

Pengembangan Teori Tekanan Lateral Aktif pada Dinding Penahan Tanah Menggunakan Metode Elemen Hingga

Ziyan Hizbulmalik¹, Aswin Lim²

^{1,2} Program Studi Magister Teknik Sipil, Universitas Katolik Parahyangan
Email: hizbulmalik.ziyan@gmail.com, aswinlim@unpar.ac.id

ABSTRAK

Estimasi nilai suatu tekanan tanah lateral yang bekerja pada dinding penahan yang kaku sangat penting dalam desain bangunan struktur geoteknik. Berbagai teori telah dikembangkan untuk menghitung tekanan tanah lateral, dengan metode, persamaan dan asumsinya tersendiri. Namun, tidak satu pun dari penelitian di atas yang mempertimbangkan persamaan tekanan tanah lateral berdasarkan metode elemen hingga. Pada penelitian ini digunakan metode konvensional dan metode elemen hingga untuk mengetahui besaran tekanan tanah lateral aktif yang terjadi pada dinding penahan tanah. Diusulkan dua persamaan tekanan tanah lateral aktif berdasarkan metode elemen hingga, dimana persamaan pertama berlaku dari awal hingga $\frac{3}{4}$ kedalaman dinding penahan tanah dan persamaan kedua berlaku dari $\frac{3}{4}$ kedalaman hingga akhir dinding penahan tanah. Studi parametrik juga dilakukan untuk mengetahui respon distribusi tekanan tanah lateral aktif terhadap berbagai parameter. Dari hasil analisis yang telah dilakukan, ketika nilai sudut geser dalam bertambah, maka tekanan tanah lateral aktif yang bekerja pada dinding penahan tanah berkurang. Sebaliknya bila nilai berat isi tanah bertambah, maka tekanan tanah lateral aktif yang bekerja pada dinding penahan tanah bertambah.

Kata Kunci: *dinding penahan tanah, tekanan tanah lateral aktif, FEM 2D*

ABSTRACT

Estimating the value of lateral earth pressure acting on a rigid retaining wall is very important in the design of geotechnical structures. Various theories have been developed to calculate lateral earth pressure, each with its own methodologies, equations, and assumptions. However, none of the studies above considered the lateral earth pressure equation based on the finite element method. In this study, conventional methods and finite element methods are used to determine the amount of active lateral earth pressure that occurred in the retaining wall. Two finite element method-based equation of active lateral earth pressure are proposed, where the first equation is applicable from the start to $\frac{3}{4}$ depth of the retaining wall and the second equation is applicable from $\frac{3}{4}$ depth to the end of the retaining wall. Parametric experiments were also conducted to determine the active lateral earth pressure distribution's response to various parameters. From the analyses, it was discovered that as the internal friction angle increases, the active lateral earth pressure decreases. Conversely, as the unit weight of soil increases, the active lateral earth pressure increases.

Key words: *earth retaining wall, active lateral earth pressure, FEM 2D*

Submitted:	Reviewed:	Revised:	Published:
24 Februari 2025	18 Juni 2025	28 Juli 2025	01 Agustus 2025

PENDAHULUAN

Kekhawatiran utama dalam analisis suatu desain dinding penahan tanah adalah penentuan nilai dan distribusi tekanan tanah lateral aktif dan pasif. Dalam permasalahan dinding penahan tanah, tekanan tanah lateral yang terjadi pada dinding penahan tanah sangat berpengaruh terhadap kegagalan struktur dinding penahan tanah. Estimasi nilai suatu tekanan tanah lateral yang bekerja pada dinding penahan yang kaku sangat penting dalam analisis dinding penahan tanah dan selanjutnya dalam desain bangunan strukturnya.

Secara umum, teori konvensional dari Coulomb dan Rankine masih sering digunakan oleh para ahli Teknik Sipil secara tradisional untuk menghitung tekanan tanah lateral aktif. Keduanya berasumsi bahwa distribusi tekanan tanah aktif yang

diberikan pada dinding berbentuk segitiga. Hingga saat ini, berbagai penelitian telah dilakukan untuk menentukan tekanan tanah lateral terhadap dinding penahan tanah. Diantaranya Wang (2000) dan Wang et al, (2005), mengusulkan metode untuk menghitung tekanan aktif lateral pada dinding penahan tanah berdasarkan teori Coulomb. Kemudian Lin (Lin, 2015), menggunakan metode analisis irisan (*slice analysis*) untuk menghitung tekanan tanah lateral yang bekerja pada dinding penahan tanah.

Lancellotta (2002), mengusulkan solusi untuk koefisien tekanan tanah aktif dan pasif untuk dinding berdasarkan analisis batas bawah (*lower bound analysis*). Kemudian Caquot dan Kerisel (1994), menggunakan tabel dan grafik yang telah

diusulkan untuk menentukan tekanan tanah lateral pasif.

Paik dan Salgado (2003), mempertimbangkan efek lengkung (*arching effect*) yang terjadi pada tanah saat menghitung tekanan tanah lateral. Begitu juga dengan Goel dan Patra (2008), yang merupakan pengembangan dari teori Paik dan Salgado (2003) juga mempertimbangkan efek lengkung tanah ketika menghitung tekanan tanah lateral. Kedua teori tersebut mempertimbangkan bentuk melingkar dan parabola untuk arah tekanan utama minor (*trajectory of minor principal stresses*). Asumsi dari kedua teori tersebut adalah kemiringan bidang gelincir dianggap sama dengan permukaan bidang gelincir Rankine untuk dinding halus ($\pi/4 + \phi/2$). Juga terbatas pada tanah non kohesif dan tidak ada beban tambahan pada tanah timbunannya.

Dalvi dan Pise (2012), Zhou (2018), Li dan Wang (2014) serta Nadukuru dan Michalowski (2012), menghadirkan rumus untuk menghitung tekanan tanah lateral pada dinding dengan mempertimbangkan efek lengkungan (*arching effects*). Distribusi tekanan tanah aktif yang akurat memungkinkan desain dinding penahan yang efisien sehingga mengurangi kemungkinan desain dinding berlebih atau kurang. Desain dinding penahan yang berlebihan akan menyebabkan pemborosan material konstruksi, sedangkan desain yang kurang akan menyebabkan risiko kegagalan yang lebih tinggi. Oleh karena itu, diperlukan penentuan teori yang paling akurat untuk digunakan dalam desain dinding penahan tanah. Berbagai teori tersedia untuk digunakan dalam desain dinding penahan. Namun, tidak satu pun dari penelitian di atas yang mempertimbangkan persamaan tekanan tanah lateral berdasarkan metode elemen hingga. Metode elemen hingga merupakan suatu pendekatan numerik yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan mekanika dan permasalahan lainnya. Pada metode elemen hingga, solusi suatu masalah dipecahkan dengan membagi suatu sistem menjadi elemen-elemen yang lebih kecil (elemen-elemen hingga). Metode elemen hingga memberikan solusi pada tiap elemen lebih sederhana berdasarkan konsep energi (Rahardjo & Alvi, 2019).

Dalam penelitian ini, serangkaian studi parametrik dilakukan untuk membahas pengaruh timbunan terhadap parameter yang mempengaruhi tekanan tanah lateral, diantaranya adalah terhadap sudut geser dalam dan berat isi tanah. Kemudian dilakukan analisa pada berbagai macam teori tekanan tanah lateral berdasarkan metode konvensional dan dimodelkan dalam program

numerik berbasis metode elemen hingga. Lalu mengusulkan suatu persamaan untuk menghitung tekanan tanah lateral aktif yang bekerja pada dinding penahan tanah berdasarkan metode elemen hingga.

Tekanan Tanah Lateral

Untuk kajian pada tekanan tanah lateral dengan metode konvensional, rumus untuk tekanan tanah lateral bisa menjadi rumit karena perlu mempertimbangkan berbagai faktor seperti sifat tanah, geometri dinding, dan juga kondisi batas. Lebih lanjut, Keshavarz dan Ebrahimi (Keshavarz & Ebrahimi, 2016), menjelaskan bahwa berbagai metode telah dikembangkan untuk menghitung tekanan tanah lateral, antara lain metode kesetimbangan batas, metode karakteristik tegangan, metode *slip line*, dan metode numerik. Setiap metode memiliki seperangkat persamaan dan asumsinya sendiri yang berkontribusi pada kompleksitas rumus secara keseluruhan. Sehingga kompleksitas formula tekanan tanah lateral muncul dari kebutuhan untuk mempertimbangkan banyak faktor dan penggunaan metode yang berbeda untuk menghitung distribusi tekanan tanah lateral. Maka dari itu, pada penelitian ini menggunakan teori tekanan tanah lateral berdasarkan metode Rankine (Das & Sobhan, 2018), Coulomb (Das & Sobhan, 2018), Lancellotta (Lancellotta, 2002), Paik dan Salgado (Paik & Salgado, 2003), Zhou (Zhou, 2018) dan Zhou, et al, (Zhou, et al, 2016).

Rankine memformulasikan tekanan lateral aktif seperti yang disajikan pada persamaan 1. Dalam menentukan nilai tekanan tanah lateral, Rankine berasumsi bahwa kondisi tanah homogen dan isotropis, tanah non kohesif, dinding penahan tanah pada kondisi vertical, kemudian tidak ada gesekan antara tanah dan dinding. (Das & Sobhan, 2018).

$$K_A = \frac{1-\sin\phi}{1+\sin\phi} \quad \dots (1)$$

Dengan:

$$\phi = \text{sudut geser dalam}$$

Teori Coulomb berasumsi bahwa kondisi tanah homogen dan isotropis, kemudian ada gesekan antara dinding dan tanah. (Das & Sobhan, 2018). Coulomb memformulasikan tekanan lateral aktif seperti yang disajikan pada persamaan 2.

$$K_A = \frac{\sin^2(\beta+\phi')}{\sin^2\beta \sin(\beta-\delta') \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi'+\delta')\sin(\phi'-\alpha)}{\sin(\beta-\delta')\sin(\alpha-\beta)}} \right]^2} \quad \dots (2)$$

Dengan:

$$\phi = \text{sudut geser dalam}$$

$$\begin{aligned}\beta &= \text{kemiringan dinding} \\ \delta' &= \text{gesekan dinding dengan tanah} \\ \alpha &= \text{kemiringan tanah dibelakang dinding}\end{aligned}$$

Lancellotta menentukan nilai tekanan tanah lateral berdasarkan teorema plastisitas batas bawah, mempertimbangkan gesekan antara dinding dan tanah, mempertimbangkan asumsi rotasi kecil, dimana pergeseran pusat lingkaran Mohr berkaitan dengan rotasi ke arah utama. Persamaan dari Lancellotta seperti yang ditunjukkan pada persamaan, juga menjelaskan perubahan arah utama melintasi diskontinuitas dan pergeseran pusat lingkaran tegangan. (Lancellotta, 2002).

$$K_A = \left[\frac{\cos\delta}{1+\sin\phi'} (\cos\delta - \sqrt{\sin^2\phi' - \sin^2\delta}) \right] e^{-2\theta\tan\phi'} \quad \dots (3)$$

Dimana,

$$2\theta = \sin^{-1} \left(\frac{\sin\delta}{\sin\phi'} \right) \quad \dots (4)$$

Dengan:

$$\begin{aligned}\phi &= \text{sudut geser dalam} \\ \delta &= \text{sudut gesekan dinding}\end{aligned}$$

Paik dan Salgado menentukan formula baru untuk menghitung tekanan tanah lateral aktif pada dinding penahan tanah yang digambarkan secara horizontal menjauh dari tanah diusulkan dengan mempertimbangkan efek lengkung dalam massa tanah yang dipertahankan. Formula yang dirumuskan ini menjelaskan efek nilai sudut geser dalam (ϕ) dan sudut geser aratan dinding dengan tanah (δ) pada tegangan vertikal pada kedalaman z di tanah. Dalam penelitian yang telah dilakukan, asumsi penyederhanaan yang dibuat oleh Coulomb bahwa bidang gelincir untuk dinding kaku translasi adalah plane dan kemiringan pada sudut $45^\circ + \phi/2$ ke arah horizontal digunakan untuk menghitung tekanan tanah lateral aktif pada dinding. Namun, berbeda dengan teori Coulomb, pertimbangan penuh diambil dari efek lengkung. Paik dan Salgado memformulasikan tekanan lateral aktif seperti yang disajikan pada persamaan (5). (Paik & Salgado, 2003).

$$K_A = \frac{\sigma_{ahw}}{\sigma_v} = \frac{3(N\cos^2\theta + \sin^2\theta)}{3N - (N-1)\cos^2\theta} \quad \dots (5)$$

Dimana,

$$N = \frac{1+\sin\phi}{1-\sin\phi} \quad \dots (6)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left[\frac{(N-1) + \sqrt{(N-1)^2 - 4N\tan^2\delta}}{2\tan\delta} \right] \quad \dots (7)$$

Dengan:

$$\begin{aligned}\phi &= \text{sudut geser dalam} \\ \delta &= \text{sudut gesekan dinding}\end{aligned}$$

Dalam merumuskan tekanan tanah lateral, Zhou berasumsi bahwa: (a) bahan timbunan tidak

kohesif, isotropik dan homogen; (b) nilai tegangan utama mayor atau minor dalam elemen datar diferensial pada kedalaman berapa pun konstan; (c) kekuatan geser timbunan massa *the sliding back fill* memenuhi kriteria kegagalan Mohr-Coulomb; (d) massa *the sliding back fill* berada dalam keadaan kesetimbangan batas aktif karena pergeseran dan translasi dinding yang cukup; (e) bidang keruntuhan adalah bidang; (f) lintasan tekanan utama minor dalam massa timbunan geser pada kedalaman berapa pun adalah lengkungan parabola. (Zhou, et al, 2016). Zhou memformulasikan tekanan lateral aktif seperti yang disajikan pada persamaan 8.

$$K_{awn} = \frac{\sigma_w}{\sigma_v} = \frac{\frac{2\sin\theta}{1-\sin\theta} \sin^2 \left(\frac{1}{2} \arcsin \frac{\sin\delta}{\sin\phi} - \frac{\delta}{2} \right) + 1}{\frac{2\sin\theta}{1-\sin\theta} \left(\frac{1}{2} \arcsin \frac{\sin\delta}{\sin\phi} - \frac{\delta}{2} \right) \cot \left(\frac{1}{2} \arcsin \frac{\sin\delta}{\sin\phi} - \frac{\delta}{2} \right) + 1} \quad \dots (8)$$

Karena,

$$\lim_{\delta \rightarrow 0} \left(\frac{1}{2} \arcsin \frac{\sin\delta}{\sin\phi} - \frac{\delta}{2} \right) = 0 \quad \dots (9)$$

Dan,

$$\lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\frac{1}{2} \arcsin \frac{\sin\delta}{\sin\phi} - \frac{\delta}{2}}{\tan \left(\frac{1}{2} \arcsin \frac{\sin\delta}{\sin\phi} - \frac{\delta}{2} \right)} = 1 \quad \dots (10)$$

Maka,

$$K_{awn}|_{\delta=0} = \frac{1-\sin\phi}{1+\sin\phi} = K_A \quad \dots (11)$$

Dengan:

$$\begin{aligned}\phi &= \text{sudut geser dalam} \\ \delta &= \text{sudut gesekan dinding}\end{aligned}$$

Zhou menentukan nilai tekanan tanah lateral berdasarkan asumsi: (a) timbunan non kohesif; (b) homogen; (c) isotropik; (d) berada dalam keadaan kesetimbangan batas aktif karena pergeseran dan pergeseran dinding yang cukup di bawah gaya bumi aktif. Zhou [15] memformulasikan tekanan lateral aktif seperti yang disajikan pada persamaan 12. (Zhou, 2018).

$$K_a = \frac{\sigma_a}{\gamma z} = \frac{(\cos\delta - \sqrt{\cos^2\delta - \cos^2\theta})\cos\beta}{\cos\beta + \sqrt{\cos^2\delta - \cos^2\theta}(\delta + 2\eta - \beta) + \sin\delta \sin(\delta + 2\eta - \beta) + 1} \quad \dots (12)$$

Dengan:

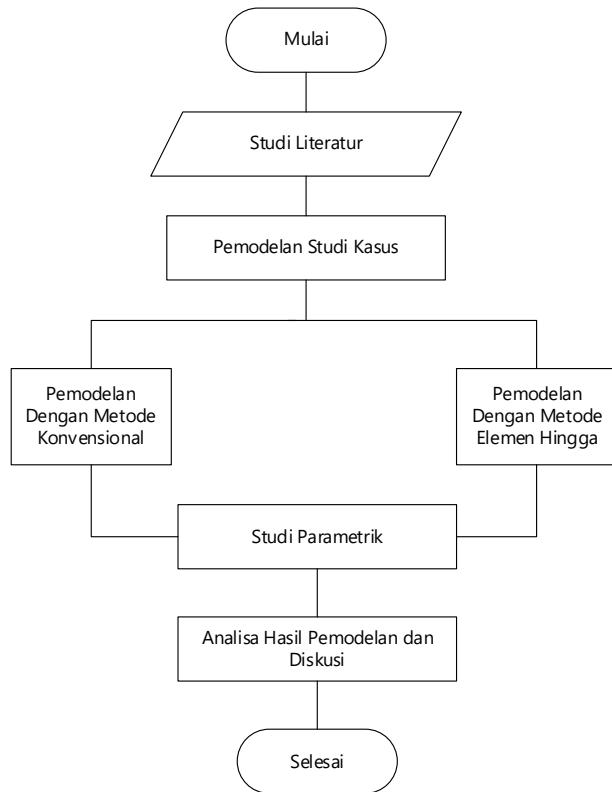
$$\begin{aligned}\phi &= \text{sudut geser dalam timbunan} \\ \delta &= \text{sudut gesekan dinding} \\ \beta &= \text{sudut permukaan timbunan terhadap horizontal} \\ \eta &= \text{sudut gesekan dinding}\end{aligned}$$

METODE PENELITIAN

Pada studi ini, tahapan penelitian yang akan dilaksanakan adalah pemodelan studi kasus untuk dijadikan sebagai acuan dalam analisis, perhitungan analisis dengan metode konvensional

dan perhitungan analisis dengan metode elemen hingga.

Data pemodelan studi kasus yang dijadikan sebagai acuan dianalisis kemudian akan dilakukan perhitungan berdasarkan metode Rankine, metode Coulomb, metode Lancellotta, metode Paik dan Salgado, metode Zhou (Zhou, 2016) dan metode Zhou (Zhou, et al, 2016) untuk perhitungan secara metode konvensional. Hasil analisis dari perhitungan metode konvensional dibandingkan dengan hasil perhitungan berdasarkan metode elemen hingga dan ditarik kesimpulan. Diagram alir penelitian ditunjukkan pada **Gambar 1**.



Gambar 1. Diagram alir penelitian

Pada studi ini, untuk data tanah yang digunakan berupa parameter tanah timbunan, tanah dasar dan dinding penahan tanah merupakan suatu parameter buatan yang dirumuskan untuk menggambarkan suatu kondisi tanah yang menjadi acuan pemodelan.

Kemudian dalam pemodelan pada program elemen hingga, untuk material seperti tanah timbunan diasumsikan sebagai tanah tak berkohesi dengan model material Mohr-Coulomb dengan jenis analisis menggunakan tipe *Drained* yang membutuhkan parameter berat isi natural (γ_{unsat}), berat isi jenuh (γ_{sat}), modulus young efektif (E'), kohesi efektif (c'), sudut geser dalam (ϕ') dan poisson rasio (ν'). Sedangkan untuk tanah dasar dan dinding penahan tanah, dimodelkan sebagai material yang bersifat Linear Elastic dengan input

parameter meliputi modulus young (E) dan poisson's ratio (ν). Untuk parameter tanah timbunan dapat dilihat pada **Tabel 1**, parameter tanah dasar dapat dilihat pada **Tabel 2** dan parameter untuk dinding penahan tanah dapat dilihat pada **Tabel 3**.

Gambar 2 menunjukkan model timbunan dan dinding penahan tanah yang digunakan untuk analisis metode elemen hingga. Kepadatan meshing elemen hingga akan sangat berpengaruh dalam hasil perhitungan numerik yang dilakukan. Semakin detail pilihan meshing yang dipilih, analisis akan semakin akurat, hanya saja akan membutuhkan waktu yang sangat lama. Pada studi ini, kepadatan meshing yang dipilih dalam analisis yaitu medium.

Kemudian untuk elemen antarmuka (*interface*), nilai R-inter diambil sama dengan satu. Dimana pada dinding penahan tanah dan material tanah timbunan dimodelkan menyentuh tanah sepenuhnya seperti kondisi model dinding penahan tanah dengan timbunan pada umumnya.

Tabel 1. Parameter Tanah Timbunan Model Material *Mohr-Coulomb Drained*

Parameter Timbunan		
γ_{unsat}	kN/m ³	18
γ_{sat}	kN/m ³	19
c'	kN/m ²	0
ϕ'	°	30
E	kN/m ²	10000
ν'		0.3

Tabel 2. Parameter Tanah Dasar Model Material *Linear Elastic Drained*

Parameter Tanah Dasar		
γ_{unsat}	kN/m ³	19
γ_{sat}	kN/m ³	20
E	kN/m ²	21000000
ν		0.15

Tabel 3. Parameter *Gravity Wall Model Material Linear Elastic Drained*

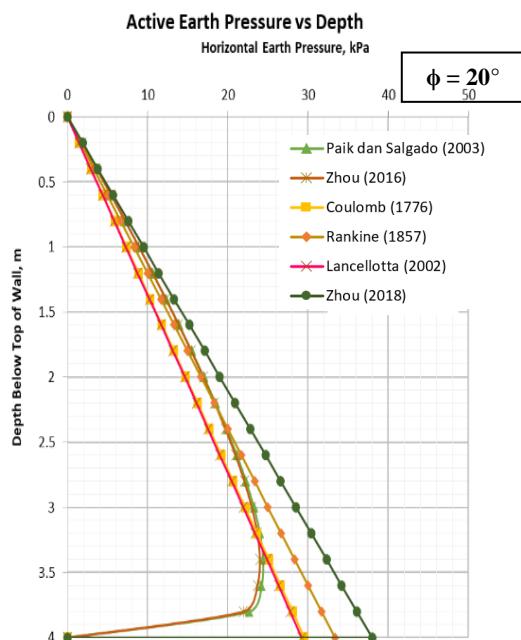
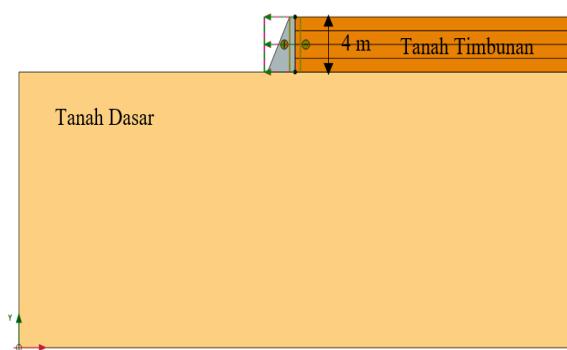
Parameter Gravity Wall		
γ_{unsat}	kN/m ³	24
γ_{sat}	kN/m ³	24
E	kN/m ²	50000
ν		0.2

Pada model dinding penahan tanah beban yang diberikan adalah beban merata dengan model beban berupa *line displacement* dengan nilai deformasi yang ditentukan. Yaitu pada kondisi pergerakan dinding 4 mm dan 8 mm seperti yang ditunjukkan pada **Tabel 4** untuk jenis tanah pasir lepas. Kemudian pembebahan dilakukan dengan cara nilai deformasi yang ditentukan diterapkan pada model untuk mengontrol batasan deformasi yang diizinkan pada dinding bagian dalam.

Tabel 4. Nilai Tipikal Pergerakan Dinding (Braja M. Das, 2018)

Soil Type	$\Delta L_a/H$	$\Delta L_p/H$
Loose Sand	0.001 – 0.002	0.01
Dense Sand	0.0005 – 0.001	0.005

Untuk tahapan analisis pada studi ini dengan menggunakan metode elemen hingga, model dinding penahan tanah sudah dalam kondisi tertimbun dengan kata lain tahapan efek daripada konstruksi secara bertahap pada dinding penahan tanah tidak dimodelkan. Kemudian pada bagian dinding penahan tanah diberikan beban dalam model *line displacement* berupa 4 mm dan 8 mm, hal ini mengacu pada besarnya pergerakan dinding penahan tanah untuk jenis tanah Pasir Padat, yaitu pada $0,001H - 0,002H$. Pembebanan dengan cara nilai deformasi yang ditentukan diterapkan pada model untuk mengontrol batasan deformasi yang diizinkan pada dinding bagian dalam.



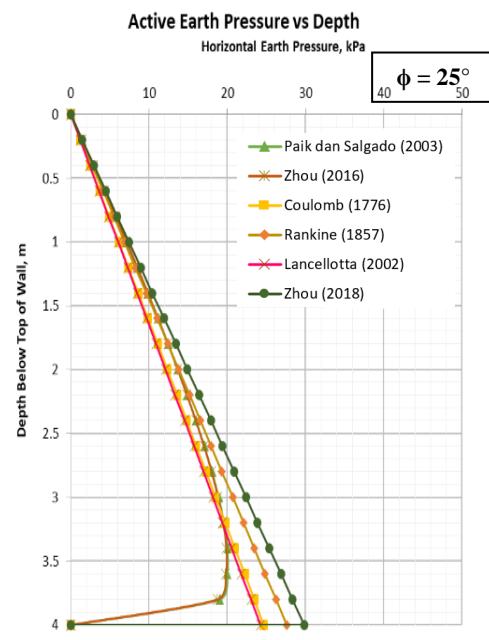
Gambar 2. Sketsa Pemodelan Dinding Penahan Tanah

Untuk kajian studi parametrik baik pada pemodelan stabilitas dinding penahan tanah dengan menggunakan metode konvensional maupun metode elemen hingga direncanakan dengan memvariasikan sudut geser dalam (ϕ) dan berat isi tanah (γ). Dengan Nilai sudut geser dalam yang digunakan adalah 20° , 25° , 30° dan 35° . Sedangkan nilai berat isi tanah yang digunakan adalah 15 kN/m^3 , 16 kN/m^3 , 17 kN/m^3 , 18 kN/m^3 dan 19 kN/m^3 .

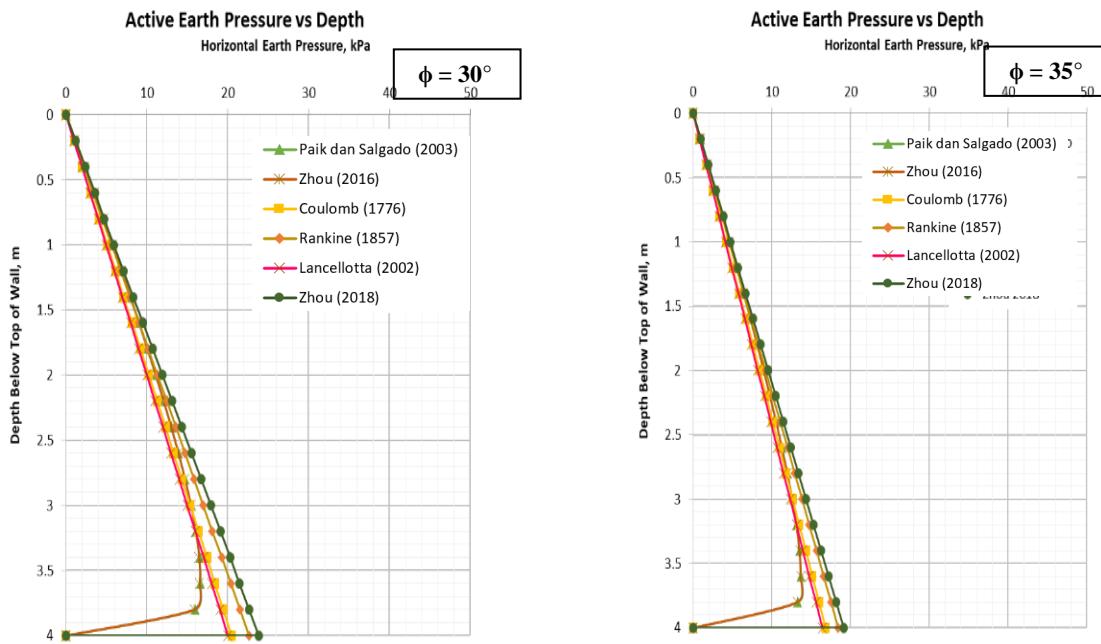
HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil analisis dengan metode konvensional

Pada **Gambar 3** dan **Gambar 4** menunjukkan hasil analisis berdasarkan metode konvensional untuk distribusi tekanan lateral dengan parameter timbunan tanah sesuai dengan **Tabel 1** yang diperoleh menggunakan berbagai macam metode. Diantaranya metode Coulomb diperoleh dengan menggunakan koefisien tekanan tanah aktif lateral yang diberikan dalam persamaan (2), Rankine menggunakan persamaan (1), Lancellotta menggunakan persamaan (3) dan (4) sedangkan Zhou (2016) menggunakan persamaan (11) dan Zhou (2018) menggunakan persamaan (12).



Gambar 3. Perbandingan Nilai Distribusi Tekanan Tanah Aktif Lateral dengan Metode Berbeda pada $\phi = 20$ dan $\phi = 25$

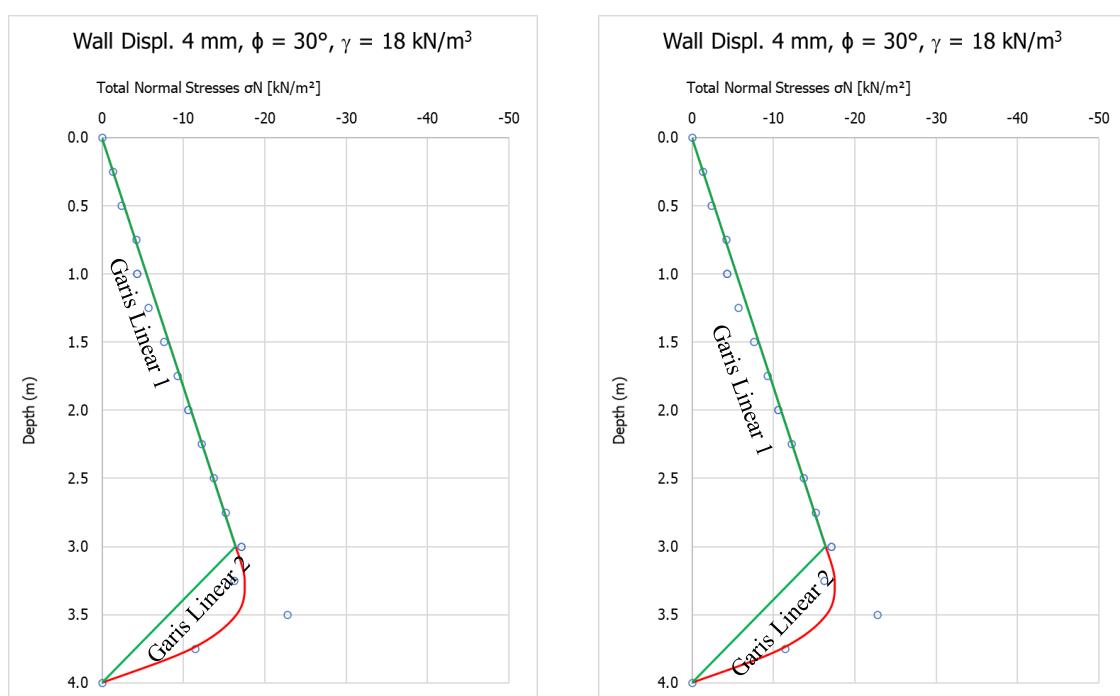


Gambar 4. Perbandingan Nilai Distribusi Tekanan Tanah Aktif Lateral dengan Metode Berbeda pada $\phi = 30$ dan $\phi = 35$

Seperti diperlihatkan pada **Gambar 3** dan **Gambar 4**, distribusi tekanan tanah lateral yang terjadi bersifat linier berdasarkan metode Coulomb, Rankine, Lancellotta dan Zhou (2018). Sedangkan untuk metode Zhou (2016) dan Paik dan Salgado, distribusi tekanan tanah lateral yang terjadi membentuk suatu lengkungan. Kemudian dengan bertambahnya atau semakin tinggi nilai sudut geser dalam, maka tekanan tanah lateral aktif yang bekerja pada suatu dinding akan mengalami penurunan atau berkurang pada setiap kedalaman

Hasil analisis dengan metode elemen hingga

Pada **Gambar 5** menunjukkan hasil analisis berdasarkan metode elemen hingga. Pemodelan dinding penahan tanah pada program PLAXIS 2D menggunakan parameter desain yang tertera pada **Tabel 1**, **Tabel 2** dan **Tabel 3**. Untuk nilai beban yang dimodelkan pada dinding penahan tanah berupa kondisi pergerakan dinding pada pergerakan 4 mm dan 8 mm seperti yang disajikan pada **Tabel 4**. Berikut ditampilkan grafik hasil pemodelan dari program PLAXIS 2D pada **Gambar 5**.



Gambar 5. Distribusi Tekanan Tanah Aktif Berdasarkan Metode Elemen Hingga

Dari analisis yang telah dilakukan, distribusi tekanan tanah lateral aktif yang terjadi bersifat *non-linear* dalam hal ini membentuk suatu lengkungan. Efek lengkung mengacu pada redistribusi tegangan dalam massa tanah, di mana bagian dari massa tanah dengan tegangan lebih tinggi mentransfer sebagian tegangannya ke bagian massa tanah dengan tegangan lebih rendah. Efek lengkung juga menyebabkan distribusi tekanan tanah aktif yang tidak linier, melainkan berbentuk parabolik dan pada dasar dinding, sehingga nilai tegangan menjadi nol.

Usulan persamaan tekanan tanah lateral berdasarkan metode elemen hingga

Pada **Gambar 5**, menunjukkan grafik perubahan tekanan tanah lateral terhadap kedalaman, dimana pada sumbu X mendefinisikan distribusi tekanan tanah lateral sedangkan sumbu Y mendefinisikan kedalaman dinding penahan tanah. Garis merah merupakan tarikan garis yang diidealisasikan yang mewakili perilaku tekanan tanah lateral terhadap kedalaman dari hasil analisis PLAXIS 2D. Sedangkan garis hijau merupakan garis bilinear yang saling berpotongan. Dari hasil data tersebut, kemudian diolah menggunakan persamaan garis lurus $y = mx + c$. Dimana variabel m adalah kemiringan dan c adalah perpotongan sumbu Y. Jika persamaan tersebut diterapkan pada hasil analisis dari metode elemen hingga maka pada garis linear 1 akan didapat suatu persamaan:

$$y_1 = mx_1 + c_1 = \left(\frac{\gamma z_i K_a}{z_i a}\right) z_i + c_1 \quad \dots (13)$$

Dimana γ merupakan berat isi tanah, K_a adalah koefisien tekanan tanah aktif, z_i merupakan kedalaman dinding dan parameter a merupakan nilai faktor kemiringan (*slope*) untuk garis linear 1 dan tidak ada arti secara fisik (*no physical meaning*). Untuk garis linear 2 secara konsep sama dengan garis linear 1, hanya saja dalam mencari nilai c_2 , persamaan untuk garis linear 1 dan 2 saling mensubstitusi/mengganti sehingga untuk persamaan garis linear 2 menjadi seperti yang ditampilkan berikut:

$$c_2 = z_i (m_1 - m_2) \quad \dots (14)$$

$$y_2 = \left(\frac{\gamma z_i K_a}{z_i b}\right) z_i + (z_i (m_1 - m_2)) \quad \dots (15)$$

Untuk parameter b sama seperti parameter a , merupakan nilai faktor kemiringan dan tidak ada arti secara fisik (*no physical meaning*). Persamaan (13) berlaku pada kedalaman $0 - \frac{3}{4}$ tinggi dinding penahan tanah.

Sedangkan persamaan (14) dan (15) berlaku pada $\frac{3}{4}$ hingga akhir kedalaman dinding penahan

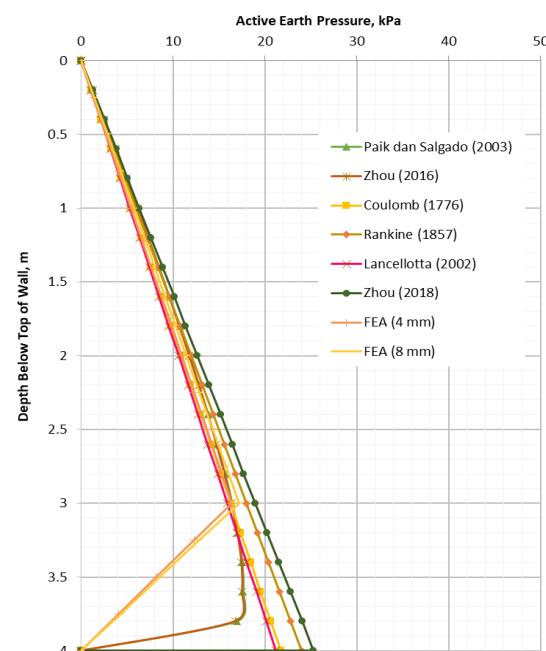
tanah. Hasil dari usulan persamaan tekanan tanah lateral berdasarkan metode elemen hingga dapat dilihat pada **Gambar 6** hingga **Gambar 10**.

Perbandingan teori analitik dengan pemodelan plaxis

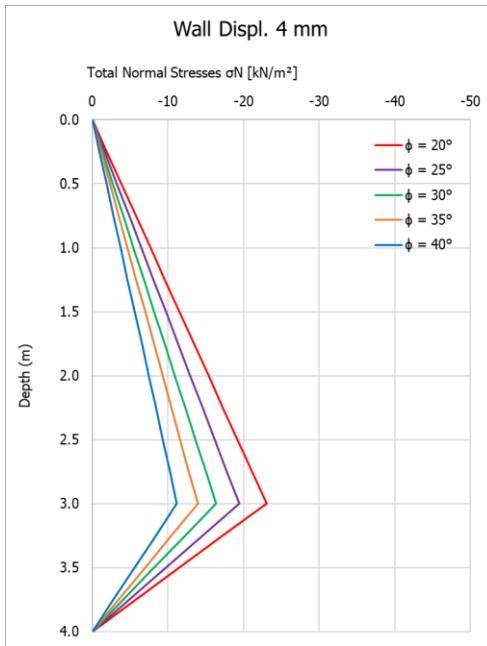
Pada **Gambar 6**, menunjukkan grafik yang menggabungkan seluruh teori analisis mengenai tekanan tanah lateral aktif berdasarkan metode Coulomb, Rankine, Lancellotta, Paik dan Salgado, Zhou (2018), Zhou (2016) dan analisis PLAXIS. Berdasarkan hasil analisis, tekanan tanah lateral aktif maksimum untuk analisis dengan metode elemen hingga berada pada kisaran 75% hingga 100% dari tinggi dinding. Untuk metode Paik dan Salgado serta Zhou (2016) tekanan tanah lateral aktif maksimum berada pada kisaran 80% hingga 100% dari tinggi dinding. Sedangkan metode lainnya tekanan tanah lateral aktif maksimum terletak di bagian bawah dinding.

Hubungan tekanan tanah lateral terhadap variasi sudut geser dalam

Dari studi parametrik berdasarkan variasi sudut geser dalam dengan menggunakan parameter dan model yang sama seperti yang digunakan pada bagian sebelumnya. Nilai sudut geser dalam yang digunakan pada bagian ini adalah $\phi = 20^\circ$, $\phi = 25^\circ$, $\phi = 30^\circ$, $\phi = 35^\circ$ dan $\phi = 40^\circ$. **Gambar 7** dan **Gambar 8** menunjukkan distribusi tekanan tanah lateral dengan nilai ϕ yang berbeda pada pergerakan dinding 4 mm dan 8 mm.

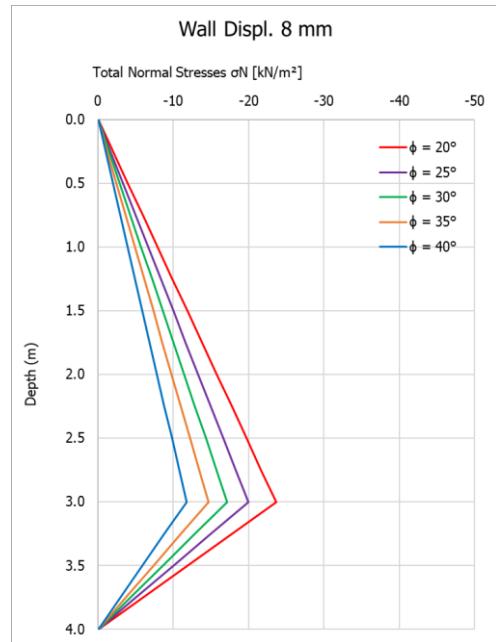


Gambar 6. Ragam Hasil Analisa Teori dan Analisa PLAXIS Mengenai Tekanan Tanah Lateral Aktif



Gambar 7. Perubahan Distribusi Tekanan Tanah Lateral Aktif dengan Variasi ϕ Kondisi Deformasi 4 mm

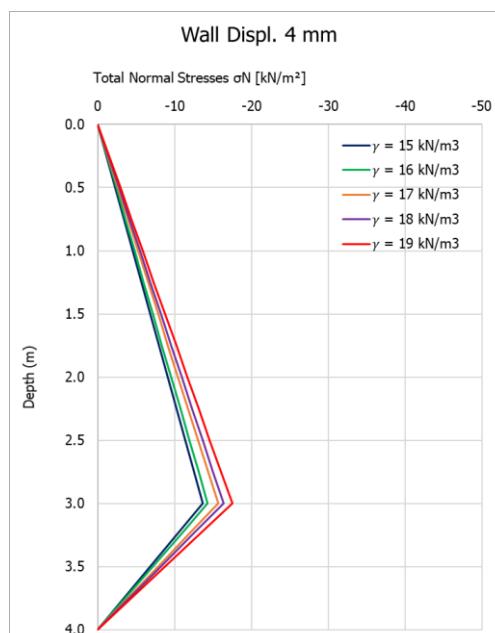
Berdasarkan hasil analisis, tekanan tanah lateral aktif maksimum untuk analisis dengan metode elemen hingga berada pada kisaran 75% hingga 100% dari tinggi dinding. Untuk metode Paik dan Salgado serta Zhou (2016) tekanan tanah lateral aktif maksimum berada pada kisaran 80% hingga 100% dari tinggi dinding. Sedangkan metode lainnya tekanan tanah lateral aktif maksimum terletak di bagian bawah dinding.



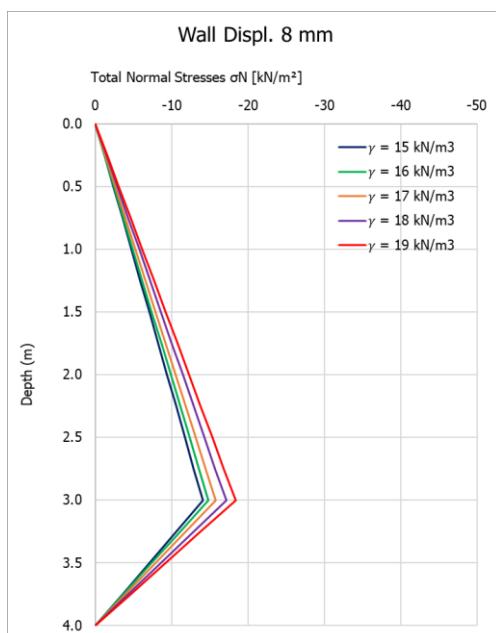
Gambar 8. Perubahan Distribusi Tekanan Tanah Lateral Aktif dengan Variasi ϕ Kondisi Deformasi 8 mm

Hubungan tekanan tanah lateral terhadap variasi berat isi tanah

Dari studi parametrik berdasarkan variasi berat isi tanah dengan menggunakan model yang sama seperti yang digunakan pada bagian sebelumnya. Nilai berat isi tanah yang digunakan dalam bagian ini adalah $\gamma = 15 \text{ kN/m}^3$, $\gamma = 16 \text{ kN/m}^3$, $\gamma = 17 \text{ kN/m}^3$, $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$ dan $\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$. **Gambar 9** dan **Gambar 10** menunjukkan distribusi tekanan tanah lateral dengan nilai γ yang berbeda pada pergerakan dinding 4 mm dan 8 mm.



Gambar 9. Perubahan Distribusi Tekanan Tanah Lateral Aktif dengan Variasi γ Kondisi Deformasi 4 mm



Gambar 10. Perubahan Distribusi Tekanan Tanah Lateral Aktif dengan Variasi γ Kondisi Deformasi 8 mm

Berdasarkan analisis yang telah dilakukan, tekanan tanah lateral aktif yang bekerja pada setiap kedalaman di seluruh dinding penahan tanah akan meningkat seiring dengan bertambahnya nilai berat isi tanah. Dimana tanah dengan berat satuan yang lebih tinggi akan memberikan tekanan tanah lateral aktif yang lebih tinggi pada dinding penahan tanah.

Selain itu, suatu tanah dengan nilai berat isi tanah yang lebih tinggi memerlukan pergerakan dinding ($\Delta L/H$) yang lebih kecil untuk mengembangkan tekanan tanah aktif. Maka dari itu, semakin besar berat isi tanah maka tekanan tanah lateral aktif yang bekerja pada dinding penahan tanah semakin besar.

KESIMPULAN

Dari analisis yang dilakukan, pada metode konvensional distribusi tekanan tanah lateral yang dihasilkan sesuai dengan pendefinisian masing-masing rumus tekanan tanah lateral. Untuk hasil analisis dengan metode elemen hingga, bentuk distribusi tekanan tanah lateral berupa bilinear. Karena ada efek lengkung (*arching effect*) yang menyebabkan distribusi tekanan tanah aktif yang tidak linier. Kemudian, berdasarkan analisis dengan metode elemen hingga, dua buah persamaan tekanan tanah lateral diusulkan dimana dari persamaan tersebut menunjukkan kesesuaian yang tinggi terhadap ragam teori metode konvensional yang ada. Persamaan pertama diperuntukkan pada awal dinding hingga $\frac{3}{4}$ kedalaman dinding, sedangkan persamaan kedua diperuntukkan dari $\frac{3}{4}$ kedalaman hingga akhir kedalaman dinding. Berdasarkan hasil studi parametrik, ketika nilai sudut geser dalam bertambah, maka tekanan tanah lateral aktif yang bekerja pada dinding penahan tanah berkurang. Sebaliknya bila nilai berat isi tanah bertambah, maka tekanan tanah lateral aktif yang bekerja pada dinding penahan tanah bertambah.

DAFTAR PUSTAKA

- Caquot A., & Kerisel J. (1994). *Tables for the calculation of passive pressure, active pressure and bearing capacity of foundations.* Gauthier-Villars.
<https://lib.ugent.be/catalog/rug01:001335589>
- Dalvi, R. S., & P. J. Pise. (2012). Analysis of Arching in Soil-Passive State. *Indian Geotech. J.*, 42 (2): 106–112.
<https://doi.org/10.1007/s40098-012-0004-8>
- Das, B.M., & Sobhan, K. (2018). *Principles of Geotechnical Engineering.* 9th Edition. United States: Cengange Learning.
- Goel, S., & N. R. Patra. (2008). Effect of Arching on Active Earth Pressure for Rigid Retaining Walls Considering Translation Mode. *Int. J. Geomech.* 8(2): 123–133.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1532-3641\(2008\)8:2\(123\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1532-3641(2008)8:2(123))
- Keshavarz, A., & Ebrahim, M. (2016). The Effects of the Soil-Wall Adhesion and Friction Angle on the Active Lateral Earth Pressure of Circular Retaining Walls. *International Journal of Civil Engineering.* 14, 97–105.
<https://doi.org/10.1007/s40999-016-0016-3>
- Lancellotta, R. (2002). Analytical Solution of Passive Earth Pressure. *Géotechnique.* 52(8), pp. 617–619.
<https://doi.org/10.1680/geot.2002.52.8.617>
- Li, J. & Wang, M. (2014). Simplified Method for Calculating Active Earth Pressure on Rigid Retaining Walls Considering the Arching Effect Under Translational Mode. *International Journal of Geomechanics*, ASCE. 14(2), pp. 282-290.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0000313](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000313)
- Lim, A. (2018). Lesson learned from retaining wall failures: A geotechnical disaster. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 229, p. 03014). EDP Sciences.
<https://doi.org/10.1051/matecconf/201822903014>
- Lin, Y. L., Leng, W. M., Yang, G. L., Zhao, L. H., Li, L., & Yang, J. S. (2015). Seismic active earth pressure of cohesive-frictional soil on retaining wall based on a slice analysis method. *Soil Dyn. Earthquake Eng.* 70(3), 133–147.
<https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2014.12.006>
- Nadukuru, S. S., & R. L. Michalowski. (2012). Arching in Distribution of Active Load on Retaining Walls. *J. Geotech. Geoenvir. Eng.* 138(5), 575–584.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000617](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000617)
- Paik, K. H., & Salgado, R. (2003). Estimation of Active Earth Pressure Against Rigid Retaining Walls Considering Arching Effects. *Géotechnique.* 53(7), 643–653.
<https://doi.org/10.1680/geot.2003.53.7.643>
- Rahardjo, P. P., & Alvi, S. D. (2019). *Metode Elemen Hingga untuk Analisis Geoteknik.* Edisi 1. Penerbit Pusat Studi Geoteknik Universitas Katolik Parahyangan, Bandung.
- Wang, Y. Z. (2000). Distribution of Earth Pressure on A Retaining Wall. *Géotechnique.* 50(1), 83-88.
<https://doi.org/10.1680/geot.2000.50.1.83>

Zhou, Y.T. (2018). Active Earth Pressure Against Rigid Retaining Wall Considering Effects of Wall-Soil Friction and Inclinations. *KSCE Journal of Civil Engineering*.

<https://doi.org/10.1007/s12205-018-1984-4>

Zhou, Y.T., Chen, Q.S., Chen, F.Q., Xue, X.H., & Ba-sack, S. (2016). Active Earth Pressure on

Translating Rigid Retaining Structures Considering Soil Arching Effect. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 22(8), pp. 910-926.

<https://doi.org/10.1080/19648189.2016.1229225>