

# OPTIMASI NILAI PERMEABILITAS DAN KOMPRESIBILITAS TANAH BERDASARKAN UJI OEDOMETER DAN TEORI KONSOLIDASI 1D TERZAGHI

William Wijaya<sup>1</sup>, Hansel Schaeffer Sumaji<sup>2</sup>, dan Luky Handoko<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Sipil, Universitas Atma Jaya Yogyakarta, Jl. Babarsari No. 44, Sleman  
e-mail: [william.wijaya@uajy.ac.id](mailto:william.wijaya@uajy.ac.id)

<sup>2</sup> Program Studi Teknik Sipil, Universitas Atma Jaya Yogyakarta, Jl. Babarsari No. 44, Sleman  
e-mail: [hanselschaeffer09@gmail.com](mailto:hanselschaeffer09@gmail.com)

<sup>3\*</sup>Program Studi Teknik Sipil, Universitas Atma Jaya Yogyakarta, Jl. Babarsari No. 44, Sleman  
e-mail: [luky.handoko@uajy.ac.id](mailto:luky.handoko@uajy.ac.id)

## ABSTRAK

Teori konsolidasi satu dimensi (1D) Terzaghi sering digunakan dalam perhitungan konsolidasi tanah, khususnya dalam menentukan penurunan tanah terhadap waktu. Teori ini menggunakan asumsi koefisien konsolidasi yang konstan. Namun, untuk tanah lempung dengan permeabilitas tinggi, seperti tanah reklamasi, pendekatan ini tidak sepenuhnya akurat. Hal ini disebabkan oleh perubahan dalam permeabilitas dan kompresibilitas tanah seiring waktu, yang tidak diperhitungkan dalam teori Terzaghi. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan nilai koefisien konsolidasi yang lebih akurat dengan memperhitungkan perubahan parameter tanah yang terjadi. Nilai koefisien diperoleh melalui pengujian laboratorium yang selanjutnya divalidasi dengan pendekatan numerik. Validasi dilakukan dengan mempertimbangkan tekanan air pori berlebih, angka permeabilitas, serta koefisien perubahan volume menggunakan metode analitik dan optimasi melalui teknik Particle Swarm Optimization (PSO) dengan metode back step calculation. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan pendekatan MATLAB dalam perhitungan koefisien konsolidasi memberikan hasil yang lebih akurat dibandingkan dengan metode tradisional seperti Casa Grande dan Taylor, terutama pada percobaan pertama dan kedua. Ketika hasil ini dibandingkan dengan data dari pengujian laboratorium, pendekatan ini terbukti memberikan prediksi penurunan yang lebih akurat. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa metode yang dilakukan mampu memberikan perhitungan konsolidasi yang lebih baik dan lebih cepat, khususnya untuk tanah dengan permeabilitas tinggi dan kondisi yang bervariasi, seperti tanah reklamasi.

**Kata kunci:** Koefisien Konsolidasi, Koefisien Permeabilitas, Optimasi, *Particle Swarm Optimization*, Metode Analitik dan Numerik.

## 1. PENDAHULUAN

Keterbatasan lahan mengakibatkan para ilmuwan meneliti cara penyelesaiannya. Salah satu penyelesaiannya adalah dengan melakukan perbaikan pada tanah dan reklamasi. Tanah reklamasi dapat berasal dari sedimentasi tanah maupun dari hasil limbah sedangkan proses perbaikan tanah dapat dilakukan dengan cara mengganti material atau penambahan zat addictive (Silveira et al., 2018). Akan tetapi, hal tersebut tetap akan mengakibatkan tanah mengalami konsolidasi.

Penurunan yang terjadi dapat dihitung dengan menentukan koefisien konsolidasi ( $C_v$ ). Koefisien konsolidasi didapatkan dengan melakukan pengujian eksperimen maupun numerik (Chai et al., 2012). Hasil dari pengujian eksperimen dapat ditentukan menggunakan metode Asaoka (Asaoka, 1977), Casa Grande (Casagrande, 1948) dan Taylor (Taylor, 1948). Tetapi, pada eksperimen di lapangan koefisien konsolidasi dapat berubah seiring berjalannya waktu dan berbeda nilai pada bagian atas dan tengah. Hal itu disebabkan karena adanya perubahan angka pori, permeabilitas dan faktor perubahan volume.

Beberapa penelitian telah dilakukan untuk menemukan koefisien konsolidasi. Beberapa metode yang digunakan dalam menentukan  $C_v$  di antaranya adalah metode Terzaghi, Casagrande, Taylor, *Inflection Point Method*, Analitik, Kecepatan, *Rectangular Hyperbola Fitting Method*, *Revised Logarithm of Time Fitting Method*, dan Asaoka. Tetapi belum ada metode yang digunakan untuk menentukan koefisien konsolidasi yang bervariasi yang disebabkan oleh nilai koefisien permabilitas dan koefisien perubahan volume yang bervariasi. Kelemahan dari pengujian eksperimen lainnya di antaranya membutuhkan biaya dan waktu yang besar untuk mendapatkan hasil yang akurat. (Ansari et al., 2014; Chai et al., 2012; Dienstmann et al., 2018; Dobak & Gaszyński, 2014; Lim et al., 2019; Olek, 2020).

Koefisien konsolidasi dapat dicari dengan cara numerik maupun analitik. Beberapa metode yang sering digunakan adalah Casa Grande dan Taylor. Sedangkan beberapa cara lainnya didapatkan dari Asaoka, Hyperbola dan campuran Asaoka dan hyperbola. Akan tetapi, Penggunaan metode Casa Grande dan Taylor memiliki konsep yang berbeda satu orang dengan yang lainnya. Jika menggunakan metode numerik maka hasil dari pengujian numerik harus di

validasikan dengan hasil pengujian laboratorium. Verifikasi tersebut bertujuan agar rumus numerik yang digunakan bisa mendapatkan hasil yang sama. Namun, pengujian numerik yang dilakukan tidak memikirkan optimasi pada angka permeabilitas dan angka pori sehingga hasil yang didapatkan hanya memiliki satu jawaban. Optimasi dapat dilakukan untuk mendapatkan nilai yang maksimum sehingga dapat meminimumkan kesalahan data yang terjadi di lapangan (Bharat & Sharma, 2011).

Penelitian ini bertujuan untuk menentukan nilai koefisien konsolidasi yang universal yang didapatkan dari pengujian laboratorium yang di validasikan dengan hasil numerik dengan mempertimbangkan tekanan air pori berlebih, angka permeabilitas, dan koefisien perubahan volume menggunakan metode analitik dan numerik (*Particle Swarm Optimization*) dengan metode *back step calculation*. Hal yang menjadi batasan adalah penginputan menggunakan metode *Particle Swarm Optimization* (PSO) dari nilai koefisien kompresibilitas, koefisien kemiringan permeabilitas dan koefisien permeabilitas. Kedua, penghitungan tekanan air pori akan dihitung secara analitik. Hasil dari optimasi tersebut akan diverifikasi dengan data tanah yang ada. Selanjutnya, perhitungan dilakukan secara mundur (*back step*) dan tanah dimodelkan secara homogen. Pengujian ini menggunakan software MATLAB 2019. Hasil akhir yang didapatkan dicek erornya menggunakan RMSE (*Root Mean Square Error*) sehingga jika hasil perhitungan RMSE didapati masih besar maka diulangi kembali hingga hasilnya mendekati.

## 2. METODE

Metode Terzaghi (1943) adalah metode dasar yang digunakan untuk menentukan koefisien konsolidasi tanah ( $C_v$ ) yang diambil dengan menggunakan metode analitik (Terzaghi, 1943). Menurut Lakkoju, dkk (2020) teori 1D konsolidasi sudah tidak dapat digunakan dikarenakan koefisien yang digunakan tidak mungkin (hanya tetap). Metode ini menggunakan rumus dasar pada persamaan 1.

$$\frac{du}{dt} = C_v \frac{du^2}{d^2z} \quad (1)$$

dengan  $u$  adalah tekanan air pori pada saat ini,  $z$  adalah kedalaman, dan  $x$  adalah bagian terkecil dari  $z$ . Persamaan Terzaghi menganggap bahwa angka pori, koefisien permeabilitas, dan juga koefisien perubahan volume tidak berubah di setiap waktu. Penurunan akibat konsolidasi dapat dicari dengan menggunakan persamaan 2 dan 3.

$$S = \frac{H}{1+e_0} C_c \text{Log} \frac{\sigma_0 + \Delta\sigma'}{\sigma_0} \quad (2)$$

$$S = m_v d_h \Delta\sigma' \quad (3)$$

di mana  $H$  adalah tebal spesimen tanah,  $e_0$  adalah angka pori awal,  $C_c$  adalah koefisien kompresibilitas,  $\sigma_0$  adalah tegangan awal,  $m_v$  adalah koefisien perubahan volume,  $d_h$  adalah tinggi specimen bagian terkecil yang telah dibagi oleh node dan  $\Delta\sigma'$  adalah tambahan tegangan.

Untuk metode analitik, tekanan air pori dapat dicari menggunakan persamaan 4.

$$u(z, t) = \frac{4}{\pi} \Delta\sigma \sum_{N=0}^{\infty} \left[ \frac{1}{2N+1} \sin \frac{(2N+1)\pi z}{2H} e^{-\frac{(2N+1)^2 \pi^2 C_v t}{4H^2}} \right] \quad (4)$$

di mana  $z$  adalah tinggi specimen pernode,  $H$  adalah tinggi specimen, dan  $N$  adalah bilangan real. Tekanan air pori yang bekerja pada awal konsolidasi adalah tekanan air pori berlebihan (*excess pore water pressure*) di mana pada awal terjadinya pembebanan butiran tanah tidak menahan tekanan tetapi air yang menahan tekanan. Sehingga tekanan air pori makin lama akan makin berkurang dan tekanan akan dibebani ke butiran tanah seiring berjalannya waktu.

Hubungan antara angka pori dengan log tegangan efektif telah diteliti oleh beberapa peneliti (Abbasi et al., 2007; Abeele, 1986; Lekha et al., 2003; Proskin et al., 2010; Tiwari & Ajmera, 2012; Yin & Feng, 2017). Pada percobaan yang dilakukan didapatkan nilai angka pori yang tinggi dan menurun seiring bertambahnya tegangan efektif. Dari grafik yang didapatkan dapat disimpulkan bahwa nilai hubungan antara angka pori dengan log tegangan efektif linier dan menurun seiring bertambahnya nilai tegangan efektif.

Hubungan antara angka pori dengan log koefisien permeabilitas telah diteliti oleh beberapa peneliti (Abbasi et al., 2007; Abeele, 1986; Horpibulsuk et al., 2011; Kaniraj & Gayathri, 2004; Lekha et al., 2003; Pane et al., 1983). Dari pengujian tersebut didapatkan nilai angka pori yang berbeda beda di setiap pengujiannya. Nilai angka pori akan semakin bertambah seiring meningkatnya nilai permeabilitas. Hasil dari penelitian tersebut didapatkan nilai angka pori akan linier dengan bertambahnya nilai koefisien permeabilitas.

Dari kedua hubungan tersebut didapatkan persamaan dalam menentukan angka permeabilitas yang dapat dilihat pada persamaan 5 (García-Ros & Alhama, 2020).

$$k = k_0 \frac{\sigma'_v}{\sigma'_v} \frac{C_c}{\sigma'_v} \quad (5)$$

Perhitungan dilakukan setelah mendapatkan koefisien permeabilitas adalah perubahan volume ( $m_v$ ) yang dapat dilihat pada persamaan 6.

$$m_v = \frac{0.434 \cdot C_c}{(1 + e_0) \sigma'_v} \quad (6)$$

### Persiapan Material

Jenis tanah yang digunakan adalah tanah hasil pengujian yang diambil dari jurnal pada tahun 2020 yang membahas tentang pengujian konsolidasi menggunakan Oedometer. Material properties dapat dilihat pada tabel 1 dan 2. Sedangkan untuk hasil pengujian konsolidasi pada pembebanan 25 kPa dan 50 kPa dapat dilihat pada gambar 1 dan 2.

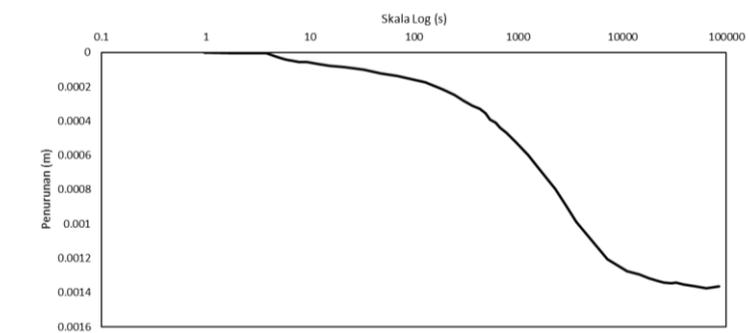
**Tabel 1. Karakteristik Tanah**

Angka Pori Awal ( $e_0$ )	Gravitas Khusus (G)	Kadar air (w)	Klasifikasi	Berat volume ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )
1.35	2.72	43.47	CH-MH	1.48

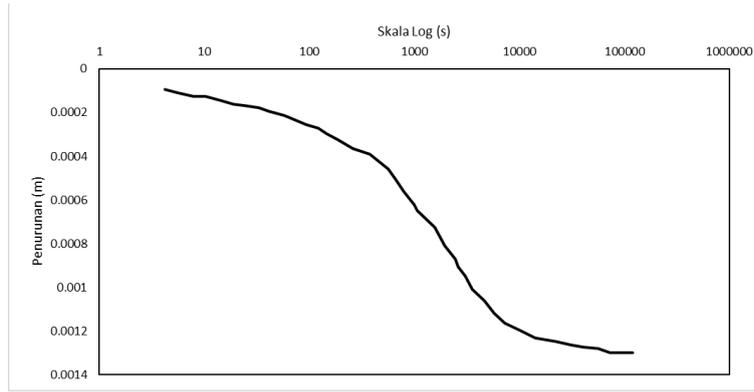
**Tabel 2. Batas Atterberg Tanah**

Batas batas		
Cair	Plastis	Susut
64.39	33.14	-

Pengujian yang dilakukan hanya pada pengujian ke 2 dan ke 3 yang didapatkan dari jurnal. Pengujian ini menggunakan beban awal 25 kPa dengan target beban akhir 50 kPa pada tahap ke 2. Sehingga angka pori akhir yang didapatkan pada pengujian ini 0,928 dan penambahan beban pada tahap ke-2 ini sebesar 25 kPa. Sedangkan pada tahap ke-3 beban awal yang diberikan sebesar 50 kPa dengan target beban akhir 100 kPa. Angka pori yang didapatkan menurun yaitu 0,776 dan penambahan beban pada tahap ke-3 ini sebesar 50 kPa.

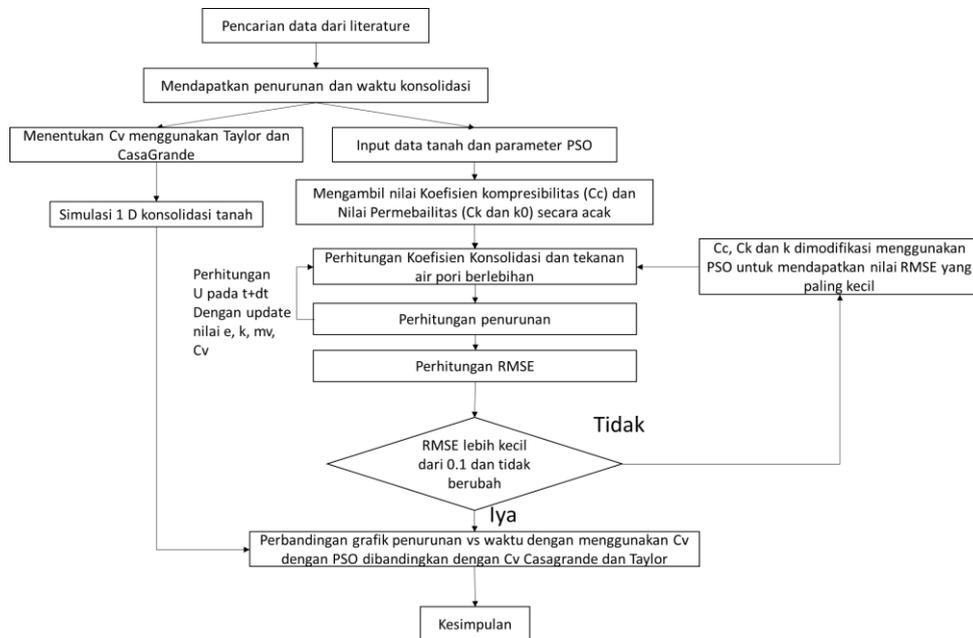


**Gambar 1. Penurunan Pembebanan 25 kPa (Garcia-Ros, 2020)**



**Gambar 2. Penurunan Pembebanan 50 kPa (Garcia-Ros, 2020)**

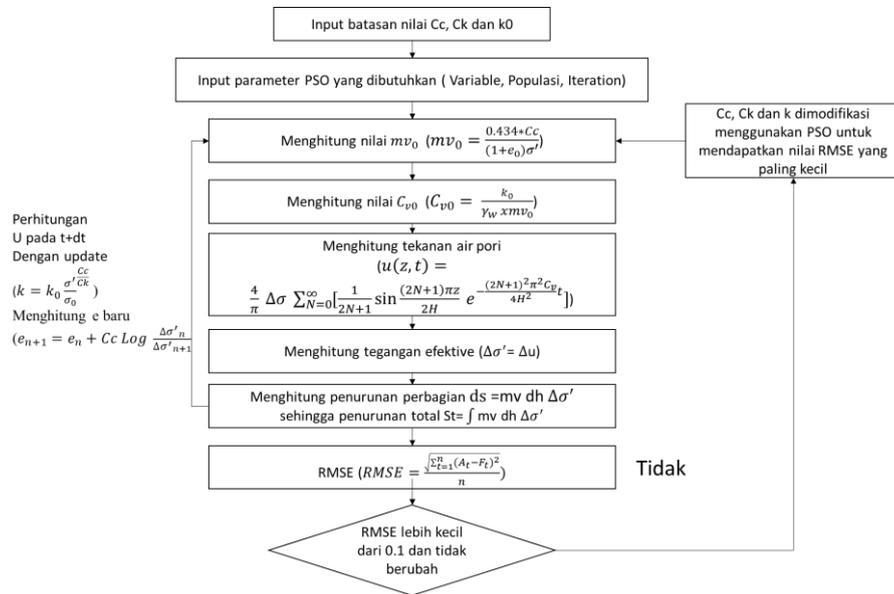
Perhitungan numerik dilakukan dengan mengoptimasi nilai koefisien kompresibilitas ( $C_c$ ), koefisien kemiringan permeabilitas ( $C_k$ ), dan koefisien permeabilitas awal ( $k_0$ ). Nilai tersebut memiliki batas atas dan batas bawah. Batas atas nilai  $C_c$  pada perhitungan pertama yaitu 1 sampai 1,2, sedangkan  $C_k$  adalah 1,5 hingga 3 dan  $k$  adalah  $10^{-9}$  hingga  $10^{-11}$ . Sedangkan batasan pada tahap kedua yaitu  $C_c$  pada perhitungan pertama yaitu 0.5 sampai 1.2, sedangkan  $C_k$  adalah 0.5 hingga 2 dan  $k$  adalah  $7 \times 10^{-11}$  hingga  $10^{-13}$ . Batasan nilai koefisien permeabilitas kedua diambil dari hasil perhitungan akhir pada koefisien permeabilitas yang pertama. Batasan ini akan menjadi batasan PSO dalam mencari nilai optimasi terbaik. PSO ini akan memiliki beberapa populasi dan pengulangan di mana pengulangan ini dilakukan sebanyak 50 kali. Populasi yang digunakan pada PSO ini sebanyak 20. Sehingga, 20 populasi ini akan menghitung sebanyak 50 kali dalam mencari nilai nilai yang ditentukan. Target utama adalah eror dari nilai tersebut (RMSE) maksimal 0.1 dan pengulangan yang terjadi harus 50 kali sehingga perhitungan dapat dihentikan dan hasil yang didapatkan dikatakan akurat. Pada saat penghitungan koefisien perubahan volume, koefisien permeabilitas, angka pori, tegangan efektif dan koefisien konsolidasi akan diupdate terus menerus hingga hasil yang maksimal. Untuk alur metode penelitian dapat dilihat pada gambar 3 dan 4.



**Gambar 3. Metode Penelitian**

Secara garis besar pengujian diawali dengan pencarian data dari literature. Data yang didapatkan adalah data pengujian Oedometer yaitu penurunan dan waktu konsolidasi. Setelah mendapatkan data tersebut akan dilakukan dua simulasi. Pertama, simulasi menggunakan  $C_v$  dari Taylor dan Casagrande. Di mana hasil  $C_v$  yang didapatkan disimulasikan 1D menggunakan Matlab dengan  $C_c$ ,  $C_k$ , dan  $k_0$  yang sama seperti yang akan dioptimalkan. Pada simulasi kedua yaitu simulasi menggunakan PSO atau optimasi. Hal pertama yang dilakukan adalah menentukan batasan-batasan untuk nilai  $C_c$ ,  $C_k$  dan  $k_0$ . Setelah menentukan nilai awal dari variable tersebut maka selanjutnya dilakukan perhitungan koefisien konsolidasi dan tekanan air pori berlebihan. Setelah mendapatkan data tersebut, perhitungan penurunan

dapat dilakukan. Perhitungan akan diulang selama waktu yang ditentukan dengan mengupdate nilai angka pori, koefisien permeabilitas, koefisien perubahan bentuk, dan koefisien konsolidasi. Setelah perhitungan selesai sesuai dengan waktu yang ditentukan, maka dihitung error dari perhitungan menggunakan RMSE. Setelah didapatkan nilai RMSE, perhitungan diulang ke perhitungan awal sebanyak iterasi yang dilakukan dengan menggunakan  $C_c$ ,  $C_k$  dan  $k_0$ , sehingga didapatkan nilai RMSE terkecil. Setelah iterasi selesai maka akan dilakukan perbandingan perhitungan penurunan antara Casagrande, Taylor dan PSO.

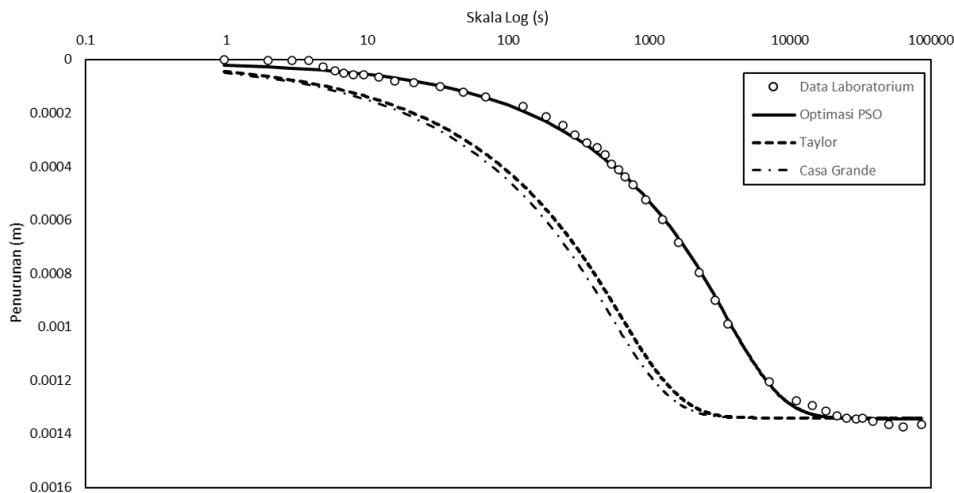


Gambar 4. Detail Optimasi PSO

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

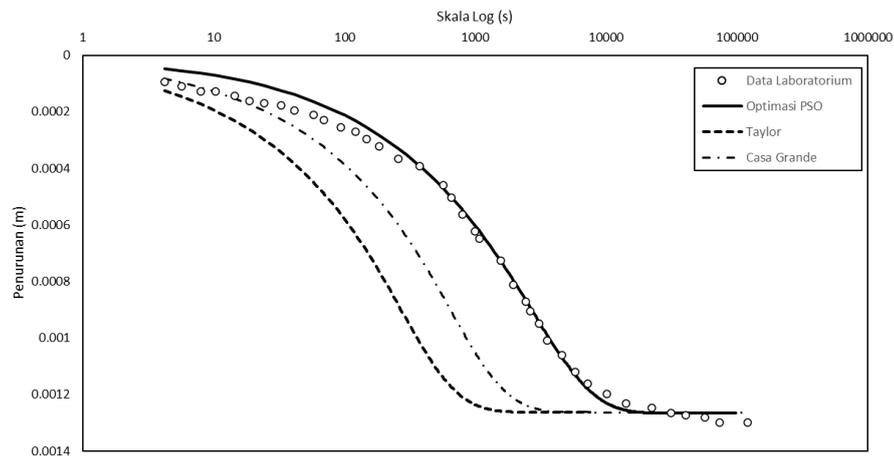
#### Perhitungan Penurunan

Perhitungan penurunan dilakukan dengan menggunakan PSO. Perhitungan ini dengan mempertimbangkan nilai  $C_v$  yang didapatkan menggunakan optimasi PSO, Casagrande dan Taylor. Perhitungan penurunan ini menggunakan  $C_c$  dan  $C_k$  yang sama di mana nilai  $C_c$  untuk step 2 sebesar 1,045 dan step 3 sebesar 0,985. Sedangkan untuk nilai  $C_k$  yang digunakan pada step 2 sebesar 2,618 dan step 3 sebesar 0,814. Beban awal pada step 2 sebesar 25 kPa di mana penambahan beban sebesar 25 kPa. Sedangkan pada step 3 pembebanan awal sebesar 50 kPa dengan penambahan beban bertahap hingga pembebanan akhir sebesar 100 kPa. Pada simulasi 1D Terzaghi didapatkan penurunan yang dapat dilihat pada gambar 5 dan 6



Gambar 5. Perbandingan hasil penurunan menggunakan koefisien konsolidasi metode Optimasi PSO, Taylor dan Casagrande pada Step 2

Pada perhitungan penurunan step 2 didapatkan nilai optimasi PSO mendekati data pengujian laboratorium. Nilai  $C_v$  pada optimasi PSO berbeda seiring dengan bertambahnya beban dan waktu sehingga nilai yang didapatkan berdekatan. Pada kondisi awal, penurunan laboratorium didapatkan sebesar 0 meter. Sedangkan untuk Optimasi PSO, Taylor, dan Casagrande berturut-turut sebesar 0,000022 meter, 0,000033 meter dan 0,000033 meter. Sedangkan pada penurunan akhir menunjukkan kesamaan yaitu sebesar 0,00136 meter. Pada saat waktu pembebanan telah diberikan secara bertahap hingga 50 kPa, penurunan konsolidasi yang terjadi pada metode Taylor dan Casagrande mengalami penurunan yang cepat dibandingkan dengan penurunan Optimasi. Dapat dilihat pada waktu ke 2 perbedaan dari metode tersebut sangat terlihat dan signifikan pada waktu 100 detik. Selisih kecepatan konstan antara Casagrande, Taylor dan Optimasi dapat dilihat pada waktu konsolidasi 1000 detik.

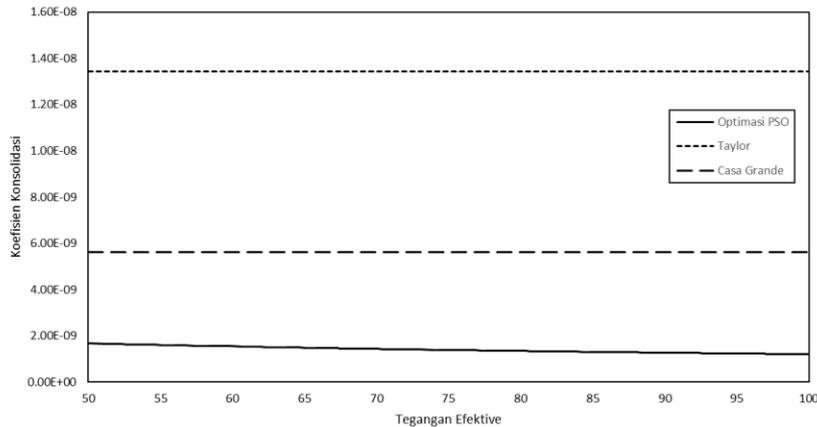


**Gambar 6. Perbandingan hasil penurunan menggunakan koefisien konsolidasi metode Optimasi PSO, Taylor dan Casagrande pada Step 3**

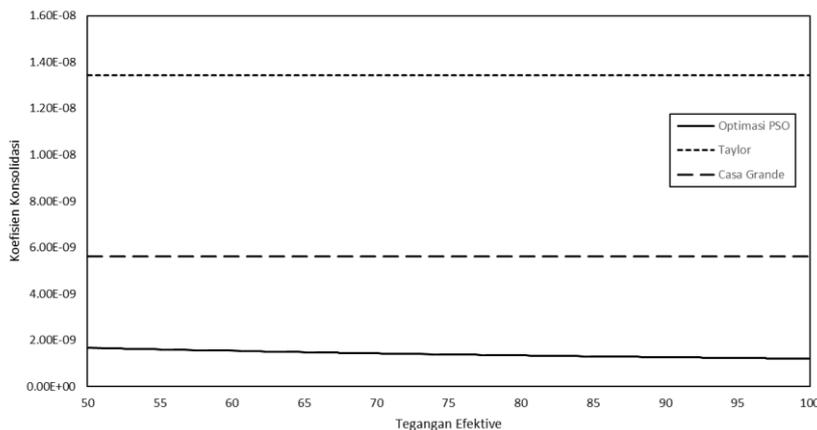
Pada perhitungan penurunan step 3, hasil yang ditunjukkan sedikit berbeda dengan step 2 di mana Optimasi PSO, Taylor, dan Casagrande berbeda dengan hasil pengujian laboratorium pada waktu 1 detik hingga 350 detik. Pada detik pertama hingga 350 didapatkan nilai Taylor dan Casagrande yang menjauh dari pengujian laboratorium sedangkan nilai dari Optimasi PSO mendekati terus menerus hingga pada detik ke 350 sudah menyerupai dengan pengujian laboratorium. Proses konsolidasi pada step 3 tercepat pada metode Taylor. Metode Taylor dan Casagrande memiliki perbedaan yang signifikan dengan pengujian laboratorium di mana konsolidasi Taylor selesai pada detik ke 850 dan Casagrande selesai pada detik ke 1500. Hasil penurunan akhir pada step ke-2 dan ke-3 sama dikarenakan nilai  $C_c$  dan  $C_k$  akhir yang digunakan dalam menghitung penurunan mirip dengan ketiga metode tersebut. Penurunan akhir yang didapatkan sebesar 0,00129 meter.

### Hubungan Koefisien Konsolidasi dan Tekanan Efektif

Pada gambar 7 didapatkan nilai koefisien konsolidasi pada metode Taylor dan Casagrande yang konstan. Di mana pada pembebanan 25 kPa, nilai koefisien konsolidasi Casagrande lebih tinggi dari pada Taylor dan lebih tinggi dari pada Optimasi PSO. Pada penambahan beban dari 25 kPa hingga 50 kPa, Optimasi PSO mengalami peningkatan nilai koefisien konsolidasi yang awalnya  $1,22 \times 10^{-9}$  menjadi  $1,58 \times 10^{-9}$ . Hal ini disebabkan oleh nilai koefisien kompresibilitas dibandingkan dengan koefisien kemiringan permeabilitas ( $C_c/C_k$ ) lebih kecil dari pada 1 sehingga nilai koefisien konsolidasi akan meningkan. Peningkatan pada pengujian step 2 tidak begitu signifikan dikarenakan hubungan linier antara angka pori dan koefisien permeabilitas dan angka pori dengan log regangan masih diset linier. Penambahan tegangan dan tebal sampel juga mempengaruhi perubahan nilai koefisien konsolidasi. Sampel yang digunakan dan penambahan tebal yang diberikan sangatlah kecil.



**Gambar 7. Koefisien Konsolidasi pada Step 3 dengan metode Optimasi PSO, Taylor dan Casa Grande**



**Gambar 8. Koefisien Konsolidasi pada Step 3 dengan metode Optimasi PSO, Taylor dan Casa Grande**

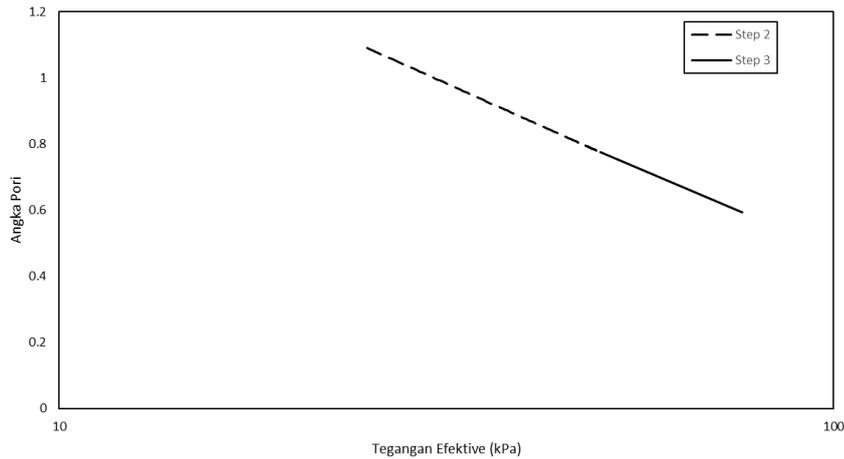
Pada gambar 8 didapatkan nilai yang berbeda dengan step 2 di mana nilai koefisien konsolidasi optimasi PSO semakin ditambah beban maka akan semakin kecil. Hal ini juga disebabkan oleh nilai koefisien kompresibilitas dan koefisien kemiringan permeabilitas lebih besar dari pada 1. Nilai koefisien konsolidasi awal pada Optimasi PSO sebesar  $1,67 \times 10^{-9}$  dan pada saat pembebanan mencapai 100 kPa sebesar  $1,2 \times 10^{-9}$ . Perbandingan koefisien konsolidasi ini dapat dilihat pada tabel 3.

**Tabel 3. Perbandingan Koefisien Konsolidasi**

Metode	Step 2		Step 3	
	Awal	Akhir	Awal	Akhir
Taylor	$8.27 \times 10^{-9}$	$8.27 \times 10^{-9}$	$1.34 \times 10^{-8}$	$1.34 \times 10^{-8}$
Casagrande	$9.73 \times 10^{-9}$	$9.73 \times 10^{-9}$	$5.61 \times 10^{-9}$	$5.61 \times 10^{-9}$
Optimasi PSO	$1.22 \times 10^{-9}$	$1.58 \times 10^{-9}$	$1.67 \times 10^{-9}$	$1.2 \times 10^{-9}$

**Hubungan Angka Pori dan Tekanan Efektif**

Pada gambar 9 dapat dilihat angka pori berkurang seiring dengan penambahan tegangan efektif. Pada step 2 angka pori awal sebesar 1,089 dan angka pori akhir sebesar 0,774. Pada step 3, angka pori awal sebesar 0,774 di mana nilai ini digunakan dari angka pori akhir pada pengujian step 2 sebesar 0.447. Hasil yang didapatkan pada step 2 dan 3 ini menunjukkan bahwa teori mengenai hubungan angka pori dan tekanan efektif sesuai jika divalidasikan dengan pengujian-pengujian sebelumnya.



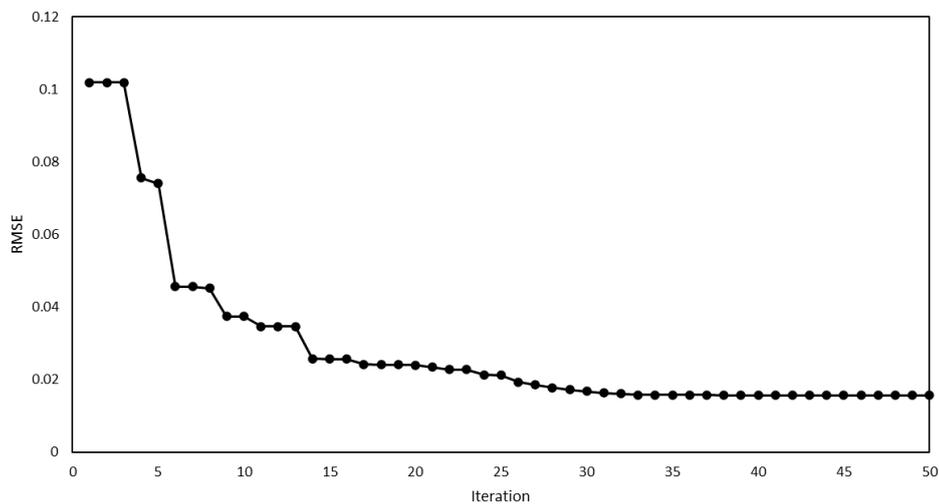
**Gambar 9. Hubungan Tekanan Efektive dan Log Angka Pori**

### Hubungan Angka Pori dan Koefisien Permeabilitas

Pada gambar 10 dapat dilihat bahwa angka pori akan berkurang dengan seiringnya koefisien permeabilitas yang mengecil. Koefisien permeabilitas awal pada step 2 sebesar  $1,04 \times 10^{-10}$  m/s dengan angka pori sebesar 1,089 dan koefisien permeabilitas akhir sebesar  $7,92 \times 10^{-11}$  m/s dengan angka pori akhir sebesar 0,774. Nilai koefisien akhir permeabilitas ini digunakan pada percobaan step 3 di mana nilai koefisien permeabilitas dan angka pori awal step 3 sama dengan koefisien permeabilitas dan angka pori akhir. Hasil akhir yang didapatkan adalah koefisien permeabilitas sebesar  $3,42 \times 10^{-11}$  m/s dengan angka pori akhir 0,447. Dari hasil percobaan didapatkan kesamaan pada step 2 dan 3 dengan teori mengenai hubungan angka pori dan koefisien permeabilitas sesuai jika divalidasikan dengan pengujian-pengujian sebelumnya.

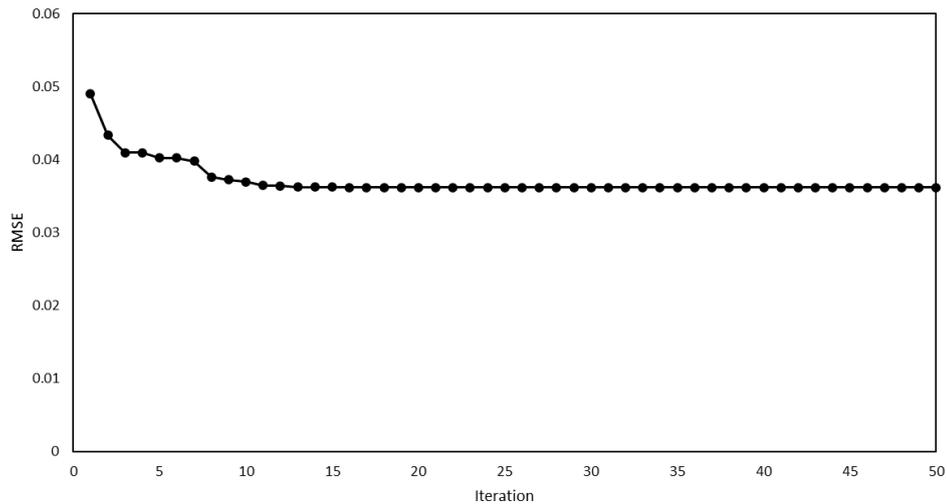
### Root Mean Square Error (RMSE)

Hasil *Root Mean Square Error* mengalami perbedaan pada step 2 dan step 3. Pada step 2 didapatkan RMSE sebesar 0,0156 sedangkan pada step 3 sebesar 0,0361. RMSE total yang dihitung pada setiap step sebanyak 1000 data. 1000 data tersebut diseleksi menjadi 50 data terbaik. 50 data tersebut dapat dilihat pada gambar 10 dan 11.



**Gambar 10. Perhitungan RMSE Pada Step 2**

Pada step 2 didapatkan nilai RMSE awal sebesar 0,1018. RMSE terus berkurang hingga RMSE maksimal yang didapatkan adalah 0,0156. RMSE maksimal pada perhitungan ini dapat diambil dari perhitungan ke-33 di mana RMSE ini akan konstan hingga perhitungan ke 50. Sedangkan pada step 3 didapatkan nilai RMSE awal sebesar 0,04901 dan RMSE maksimum pada percobaan ini sebesar 0,0361 di mana nilai ini didapatkan pada perhitungan terbaik ke-16.



**Gambar 11. Perhitungan RMSE Pada Step 3**

#### 4. KESIMPULAN

Metode optimasi PSO digunakan pada penelitian ini untuk mendapatkan nilai koefisien kompresibilitas, koefisien kemiringan permeabilitas, dan koefisien permeabilitas awal yang digunakan sebagai parameter untuk mendapatkan nilai koefisien konsolidasi yang bervariasi selama waktu terjadinya proses konsolidasi.

Metode Optimasi digunakan untuk menggantikan metode grafis dalam menentukan parameter konsolidasi. Dengan metode Optimasi, parameter konsolidasi yang didapatkan bervariasi dibandingkan dengan metode Taylor dan Casagrande. Hasil *back analysis* menunjukkan bahwa parameter yang digunakan dari hasil optimasi lebih mendekati hasil laboratorium dibandingkan dengan metode Taylor dan Casagrande.

#### 5. DAFTAR PUSTAKA DAN PENULIS PUSTAKA

- Abbasi, N., Rahimi, H., Javadi, A. A., & Fagher, A. (2007). Finite difference approach for consolidation with variable compressibility and permeability. *Computers and Geotechnics*, *34*(1), 41–52. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2006.09.003>
- Abeele, W. V. (1986). The influence of bentonite on the permeability of sandy silts. *Nuclear and Chemical Waste Management*, *6*(1), 81–88. [https://doi.org/10.1016/0191-815X\(86\)90091-4](https://doi.org/10.1016/0191-815X(86)90091-4)
- Ansari, Y., Merifield, R., & Sheng, D. (2014). A piezocone dissipation test interpretation method for hydraulic conductivity of soft clays. *Soils and Foundations*, *54*(6), 1104–1116. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2014.11.006>
- Asaoka, A. (1977). Observational Procedure of Settlement Prediction. *Chemical Pharmaceutical Bulletin*, *57*(534), 364–370. <http://www.mendeley.com/research/geology-volcanic-history-eruptive-style-yakedake-volcano-group-central-japan/>
- Bharat, T. V., & Sharma, J. (2011). Prediction of Compression and Permeability Characteristics of Mine Tailings Using Natural Computation and Large-Strain Consolidation Framework. *Geo-Frontiers*, 1081–1090.
- Casagrande, A. (1948). *Die Araometer-Methode zur Bestimmung der Korn . verteilung von Boden und anderen Materialien*.
- Chai, J., Sheng, D., Carter, J. P., & Zhu, H. (2012). Coefficient of consolidation from non-standard piezocone dissipation curves. *Computers and Geotechnics*, *41*, 13–22. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2011.11.005>
- Dienstmann, G., Schnaid, F., Maghous, S., & DeJong, J. (2018). Piezocone Penetration Rate Effects in Transient Gold Tailings. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, *144*(2), 04017116. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0001822](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0001822)
- Dobak, P., & Gaszyński, J. (2014). Evaluation of soil permeability from consolidation analysis based on terzaghi's and biot's theories. *Geological Quarterly*, *59*(2), 373–381. <https://doi.org/10.7306/gq.1197>
- García-Ros, G., & Alhama, I. (2020). Method to determine the constitutive permeability parameters of non-linear consolidation models by means of the oedometer test. *Mathematics*, *8*(12), 1–19.

<https://doi.org/10.3390/math8122237>

- Horpibulsuk, S., Yangsukkaseam, N., Chinkulkijniwat, A., & Du, Y. J. (2011). Compressibility and permeability of Bangkok clay compared with kaolinite and bentonite. *Applied Clay Science*, 52(1–2), 150–159. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2011.02.014>
- Kaniraj, S. R., & Gayathri, V. (2004). Permeability and Consolidation Characteristics of Compacted Fly Ash. *Journal of Energy Engineering*, 130(1), 18–43. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9402\(2004\)130:1\(18\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9402(2004)130:1(18))
- Lekha, K. R., Krishnaswamy, N. R., & Basak, P. (2003). and Compressibility. *Water Resources*, November, 1001–1009.
- Lim, Y. X., Tan, S. A., & Phoon, K. K. (2019). Interpretation of horizontal permeability from piezocone dissipation tests in soft clays. *Computers and Geotechnics*, 107(November 2017), 189–20.