

Analisis Pengaruh Metode Pemodelan Angkur dan Variasi Kedalaman Pancang Terhadap *Safety Factor* Dinding Penahan Tanah *Corrugated Concrete Sheet Pile* (CCSP) pada Proyek Reklamasi

L Tambunan¹, AA Laksmi^{2*}, OA Putra¹

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik dan Teknologi Pertahanan, Universitas Pertahanan Republik Indonesia, Bogor, Indonesia¹

Program Studi Rekayasa Sumber Daya Air, Fakultas Teknik dan Teknologi Pertahanan, Universitas Pertahanan Republik Indonesia, Bogor, Indonesia²

Koresponden*, Email: anasyaarsita@gmail.com

	Info Artikel	Abstract
Diajukan	10 November 2025	<i>The main function of retaining walls is to maintain slope stability and resist lateral soil pressure in reclamation projects. This study aims to analyze the effect of anchor modeling methods and pile embedment depth variations on the Safety Factor (SF) of Corrugated Concrete Sheet Pile (CCSP) walls using the Finite Element Method (FEM). Two anchor models were studied: fixed-end anchor and node-to-node anchor, with pile depth variations ranging from 26 meters to 14 meters. The analysis results show that the node-to-node anchor model produces a smaller SF value than the fixed-end model, which describes critical conditions. The SF value decreased as the pile depth decreased, where the minimum safety limit of 1.5 was reached at a depth of 16 meters, and failure occurred at a depth of 14 meters (SF = 1.45). These findings emphasize the importance of selecting the appropriate anchor model and determining a design that remains conservative in terms of global stability.</i>
Diperbaiki	09 Januari 2026	
Disetujui	17 Maret 2026	

Keywords: CCSP, embedment depth, node to node anchor, fixed-end anchor, safety factor

Kata kunci: CCSP, kedalaman pancang, angkur *node to node*, angkur *fixed-end*, faktor keamanan

Abstrak

Fungsi utama dinding penahan tanah adalah untuk menjaga kestabilan lereng dan menahan tekanan lateral tanah pada proyek reklamasi. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh metode pemodelan angkur dan variasi kedalaman penanaman tiang terhadap *Safety Factor* (SF) pada dinding *Corrugated Concrete Sheet Pile* (CCSP) dengan menggunakan Metode Elemen Hingga (*Finite Element Method*/FEM). Dua model angkur yang diteliti adalah *fixed-end anchor* dan *node-to-node anchor*, dengan variasi kedalaman tiang mulai dari 26 meter hingga 14 meter. Hasil analisis menunjukkan bahwa model angkur *node-to-node* menghasilkan nilai SF yang lebih kecil dibandingkan dengan model *fixed-end*, yang menggambarkan kondisi kritis. Nilai SF menurun seiring dengan berkurangnya kedalaman tiang, di mana batas aman minimum sebesar 1,5 tercapai pada kedalaman 16 meter, dan kegagalan terjadi pada kedalaman 14 meter (SF = 1,45). Temuan ini menegaskan pentingnya pemilihan model angkur yang tepat serta penentuan desain yang tetap bersifat konservatif dalam hal kestabilan global.

1. Pendahuluan

Dinding penahan tanah merupakan struktur yang digunakan dalam perkuatan lereng. Salah satu perkuatan tebing yang biasa digunakan adalah konstruksi berbentuk *sheet pile*. *Sheet pile* biasanya digunakan sebagai penahan tebing galian, struktur bawah tanah, perlindungan tepi sungai, dinding dermaga, dok kapal dan lain sebagainya [1]. Dalam proyek reklamasi pantai, penggunaan struktur penahan tanah memiliki peranan yang sangat penting dalam menjaga kestabilan lereng, menahan tekanan lateral tanah, serta mencegah pergeseran massa tanah akibat gaya hidrostatis dan beban tambahan. *Corrugated Concrete Sheet Pile* (CCSP) merupakan salah satu jenis dinding penahan tanah yang tergolong sebagai dinding fleksibel. Sesuai dengan namanya, material penyusun CCSP

merupakan beton. Penggunaan turap CCSP memiliki keunggulan yaitu waktu pekerjaan yang relatif singkat karena mudah untuk dikerjakan [2].

Dalam tahap perencanaan, dinding CCSP dirancang dengan kedalaman pancang tertentu yang ditetapkan berdasarkan analisis keseimbangan gaya tanah aktif dan pasif serta daya dukung tanah di lapisan bawah. Kedalaman pancang menjadi parameter krusial karena secara langsung memengaruhi besarnya tahanan pasif yang bekerja pada bagian bawah dinding, sehingga menentukan nilai *safety factor* (SF) keseluruhan struktur. Kedalaman pemancangan CCSP bergantung dari jenis tanah dasar di sekitar area pemancangan. Semakin tebal lapisan tanah lunak, maka semakin dalam pula penanaman CCSP[2].

Dalam praktik lapangan, sering kali terjadi deviasi antara kedalaman rencana (DED) dan kedalaman aktual (*as-built*). Hal ini dapat disebabkan oleh kondisi lapangan yang berbeda dari asumsi desain seperti adanya lapisan keras tidak merata atau perubahan sifat tanah. Deviasi ini tidak dapat diabaikan, sebab pengurangan kedalaman pancang secara langsung mengurangi zona tahanan pasif tanah yang berperan menahan gaya dorong dari sisi belakang. Jika tahanan pasif berkurang, struktur berpotensi mengalami penurunan *safety factor*, deformasi berlebih, bahkan kegagalan rotasi pada titik kaki dinding [3].

Selain itu kedalaman terpancang akan mengakibatkan ujung *sheet pile* berada pada jenis tanah yang berbeda-beda. Jenis tanah di bawah ujung *sheet pile* memiliki pengaruh yang signifikan terhadap besar kecilnya tahanan ujung (*end bearing*) serta distribusi tekanan tanah pasif dan aktif yang bekerja pada sistem dinding penahan tanah [4]. Setiap jenis tanah memiliki karakteristik fisik dan mekanis yang berbeda, sehingga responsnya terhadap beban lateral dari dinding juga bervariasi.

Pada tanah berbutir kasar seperti pasir padat (*dense sand*) atau tanah kohesif kuat seperti lempung kaku (*stiff clay*) nilai daya dukung atau SF cenderung lebih tinggi karena kedua jenis tanah tersebut memiliki kekuatan geser internal (ϕ') dan kohesi (c') yang besar. Kekuatan geser ini memungkinkan tanah memberikan tahanan pasif yang kuat terhadap pergerakan dinding, serta memperkecil potensi deformasi lateral. Sebaliknya, pada tanah dengan sifat mekanis lemah seperti lempung lunak (*soft clay*) atau pasir lepas (*loose sand*), nilai SF relatif lebih rendah karena modulus elastisitas (E) dan kekuatan geser tanah yang rendah menyebabkan penurunan kemampuan tanah dalam menahan tekanan aktif maupun pasif [5].

Faktor penting lain yang berpengaruh terhadap hasil analisis stabilitas adalah metode pemodelan angkur yang digunakan dalam simulasi numerik. Terdapat dua alternatif metode pemodelan angkur yaitu *fixed-end anchors* dan *node-to-node anchors*. Perbedaan metode pemodelan tersebut dapat menghasilkan nilai *Safety Factor*, gaya angkur, dan deformasi dinding yang berbeda meskipun menggunakan parameter tanah dan beban yang sama.

Pada beberapa penelitian terdahulu telah dilakukan analisis pengaruh kedalaman CCSP terpancang pada proyek konstruksi yang tidak sesuai dengan DED. Penelitian yang dilakukan oleh Astuti [2] pada sebuah pekerjaan galian abutmen jembatan menunjukkan bahwa nilai SF ditentukan oleh kedalaman pancang CCSP. Pada kedalaman pancang 18 meter, nilai SF belum aman. Tetapi pada kedalaman 20 meter nilai SF sudah mencapai batas

aman. Penelitian serupa juga dilakukan oleh Irawan dkk [6] pada sebuah konstruksi dermaga. Hasil penelitiannya menunjukkan semakin dalam CCSP dipancang, maka nilai SF semakin tinggi. Selain itu, penelitian ini juga menganalisis pengaruh spasi antar tierod terhadap nilai SF. Dari kedua penelitian ini, terdapat celah yang belum diteliti yaitu terkait dengan metode pemodelan angkur yang di kombinasikan dengan kedalaman pancang CCSP.

Oleh karena itu penelitian ini dilakukan untuk menganalisis secara numerik pengaruh variasi kedalaman pancang dan metode pemodelan angkur terhadap nilai *safety factor* dinding CCSP pada proyek reklamasi. Melalui pemodelan dengan beberapa skenario kedalaman serta dua metode pemodelan angkur (*fix-end* dan *node-to-node*), diharapkan dapat diketahui sejauh mana perubahan kondisi aktual di lapangan memengaruhi kestabilan struktur.

Penelitian ini hanya dibatasi pada perhitungan *safety factor* kestabilan global tanpa memperhitungkan aspek lainnya seperti deformasi maupun kekuatan struktur CCSP. Hasil penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi praktis dalam mendukung kegiatan evaluasi desain, pengawasan konstruksi, serta pengambilan keputusan teknik apabila terjadi penyimpangan kedalaman pancang dari rencana awal pada proyek-proyek reklamasi di Indonesia.

2. Metode

Penelitian ini menggunakan pendekatan pemodelan numerik dengan metode elemen hingga (*Finite Element Method/FEM*). Metode elemen hingga merupakan prosedur perhitungan yang dipakai untuk mendapatkan pendekatan dari permasalahan matematis yang sering muncul pada rekayasa teknik dari metode tersebut yang membuat persamaan matematis dengan berbagai pendekatan dan rangkaian persamaan aljabar yang melibatkan nilai-nilai pada titik-titik diskrit pada bagian yang dievaluasi [7]. Proses pemodelan melibatkan dua variabel utama, yaitu:

2.1 Kedalaman pancang

Kedalaman tiang terpancang akan berpengaruh terhadap stabilitas turap [5]. Hal tersebut dikarenakan panjang turap akan berdampak pada area tekanan pasif dan tekanan aktif tanah. Oleh karena itu akan dilakukan penelitian pada *sheepile* yang akan divariasikan pada beberapa kedalaman, yang awalnya sesuai DED 26 meter kemudian dikurangi untuk setiap interval 2 meter. Sehingga diperoleh pengaruh kedalaman tiang terpancang terhadap *safety factor* dinding penahan tanah.

2.2 Metode Pemodelan Angkur

Terdapat dua metode yang digunakan untuk memodelkan angkur pada sistem *sheetpile*. Metode tersebut adalah *node to node anchor* dan *fixed-end anchor*. Angkur model *node to node* merupakan pegas yang digunakan untuk memodelkan ikatan antara dua buah titik. Angkur ini merupakan elemen pegas dengan kekakuan pegas yang konstan (kekakuan normal). Elemen ini dapat menerima gaya tarik (untuk jangkar) maupun gaya tekan (untuk pengaku *strut*). Baik gaya tarik maupun gaya tekan pada jangkar akan disalurkan ke struktur *deadmen*.

Angkur model *fixed-end* merupakan elemen pegas satu titik nodal dengan kekakuan pegas yang konstan (kekakuan normal). Ujung lain dari pegas (didefinisikan oleh panjang ekuivalen dan arah tertentu) adalah tetap. Skenario yang digunakan pada penelitian ini meliputi analisis pemodelan angkur dan analisis pengaruh kedalaman terpancang terhadap nilai SF. Pertama adalah analisis model angkur yang terdiri dari model *node to node* dan *fixed-end*. Dua model ini di analisis dengan kedalaman CCSP sesuai DED yaitu 26 meter.

Sedangkan untuk analisis pengaruh kedalaman terpancang terdiri dari kedalaman sesuai DED 26 meter, dan kedalaman yang tidak sesuai DED yaitu 24 meter, 22 meter, 20 meter dan seterusnya sampai nilai *safety factor* yang dihasilkan kurang dari 1,5. Hal tersebut sesuai dengan syarat SF minimum untuk stabilitas global perencanaan dinding penahan tanah pada SNI 8460:2017 [8]. Untuk jenis angkur yang digunakan akan dipilih dari model angkur yang menghasilkan SF terkecil.

Pada kondisi tanah yang belum padat (timbunan), nilai SF yang dianalisis ada dua, yaitu SF *Short Term* (ST) dan SF *Long Term* (LT). Pentingnya untuk menganalisis SF pada dua kondisi tersebut diakibatkan adanya proses konsolidasi tanah lempung dan tekanan air pori berlebih yang menghilang [9]. SF *Short-term* adalah faktor keamanan yang dihitung untuk kondisi di mana tanah belum terkonsolidasi. Dalam hal ini adalah sesaat ketika beban operasional telah diperhitungkan. Sedangkan SF *Long-term* adalah faktor keamanan yang dihitung untuk kondisi di mana konsolidasi tanah diperkirakan telah selesai. Dalam penelitian ini diperkirakan waktu konsolidasi adalah 10 tahun. Pemilihan durasi 10 tahun didasarkan pada hasil analisis numerik yang menunjukkan bahwa pada kurun waktu tersebut, tekanan air pori berlebih (*excess pore pressure*) telah terdisipasi hingga mendekati nol. Hal tersebut akan dibuktikan dengan memeriksa tekanan air pori berlebih pada PLAXIS *output*. Analisis penelitian ini dibatasi pada perhitungan *Safety Factor* (SF) kestabilan global menggunakan metode elemen hingga

tanpa mempertimbangkan deformasi maupun kekuatan material secara detail.

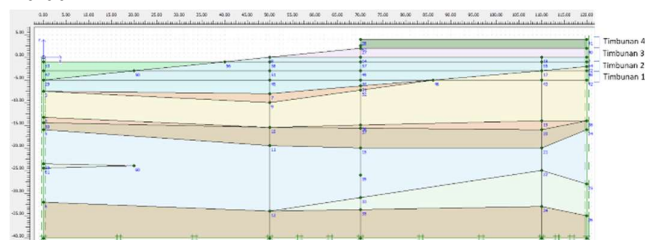
3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Data

Keandalan dan tingkat presisi dalam proses pemodelan numerik geoteknik sangat ditentukan oleh kualitas parameter input yang digunakan, di mana parameter tersebut harus mampu merepresentasikan kondisi aktual mekanika mekanis dan stratigrafi tanah di lapangan secara komprehensif. Rangkaian data teknis yang diintegrasikan sebagai basis pemodelan mencakup profil litologi dari pengujian pengeboran inti (*borelog*), parameter perlawanan penetrasi dan tekanan air pori dari instrumen CPTe dan CPTu, serta spesifikasi material dan dimensi dari elemen struktur penahan tanah yang meliputi CCSP beserta sistem *tie rod*. Melalui pendekatan data-driven ini, output model komputasi yang dihasilkan diharapkan memiliki tingkat korelasi yang tinggi terhadap perilaku geometrik dan struktural infrastruktur reklamasi yang sesungguhnya.

3.1.1 Stratigrafi Tanah

Berdasarkan data *borelog*, CPTe dan CPTu stratigrafi tanah dibagi menjadi 9 jenis tanah seperti pada **Gambar 1**. Sisi kanan gambar merupakan area reklamasi dan sisi kiri merupakan area laut. Kemiringan *slope* pada sisi laut adalah 1: 10. Sedangkan muka air terdapat pada elevasi +0.00 mLWS.



Gambar 1. Pemodelan stratigrafi tanah

Keterangan :

- : Loose to medium dense sand
- : Medium dense to dense sand
- : Soft to medium stiff clay
- : Stiff to very clay
- : Timbunan pasir
- : Timbunan pasir dipadatkan
- : Very dense sand
- : Very loose sand
- : Very soft clay

3.1.2 Parameter Tanah

Data parameter tanah yang digunakan merupakan hasil laboratorium dan hasil perhitungan. Parameter yang digunakan pada pemodelan adalah seperti pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Hasil Perhitungan. Parameter berdasarkan Koordinat Titik-titik *Cross Section*

Parameter	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	Satuan
Model material	HS-S	HS-S	HS-S	HS-S	HS-S	HS-S	HS-S	HS	HS	-
Tipe drainase	D	UA	UA	D	D	UA	UA	D	D	-
γ	15,5	15,5	16,3	17,0	19,0	16,4	17,2	17,9	18,8	kN/m ³
e_0	0,50	2,33	0,82	0,50	0,50	2,03	1,78	0,50	0,50	-
E_{s0}^{ref}	11.400	7.200	1.169*	22.800	48.000	1.342*	13.500	12.000	15.000	kN/m ²
E_{oed}^{ref}	11.400	7.200	935*	22.800	48.000	1.073*	13.500	12.000	15.000	kN/m ²
E_{ur}^{ref}	34.200	21.600	3.672*	68.400	144.000	7.740*	40.500	36.000	45.000	kN/m ²
m	0,5	1,0	1,0	0,5	0,5	1,0	1,0	-	-	-
G_0^{ref}	63.291	23.351	23.351	138.736	292.725	42.633	101.855	-	-	kN/m ²
$\gamma_{0,7}$	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,03	0,03	-	-	-
c'	2	0,5	1	1	1	8,5	16	2	2	kN/m ²
ϕ'	28	21	19	36	36	26	25	30	32	°
ν	0,25	0,15	0,30	0,30	0,35	0,35	0,30	0,30	0,30	-
k_x	4,0	$8,67 \cdot 10^{-4}$	$8,67 \cdot 10^{-4}$	4,0	4,0	$2,31 \cdot 10^{-2}$	$5,85 \cdot 10^{-3}$	4,0	4,0	m/hari
k_y	4,0	$8,67 \cdot 10^{-4}$	$8,67 \cdot 10^{-4}$	4,0	4,0	$3,21 \cdot 10^{-5}$	$5,85 \cdot 10^{-3}$	4,0	4,0	m/hari

3.1.3 Parameter Sheet Pile

Sheet pile yang digunakan adalah CCSP W600 dengan parameter seperti pada Tabel 2.

Tabel 2. Parameter CCSP W600

Parameter	Nilai	Satuan
Luas (A)	= 0,2078	m ² /m
Momen Inersia (I)	= 0,00765907	m ⁴ /m
Berat Jenis Beton (γ_{beton})	= 24	kN/m ³
Modulus Elastisitas Beton (Ebeton)	= 37007837,01	kN/m ²
Kekakuan Aksial (EA)	= 7690228,53	kN/m
Kekakuan Lentur Pelat (EI plate)	= 283445,61	kNm ² /m
Beban Merata (w)	= 1,4546	kN/m/m
Gaya Normal Beton (N_p)	= 7730,16	kN/m
Momen Plastis Beton (Mp-concrete)	= 506	kN·m/m

3.1.4 Parameter Tie-rod

Angkur (tie rod) yang digunakan terbuat dari baja dengan spesifikasi 670/800, yang berarti tegangan leleh minimum F_y sebesar 670 MPa dan tegangan maksimum F_u sebesar 800 MPa. Untuk parameter input yang digunakan adalah seperti Tabel 3.

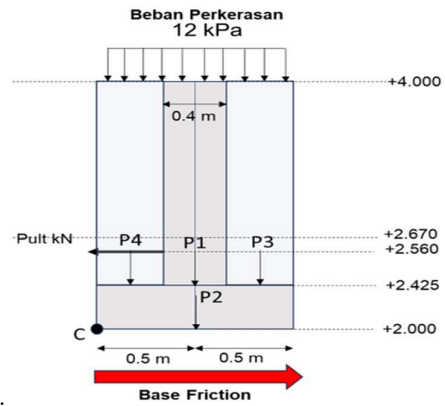
Tabel 3. Parameter Tie-rod

Parameter	Nilai	Satuan
Jenis Material	Elastis	-
Diameter	0,035	m
Luas	9,62E-04	m ²
Elastisitas Baja (E)	2,00E+05	Mpa
Kekakuan Aksial (EA)	1,92E+02	kN
Spasi antar tie-rod (L-spasi)	2	m
Fmaks. Tarik (auto)	1,00E+15	kN
Fmaks. tekan (auto)	1,00E+15	kN

3.1.5 Parameter Deadmen

Pada bagian ujung tierod terdapat struktur deadmen yang berfungsi menahan tekanan lateral tanah. Tekanan lateral yang diterima CCSP kemudian disalurkan oleh tierod. Struktur deadmen berbentuk seperti pondasi telapak

menerus. Visualisasi struktur deadmen adalah seperti pada Gambar 2.



Gambar 2. Pemodelan Deadmen

Deadmen terbuat dari beton f_c' 45 MPa dengan parameter input seperti pada Tabel 4.

Tabel 4. Parameter Tie-rod

Parameter	Nilai		Satuan
	Badan	Kaki	
Luas (A)	0,63	0,425	m ² /m
Momen Inersia (I)	0,13023281	0,00639714	m ⁴ /m
Berat Jenis Beton (γ_{beton})	24	24	kN/m ³
Modulus Elastisitas Beton (Ebeton)	31528558,48	31528558,48	kN/m ²
Kekakuan Aksial (EA)	19862991,84	13399637,36	kN/m
Kekakuan Lentur Pelat (EIplate)	4106052,85	201692,46	kNm ² /m
Beban Merata (w)	4,8	4,8	kN/m/m
Gaya Normal Beton (N_p)	12048,75	8128,125	kN/m
Momen Plastis Beton (Mp-concrete)	7441,88	1354,6875	kN·m/m

3.1.6 Tahapan Perhitungan

Proyek reklamasi ini membutuhkan waktu yang cukup lama karena proses timbunan dilakukan sebanyak empat kali. Pelaksanaan penimbunan tidak sekaligus, melainkan bertahap mulai dari elevasi dasar -5.00, timbunan tahap 1 pada elevasi -3.00, timbunan tahap 2 pada elevasi -1.00, timbunan tahap 3 pada elevasi +2.00 dan elevasi final pada penimbunan tahap 4 pada +4.00. Pada setiap tahapan penimbunan diselangki dengan konsolidasi.

Pemancangan CCSP dan instalasi *tie rod* serta *deadmen* dilakukan setelah konsolidasi 3. Setelah ditimbun lagi hingga elevasi +4.00 dilanjutkan dengan konsolidasi 4. Dan tahapan terakhir dari konstruksi adalah beban operasional berupa gabungan dari beban *pavement* sebesar 12 kPa dan beban operasional 40 kPa. Selain itu dilakukan *forecasting* SF hingga 10 tahun setelah beban operasional berjalan. Untuk lebih lengkapnya, tahapan perhitungan disajikan dalam **Tabel 5**.

Tabel 5. Tahapan Perhitungan

Tahap Konstruksi	Jenis Perhitungan	Waktu (hari)
<i>Initial Condition</i>	-	0
Timbunan 1 (el. -3.00)	Analisa plastis	10
Konsolidasi 1	Analisa konsolidasi	14
Timbunan 2 (el. -1.00)	Analisa plastis	10
Konsolidasi 2	Analisa konsolidasi	14
Timbunan 3 (el +2.00)	Analisa plastis	10
Konsolidasi 3	Analisa konsolidasi	3285
Pemancangan CCSP	Analisa plastis	31
Konsolidasi 4	Analisa konsolidasi	47
Pemasangan <i>tie-rod</i>	Analisa plastis	31
Timbunan 5 (el. +4.00)	Analisa plastis	14
Konsolidasi 5	Analisa konsolidasi	47
Beban Operasional	Analisa plastis	0
SF ST	Reduksi phi-c	0
Beban Operasional 10 tahun	Analisa konsolidasi	3650
SF LT	Reduksi phi-c	0

3.2 Hasil

Penelitian diawali dengan pembuatan model geometri di PLAXIS, yang mencakup *input* data lapisan tanah dan spesifikasi CCSP sesuai dengan DED. Setelah geometri dasar terbentuk, analisis dibagi menjadi dua skenario pemodelan angkur yang berbeda untuk dibandingkan, yaitu mode *node to node* dan metode *fixed-end*. Perbandingan ini

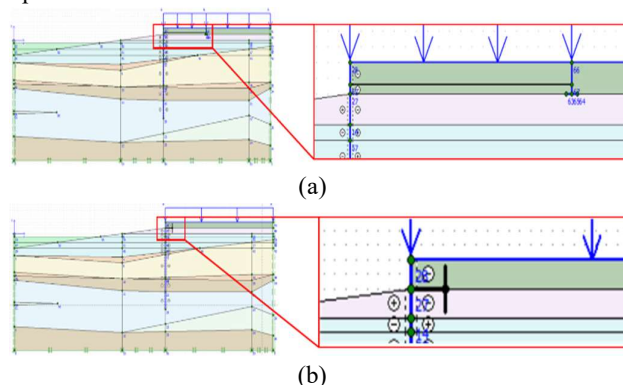
bertujuan untuk menghitung SF global pada sistem dinding penahan tanah dalam kondisi waktu yang berbeda. Kondisi tersebut adalah pada jangka waktu pendek (*Short Term/ST*) dan jangka panjang (*Long Term/LT*) yang sudah mempertimbangkan efek konsolidasi tanah selama 10 tahun setelah beban operasional bekerja.

Setelah simulasi kedua pendekatan angkur selesai, langkah berikutnya adalah melakukan perhitungan SF untuk mengevaluasi stabilitas sistem. Berdasarkan hasil tersebut, model angkur yang menghasilkan nilai SF terkecil dipilih sebagai representasi kondisi paling kritis untuk digunakan dalam analisis lanjutan. Pemilihan nilai SF terendah ini sangat penting dalam rekayasa geoteknik guna memastikan desain tetap aman di bawah asumsi pemodelan yang paling konservatif, sebelum ke tahap optimasi dimensi struktur.

Tahap akhir adalah proses iterasi pengurangan kedalaman CCSP sebesar 2 meter secara bertahap. Setiap kali kedalaman dikurangi, sistem akan melakukan perhitungan ulang SF untuk memantau perubahan stabilitasnya. Proses ini merupakan siklus berkelanjutan (*looping*) selama nilai SF masih lebih dari 1,5. Iterasi baru akan dinyatakan selesai apabila nilai SF telah mendekati atau turun di bawah ambang batas 1,5. Hasil akhir dari prosedur ini memberikan hubungan antara jenis pemodelan angkur yang digunakan dengan kedalaman terpancang CCSP minimum yang optimal sesuai dengan standar keamanan yang disyaratkan.

3.2.1. Pemodelan Angkur

Stratigrafi tanah divisualisasikan seperti **Gambar 3**, lengkap dengan lapisan tanah, penempatan awal CCSP dengan kedalaman DED 26 meter, sistem angkur dan beban operasional.



Gambar 3 . Pemodelan Angkur (a) *Node to Node Anchor*, (b) *Fixed-end Anchor*
Sumber : Data Proyek

Analisis stabilitas awal dilakukan untuk membandingkan pengaruh metode pemodelan terhadap nilai SF. Hasil

perhitungan menunjukkan bahwa nilai SF yang dihasilkan oleh model angkur *node to node* lebih kecil dibandingkan dengan model *fixed-end*, baik pada kondisi *Short Term* (ST) maupun *Long Term* (LT). Nilai SF disajikan dalam **Tabel 6**.

Tabel 6. Nilai SF pada kedua jenis angkur

Jenis angkur	SF ST	SF LT
<i>node to node</i>	1,59	1,76
<i>fixed-end</i>	2,08	2,30

Pada **Tabel 6**, SF untuk kedua jenis angkur masih lebih besar dari 1,5 sehingga masih aman untuk kestabilan global baik untuk ST maupun LT. Karena tujuan penelitian ini adalah menganalisis kestabilan struktur pada kondisi yang paling berpotensi mengalami kegagalan, maka model angkur *node to node* yang menghasilkan SF terkecil dipilih dan digunakan sebagai model untuk analisis pengaruh variasi kedalaman pancang selanjutnya.

3.2.2. Kedalaman Pancang

Berdasarkan hasil pada sub-bab 3.2.1, analisis pengaruh variasi kedalaman pancang dilakukan menggunakan model angkur *node to node* sebagai kondisi kritis. Kedalaman CCSP divariasikan dari kedalaman rencana (DED) 26 meter, dan dikurangi secara bertahap setiap 2 meter, yaitu 24 meter, 22 meter, hingga nilai SF yang dihasilkan kurang dari 1,5. **Tabel 7** menyajikan rangkuman nilai SF stabilitas global untuk kondisi ST dan LT pada masing-masing kedalaman pancang yang dianalisis.

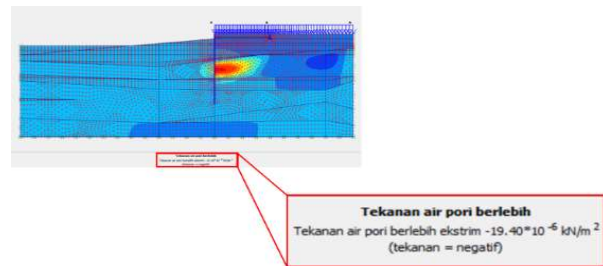
Tabel 7. Nilai SF pada beberapa variasi kedalaman

Kedalaman Terpancang (m)	SF ST	SF LT
26	1,59	1,76
24	1,59	1,76
22	1,59	1,76
20	1,58	1,76
18	1,54	1,71
16	1,51	1,69
14	1,45	1,67

Sesuai dengan **Tabel 7**, nilai SF cenderung konstan hingga kedalaman 20 meter. Tetapi pada mulai kedalaman 18 meter sampai seterusnya nilai SF semakin menurun. CCSP yang terpancang pada kedalaman 14 meter sudah tidak sesuai lagi dengan persyaratan dikarenakan nilai SF ST sebesar 1,45 lebih kecil dari 1,5. Selain itu dapat disimpulkan bahwa nilai SF *long term* selalu lebih besar dari *short term*.

Pada kondisi LT dengan masa kerja beban operasional selama 10 tahun, konsolidasi sudah selesai. Hal tersebut ditunjukkan pada tekanan air pori berlebih mendekati 0 yaitu $19,4 \times 10^{-6}$ kN/m² (**Gambar 4**). Nilai air pori yang ditunjukkan **Gambar 4** dapat dianggap 0, sehingga dapat

disimpulkan konsolidasi sudah berhenti pada rentang waktu 10 tahun.



Gambar 4. Tekanan air pori berlebih

3.3 Pembahasan

3.3.1. Pengaruh Model Angkur

Analisis numerik menunjukkan bahwa nilai SF yang diperoleh dari pemodelan angkur *node to node* lebih rendah dibandingkan dengan model *fixed-end* pada desain *sheet pile* di proyek reklamasi ini. Perbedaan hasil ini bersifat signifikan karena mencerminkan perbedaan asumsi mekanis dasar antara kedua model tersebut. Model *fixed-end* (jangkar ujung tetap) adalah elemen pegas satu titik nodal, dengan asumsi ujung pegas yang lain dianggap tetap. Asumsi ini cenderung memberikan representasi yang lebih kaku pada sistem karena secara efektif membatasi pergerakan dan deformasi pada ikatan angkur.

Sebaliknya, model *node to node* (jangkar nodal ke nodal) merepresentasikan angkur sebagai pegas yang menghubungkan dua titik nodal yang berbeda, yaitu pada dinding dan pada massa tanah. Model dua titik nodal ini mereplikasi perilaku ikatan antara dua elemen struktur secara lebih dinamis, di mana angkur dapat menerima gaya tarik maupun gaya tekan. Karena model *node to node* mengizinkan interaksi deformasi yang lebih realistis dan kurang terkekang dibandingkan model *fixed-end*, ia cenderung menghasilkan distribusi tegangan dan gaya angkur yang lebih mendekati kondisi kritis. Oleh karena itu, penetapan model *node to node* sebagai kondisi desain kritis dalam penelitian ini diperlukan untuk menganalisis batas kestabilan struktur yang paling rentan terhadap kegagalan.

3.3.2. Pengaruh Variasi Kedalaman

Terdapat korelasi antara penurunan kedalaman pancang akan menghasilkan penurunan nilai SF. Hubungan ini merupakan prinsip fundamental mekanika tanah, yaitu peran kedalaman pancang (D) dalam memobilisasi tahanan pasif tanah. Dinding penahan tanah bertumpu pada tahanan pasif di bawah garis galian atau dasar galian untuk menahan gaya dorong aktif lateral yang berasal dari tanah timbunan di belakangnya. Tekanan tanah lateral yang diakibatkan oleh tanah urugan di belakang dinding penahan, cenderung menggulingkan dinding dengan pusat rotasi pada ujung kaki

depan fondasi. Momen penggulingan ini, dilawan oleh momen akibat berat sendiri dinding penahan dan momen akibat berat tanah di atas plat fondasi [10].

Semakin dalam kedalaman pancang, semakin besar pula zona di mana tahanan pasif dapat terbentuk, sehingga meningkatkan momen penahan rotasi dan, secara langsung, meningkatkan nilai SF keseluruhan struktur. Sebaliknya, reduksi kedalaman pancang akan mengurangi panjang kontak dinding dengan lapisan tanah di bawah elevasi galian, secara drastis mengurangi zona pembentukan tahanan pasif yang berperan sebagai penahan utama kegagalan rotasi pada kaki dinding.

Analisis numerik ini mengidentifikasi secara kuantitatif sejauh mana pengurangan kedalaman dapat diterima sebelum melanggar persyaratan keamanan. Berdasarkan SNI 8460:2017, persyaratan SF minimum untuk stabilitas global perencanaan dinding penahan tanah adalah 1,5. Data yang disajikan pada **Tabel 7** menunjukkan bahwa:

- Nilai SF tetap berada di atas batas aman 1,5 hingga kedalaman pancang berkurang sampai kedalaman 16 meter.
- Nilai SF *short term* (SF ST) merepresentasikan kondisi paling kritis, karena nilai SF-nya secara konsisten lebih rendah dibandingkan SF *long term* (SF LT).
- SF ST menunjukkan nilai 1,45 pada kedalaman 14 meter. Nilai SF di bawah batas minimum 1,5 pada kedalaman 14 meter tersebut menandakan bahwa deviasi sebesar 12 meter dari kedalaman rencana (26 meter) akan menyebabkan kegagalan kestabilan struktural pada jangka pendek.

Pada **Gambar 3** grafik penurunan SF menunjukkan tren yang tidak linear. Hal tersebut dikarenakan CCSP ditopang oleh lapisan *medium dense to dense sand* pada kedalaman 26 meter hingga 20 meter. Nilai SF cenderung stabil karena kontribusi friksi dan daya dukung ujung (*end bearing*) dari lapisan pasir yang padat masih sangat dominan. Sebaliknya, penurunan SF yang tajam terlihat ketika kedalaman pancang direduksi lebih jauh ke rentang 18 meter hingga 14 meter, di mana ujung pancang mulai bertumpu pada lapisan *stiff to very clay*. Pergeseran ini sangat krusial karena mengurangi efektivitas pembentukan tahanan pasif lateral dan secara implisit menurunkan kontribusi *end bearing* total dibandingkan dengan lapisan pasir yang lebih padat di atasnya.

4. Simpulan

Berdasarkan analisis numerik yang telah dilakukan terhadap pengaruh metode pemodelan angkur dan variasi

kedalaman pancang pada dinding CCSP, diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

- Pemodelan angkur *node to node* menghasilkan nilai *Safety Factor* (SF) yang secara konsisten lebih kecil (SF ST = 1,56; SF LT = 1,73) dibandingkan model *fixed-end* (SF ST = 2,08; SF LT = 2,30). Model *node-to-node* dipilih sebagai kondisi kritis karena mereplikasi interaksi deformasi yang lebih dinamis dan kritis antara angkur dan massa tanah.
- Terdapat korelasi negatif yang jelas antara pengurangan kedalaman pancang CCSP dengan penurunan nilai SF stabilitas global. Penurunan ini disebabkan oleh berkurangnya zona pembentukan tahanan pasif lateral dan kontribusi daya dukung ujung (*end bearing*) ketika tumpuan beralih ke lapisan tanah yang kurang efektif.
- Kedalaman kritis CCSP berada pada 14 meter, di mana nilai SF *Short Term* (SF ST) mencapai 1,45, yang sudah di bawah persyaratan minimum 1,5 sesuai SNI 8460:2017. Nilai SF yang mendekati dan di bawah 1,5 mengindikasikan potensi kegagalan struktural pada jangka pendek.
- Nilai SF *Long Term* (SF LT) selalu lebih besar daripada SF ST. Kondisi konsolidasi telah selesai pada akhir masa kerja beban operasional 10 tahun, yang dibuktikan dengan nilai tekanan air pori berlebih yang mendekati nol ($124,04 \times 10^{-6}$ kN/m²).
- Reduksi kedalaman pancang secara signifikan memengaruhi kestabilan struktur, terutama ketika ujung pancang bergeser dari lapisan *medium dense to dense sand* (kedalaman 26 m–20 m) ke lapisan *stiff to very clay* (kedalaman 18 m–14 m). Oleh karena itu, deviasi kedalaman pancang di lapangan harus dihindari karena berisiko menyebabkan kegagalan kestabilan pada jangka pendek.

Daftar Pustaka

- D. Alfianti, E. Priadi, and A. Faisal, "Studi Kestabilan Perkuatan Tebing Dermaga Quay Wall di Matan Kabupaten Kayong Utara."
- S. Astuti and A. Pratiwi, "Kestabilan Dinding Penahan Tanah Jenis Corrugated Concrete Sheet Pile (CCSP) pada Pekerjaan Galian Abutmen Jembatan BH 1751 di Kecamatan Lok Ulo, Kebumen," *Jurnal Perkeretaapian Indonesia*, vol. 3, pp. 40–44, Mar. 2019.
- J. Bowles, *Foundation Analysis and Design*. Irwin/McGraw-Hill, 1997.
- B. Das, "Principle of Foundation Engineering 7th Edition," USA, 2011.

- [5] H. Hardiyatmo, "Mekanika Tanah 2 Edisi 3," 2002.
- [6] F. Irawan, A. Sulaeman, and D. X. Meiprasetyo, "Analisis Perkuatan Stabilitas Struktur Dinding Penahan Tanah (Sheet Pile) Dermaga yang Tidak Sesuai Detail Engineering Design (DED)," *Jurnal Teknik: Media Pengembangan Ilmu dan Aplikasi Teknik*, vol. 24, no. 01, pp. 10–23, 2025, [Online]. Available: <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>
- [7] P. Jembatan, W. Apu, A. P. Putra, and D. Syafriyandi, "Analisis Stabilitas Lereng dengan Metode Finite Element Method untuk Analysis of Slope Stability Using the Finite Element Method for the Wai Apu Bridge Construction."
- [8] Badan Standarisasi Nasional, "Standar Nasional Indonesia (SNI) 8460:2017 Persyaratan perancangan geoteknik," 2017, [Online]. Available: www.bsn.go.id
- [9] K. G. Prakash and A. Krishnamoorthy, "Evaluation of Stability of Embankment Constructed on Soft Consolidating Soil with Lime–CFG Composite Column System," *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, vol. 7, no. 3, Sep. 2021, doi: 10.1007/s40891-021-00302-w.
- [10] S. Ramadhani, "Perencanaan Dinding Penahan Tipe Gravitasi Pada Lokasi Bukit BTN Teluk Palu Permai."