

## ANALISIS STABILITAS TEROWONGAN DANGKAL PADA TANAH LUNAK

Putri Nova Haryu Dhanti <sup>2)</sup> dan Singgih Saptono <sup>3)</sup>

<sup>2,3)</sup> Program Studi Magister Teknik Pertambangan – Fakultas Teknologi Mineral –  
Universitas Pembangunan Nasional Veteran Yogyakarta  
Jalan Pajajaran 104 Condongcatur, Yogyakarta, Indonesia, 55293

### ABSTRAK

Pada lima tahun terakhir ini banyak pembangunan yang dilakukan di Indonesia khususnya pembangunan infrastruktur, seperti pembangunan sarana Mass Rapid Transportation (MRT) berupa terowongan di Jakarta, dan berapa terowongan jalan raya dan terowongan jalur kereta api. Hal ini menjadi tantangan bagi para pembuatan terowongan di Indonesia. Tantangan tersebut adalah membuat terowongan jalan raya dan kereta api pada tanah lunak khususnya lempung dan pada kedalaman yang dangkal. Hal ini perlu perhatian khusus, disebabkan oleh sifat lempung yang memiliki sifat *swelling* dan serta penggalian terowongan tersebut pada kedalaman kurang dari 100 m. Pendekatan kekuatan batuan sudah tidak dapat digolongkan sebagai batuan karena pada umumnya menurut material lempung digolongkan sebagai tanah, sehingga teori elastistas sudah tidak berlaku lagi. Pendekatan yang diusulkan untuk analisis stabilitas pada terowongan di batuan lempung adalah berperilaku *swelling* sesuai dengan kandungan mineral penyusunnya yaitu montmorilonit. Untuk itu analisis stabilitas diperlukan parameter *swelling*. Pada Analisis dengan perilaku *swelling* ini menggunakan metode elemen hingga (Phase2, Rocscience). Dengan pendekatan perilaku *Swelling* dalam analisis stabilitas terowongan akan lebih mendekati dengan sifat material yang ada di terowongan.

Kata kunci: *swelling*, metode elemen hingga, stabilitas, terowongan

### ABSTRACT

*In the last five years a lot of development has been carried out in Indonesia, especially infrastructure development, such as the construction of Mass Rapid Transportation (MRT) facilities in the form of tunnels in Jakarta, and how many road tunnels and railroad tunnels. This is a challenge for tunnels in Indonesia. The challenge is to build road and rail tunnels on soft soil, especially clays and at shallow depths. This needs special attention, due to the nature of the clay which has swelling properties and the excavation of the tunnel in the depth of less than 100 m. Rock strength approach can no longer be classified as rock because in general according to clay material classified as soil, so the theory of elasticity is no longer valid. The proposed approach for the stability analysis of tunnels in clay rock is to behave swelling according to its constituent mineral content, montmorillonite. For this reason, stability analysis requires swelling parameters. In this analysis with swelling behavior using the finite element method (Phase2, Rocscience). With the Swelling behavior approach in the tunnel stability analysis it will be closer to the material properties in the tunnel.*

Key words : *Swelling, Finite Element Method, Stability, Tunnel*

## A. PENDAHULUAN

Pada penggalian di setiap penambangan selalu berhubungan dengan berbagai material dari material yang sangat lunak (seperti tanah) hingga material batuan yang sangat keras (seperti batuan beku, batuan sedimen dan batuan metamorf). Pada berbagai kasus material yang sangat lunak akan memberikan perilaku khusus seperti berperilaku plastis, dan berperilaku pengembangan (*swelling*). Pada penelitian ini ada dilakukan suatu studi parameter pada material berperilaku *swelling* pada material tanah dengan kandungan mineral *monmorillonite*. Hal ini sangat menarik dikarenakan pada material tanah tersebut mampu mengembang (*swelling*) sebelum terjadinya keruntuhan, hal ini sangat berbeda pada material plastis. Material plastis akan memiliki sifat plastis sebelum terjadinya pecah (*failure*). Sehingga pada penelitian ini akan dilihat bagaimana proses perilaku dari hari pertama hingga mencapai hari ke seratus, jika diterapkan pada studi kasus stabilitas terowongan di material berperilaku *swelling*. Contoh batuan material tanah yang akan dianalisis adalah batulempung pada pembawa lapisan batubara, sampel di ambil dari 2 daerah yang berbeda yaitu batu lempung yang berasal dari Kabupaten Kutai Kartanegara, Kalimantan Timur dan Kabupaten Barito Selatan, Kalimantan Tengah. Pengambilan contoh ini didasarkan adanya kasus rencana penambangan batubara bawah tanah dan tambang terbuka.

Dengan adanya mineral lempung pada pembawa lapisan batubara, maka memungkinkan potensi terjadinya *swelling*. *Swelling* adalah variasi perubahan kadar air atau peristiwa penyerapan dan pelepasan air oleh mineral lempung yang mengakibatkan perubahan volume. Salah satu dampak *swelling* pada bukaan tambang bawah tanah dapat menyebabkan lantai tambang mengembang dan lantai menjadi naik, sehingga dimensi lubang bukaan tambang menjadi lebih kecil daripada rancangan awal dan menyebabkan proses penambangan menjadi terganggu. White (1956) menyatakan bahwa naiknya lantai tambang karena material mengandung lempung terutama mineral *montmorillonite*.

Pada penelitian ini diperoleh dua karakteristik material berpotensi terjadinya *swelling* dan material tak berpotensi terjadinya *swelling*. Kedua material tersebut memiliki karakteristik seperti modulus elastisitas, kohesi, sudut gesek dalam, tensile strength, time *swelling* parameter, time *swelling* parameter for elastic strain, time *swelling* parameter for plastic strain, plastic volumetric strain for plastic strain, dan maximum *swelling* stress – normal serta maximum *swelling* stress – tangensial. Tujuan penelitian ini akan mencari parameter berpengaruh potensi atau tidak potensinya material terhadap *swelling*. Selain pada penelitian akan melihat beberapa perilaku yang terjadi pada *swelling* seperti perilaku elastik, plastik tanpa terjadinya runtuh.

## B. METODOLOGI PENELITIAN

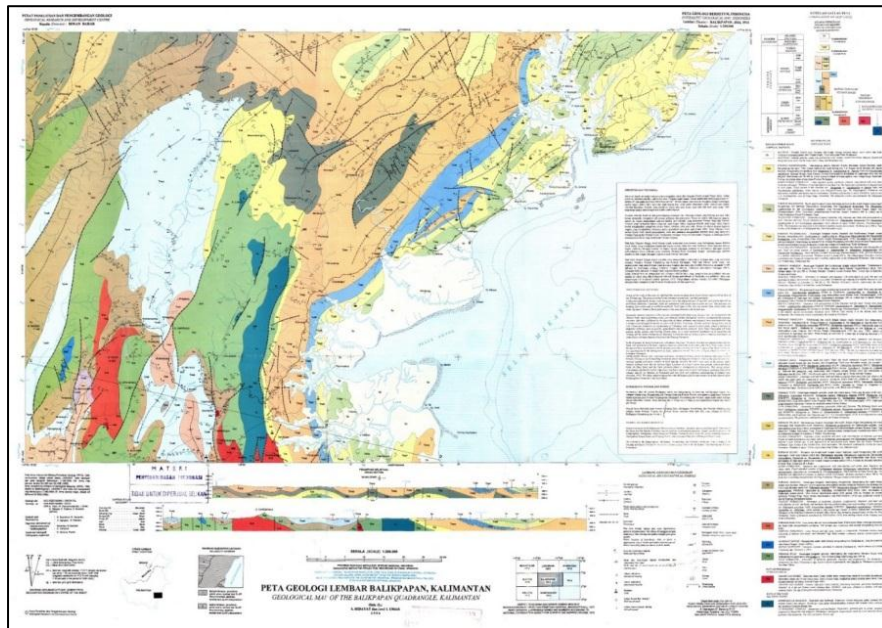
### B.1 Geologi Kutai Kartanegara dan Barito Selatan

Pada penelitian ini, sampel di ambil dari 2 daerah yang berbeda yaitu batulempung di Kabupaten Kutai Kartanegara Kalimantan Timur (Gambar 1), dan di Kabupaten Barito Selatan, Kalimantan Tengah (Gambar 2).

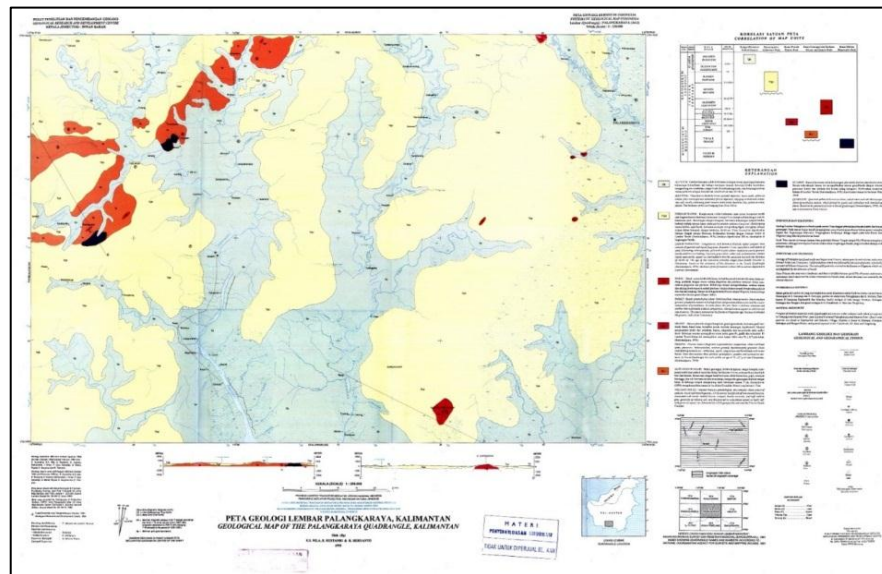
Formasi pembawa batubara di Kabupaten Kutai Kartanegara, Kalimantan Timur adalah formasi Balikpapan. Formasi Balikpapan terdiri dari beberapa siklus endapan delta yang disusun oleh litologi yang terdiri dari perselingan batupasir dan lempung dengan sisipan lanau, serpih, batugamping dan batubara. Batupasir kuarsa, putih kekuningan, tebal lapisan 1-3 m, disisipi lapisan batubara tebal 5 – 10 cm. Batupasir gampingan, coklat, berstruktur sedimen lapisan bersusun dan silang siur, tebal lapisan 20 – 40 cm, mengandung foraminifera kecil, disisipi lapisan tipis karbon. Batulempung, kelabu kehitaman, setempat mengandung sisa tumbuhan oksidasi besi yang mengisi rekahan-rekahan setempat mengandung lensa-lensa batupasir gampingan. Lanau gampingan, berlapis tipis.

Formasi pembawa batubara di Kabupaten Barito Selatan, Kalimantan Selatan adalah formasi Tanjung. Formasi Tanjung merupakan batuan Tersier paling tua dan sebagai formasi pembawa

batubara, dapat dibedakan menjadi dua bagian. Bagian bawah terdiri dari perselingan batu kuarsa dengan lanau bersisipan batugamping dan batubara. Bagian Bawah terdiri dari perselingan batupasir, batulempung dan batulanau. Formasi Tanjung tersingkap di daerah Lemo.



Gambar 1. Kabupaten Kutai Kartanegara (S. Supriatna, dkk 1995)



Gambar 2. Kabupaten Barito Selatan (Sikumbang dan Heriyanto, 1994)

## B.2 Mineral Lempung

Di Indonesia dengan pelapukan kimia yang sangat dominan akibat iklim tropis, sehingga banyak menghasilkan berupa batulempung. Salah satu mineral penyusun batuan tersebut adalah mineral lempung yang memiliki sifat mengembang (*swelling*) dan tidak mengembang.

Mineral lempung, memungkinkan akan terjadinya *swelling*. *Swelling* adalah variasi perubahan kadar air yaitu peristiwa penyerapan dan pelepasan air oleh mineral *lempung* mengakibatkan perubahan volume. Salah satu dampak *swelling* pada lubang bukaan (terowongan) dapat menyebabkan lantai mengembang dan lantai menjadi naik sehingga dimensi lubang bukaan menjadi lebih kecil daripada rancangan awal dan menyebabkan stabilitas lubang bukaan menjadi terganggu.

Pada umumnya sebagian besar wilayah Indonesia ini diliputi oleh lempung dengan pengembangan yang cukup besar (plastisitas tinggi), yaitu akan berubah volumenya (mengembang) bila bertambah (berubah) kadar airnya. Volumennya akan membesar dalam kondisi basah dan akan menyusut bila dalam kondisi kering. Plastisitas adalah keadaan konsistensi, yaitu cair, plastis, semi padat, atau padat bergantung pada kadar airnya. Variasi perubahan kadar air yaitu peristiwa penyerapan dan pelepasan air oleh mineral lempung mengakibatkan perubahan volume atau yang disebut dengan *swelling* (mengembang atau menyusut dari tanah lempung). Jenis batuan yang paling memperlihatkan perilaku *swelling* misalnya batulempung dan *anhydrite bearing-rock*. Walaupun secara *macroscopic* perilaku *swelling* nya tampak sama, namun proses kimia berbeda. Namun *swelling* tidak hanya bergantung pada sifat-sifat material tetapi juga pada ketersediaan air.

Potensi terjadinya *swelling* biasanya pada daerah dengan kondisi yang basah atau adanya perubahan kadar air (Pusch, 2012). *Swelling* terjadi ketika molekul air melekat pada permukaan lempung yang bermuatan negatif. Perubahan molekul air yang sangat terikat pada permukaan lempung untuk air pori bebas secara bertahap terjadi dan memungkinkan terjadinya *swelling* dengan potensi yang besar. Faktor jarak antar lapisan, ion, valensi, dan ketersediaan air akan berpengaruh pada proses mengalirnya air ke lapisan mineral lempung dan tingkat *swelling*.

Faktor yang signifikan terhadap peningkatan volume ketika lempung mengalami *swelling* adalah sementasi mineral lempung gaya tarik menarik antar partikel lempung dan perekat organik dan anorganik seperti karbonat dan hidroksida (Pusch, 2012). Sementasi partikel melibatkan pembentukan ikatan molekul yang membuat interlayer dalam mineral lempung tidak dapat ditembus oleh kation dan molekul air mampu merusak lempung untuk berekspansi.

### B.3 Perilaku *Swelling*

Berdasarkan hasil uji *swelling* setelah Huder dan Amberg (1970), Grob (1972) merumuskan hukum *swelling* satu dimensi. Hasil uji Huder dan Amberg (1970), digunakan untuk mengukur deformasi luas sebagai akibat dari *swelling*.

Fenomena naiknya lantai terowongan, atau kerusakan pada invert arch, telah terkenal sejak awal pembangunan terowongan di pertengahan abad ke-19. Fenomena ini telah dikaitkan dengan peningkatan volume massa batuan karena penyerapan air. Batuan yang mengalami *swelling* mengandung mineral *clay*, dalam beberapa kasus, bersifat anhidrit. Tinjauan komprehensif dari temuan empiris yang berhubungan dengan penelitian ini diberikan di tempat lain (Anagnostou, 1991). Namun demikian, perlu untuk menyebutkan beberapa fitur dari fenomena yang diamati untuk membedakan *swelling* dari fenomena lain dalam terowongan, khususnya *squeezing*.

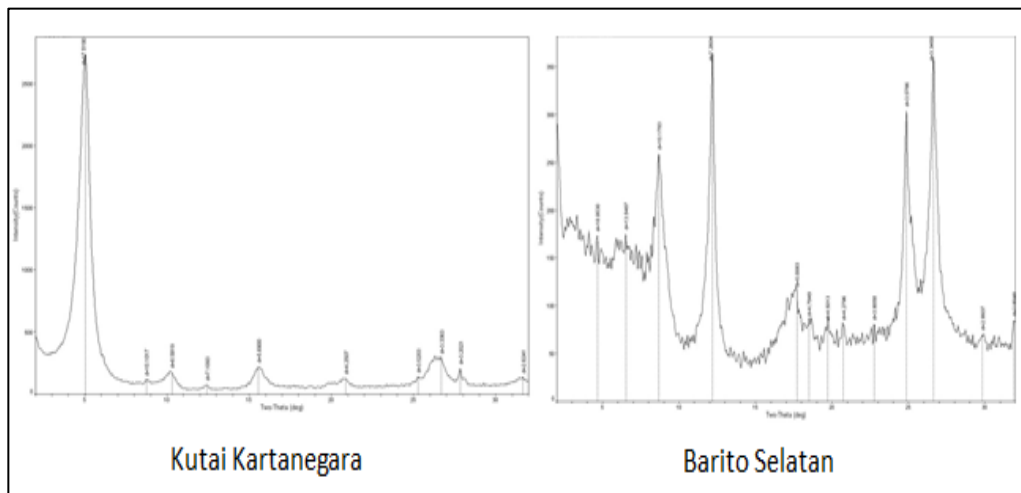
Berbeda dengan *squeezing*, keberadaan air, serta komposisi mineralogi tertentu sangat berpengaruh untuk terjadinya *swelling*. Karena *squeezing* (tergantung pada kekuatan batuan dan overburden) pada prinsipnya dapat terjadi pada batuan apa pun, dalam batuan yang mengandung mineral yang menyebabkan *swelling* juga, kita tidak bisa mengesampingkan kemungkinan terjadinya *swelling* dan *squeezing* secara simultan. Namun perlu ditekankan bahwa *swelling* dan *squeezing* yang simultan adalah fenomena yang agak jarang terjadi yang hanya terjadi pada batuan yang lemah.

Pola khas deformasi yang diamati pada terowongan di batuan yang mengalami *swelling* terdiri dari, naiknya lantai yang sangat besar dan tidak adanya deformasi yang sebanding di dinding dan *crown*. Biasanya, batuan yang mengalami *swelling* menunjukkan plastisitas tinggi selama penggalian. Dinding dan mahkota tetap stabil selama bertahun-tahun. Di laboratorium, seseorang mengukur tekanan *swelling* yang seringkali lebih tinggi dari tegangan vertikal yang sesuai dengan lapisan penutup di lokasi asli spesimen. Pengamatan *in situ* jelas menyiratkan bahwa tekanan *swelling* berbeda dengan jenis tekanan batuan lainnya, bisa lebih tinggi dari tegangan vertikal primer, terutama ketika terowongan dangkal.

## C. HASIL DAN PEMBAHASAN

### C.1 Hasil Pengujian XRD

Hasil analisis ini dalam bentuk persentase dari masing-masing jenis mineral yaitu illite, kaolinite, dan monmorillonite, Sebagai pada penelitian ini adalah contoh jenis lempung dari Kutai Kartanegara akan dibandingkan dengan contoh jenis lempung dari Barito Selatan, Hal ini dilakukan untuk mendapatkan perilaku lempung dengan potensi *swelling* dari contoh tersebut, Potensi perilaku lempung, Selain itu juga dibedakan berdasarkan kemampuan menyerap air, Hasil pengujian ini menunjukkan bahwa untuk contoh dari daerah Kutai Kartanegara potensi *swelling*nya sebesar 19,8% untuk monmorillonite, sedangkan untuk contoh dari daerah Barito Selatan yang potensi *swelling*nya kecil menyerap airnya sebesar 2,5%. Hasil pengujian dengan XRD ini yang berupa Grafik peak contoh dari Kutai Kartanegara (1) dapat dilihat pada Gambar 4 dan peak XRD contoh dari Barito Selatan (1).

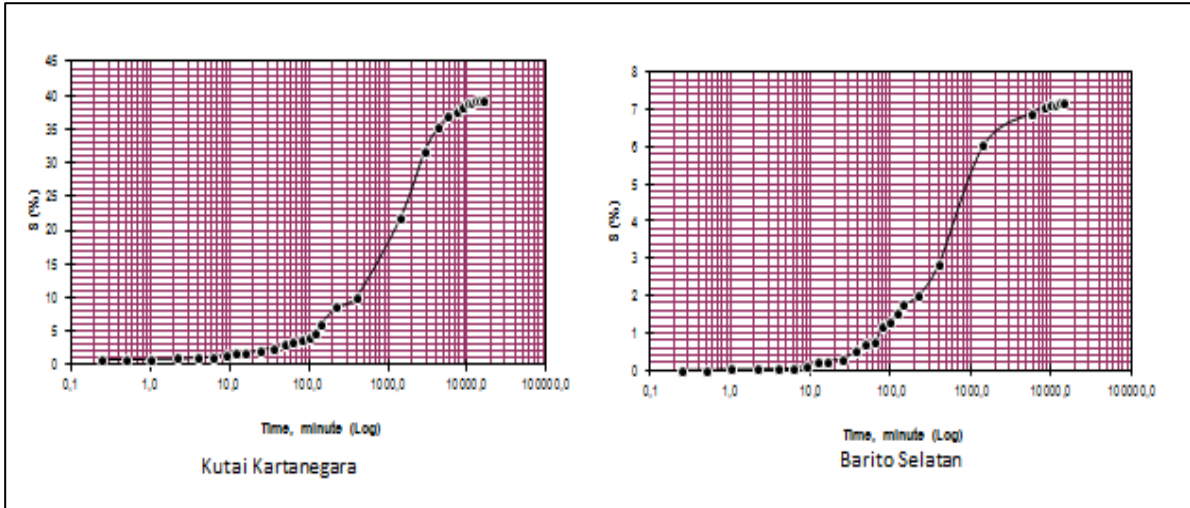


Gambar 4. Grafik peak XRD Kutai Kartanegara & Barito Selatan

### C.2 Hasil Pengujian *Swelling*

Uji *swelling* dilakukan pada cincin besi yang berbentuk silinder (contoh terkekang lateral). Awalnya tanah dibebani dengan tekanan terbagi rata, dan kemudian direndam air. Contoh mengembang secara vertikal dan perubahan tinggi dibagi tinggi awal adalah potensi pengembangannya (dinyatakan dalam persen). Pengujian pengembangan ini dapat dilakukan dengan alat uji oedometer. Lama waktu pengujian dipertimbangkan terhadap waktu yang dibutuhkan untuk masuk ke dalam contoh., karena tanah ekspansif tidak segera mengembang ketika ditambahkan air.

Berdasarkan Gambar 5. dapat dilihat bahwa daerah Kutai Kartanegara memiliki regangan yang besar terhadap waktu di bandingkan pada Barito Selatan. Hal itu terjadi di karenakan bahwa daerah Kutai Kartanegara memiliki potensi *swelling* yang besar di banding dengan Barito Selatan.



Gambar 5. Grafik hasil pengujian *swelling* regangan terhadap waktu contoh dari Kutai Kartanegara

**C.3 Hasil Analisis Parameter *Swelling***

Data input yang diperlukan untuk simulasi di Soil Test Facility (Uji Tanah) , dan setelah diolah maka hasil parameter *swelling* untuk parameter analisis *swelling* seperti pada Tabel 1 dan Tabel 2, sebagai perbandingan antara potensi *swelling* dan non *swelling*.

Tabel 1. Data Material Kutai Kartanegara

Parmeter	Satuan	Nilai	Parameter	Satuan	Nilai
$\varphi_k$	( <sup>0</sup> )	13-20	$\varphi_k$	( <sup>0</sup> )	13-20
$c_k$	(kPa)	100-180	$c_z$	(kPa)	100-180
$\psi_k, \psi_s$	( <sup>0</sup> )	1	$\nu$	(-)	0,3
$E$	(MPa)	110-190	$K_{q,z}$	(%)	31-40
$K_{q,k}$	(%)	31-40	$\sigma_0$	kPa	350-550

Tabel 2. Data Material Barito Selatan

Parmeter	Satuan	Nilai	Parameter	Satuan	Nilai
$\varphi_k$	( <sup>0</sup> )	20-21	$\varphi_k$	( <sup>0</sup> )	20-21
$c_k$	(kPa)	160-185	$c_z$	(kPa)	160-185
$\psi_k, \psi_s$	( <sup>0</sup> )	1	$\nu$	(-)	0,3
$E$	(MPa)	150-320	$K_{q,z}$	(%)	3-8
$K_{q,k}$	(%)	3-8	$\sigma_0$	kPa	80-140

K dan S adalah indeks yang digunakan dalam model Wittke-Gattermann (1998) untuk menunjukkan set sambungan vertikal (tegak lurus terhadap bedding) dan perlapisan horizontal, Tabel 3 dan Tabel 4 menunjukkan beberapa nilai parameter waktu pembengkakan (*swelling time*) dalam model Wittke-Gattermann yang digunakan dalam simulasi numerik aplikasi terowongan dengan material penyusun berperilaku plastik dan *swelling*,

Tabel 3. Parameter waktu pembengkakan (*swelling time*) Kutai Kartanegara

Parmeter	Satuan	Nilai	Parameter	Satuan	Nilai
$A_0$	(1/a)	0-0,3	$A_{el0}$	(1/a)	0-15
$A_{VP}$	(1/a)	0-25	max <i>EVP</i>	(-)	0,05

Tabel 4. Parameter waktu pembengkakan (*swelling time*) Barito Selatan

Parameter	Satuan	Nilai	Parameter	Satuan	Nilai
$A_0$	(1/a)	0-0,3	$A_{elo}$	(1/a)	0-5
$A_{VP}$	(1/a)	0-8	max EVP	(-)	0,05

Nilai 'a' adalah singkatan dari annum (tahun), Wittke-Gattermann (1998) memperkirakan nilai 'parameter A' setelah simulasi untuk mereproduksi hasil pengukuran in situ dari galeri eksplorasi di terowongan Freudenstein di Jerman, Ini adalah alasan utama bahwa nilai-nilai "A" ditunjukkan menunjukkan tabel lainnya (Tabel 6) digunakan untuk simulasi numerik di *Soil Test Facility* (Uji Tanah),

Keterangan 'd' adalah singkatan untuk hari, nilai tekanan *swelling* maksimum harus dimasukkan sebagai nilai positif dalam input model.

Tabel 6. Parameter model konstan oedometer

Parameter	Unit	Value	Parameter	Unit	Value	Parameter	Unit	Value
$\phi'$	(°)	35	$A_0$	(1/d)	0.1 <sup>6</sup>	$E_p, E_t$	(kPa)	4E + 06
$c'$	(kPa)	500	$A_{si}$	(1/d)	0	$K_{q,p}, K_{q,t}$	(%)	0.33
$\psi$	(°)	0	$A_{pi}$	(1/d)	0	$\nu_p, \nu_t$	(-)	0.25
$\sigma_{Ten}$	(kPa)	0	$A_{pi} \text{ max}$	(-)	0.005	$\sigma_{0,p}, \sigma_{0,t}$	(kPa)	-750
$G_{23}$	(kPa)	1.6E + 06	$\alpha$	(°)	0	Model ID	(-)	1

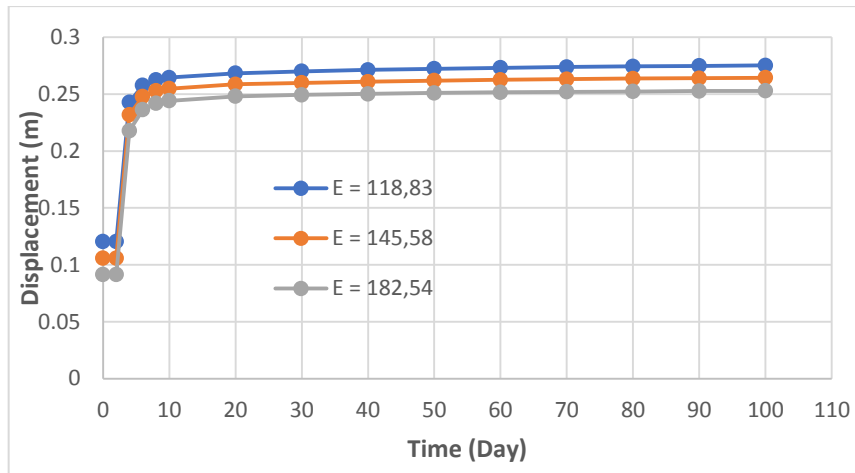
#### C.4 Pembahasan

Penelitian mengenai perilaku *swelling* pada saat ini di Indonesia masih kurang banyak diperhatikan, sementara pendekatan untuk analisis selalu menggunakan perilaku *plastis*. Perilaku (*swelling*) terjadi akibat adanya air, sehingga perilaku *swelling* di Indonesia seharusnya menjadi topik pembahasan yang menarik pada kasus pembuatan terowongan dan kasus stabilitas lereng di tambang terbuka. Pada penelitian ini dari hasil analisis XRD terhadap sample dari Kutai Kartanegara dan Barito Selatan ditemukan mineral *montmorillonite, kaolinit dan illite*. Mineral tersebut menjadikan parameter terjadi perilaku Swelling. Dari hasil penelitian maka parameter yang berpengaruh pada perilaku swelling yaitu Modulus Young, kohesi, sudut gesek dalam, *Plactic volumetric strain for plastic strain, Maximum swelling stress – normal dan maximum swelling stress – tangensial*.

Penelitian mengenai parameter perilaku swelling yang dilakukan pada penelitian ini, yaitu mensimulasikan terhadap parameter Modulus Young.. Pada penelitian ini didapatkan tiga kondisi Modulus Young sebagai berikut yaitu berturut-turut dengan nilai  $E = 118,83 \text{ MPa}, 154,58 \text{ MPa}, \text{ dan } 182,54 \text{ MPa}$  untuk mengetahui perilaku displacement di dinding terowongan (lihat Gambar 6).

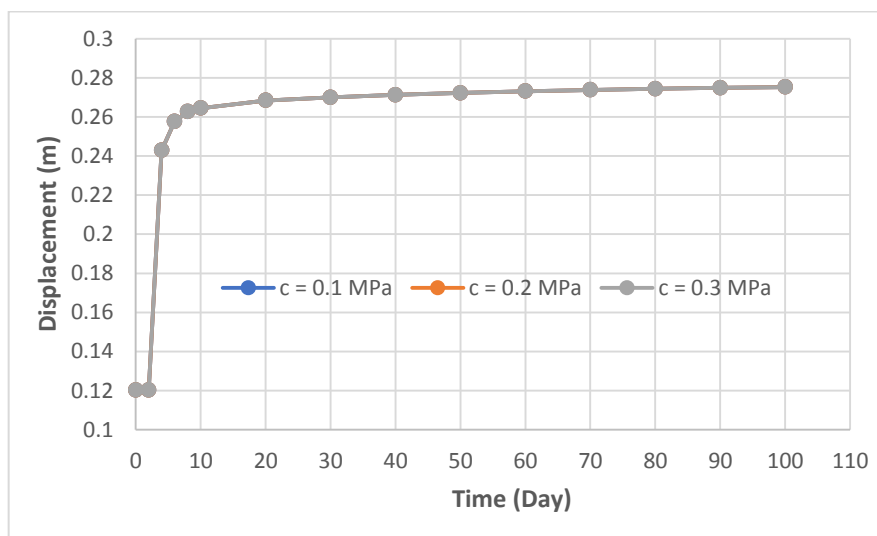
Hasil analisis terhadap Modulus Young pada Gambar 6, nilai Modulus Young mempengaruhi *displacement* pada saat berperilaku *swelling*. Dengan mensimulasikan nilai E maka didapatkan nilai *displacement* sebesar, untuk nilai  $E = 118,83 \text{ MPa}$  mengalami *displacement* sebesar 0.0250 m pada hari ke 2 (0,2178 m) dan hari ke 4 (0,2428 m). Pada kondisi tersebut menunjukkan bahwa perilaku *time swelling parameter for elastic strain* dan pada hari ke 4 merupakan kondisi perilaku *time swelling parameter for platic strain*, pada titik tersebut terjadi perubahan dari kondisi elastis menuju kondisi perilaku *plastis*. Pada hari ke 4 (0,24828 m) sampai dengan hari ke 20 (0,2683 m) merupakan kondisi perilaku *time swelling parameter*. Untuk nilai  $E = 145,58 \text{ MPa}$  mengalami *displacement* sebesar 0,0141 m pada hari ke 2 (0.2178 m) dan hari ke 4 (0,2319 m). Hal ini juga terjadi pada hari ke 4 (0,2319 m) sampai dengan hari ke 20 (0,2585 m). Untuk nilai  $E = 182,54 \text{ MPa}$  mengalami *displacement* sebesar 0,1264 m pada hari ke 2 (0,0914 m) dan hari ke 4 (0,2178

m). demikian seterusnya terjadi pada hari yang sama yaitu hari ke 4 (0,2178 m) sampai dengan hari ke 20 (0,2481 m) merupakan kondisi *time swelling parameter*.



Gambar 6. Perbandingan *displacement* terhadap nilai Modulus Young pada perilaku *swelling*

Selain mensimulasikan Modulus Young juga mensimulasikan pengaruh kohesi (*c*) dengan nilai adalah 0.1 MPa, 0.2 MPa dan 0.3 MPa. Hasil perhitungan dengan parameter kohesi seperti tertera pada Gambar 7. Untuk nilai *c* = 0,1 MPa mengalami *displacement* sebesar 0.1255 m pada hari ke 2 (0,1203 m) dan hari ke 4 (0,2428 m). Pada kondisi tersebut merupakan kondisi *time swelling parameter for elastic strain* dan pada hari ke 4 merupakan kondisi *time swelling parameter for plastic strain*, pada titik tersebut terjadi perubahan dari kondisi elastis menuju kondisi perilaku *plastis*. Pada hari ke 4 (0,24828 m) sampai dengan hari ke 20 (0,2683 m) merupakan kondisi *time swelling parameter*. Pada nilai *c* = 0,2 MPa dan *c* = 0,3 MPa nilai *displacement* tidak mengalami perubahan, sama dengan kondisi *c* = 0,1 MPa. Hal ini sesuai dengan teori tegangan – regangan. Pada saat kondisi volumetric strain pada penelitian membuktikan bahwa tidak mengalami perpindahan, dan yang terjadi adalah proses yang dihasilkan oleh mekanisme pergeseran dari hubungan antar butir mineral tersebut (geser micro) saja.



Gambar 7. Perbandingan *displacement* terhadap nilai kohesi pada perilaku *swelling*

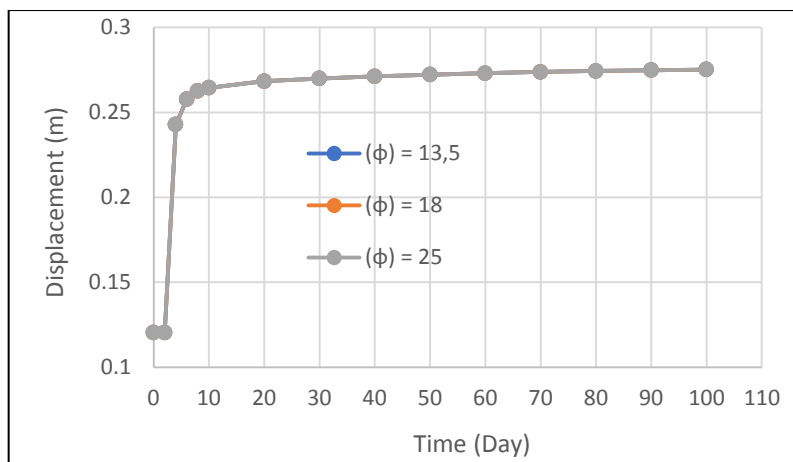
Pada penelitian ini juga meneliti terhadap pengaruh sudut gesek dalam ( $\phi$ ) yaitu nilai  $\phi$  yang disimulasikan ( $\phi$ ) = 13,5°, 18° dan 25°. Hasil perhitungan dapat dilihat pada Gambar 8. Berdasarkan grafik hasil analisis terhadap nilai sudut gesek dalam pada Gambar 8, dengan



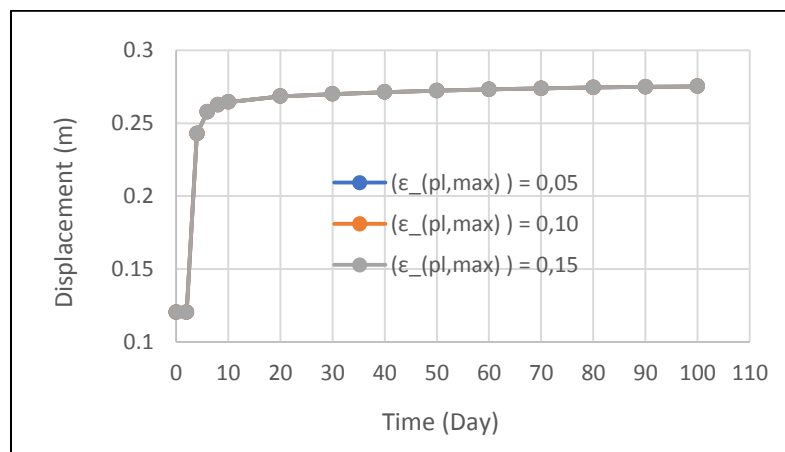
mensimulasikan sudut gesek dalam ( $\varphi$ ) maka didapatkan nilai *displacement*, untuk ( $\varphi$ ) =  $13,5^0$  mengalami *displacement* sebesar 0.1255 m pada hari ke 2 (0,1203 m) dan hari ke 4 (0,2428 m).

Pada kondisi tersebut merupakan kondisi *time swelling parameter for elastic strain* dan pada hari ke 4 merupakan kondisi *time swelling parameter for plastic strain*, pada titik tersebut terjadi perubahan dari kondisi elastis menuju kondisi perilaku *plastis*. Pada hari ke 4 (0,24828 m) sampai dengan hari ke 20 (0,2683 m) merupakan kondisi *time swelling parameter*. Pada nilai sudut gesek dalam ( $\varphi$ )  $18^0$  dan  $25^0$  nilai *displacement* tidak mengalami perubahan, sama dengan kondisi kohesi  $13,5^0$ . Hal ini sesuai dengan hubungan tegangan – regangan.

Pada penelitian juga meneliti pengaruh parameter *plactic volumetric strain for plastic strain* ( $\epsilon_{pl,max}$ ) yaitu 0,05, 0,10 dan 0,15. Adapun hasil perhitungan pengaruh paramater parameter *plactic volumetric strain for plastic strain* seperti pada Gambar 9



Gambar 8. Perbandingan *displacement* terhadap nilai sudut gesek dalam ( $\varphi$ ) pada perilaku *swelling*

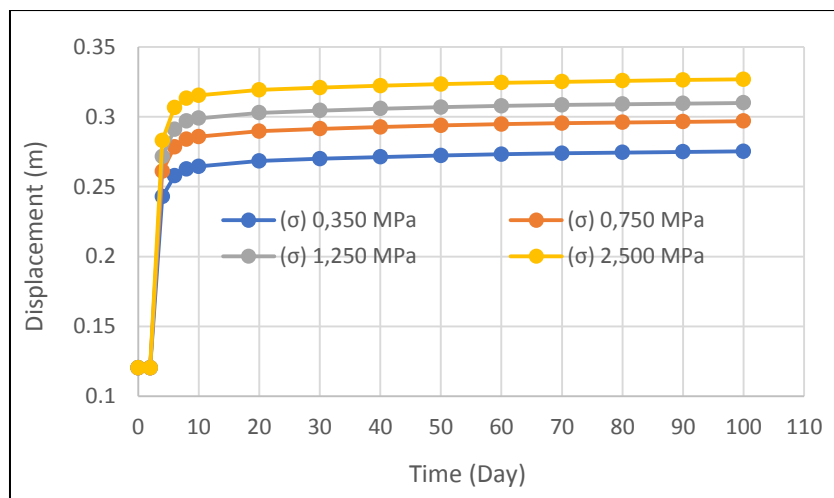


Gambar 9. Perbandingan *displacement* terhadap *plactic volumetric strain for plastic strain* ( $\epsilon_{pl,max}$ ) pada perilaku *swelling*

Berdasarkan hasil analisis (Lihat Gambar 9) pengaruh terhadap *plactic volumetric strain for plastic strain* ( $\epsilon_{pl,max}$ ) didapatkan nilai *displacement*, untuk nilai *plactic volumetric strain for plastic strain* ( $\epsilon_{pl,max}$ ) = 0,05 mengalami *displacement* sebesar 0.1255 m pada hari ke 2 (0,1203 m) dan hari ke 4 (0,2428 m). Sedang pada kondisi *plactic volumetric strain for plastic strain* ( $\epsilon_{pl,max}$ ) sebesar 0,10 dan 0,15 MPa nilai *displacement* tidak mengalami perubahan, sama dengan kondisi

*plastic volumetric strain for plastic strain* ( $\epsilon_{pl,max}$ ). Pada keadaan tersebut menunjukkan kondisi volumetric strain tidak mengalami perpindahan. Pada masalah *swelling* volumetric strain ini terjadi juga pada kondisi setelah batas elastis batu lempung terlampaui.

Pada analisis *Maximum swelling stress – normal* dan *maximum swelling stress – tangensial* ( $\sigma$ ) nilai yang disimulasikan yaitu (0,350) MPa, (0,750) MPa, (1,250) MPa dan (2,500) MPa. Berdasarkan grafik (lihat Gambar 10) hasil analisis terhadap *Maximum swelling stress – normal* dan *maximum swelling stress – tangensial* pada Gambar 10, dengan mensimulasikan nilai ( $\sigma$ ) maka didapatkan nilai *displacement* sebesar, untuk nilai ( $\sigma$ ) = 0,350 MPa mengalami *displacement* sebesar 0.1225 m pada hari ke 2 (0,1203 m) dan hari ke 4 (0,2428 m). Pada kondisi tersebut merupakan *time swelling parameter for elastic strain* dan pada hari ke 4 merupakan kondisi *time swelling parameter for plastic strain*, pada titik tersebut terjadi perubahan dari kondisi elastis menuju kondisi perilaku *plastis*. Pada hari ke 4 (0,24828 m) sampai dengan hari ke 20 (0,2684 m) merupakan kondisi *time swelling parameter*. Adapun untuk nilai ( $\sigma$ ) = 0,750 MPa, 1,250 MPa, dan 2,500 MPa mengalami *displacement* masing sebesar 0,1406 m pada hari ke 2 (0,1203 m) dan hari ke 4 (0,2609 m), untuk 1,250 Mpa adalah 0,1511 m pada hari ke 2 (0,1203 m) dan hari ke 4 (0,2714 m), untuk 2,500 Mpa sebesar 0,1627 m pada hari ke 2 (0,1203 m) dan hari ke 4 (0,2830 m). Pada kondisi tersebut merupakan *time swelling parameter for elastic strain* dan pada hari ke 4 merupakan kondisi *time swelling parameter for plastic strain*, pada titik tersebut terjadi perubahan dari kondisi elastis menuju kondisi perilaku *plastis*, masing-masing sebesar Pada hari ke 4 (0,2609 m) sampai dengan hari ke 20 (0,2897 m), hari ke 4 (0,2714 m) sampai dengan hari ke 20 (0,3028 m), ke 4 (0,2830 m) sampai dengan hari ke 20 (0,3192 m) merupakan kondisi *time swelling parameter*.



Gambar 10 Perbandingan *displacement* terhadap *Maximum swelling stress – normal* dan *maximum swelling stress – tangensial* pada perilaku *swelling*

**D. KESIMPULAN**

Pada perilaku *swelling* semakin besar nilai modulus young maka nilai displacementnya semakin kecil. Besar atau kecil nilai kohesi, sudut gesek dalam dan *tensile strength* pada perilaku *swelling* tidak mempengaruhi displacement hal ini dikarenakan pengaruh volumetric strain bukan gesekan (*shear*).

**UCAPAN TERIMAKASIH**

Ucapan terimakasih diberikan kepada Bapak Dr. Ir. Barlian Dwinagara, MT. yang telah membantu kepada penulis memberikan contoh batulempung dari daerah Kutai Kertanegara dan Barito Selatan untuk dijadikan inspirasi terhadap penelitian *Swelling* ini.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Anagnostou, G., 1993. *A model for swelling rock in tunnelling*. Swiss federal institute of technology, Zurich, Switzerland, *Journal of Rock Mechanics and Rock Engineering*, pp. 307-331.
- Dhanti, P.N.H., Prabawa, A.D., Laitupa, K., 2017. *Studi Kandungan Mineral Clay Pada Pembawa Lapisan Batubara Untuk Memprediksi Adanya Potensi Swelling Pada Lantai Tambang Batubara Bawah Tanah*. Padang; Proceeding Seminar Nasional Geomekanika IV Padang 26 Oktober 2017. hal 23-32.
- Grob, H. 1976. *Swelling and Heave in Swiss Tunnels*, Bull. Int. Assoc. Engng. Geol. 13, 55-60.
- Huder, J. & Amberg, G. (1970). *Quellung in Mergel, Opalinuston und Anhydrit*. Schweizerische Bauzeitung 43, 975-980
- Pusch, R. 2012. *Environmental Soil Properties and Behaviour, Swelling Clays, chapter 4*. CRC Press, Taylor & Francis Group, LLC: pp.133-161.
- S. Supriatna, Sukardi, dan E. Rustandi, Tahun 1995: *Peta Geologi Lembar Samarinda, Kalimantan, Skala 1:250.000*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi Bandung.
- Sikumbang, N., dan Heryanto, R., 1994. *Peta Geologi Lembar Banjarmasin, Skala 1:250.000*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi Bandung.
- White, Joe L., 1956. *Reaction of Molten Salt With Layer Lattice Silicates: in Clay and Clay Minerals*, Acad.Sci-Nat.Res.Council. pub 456, p. 133-146.
- Wittke-Gattermann, P., 1998. *Verfahren zur Berechnung von Tunnels in quellfähigem Gebirge und Kalibrierung an einem Versuchsbauwerk*. Geotechnik in Forschung und Praxis, WBI-PRINT 1, Verlag Glückauf, Essen

