Gambar 8 Pemodelan ETABS tampak atas

Respon Spektrum

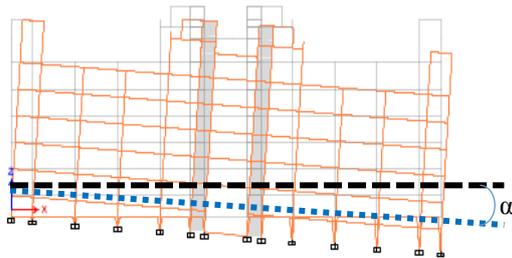
Perhitungan beban gempa atau respons spektrum ditentukan berdasarkan wilayah gempa sesuai peta *hazard* 2017. Parameter yang didapat adalah nilai S_1 dan nilai S_s . Jenis tanah pada daerah tersebut, fungsi dari bangunan itu sendiri dan sistem bangunan yang dipakai juga sebagai parameter awal dalam menghitung besaran gempa yang terjadi. Perhitungan beban gempa menggunakan BSN (2012) tentang tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung non gedung tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung non gedung sebagai dasar dalam perhitungan besarnya gaya gempa yang bekerja. Besaran gaya gempa yang bekerja di sajikan dalam bentuk grafik respon spektrum berdasarkan perhitungan dari parameter – parameter yang diperlukan dalam menentukan besaran gempa yang terjadi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9.



Gambar 9 Grafik respons spektrum

Beban Penurunan

Menurut Muntohar (2010) penurunan yang terjadi pada Universitas Muhammadiyah Yogyakarta berkisar antara 2,5 cm sampai 13,5 cm, maka ditentukan sudut untuk mendapatkan penurunan maksimum yang berkisar antar 2,5 cm sampai 13,5 cm. Sudut penurunan disimbolkan dengan (α) seperti yang ditunjukkan Gambar 10.



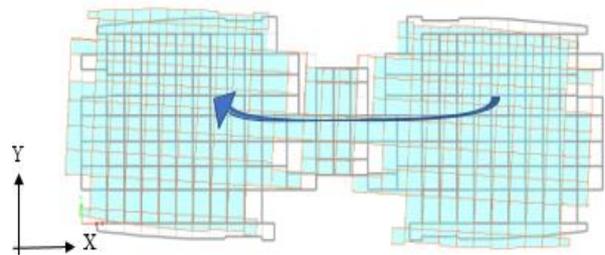
Gambar 10 Sudut Penurunan

3. Hasil dan Pembahasan

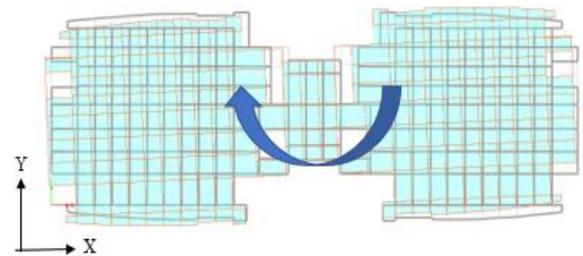
1. Mode Getar Struktur

Menurut BSN (2012) analisis yang dilakukan juga menyertakan ragam yang cukup hingga partisipasi massa ragam terkombinasi mencapai 90 persen dari massa aktual dalam masing – masing sumbu baik horisontal ortogonal dari respon modal yang ditinjau. Partisipasi massa tercapai 90 persen pada mode ke 18 sehingga persyaratan dalam Pasal 7.9.1 sudah terpenuhi. BSN (2012) pasal 7.7.3 menyatakan apabila desain yang dilakukan secara 3-D maka derajat kebebasan dinamis terdiri dari 3 yaitu 2 arah translasi arah horisontal sumbu X dan Y serta 1 derajat kebebasan rotasi atau torsi pada tiap tingkatan. Mode getar 1 derajat kebebasan yang terjadi pada bangunan tersebut cenderung mengalami translasi arah sumbu X terlihat pada Gambar 11, mode getar ke 2 seperti Gambar 12 mengalami rotasi dan pada mode getar ke 3 seperti yang ditunjukkan pada Gambar 13 mengalami translasi arah sumbu Y sehingga permodelan gedung sudah memenuhi yang disyaratkan pada SNI 1726:2012 (BSN, 2012). Jika suatu pemodelan struktur gedung pada ragam gerak pertama atau mode 1 sudah mengalami rotasi atau dominan mode keruntuhan cenderung mengalami rotasi mengindikasikan bahwa perilaku yang buruk

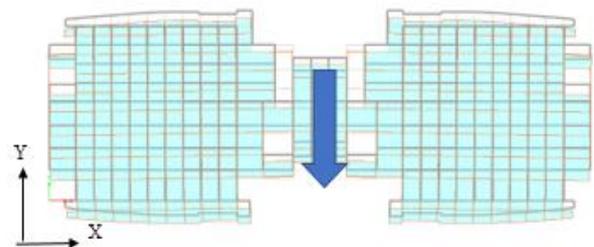
bagi penghuni apabila terjadi gempa maka diperlukan pemodelan ulang atau menata ulang kembali penempatan unsur struktur sehingga ragam gerak pertama mengalami translasi baik arah sumbu X maupun Y (Satyarno dkk., 2012).



Gambar 11 Translasi arah sumbu X pada mode 1 dengan nilai T = 0,783



Gambar 12 Translasi arah sumbu X pada mode 1 dengan nilai T = 0,758



Gambar 13 Translasi arah sumbu X pada mode 1 dengan nilai T = 0,61

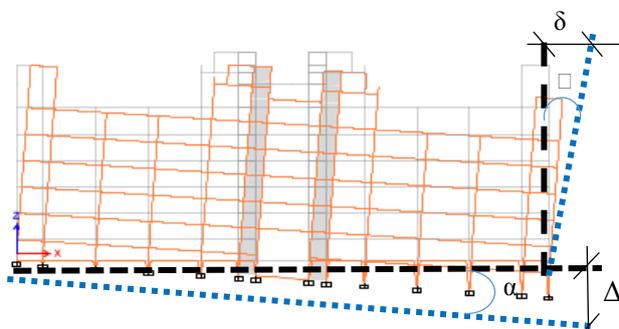
2. Kemiringan gedung

Analisis yang telah dilakukan mendapatkan hasil bahwa semakin besar sudut penurunan (α) maka sudut simpangan bangunan (\square) yang terjadi semakin besar pula dan juga sebaliknya, ini dapat dilihat pada Gambar 15 yang menunjukkan hubungan keduanya mengalami perubahan yang sama atau secara linier. Nilai sudut simpangan bangunan (\square) merupakan sudut yang dihasilkan dari besarnya simpangan dari bangunan (Δ) yang kemudian digunakan

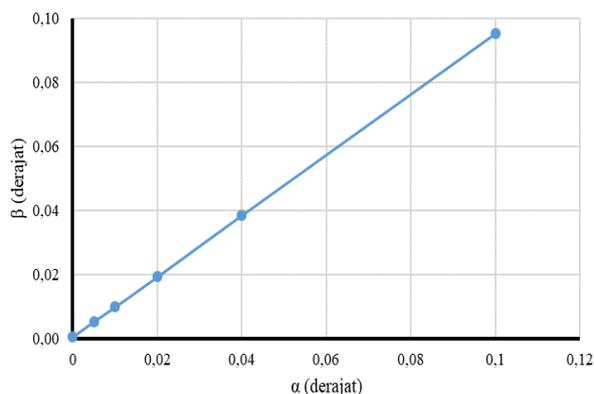
persamaan trigonometri untuk mendapatkan sudut simpangan, sedangkan nilai (Δ) merupakan simpangan bangunan berdasarkan hasil output analisis menggunakan bantuan program *ETABS* yang kemudian diambil rata – rata pada simpangan tertinggi dari bangunan. Besar penurunan yang terjadi disimbolkan dengan (δ), nilai besaran penurunan (δ) didapat dari sudut penurunan kemudian digunakan persamaan trigonometri guna mendapatkan nilai besaran penurunan (δ) Gambar 14 menunjukkan posisi α , δ , \square , Δ dan besarnya ditunjukkan pada Tabel 2. Tabel 2 Besar sudut α , \square , δ dan Δ

Tabel 2 Besar sudut α , \square , δ dan Δ

No	α ($^{\circ}$)	\square ($^{\circ}$)	Δ (m)	δ (m)
1	0	0,0004	0,0000	0,0002
2	0,005	0,0053	0,0064	0,0020
3	0,01	0,0098	0,0127	0,0038
4	0,02	0,0192	0,0254	0,0074
5	0,04	0,0384	0,0508	0,0148
6	0,1	0,0952	0,1271	0,0952



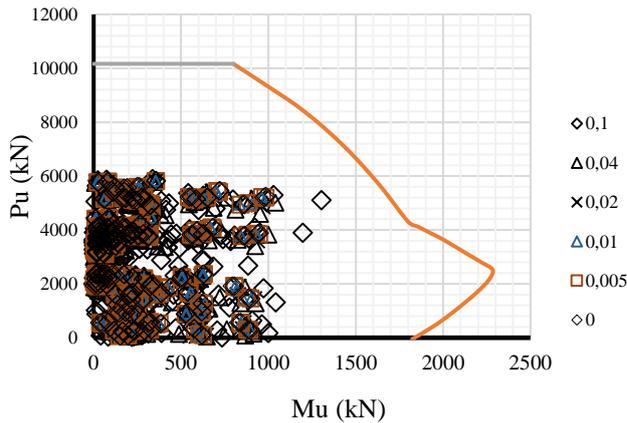
Gambar 14 Derajat Penurunan dan besaran simpangan



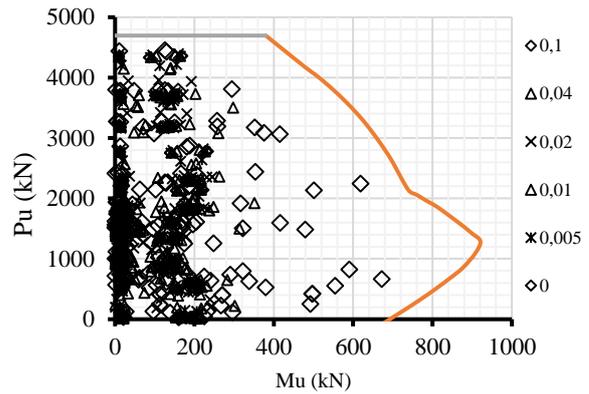
Gambar 15 Hubungan (α) dan (β)

3. Interaksi gaya pada penampang kolom

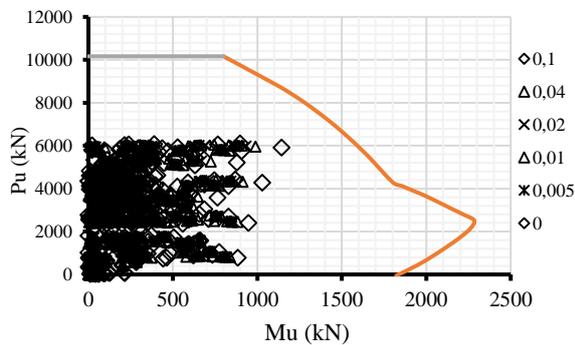
Hasil yang ditampilkan dari Gambar 16 sampai dengan Gambar 21, Kolom K7 dan K3 pada penurunan dengan sudut 0,1 derajat sudah tidak bisa menahan gaya yang bekerja, ini dapat dilihat dari semakin banyaknya titik yang kelur dari diagram interaksi. Kolom K3 dapat dikategorikan sebagai keruntuhan tarik terlihat pada Gambar 19 karena keruntuhan dominan terjadi akibat bertambahnya momen sedangkan nilai tekan aksial tidak mengalami peningkatan yang signifikan. Kolom K7 dapat ditentukan mengalami keruntuhan setimbang yang dapat dilihat pada Gambar 21 keruntuhan yang terjadi disebabkan oleh meningkatnya momen dan tekan aksial secara linier maka keruntuhan tersebut dalam kategori keruntuhan setimbang, sedangkan pada kolom K2 dan K5 mengalami keruntuhan tekan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 17 dan Gambar 20 secara berurutan walaupun kondisinya baru mencapai kondisi kritis namun peningkatan nilai P_u dan tidak adanya peningkatan pada nilai momen yang signifikan maka dapat disimpulkan bahwa keruntuhan yang terjadi adalah keruntuhan tekan. Kolom K1 dan K1A masih dapat menahan gaya yang terjadi, ini dapat dilihat pada Gambar 16 dan Gambar 18 belum adanya titik hubungan antara momen dan tekan aksial yang keluar dari diagram tersebut maka dapat disimpulkan bahwa kolom K1 dan K2 masih dalam level aman dengan penurunan yang ada.



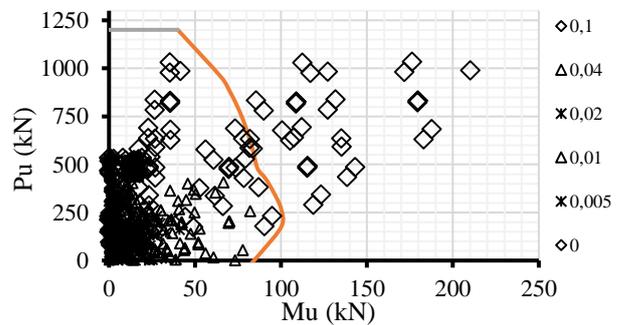
Gambar 16 Diagram interaksi kolom K1



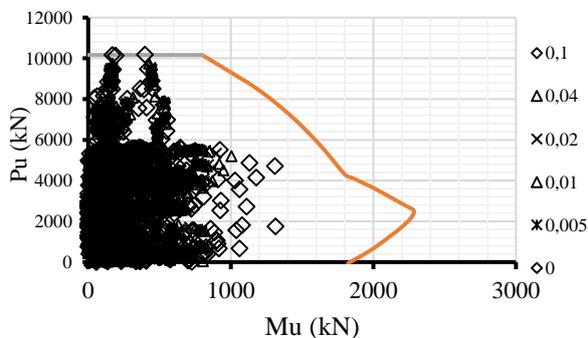
Gambar 20 Diagram interaksi kolom K5



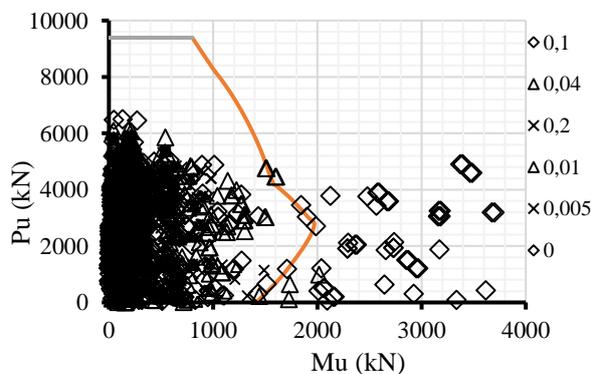
Gambar 17 Diagram interaksi kolom K1A



Gambar 21 Diagram interaksi K7



Gambar 18 Diagram interaksi kolom K2

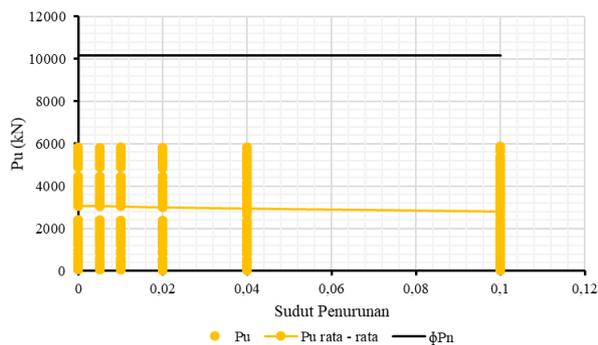


Gambar 19 Diagram interaksi kolom K3

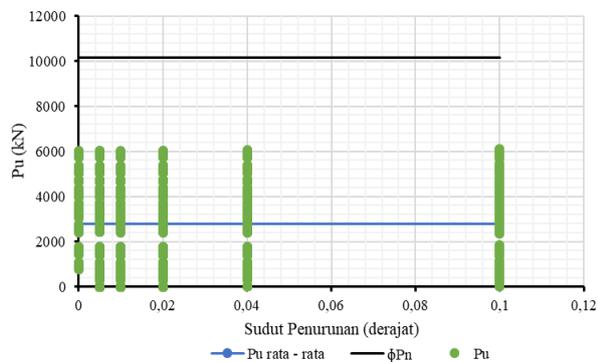
4. Tekan aksial

Dari hasil evaluasi grafik hubungan antara sudut penurunan dan tekan aksial (P_u) pada kolom, K3 pada Gambar 25, K1A pada Gambar 23 serta K1 yang ditunjukkan pada Gambar 22 nilai P_u belum melewati nilai P_n dan cenderung jauh dari batas limit dari masing – masing penampang maka kolom masih dalam kondisi aman jika dilihat dari segi tekan aksialnya. Nilai P_u tidak menunjukkan peningkatan pada tiap penambahan atau pembesaran sudut penurunan, ini bisa dilihat pada gambar yang menunjukkan garis rata – rata nilai P_u relatif datar karena tidak adanya peningkatan pada P_u pada masing – masing kolom seperti yang dijelaskan pembahasan diagram interaksi sebelumnya. Perbedaan terlihat pada kolom K7 yang pada penurunan dengan sudut 0,1 derajat mengalami peningkatan namun masih terbilang aman dilihat dari tekan aksialnya. Kolom K5 seperti yang ditampilkan pada Gambar 26 nilai P_u hampir mencapai batas limitnya dan kolom K2 Gambar 24 nilai P_u sudah mencapai pada batas

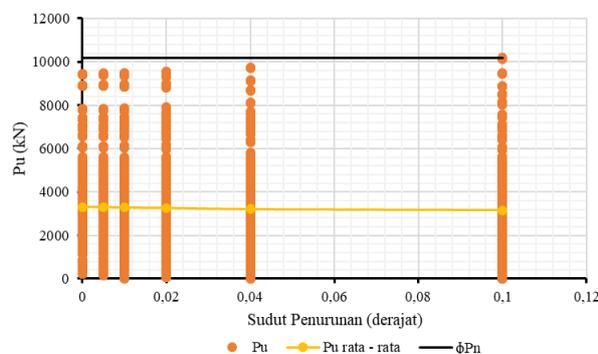
limit P_n atau nilai tekan yang bisa ditahan oleh penampang, kondisi ini berbahaya karena kapasitas penampang sudah mencapai batas ultimitnya maka penampang kolom beresiko runtuh. Kondisi ini sama dengan yang dijelaskan pada Gambar 20 dan Gambar 24 bahwa penampang kolom K5 dan K2 rawan terhadap keruntuhan tekan yaitu keruntuhan yang disebabkan karena nilai tekan aksialnya mengalami peningkatan hingga melewati batas ultimit penampang namun momen yang terjadi tidak mengalami peningkatan yang berarti atau bahkan tidak terjadi peningkatan sama sekali.



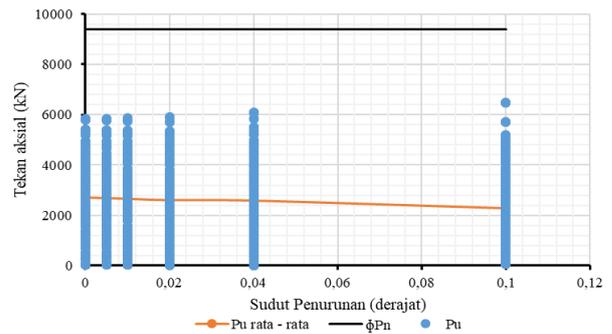
Gambar 22 Grafik hubungan sudut penurunan dan tekan aksial kolom K1



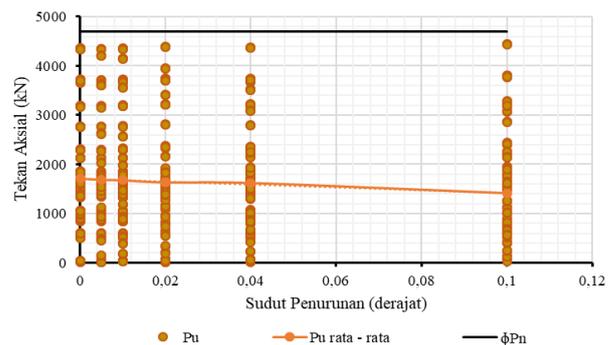
Gambar 23 Grafik hubungan sudut penurunan dan tekan aksial kolom K1A



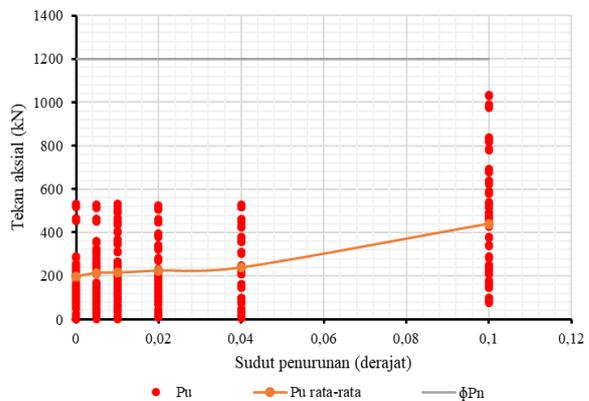
Gambar 24 Grafik hubungan sudut penurunan dan tekan aksial kolom K2



Gambar 25 Grafik hubungan sudut penurunan dan tekan aksial kolom K3



Gambar 26 Grafik hubungan sudut penurunan dan tekan aksial kolom K5

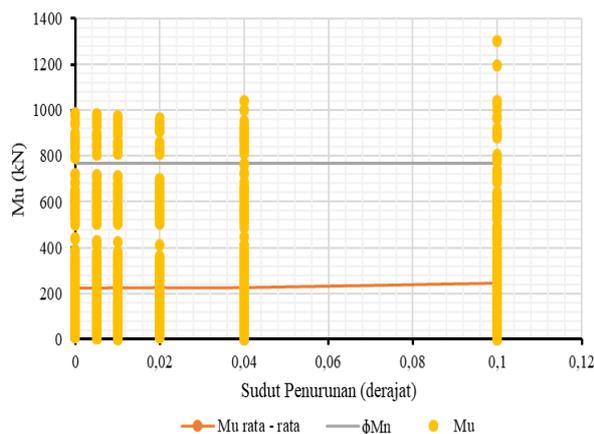


Gambar 27 Grafik hubungan sudut penurunan dan tekan aksial kolom K7

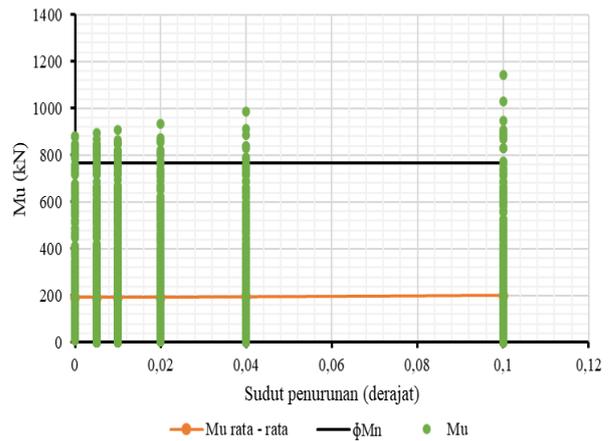
5. Momen kolom

Grafik yang yang ditunjukkan pada Gambar 28 sampai dengan Gambar 33 bahwa semakin besar penurunan maka momen yang dihasilkan semakin besar, kondisi ini berbeda dengan tekan aksial yang cenderung tidak mengalami perubahan signifikan, kolom K2, K3, K5 dan K7 seperti yang ditunjukkan pada Gambar 30, Gambar 31, Gambar 32, Gambar 33 secara berurutan mengalami lonjakan nilai

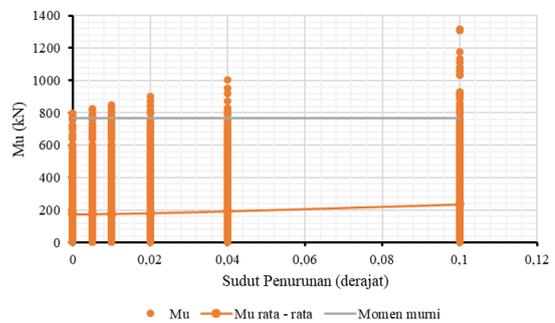
momen, lonjakan momen tersebut terjadi pada penurunan terbesar yaitu penurunan dengan sudut 0.1 derajat. Peningkatan nilai momen juga didasari dari garis rata - rata nilai momen yang pada tiap penambahan penurunan terus mengalami peningkatan, sedangkan pada kolom K1 ditunjukkan pada Gambar 28 dan K1A pada Gambar 29 momen yang terjadi cenderung konstan, garis rata – rata dari nilai M_u yang terlihat tidak adanya peningkatan yang besar, garis tersebut terlihat datar. Kedua kondisi ini terjadi karena adanya distribusi kembali nilai momen karena sebagian kolom mengalami peningkatan sedang disisi lain kolom tertentu mengalami sedikit penurunan. Peningkatan momen memang terjadi pada tiap kolom tetapi secara umum bertambahnya penurunan, momen yang terjadi tidak meningkat secara linier hanya sebagian saja yang mengalami peningkatan. Momen yang terjadi berbanding terbalik dengan nilai tekan aksial, momen terus meningkat seiring bertambahnya penurunan walaupun hanya pada kolom tertentu yang mengalami peningkatan tetapi pada tekan aksial cenderung terlihat konstan seiring bertambahnya penurunan. Grafik tersebut merupakan hubungan antara momen murni dengan sudut penurunan yang berarti grafik tersebut tidak bisa sebagai penentu bahwa momen yang dihasilkan sudah melebihi atau sudah tidak bisa ditahan oleh momen maksimum dari penampang.



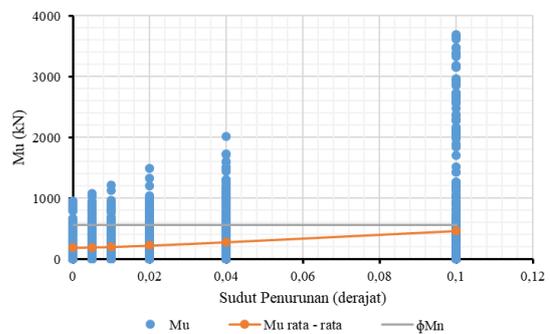
Gambar 28 Grafik hubungan penurunan dengan momen kolom K1



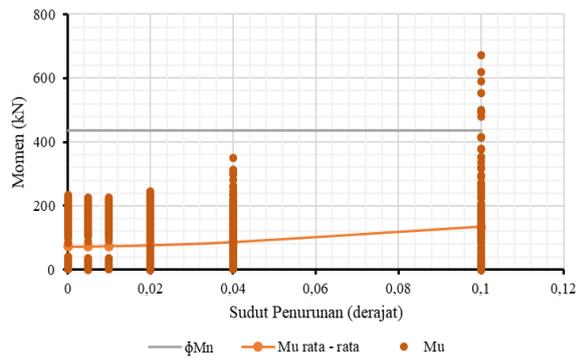
Gambar 29 Grafik hubungan penurunan dengan momen kolom K1A



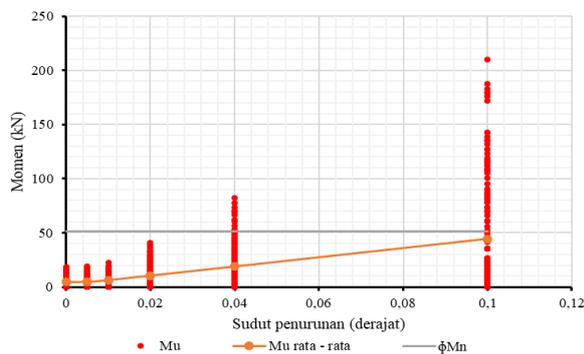
Gambar 30 Grafik hubungan penurunan dengan momen kolom K2



Gambar 31 Grafik hubungan penurunan dengan momen kolom K3



Gambar 32 Grafik hubungan penurunan dengan momen kolom K5



Gambar 33 Grafik hubungan penurunan dengan momen kolom K7

Kesimpulan

Partisipasi massa gedung sudah mencapai lebih dari 90%. Ragam getar yang dihasilkan sudah sesuai dengan yang diisyaratkan pada SNI 1726:2012 yang menyatakan 3 mode awal struktur gedung berada pada kondisi translasi orthogonal dan torsi. simpangan atau kemiringan bangunan yang dihasilkan tidak sama dengan besarnya nilai sudut penurunan

Derajat simpangan atau kemiringan bangunan yang dihasilkan tidak sama dengan besarnya nilai sudut penurunan Namun hubungan keduanya berubah secara linier

Prosentase kolom rusak berdasarkan diagram interaksi pada penurunan 0.04 pada kolom K3 sebesar 1,03 % sedangkan pada penurunan 0,1 derajat kolom tipe K7 adalah sebesar 33,33 %, K3 sebesar 2,1 % dan pada tipe kolom K2 sebesar 0,6% dari total keseluruhan kolom dalam satu gedung sedangkan pada kolom lainnya masih dapat menahan gaya yang terjadi akibat penurunan.

Nilai P_u tidak mengalami perubahan signifikan berarti bahwa nilai P_u tidak mempengaruhi keruntuhan dari kolom. Nilai M_u cenderung terus mengalami perubahan pada tiap kenaikan sudut penurunan yaitu semakin besar yang bisa disimpulkan bahwa besar keruntuhan kolom dominan dipengaruhi oleh momen.

Daftar Pustaka

- Arfiadi, Y., 2017, Diagram Interaksi Perancangan Kolom Dengan Tulangan Pada Empat Sisi Berdasarkan SNI 2847: 2013 dan ACI 318M-11, *Jurnal Teknik Sipil*, 13(4), 268-290.
- Asroni, A, & Muntafi, Y., 2013, Rectangular Column Reinforcement Design By Making Our Own Diagram, *Eco Rekayasa*, 9(1), 82-90.
- BSN, 2013, SNI 2847:2013 *Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung*. Badan Standardisasi Nasional. Jakarta
- BSN, 2012, SNI 1726:2012 *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung Non Gedung*. Badan Standardisasi Nasional. Jakarta
- Bird, J. F., Bommer, J. J., Crowley, H., & Pinho, R., 2006, Modelling liquefaction-induced building damage in earthquake loss estimation, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 26(1), 15-30.
- Guspari, O., 2011, Analisis Kolom Beton Bertulang Dengan Variasi Posisi Tulangan Dan Penampang Menggunakan Diagram Interaksi. *Rekayasa Sipil*, 7(2), 90-98.
- Ishihara, K., 1993, Liquefaction and flow failure during earthquakes, *Geotechnique*, 43(3), 351-451.
- Krisnamurti, K., Wiswamitra, K. A., & Kriswardhana, W., 2013, Pengaruh Variasi Bentuk Penampang Kolom Terhadap Perilaku Elemen Struktur Akibat Beban Gempa, *Rekayasa Sipil*, 7(1), 13-27.

- Muntohar, A. S., 2010, Estimating Ground Settlement Post-Liquefaction Using CPT, *Proceeding 1st International Conference on Sustainable Built Environment*, Yogyakarta, 27-29 may 2010, pp, 1-5.
- Muntohar, A. S., 2014, Research on Earthquake Induced Liquefaction in Padang City and Yogyakarta Area, *Jurnal Geoteknik HATTI IX (1)*, 1-9.
- Sarah, D., dan Soebowo, E., 2013, Liquefaction Due to the 2006 Yogyakarta Earthquake: Field Occurrence and Geotechnical Analysis, *Procedia Earth and Planetary Science*, 6, 383-389.
- Satyarno, I., Nawangalam, P. dan Pratomy, R. I., 2012, *Belajar SAP2000 Analisis Gempa*, 2nd ed, Yogyakarta, Zamil Publishing.
- Setiawan, H., Serikawa, Y., Nakamura, M., Miyajima, M., dan Yoshida, M., 2017, Structural damage to houses and buildings induced by liquefaction in the 2016 Kumamoto Earthquake, Japan. *Geoenvironmental Disasters*, 4(1), 13.