

ANALISIS PARAMETRIK DAN EVALUASI KINERJA DINDING CONTIGUOUS BORED PILE PADA GALIAN DALAM

(Danang Setiya Raharja, Tiara Danti Sasikirana, dan Soerjandani Priantoro Machmoed)

ANALISIS PARAMETRIK DAN EVALUASI KINERJA DINDING CONTIGUOUS BORED PILE PADA GALIAN DALAM

Danang Setiya Raharja^{1*}, Tiara Danti Sasikirana², Soerjandani Priantoro Machmoed³

^{1,2,3}Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Wijaya Kusuma Surabaya, Surabaya
Jalan Dukuh Kupang XXV No. 54, Kota Surabaya, Jawa Timur, Indonesia, 60225

E-mail: raharja@uwks.ac.id^{1,*}, tiaradantis@gmail.com², soerjandani@uwks.ac.id³

(*) Penulis Korespondensi

(Artikel dikirim: 21 Januari 2026, Direvisi: 02 Maret 2026, Diterima: 31 Mei 2026)

DOI: <http://dx.doi.org/10.30742/axial.v14i1.5187>

ABSTRAK: Galian dalam pada kondisi tanah labil memerlukan sistem dinding penahan yang mampu menahan tekanan tanah lateral dan beban dinamis untuk mencegah deformasi berlebih serta kegagalan struktur. Penelitian sebelumnya mengenai *contiguous bored pile* (CBP) umumnya masih terbatas pada satu konfigurasi desain dan belum mengevaluasi pengaruh simultan parameter geometrik dan struktural terhadap respons sistem. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi diameter CBP, diameter tulangan, dan posisi angkur terhadap kinerja struktur CBP pada kondisi statik dan gempa melalui pendekatan analisis parametrik berbasis numerik. Analisis dilakukan menggunakan Geo5 modul *Sheeting Check* terhadap delapan alternatif desain dengan variasi diameter CBP 1,0 m dan 1,5 m, diameter tulangan 25 mm dan 32 mm, serta dua konfigurasi posisi angkur. Evaluasi meliputi deformasi lateral, distribusi tekanan tanah, momen lentur, gaya angkur, dan kapasitas struktural. Hasil menunjukkan bahwa peningkatan diameter CBP dari 1,0 m menjadi 1,5 m mampu menurunkan deformasi lateral maksimum sebesar 42%–43%, namun meningkatkan momen lentur sebesar 23%–24%. Variasi diameter tulangan berpengaruh signifikan terhadap kapasitas lentur, sedangkan posisi angkur tidak menunjukkan pengaruh berarti terhadap respons global struktur. Alternatif ke-4 dengan diameter CBP 1,0 m, tulangan 25 mm, dan posisi angkur 0,2 m serta 2,7 m menghasilkan konfigurasi paling optimal dengan deformasi lateral sebesar 22,3 mm dan kapasitas momen yang masih memenuhi persyaratan desain.

KATA KUNCI : *Contiguous Bored Pile (CBP), Deformasi lateral, Galian dalam, Rasio tulangan, Studi parametrik*

ABSTRACT : *Deep excavations in unstable soil conditions require retaining wall systems that can resist lateral earth pressure and dynamic loads, thereby preventing excessive deformation and structural failure. Previous studies on contiguous bored pile (CBP) systems have generally been limited to a single design configuration and have not comprehensively evaluated the simultaneous influence of geometric and structural parameters on system performance. Therefore, this study aims to analyse the effects of CBP diameter, reinforcement diameter, and anchor position on the performance of CBP structures under both static and seismic loading conditions using a parametric numerical approach. The analysis was conducted using the Geo5 Sheeting Check module on eight design alternatives with CBP diameters of 1.0 m and 1.5 m, reinforcement diameters of 25 mm and 32 mm, and two anchor configurations. The evaluation included lateral deformation, earth pressure distribution, bending moment, anchor force, and structural utilisation. The results indicate that increasing the CBP diameter from 1.0 m to 1.5 m reduced the maximum lateral deformation by 42%–43%, but increased the bending moment by 23%–24%. Reinforcement diameter significantly affected the flexural capacity, while anchor position showed no significant influence on the overall structural response. Alternative 4, with a 1.0 m CBP diameter, 25 mm reinforcement, and anchor positions at 0.2 m and 2.7 m, provided the most optimal configuration, producing a lateral deformation of 22.3 mm while still satisfying the required moment capacity criteria.*

KEYWORDS : *Contiguous Bored Pile (CBP), Deep excavation, Lateral deformation, Parametric study, Reinforcement ratio*

1. PENDAHULUAN

Pekerjaan galian dalam merupakan salah satu tantangan utama dalam rekayasa geoteknik modern, terutama pada pembangunan infrastruktur di kawasan dengan keterbatasan

ruang dan kondisi tanah yang kompleks. Pembangunan struktur bawah tanah seperti underpass memerlukan perencanaan dinding penahan tanah yang mampu menjaga stabilitas galian terhadap tekanan tanah lateral, gaya geser,



guling, serta daya dukung tanah untuk mencegah potensi keruntuhan (Nasrudin & Siswoyo, 2019). Proses penggalian menyebabkan redistribusi tegangan tanah yang signifikan, sehingga berpotensi menimbulkan deformasi lateral, penurunan permukaan tanah, serta kerusakan pada struktur di sekitarnya apabila tidak didukung oleh sistem penahan yang memadai. Kajian literatur terbaru menunjukkan bahwa perilaku deformasi sistem penahan galian dalam dipengaruhi oleh berbagai parameter, seperti rasio defleksi horizontal terhadap kedalaman galian, penurunan vertikal, serta zona pengaruh penurunan tanah, yang semuanya berkaitan erat dengan kekakuan sistem dan interaksi tanah-struktur (El-Nimr et al., 2022).

Salah satu sistem yang banyak digunakan untuk mendukung stabilitas galian dalam adalah dinding penahan tanah tipe *contiguous bored pile* (CBP). Sistem ini terdiri dari susunan tiang bor beton bertulang yang dipasang berdekatan untuk membentuk elemen penahan tanah yang mampu menahan tekanan lateral serta mengontrol deformasi. Dalam praktiknya, sistem CBP sering dikombinasikan dengan perkuatan ankur untuk meningkatkan kapasitas tahanan lateral dan mengurangi pergerakan dinding. Studi numerik menunjukkan bahwa kegagalan sistem ankur dapat secara signifikan mempengaruhi distribusi gaya dalam, momen lentur pada dinding, serta deformasi lateral, terutama pada bagian atas dinding dan area dekat dasar galian (Zhao et al., 2018).

Penelitian mengenai sistem penahan galian dalam juga menunjukkan bahwa kinerja struktur sangat dipengaruhi oleh konfigurasi dan interaksi antar elemen penahan. Studi pada sistem penahan komposit mengungkapkan bahwa parameter seperti kekakuan dinding, rasio penanaman (*embedment ratio*), serta gaya tarik ankur berpengaruh langsung terhadap distribusi momen lentur dan deformasi lateral selama tahapan penggalian. Selain itu, peningkatan kekakuan struktur cenderung menurunkan deformasi lateral, meskipun dapat meningkatkan gaya dalam pada elemen struktur (Cui et al., 2019).

Lebih lanjut, penelitian berbasis analisis numerik menunjukkan bahwa parameter desain seperti jumlah ankur, sudut inklinasi, ketebalan dinding, serta kondisi muka air tanah memiliki pengaruh signifikan terhadap stabilitas dan deformasi sistem galian dalam (Al-Ne'aimi & Nasir, 2023). Hal ini diperkuat oleh studi parametrik lain yang menunjukkan bahwa kekakuan dinding, kekakuan ankur, jumlah ankur, serta beban tambahan di permukaan tanah (*surcharge*) memberikan kontribusi

signifikan terhadap respons deformasi, gaya dalam, serta penurunan tanah di belakang dinding (Debnath & Pal, 2023). Di sisi lain, perbandingan berbagai metode perkuatan menunjukkan bahwa efektivitas sistem sangat bergantung pada konfigurasi geometrik dan interaksi tanah-struktur, sehingga pendekatan parametrik menjadi penting dalam menghasilkan desain yang optimal (Taghavi et al., 2024).

Penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh penulis pada Jurnal Ilmiah Indonesia melalui artikel Analisis Stabilitas Galian Dalam Menggunakan *Contiguous Bored Pile* dengan Perkuatan Ankur Berbasis Geo5 (Sasikirana & Raharja, 2026) menunjukkan bahwa penggunaan dinding CBP dengan sistem ankur mampu meningkatkan stabilitas galian dalam secara signifikan, dengan nilai faktor keamanan yang memenuhi kriteria serta deformasi lateral yang masih dalam batas izin. Namun demikian, penelitian tersebut masih terbatas pada satu konfigurasi desain, sehingga belum mampu menjelaskan sensitivitas kinerja sistem terhadap variasi parameter desain.

Meskipun berbagai penelitian telah dilakukan terkait sistem penahan tanah pada galian dalam, sebagian besar studi masih berfokus pada pengaruh individual parameter tertentu, seperti kekakuan dinding, jumlah ankur, atau kondisi pembebanan. Penelitian yang secara khusus mengevaluasi interaksi antara parameter geometrik utama dinding CBP, seperti diameter pile, konfigurasi tulangan, dan posisi ankur terhadap respons stabilitas dan deformasi secara simultan masih terbatas. Selain itu, kajian parametrik berbasis numerik menggunakan Geo5 pada sistem CBP berankur dengan evaluasi kinerja yang komprehensif juga masih jarang ditemukan pada studi terdahulu.

Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan studi sebelumnya melalui pendekatan analisis parametrik dan evaluasi kinerja dinding *contiguous bored pile* pada galian dalam. Analisis dilakukan dengan memvariasikan parameter desain utama, yaitu diameter *bored pile* dan posisi ankur, menggunakan pendekatan numerik berbasis Geo5. Evaluasi kinerja dilakukan secara komprehensif dengan mempertimbangkan faktor keamanan, deformasi lateral, penurunan, serta respons struktural. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat mengidentifikasi parameter paling berpengaruh serta menghasilkan rekomendasi desain yang lebih efektif dan rasional dalam perencanaan galian dalam.

ANALISIS PARAMETRIK DAN EVALUASI KINERJA DINDING CONTIGUOUS BORED PILE PADA GALIAN DALAM

(Danang Setiya Raharja, Tiara Danti Sasikirana, dan Soerjandani Priantoro Machmoed)

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1. Pendekatan Analisis

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode numerik untuk menganalisis kinerja dinding penahan tanah tipe CBP pada galian dalam. Modul *Sheeting Check* pada Geo5 digunakan untuk menganalisis stabilitas dinding penahan tanah dengan pendekatan keseimbangan batas (*limit equilibrium method*) dan metode verifikasi berbasis *safety factor (Allowable Stress Design/ASD)*. Dalam analisis ini, tekanan tanah lateral dihitung menggunakan teori *Coulomb Earth Pressure Theory* untuk kondisi aktif, sedangkan tekanan tanah pasif menggunakan pendekatan *Caquot-Kerisel Method*, yang mempertimbangkan pengaruh sudut geser dalam tanah dan interaksi tanah-struktur secara lebih realistis (FINE Ltd., 2023).

$$\sigma_a = \sigma_z K_a - 2c_{ef} K_{ac} \quad (1)$$

$$K_a = \frac{\cos^2(\varphi - \alpha)}{\cos^2 \alpha \cos(\alpha + \delta) \left(1 + \sqrt{\frac{\sin(\varphi + \delta) \sin(\varphi - \beta)}{\cos(\alpha + \delta) \cos(\alpha - \beta)}}\right)^2} \quad (2)$$

Keterangan:

- σ_a : Tekanan aktif horizontal
- σ_z : Tegangan geostatik vertikal
- c_{ef} : Kohesi efektif tanah
- K_a : Koefisien tekanan tanah aktif Coulomb
- K_{ac} : Koefisien tekanan tanah aktif akibat kohesi
- φ : Sudut geser internal tanah
- δ : Sudut friksi antara tanah dan struktur
- β : Sudut kemiringan lereng
- α : Sudut kemiringan sisi struktur bagian dalam

$$\sigma_p = \sigma_z K_p \psi + 2c \sqrt{K_p} \psi \quad (3)$$

Keterangan:

- σ_p : Tekanan pasif horizontal
- K_p : Koefisien tekanan pasif tanah untuk $\delta = -\varphi$
- ψ : Koefisien reduksi ψ for $|\delta| < \varphi$,
- c : Kohesi tanah

Analisis dilakukan dengan metode *dependent pressures*, di mana distribusi tekanan tanah dipengaruhi oleh deformasi dinding. Selain itu, model juga memperhitungkan pengaruh muka air tanah, beban tambahan di permukaan (*surchage load*), serta kontribusi gaya dari sistem ankur.

Untuk kondisi gempa, digunakan pendekatan pseudo-statik berdasarkan metode *Mononobe-Okabe Method* dalam menghitung tambahan tekanan tanah akibat beban seismik (FINE Ltd., 2023).

$$K_{ae} = \frac{\cos^2(\varphi - \psi - \alpha)}{\cos \psi \cos^2 \alpha \cos(\psi + \alpha + \delta) \left(1 + \sqrt{\frac{\sin(\varphi + \delta) \sin(\varphi - \beta)}{\cos(\delta + \psi + \alpha) \cos(-\beta + \alpha)}}\right)^2} \quad (4)$$

$$K_{pe} = \frac{\cos^2(\varphi - \psi + \alpha)}{\cos \psi \cos^2 \alpha \cos(\psi - \alpha + \delta) \left(1 - \sqrt{\frac{\sin(\varphi + \delta) \sin(\varphi - \beta)}{\cos(\delta + \psi - \alpha) \cos(\beta - \alpha)}}\right)^2} \quad (5)$$

Keterangan:

- K_{ae} : Koefisien tekanan aktif kondisi gempa
- K_{pe} : Koefisien tekanan pasif kondisi gempa
- γ : Berat volume tanah
- H : Tinggi struktur penahan tanah
- kv : Koefisien percepatan gempa arah vertikal
- kh : Koefisien percepatan gempa arah horizontal
- ψ : Sudut inersia seismik

Respons struktur dianalisis dengan mempertimbangkan modulus reaksi tanah (*modulus of subsoil reaction*) menggunakan metode Schmitt (1995), dengan reduksi pada kondisi dinding berangkur (*anchored sheeting*) (FINE Ltd., 2023).

$$k_h = 2.1 \left(\frac{E_{oed}^{4/3}}{(EI)^{1/3}} \right) \quad (6)$$

Keterangan:

- kh : Modulus reaksi tanah
- EI : Kekakuan bending struktur dinding [MNm^2/m]
- E_{oed} : Modulus Oedometriksi [MPa]

Selain itu, verifikasi elemen struktur mengacu pada standar desain, yaitu ACI 318-19 untuk beton dan EN 1993-1-1 untuk baja, dengan faktor parsial kapasitas baja sebesar $\gamma M_0 = 1,00$. Dengan pendekatan ini, analisis mampu mengevaluasi stabilitas, distribusi gaya dalam, serta deformasi lateral dinding penahan tanah secara komprehensif.

Validasi model dilakukan dengan membandingkan hasil analisis numerik terhadap perilaku empiris dan hasil penelitian terdahulu terkait galian dalam dengan sistem dinding berangkur. Parameter validasi meliputi distribusi deformasi lateral dan gaya dalam pada dinding. Hasil analisis dengan *Sheeting Check* dibandingkan dengan perilaku struktur yang dilaporkan oleh Zhao et al. (2018).

Melalui pendekatan ini, program mampu mengevaluasi faktor keamanan terhadap potensi kegagalan seperti guling dan geser, serta menghitung distribusi gaya dalam berupa momen lentur dan gaya geser pada dinding. Selain aspek stabilitas, deformasi lateral dinding juga dianalisis untuk menilai kinerja struktur dalam mengendalikan pergerakan tanah. Proses analisis dilakukan secara bertahap mengikuti tahapan konstruksi (*construction stage analysis*), sehingga respons sistem penahan tanah dapat direpresentasikan secara lebih realistis sesuai dengan kondisi aktual di lapangan.

2.2. Data Penelitian

Data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data sekunder yang diperoleh dari salah satu proyek galian dalam. Data penelitian meliputi data tanah yang berupa bor dalam lengkap dengan *standard penetration test* (SPT) serta data geometri galian dalam.

Gambar 1 menunjukkan lapisan tanah dan sebaran nilai N-SPT terhadap kedalaman. Pada kedalaman 0 hingga sekitar 5 m, lapisan tanah didominasi oleh lanau berpasir dengan nilai N-SPT yang relatif rendah, berkisar antara 0 hingga 4. Nilai ini menunjukkan bahwa tanah berada dalam kondisi sangat lunak hingga lunak, dengan daya dukung yang rendah serta potensi deformasi yang tinggi apabila dibebani.

Selanjutnya, pada kedalaman ± 5 m hingga 8 m, terdapat lapisan lempung kaku berpasir dengan nilai N-SPT meningkat menjadi sekitar 9 hingga 24. Kondisi ini menunjukkan perubahan karakteristik tanah menjadi konsistensi sedang hingga kaku, dengan peningkatan kapasitas dukung dan kekakuan tanah dibandingkan lapisan di atasnya.

Pada kedalaman ± 8 m hingga 14 m, lapisan tanah kembali didominasi oleh lanau berpasir sangat kaku hingga keras, dengan nilai N-SPT yang cukup tinggi, yaitu berkisar antara 30 hingga 61.

Nilai ini menunjukkan bahwa tanah memiliki kepadatan dan kekuatan yang tinggi, sehingga berpotensi memberikan kontribusi signifikan terhadap tahanan lateral pada sistem dinding penahan tanah.

Memasuki kedalaman ± 14 m hingga 20 m, nilai N-SPT menunjukkan fluktuasi antara 19 hingga 55, yang mengindikasikan adanya variasi kondisi tanah dari kaku hingga sangat kaku. Variasi ini kemungkinan disebabkan oleh heterogenitas material tanah atau perubahan komposisi butiran. Pada kedalaman lebih dalam, yaitu ± 20 m hingga 30 m, lapisan tanah kembali didominasi oleh lanau berpasir kaku hingga sangat keras, dengan nilai N-SPT berkisar antara 34 hingga 100. Nilai N-SPT yang mencapai lebih dari 60 bahkan hingga 100 menunjukkan bahwa tanah berada dalam kondisi sangat padat atau keras, yang umumnya memiliki kapasitas dukung tinggi serta deformasi yang relatif kecil.

Parameter tanah (**Tabel 1**) yang digunakan dalam penelitian ini tidak diperoleh secara langsung melalui pengujian laboratorium lengkap, melainkan ditentukan berdasarkan korelasi empiris dan justifikasi dari nilai SPT yang diperoleh dari data penyelidikan tanah (Ameratunga et al., 2016; Carter & Bentley, 2016; Look, 2014). Pendekatan ini umum digunakan dalam analisis geoteknik, khususnya pada studi numerik, karena nilai N-SPT dapat memberikan indikasi yang cukup representatif terhadap sifat mekanik tanah, seperti berat isi, kohesi, sudut geser dalam, serta modulus deformasi.

Gambar 2 menunjukkan konfigurasi sistem penahan tanah tipe *contiguous bored pile* (CBP) pada galian dalam dengan kedalaman 7 m, di mana dinding CBP memiliki panjang total 24 m. Sistem diperkuat dengan dua baris angkur yang dipasang miring ke arah belakang tanah, dengan angkur baris pertama berada pada kepala CBP dan angkur baris kedua pada elevasi lebih dalam,

Tabel 1. Parameter tanah desain

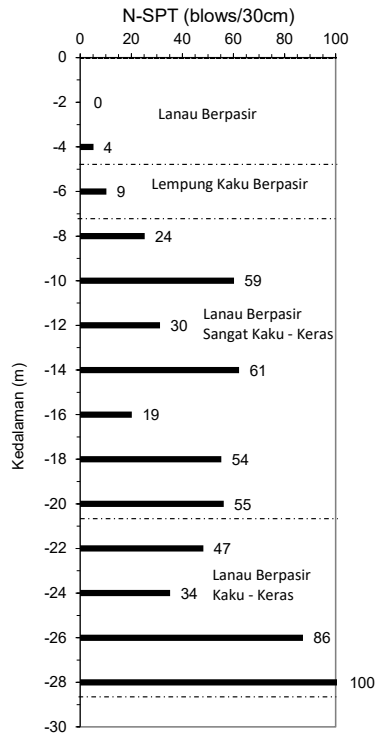
Parameter	Lanau Berpasir	Lempung Kaku Berpasir	Berpasir Lanau Sangat Kaku	Lanau Berpasir Kaku Keras	Lanau Berpasir Keras Abu-abu
Kedalaman (m)	0,00 – -4,55	-4,55 – -7,00	-7,00 – -20,00	-20,00 – -26,00	-26,00 – -28,00
N-SPT	4	9	30	47	100
γ (kN/m ³)	15	16	17	18	21
γ_{sat} (kN/m ³)	18	19	20,4	21	22
ϕ_{ef} (°)	26	28	30	31	33
C _{ef} (kPa)	5	6	15	15	15
δ struc-soil (°)	17,3	18,7	20	20,7	22
ν	0,33	0,34	0,3	0,3	0,34
E _{oed} (MPa)	4	5	15	20	50

Sumber: Hasil pengolahan / interpretasi data

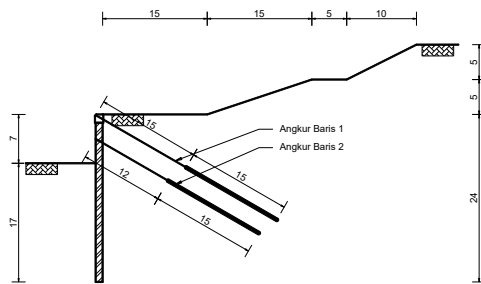
ANALISIS PARAMETRIK DAN EVALUASI KINERJA DINDING *CONTIGUOUS BORED PILE* PADA GALIAN DALAM

(Danang Setiya Raharja, Tiara Danti Sasikirana, dan Soerjandani Priantoro Machmoed)

masing-masing terdiri dari panjang bebas (*free length*) dan panjang ikatan (*bond length*). Pada bagian atas, profil tanah membentuk lereng bertahap dengan panjang segmen horizontal sekitar 15 m, 15 m, 5 m, dan 10 m serta kenaikan elevasi trap setiap ±5 m, yang berpotensi memberikan beban tambahan terhadap dinding.



Gambar 1. Grafik Nilai N-SPT terhadap Kedalaman



Gambar 2. Skema geometri galian dalam

Pada pemodelan menggunakan modul *Sheeting Check* di Geo5, kondisi batas (*boundary condition*) direpresentasikan melalui interaksi tanah–struktur dan distribusi tekanan tanah lateral di sepanjang dinding penahan. Pada sisi belakang dinding (sisi kiri model), diterapkan tekanan tanah aktif akibat massa tanah, beban tambahan (*surchage load*), serta pengaruh tekanan air tanah. Pada sisi depan dinding (sisi

kanan model), berkembang tekanan tanah pasif yang berfungsi sebagai tahanan lateral terhadap pergerakan dinding.

Pada bagian bawah model, dinding diasumsikan tertanam cukup dalam sehingga tanah di bawah dasar galian memberikan tahanan pasif dan kekangan rotasi (*partial fixity*) terhadap dinding. Kondisi ini memungkinkan transfer gaya lateral ke tanah pendukung di bagian bawah. Sementara itu, bagian atas model dianggap sebagai permukaan bebas (*free surface*), sehingga deformasi lateral masih dapat terjadi akibat proses penggalian dan pembebanan di permukaan tanah.

Selain itu, interaksi tanah–struktur dimodelkan menggunakan pendekatan *modulus of subsoil reaction*, di mana tanah direpresentasikan sebagai pegas elastis kontinu di sepanjang dinding. Dengan asumsi tersebut, respons deformasi dan distribusi gaya dalam dinding dapat dianalisis secara bertahap sesuai tahapan konstruksi (*construction stage analysis*).

2.3. Variasi Parametrik Dinding *Contiguous Bored Pile*

Error! Not a valid bookmark self-reference. menunjukkan variasi parametrik desain dinding CBP yang dianalisis dalam penelitian ini. Variasi dilakukan terhadap tiga parameter utama, yaitu diameter CBP (1,0 m dan 1,5 m), diameter tulangan (25 mm dan 32 mm), serta posisi angkur pada dua elevasi yang berbeda. Posisi angkur divariasikan pada kombinasi elevasi dangkal (1 m dan 3,5 m) dan lebih dalam (0,2 m dan 2,7 m) untuk mengevaluasi pengaruhnya terhadap kinerja sistem penahan tanah. Secara keseluruhan, delapan alternatif konfigurasi dianalisis untuk mengidentifikasi pengaruh masing-masing parameter terhadap stabilitas, deformasi, dan respons struktural dinding CBP.

Tabel 2. Alternatif Variabel CBP

Alt. ke-	Dia. CBP	Dia. tulangan	Posisi angkur 1	Posisi angkur 2
	m	mm	m	m
1	1	32	1	3,5
2	1	25	1	3,5
3	1	32	0,2	2,7
4	1	25	0,2	2,7
5	1,5	32	1	3,5
6	1,5	25	1	3,5
7	1,5	32	0,2	2,7
8	1,5	25	0,2	2,7

Sumber: Olahan data penulis, 2025

2.4. Pembebanan

Pembebanan yang diterapkan dalam pemodelan meliputi tekanan tanah lateral berupa tekanan tanah aktif dan pasif yang dihitung secara otomatis oleh perangkat lunak Geo5. Selain itu, diberikan beban tambahan di permukaan tanah sesuai ketentuan dalam SNI 8460:2017, yaitu sebesar 10–15 kN/m². Pengaruh gempa diperhitungkan menggunakan metode pseudo-statik, dengan koefisien percepatan horizontal (k_h) yang dihitung menggunakan persamaan $k_h = 0,5 \times PGA \times F_{PGA}$. Nilai *Peak Ground Acceleration* (PGA) yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebesar 0,23g. Berdasarkan data N-SPT, klasifikasi tanah ditentukan melalui perhitungan rata-rata terbobot dan menunjukkan bahwa kondisi tanah termasuk dalam kelas situs lunak (SE). Mengacu pada tabel dalam SNI 8460:2017, diperoleh nilai faktor amplifikasi gempa (F_{PGA}) sebesar 1,5, sehingga nilai koefisien gempa horizontal menjadi $k_h = 0,5 \times 0,23 \times 1,5 = 0,15g$. Nilai ini digunakan dalam analisis untuk merepresentasikan pengaruh beban gempa terhadap stabilitas dinding penahan tanah.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Perbandingan Hasil Deformasi Lateral CBP

Berdasarkan hasil analisis deformasi lateral CBP pada **Tabel 3** dan **Tabel 4** serta verifikasi dari **Gambar 1**, terlihat adanya perbedaan perilaku yang cukup signifikan antara variasi diameter CBP pada kondisi statik dan gempa, baik dari sisi besaran deformasi maupun pola distribusinya terhadap kedalaman.

Tabel 3. Hasil perbandingan deformasi lateral CBP

Alt.	Deformasi Lateral (mm)		Rasio Gempa/Statik
	Statik	Gempa	
1	17,4	43,4	2,5
2	17,4	43,4	2,5
3	22,3	45,3	2,0
4	22,3	45,3	2,0
5	9,9	40,5	4,1
6	9,9	40,5	4,1
7	13	39	3,0
8	13	39	3,0

Sumber: Hasil analisis, 2025

Tabel 4. Perbandingan deformasi antara CBP 1m dan 1,5m

Alt.	Deformasi CBP (mm)		Perbedaan Deformasi (mm)	Persen. (%)
	1 m	1,5 m		
1 vs 5	17,4	9,9	7,5	43%
2 vs 6	17,4	9,9	7,5	43%
3 vs 7	22,3	13	9,3	42%
4 vs 8	22,3	13	9,3	42%

Sumber: Hasil analisis, 2025

Pada kondisi statik, CBP dengan diameter 1,5 m (Alt. 5–8) menunjukkan nilai deformasi yang lebih kecil, yaitu berkisar antara 9,9 mm hingga 13 mm, dibandingkan CBP diameter 1,0 m (Alt. 1–4) yang berada pada rentang 17,4 mm hingga 22,3 mm. Dari grafik deformasi, pola yang terbentuk relatif halus dengan kurva yang menyerupai bentuk lengkung tunggal (*cantilever behavior*), di mana deformasi maksimum terjadi di bagian atas dinding dan berkurang seiring bertambahnya kedalaman. Hal ini konsisten dengan distribusi tekanan tanah statik yang meningkat secara bertahap terhadap kedalaman, sehingga respons struktur masih didominasi oleh tekanan tanah aktif konvensional. Kondisi ini menegaskan bahwa peningkatan diameter meningkatkan kekakuan sistem sehingga mampu mereduksi deformasi lateral.

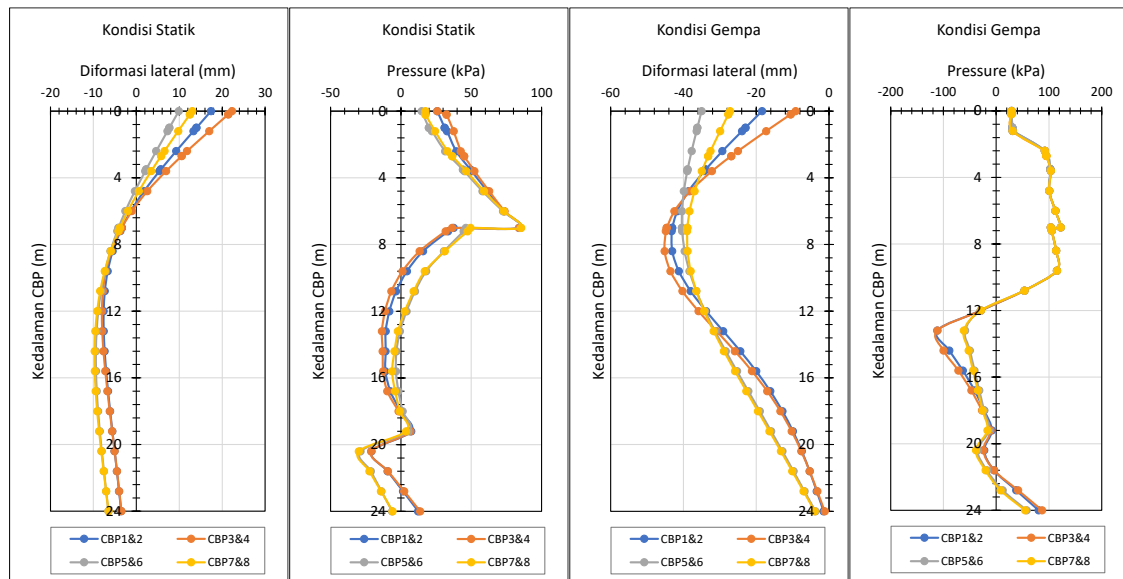
Namun demikian, pada kondisi beban gempa, tidak hanya besaran deformasi yang berubah, tetapi juga pola deformasinya. Grafik menunjukkan bahwa deformasi lateral menjadi lebih besar (sekitar 39–45 mm) dan cenderung membentuk kurva yang lebih kompleks, dengan indikasi pergeseran titik maksimum deformasi ke kedalaman tertentu (tidak hanya di bagian atas). Pola ini sejalan dengan perubahan distribusi tekanan tanah pada kondisi gempa, di mana berdasarkan pendekatan Mononobe–Okabe, tekanan tanah tidak lagi terdistribusi linier, melainkan mengalami peningkatan signifikan di dekat permukaan serta redistribusi di sepanjang kedalaman.

Distribusi tekanan gempa pada grafik juga menunjukkan adanya zona peningkatan tekanan yang lebih dominan di bagian atas hingga tengah dinding, yang kemudian diikuti oleh perubahan gradien tekanan di bagian bawah. Perubahan distribusi tekanan ini secara langsung memengaruhi bentuk kurva deformasi, sehingga dinding tidak lagi berperilaku seperti kantilever sederhana, melainkan menunjukkan respons yang lebih dinamis dan terdistribusi.

Fenomena ini juga menjelaskan mengapa pada kondisi gempa, perbedaan deformasi antara CBP diameter 1,0 m dan 1,5 m menjadi tidak terlalu

ANALISIS PARAMETRIK DAN EVALUASI KINERJA DINDING *CONTIGUOUS BORED PILE* PADA GALIAN DALAM

(Danang Setiya Raharja, Tiara Danti Sasikirana, dan Soerjandani Priantoro Machmoed)



Gambar 3. Distribusi deformasi dan tekanan pada CBP kondisi Statik dan Gempa
Sumber: Hasil analisis, 2025

signifikan (rata-rata ± 42 mm). Meskipun diameter lebih besar memberikan kekakuan lebih tinggi, peningkatan massa struktur pada CBP 1,5 m menyebabkan gaya inersia dan tekanan tanah dinamis yang lebih besar, sehingga deformasi yang terjadi menjadi relatif setara. Hal ini tercermin pula pada rasio deformasi gempa terhadap statik yang lebih tinggi pada diameter 1,5 m (3,0–4,1) dibandingkan diameter 1,0 m (2,0–2,5).

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa peningkatan diameter CBP efektif dalam mengurangi deformasi pada kondisi statik, namun pada kondisi gempa terjadi perubahan pola deformasi akibat redistribusi tekanan tanah dinamis. Perubahan ini menyebabkan respons struktur menjadi lebih kompleks dan mengurangi efektivitas peningkatan kekakuan semata, sehingga analisis desain perlu mempertimbangkan interaksi antara kekakuan, massa, dan distribusi tekanan tanah secara menyeluruh.

3.2. Perbandingan *Bending Moment* pada CBP

Berdasarkan hasil analisis pada **Tabel 5** dan **Tabel 6** serta verifikasi dari distribusi momen pada **Gambar 4**, terlihat bahwa CBP dengan diameter 1,5 m (Alt. 5–8) secara umum menghasilkan nilai momen lentur yang lebih besar dibandingkan CBP diameter 1,0 m (Alt. 1–4), baik pada kondisi statik maupun gempa. Pada kondisi statik, momen lentur meningkat dari kisaran 547,50–681,62 kNm/m menjadi 866,40–1041,37 kNm/m, sedangkan pada kondisi gempa

meningkat dari sekitar 1384,69–1648,43 kNm/m menjadi 1697,94–2037,09 kNm/m.

Tabel 5. Perbandingan bending momen CBP

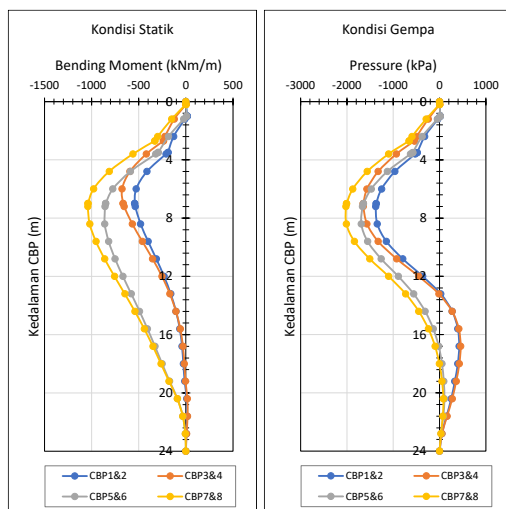
Alt.	Bending Momen (kNm/m)		Rasio Gempa/Statik
	Statik	Gempa	
1	547,50	1384,69	2,5
2	547,50	1384,69	2,5
3	681,62	1648,43	2,4
4	681,62	1648,43	2,4
5	866,40	1697,94	2,0
6	866,40	1697,94	2,0
7	1041,37	2037,09	2,0
8	1041,37	2037,09	2,0

Sumber: Hasil analisis, 2025

Tabel 6. Perbandingan moment CBP 1m dan 1,5m

Alt.	B. Momen CBP (kNm)		Perbedaan B. Momen (kNm)	Persen (%)
	1 m	1,5 m		
1 vs 5	1385	1698	313	23%
2 vs 6	1385	1698	313	23%
3 vs 7	1648	2037	389	24%
4 vs 8	1648	2037	389	24%

Sumber: Hasil analisis, 2025



Gambar 4. Distribusi *bending moment* pada CBP

Sumber: Hasil analisis, 2025

Jika ditinjau lebih lanjut dari distribusi momen sepanjang kedalaman CBP, terlihat bahwa pada kondisi statik pola momen membentuk kurva dengan satu titik maksimum (*single curvature*) yang umumnya terjadi pada kedalaman menengah (sekitar 6–10 m). Pada bagian atas, momen relatif kecil karena kondisi kepala dinding yang lebih bebas, kemudian meningkat seiring bertambahnya tekanan tanah hingga mencapai maksimum, dan selanjutnya menurun kembali ke arah ujung bawah akibat kontribusi tahanan tanah pasif. Pada CBP diameter 1,5 m, kurva momen cenderung lebih “melebar” (nilai absolut lebih besar) namun dengan bentuk yang relatif sama, yang menunjukkan bahwa peningkatan kekakuan tidak mengubah pola dasar, melainkan memperbesar respons gaya dalam.

Pada kondisi gempa, distribusi momen menunjukkan perubahan yang cukup signifikan. Kurva momen menjadi lebih besar secara keseluruhan dan cenderung mengalami pergeseran serta pelebaran zona momen maksimum, bahkan pada beberapa alternatif terlihat adanya kecenderungan kurva yang lebih kompleks (tidak sepenuhnya simetris seperti kondisi statik). Hal ini sejalan dengan distribusi tekanan tanah dinamis yang tidak lagi linier, di mana peningkatan tekanan di bagian atas hingga tengah dinding menyebabkan redistribusi momen yang lebih luas sepanjang kedalaman. Akibatnya, tidak hanya nilai maksimum yang meningkat, tetapi juga rentang kedalaman yang mengalami momen tinggi menjadi lebih panjang. Fenomena ini tetap konsisten dengan hasil deformasi sebelumnya. CBP diameter 1,5 m

yang lebih kaku menghasilkan deformasi lebih kecil, namun kurvatur yang terjadi akibat beban - terutama beban gempa - ditransformasikan menjadi momen lentur yang lebih besar dan terdistribusi lebih luas. Sebaliknya, pada CBP diameter 1,0 m, deformasi yang lebih besar menyebabkan sebagian energi terserap dalam bentuk perpindahan, sehingga distribusi momennya relatif lebih kecil. Selain itu, pada kondisi gempa, pengaruh massa struktur juga berkontribusi terhadap peningkatan momen, terutama pada diameter 1,5 m. Gaya inersia yang lebih besar menyebabkan peningkatan tekanan tanah dinamis, yang kemudian tercermin pada distribusi momen yang lebih tinggi di sepanjang dinding.

Rasio gempa terhadap statik yang sedikit lebih rendah pada diameter 1,5 m (sekitar 2,0) dibandingkan diameter 1,0 m (sekitar 2,4–2,5) menunjukkan bahwa meskipun nilai momen absolut lebih besar, respons relatif terhadap gempa lebih terkendali pada struktur yang lebih kaku. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa peningkatan diameter tidak hanya meningkatkan besaran momen lentur, tetapi juga memperluas distribusi momen sepanjang kedalaman CBP, terutama pada kondisi gempa, sebagai akibat dari interaksi antara kekakuan struktur, massa, dan distribusi tekanan tanah.

3.3. Perbandingan Gaya pada Angkur

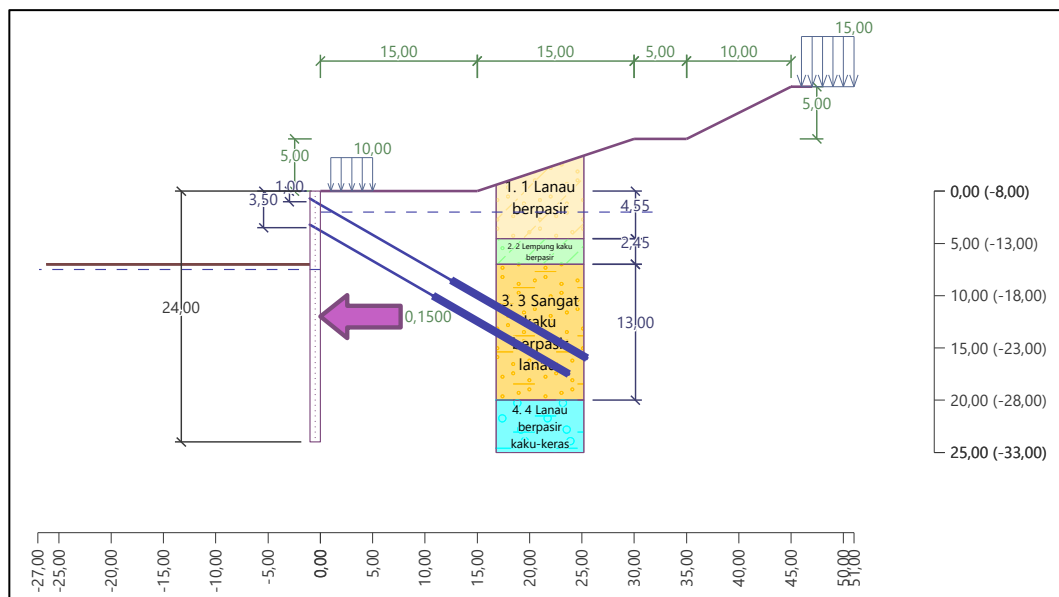
Berdasarkan analisis kapasitas angkur, diketahui bahwa angkur Baris 1 dan Baris 2 memiliki kapasitas yang sama karena bagian *grouting* berada pada lapisan yang seragam (**Gambar 5**). Nilai *Angkur Strength* (R_t) sebesar 734,33 kN, sementara *pull-out resistance* dari tanah (R_e) sebesar 742,2 kN dan *pull-out resistance* dari *grouting* mencapai 1438,57 kN.

Berdasarkan **Tabel 7** (kondisi statik), seluruh alternatif menunjukkan tingkat utilisasi yang masih aman. Nilai $Ultz. A1$ berada pada kisaran 41,72–48,18%, sedangkan $Ultz. A2$ berkisar antara 50–51,7%. Hal ini mengindikasikan bahwa gaya angkur yang bekerja masih jauh di bawah kapasitasnya, sehingga pada kondisi statik seluruh alternatif (Alt. 1–8) dapat dikategorikan aman tanpa indikasi *overcapacity*. Secara definisi, utilisasi (*utilization ratio*) merupakan perbandingan antara gaya yang terjadi pada angkur terhadap kapasitas ultimit angkur tersebut. Nilai ini umumnya dinyatakan dalam persen (%), di mana:

- Nilai $< 100\%$ → masih aman (gaya $<$ kapasitas),
- Nilai $\approx 100\%$ → kondisi kritis (mendekati kapasitas),

ANALISIS PARAMETRIK DAN EVALUASI KINERJA DINDING CONTIGUOUS BORED PILE PADA GALIAN DALAM

(Danang Setiya Raharja, Tiara Danti Sasikirana, dan Soerjandani Priantoro Machmoed)



Gambar 5. Geometri model dinding CBP

Sumber: Hasil analisis, 2025

- c) Nilai $> 100\%$ → tidak aman (melampaui kapasitas).

Tabel 7. Perbandingan gaya angkur kondisi Statik

Alt.	Force A1 (kN)	Ultz. A1 (%)	Force A2 (kN)	Ultz. A2 (%)
1	326,06	44,4	369,15	50,27
2	326,06	44,4	369,15	50,27
3	306,37	41,72	367,14	50
4	306,37	41,72	367,14	50
5	353,78	48,18	379,64	51,7
6	353,78	48,18	379,64	51,7
7	338,86	46,15	377,51	51,41
8	338,86	46,15	377,51	51,41

Sumber: Hasil analisis, 2025

Pada **Tabel 8** (kondisi gempa), terjadi peningkatan signifikan pada gaya angkur yang berdampak langsung pada nilai utilisasi. Untuk Angkur A1, seluruh alternatif masih berada dalam batas aman dengan utilisasi antara 75,2–94,17%, meskipun beberapa alternatif seperti Alt. 5–6 sudah mendekati kapasitas maksimum. Sementara itu, pada Angkur A2, sebagian besar alternatif berada sangat dekat dengan batas kapasitas (sekitar 95–98%), bahkan Alt. 5 dan 6 menunjukkan nilai utilisasi melebihi 100% (101,47%), yang berarti tidak aman karena telah melampaui kapasitas desain.

Tabel 8. Perbandingan gaya angkur kondisi Gempa

Alt.	Force A1 (kN)	Ultz. A1 (%)	Force A2 (kN)	Ultz. A2 (%)
1	610,72	83,17	720,98	98,18
2	610,72	83,17	720,98	98,18
3	552,24	75,2	699,73	95,29
4	552,24	75,2	699,73	95,29
5	691,51	94,17	745,1	101,47
6	691,51	94,17	745,1	101,47
7	647,88	88,23	723,65	98,55
8	647,88	88,23	723,65	98,55

Sumber: Hasil analisis, 2025

Dengan demikian, alternatif yang masih tergolong aman pada kondisi gempa adalah Alt. 1, 2, 3, 4, 7, dan 8, meskipun beberapa di antaranya berada dalam kondisi kritis (mendekati 100%). Sedangkan Alt. 5 dan 6 tidak memenuhi kriteria keamanan, khususnya pada Angkur A2.

3.4. Perbandingan Tulangan CBP

Berdasarkan **Tabel 9** terkait perbandingan kebutuhan tulangan pada 8 alternatif CBP, dapat dilihat bahwa parameter utama dalam penentuan desain tulangan adalah rasio tulangan, yaitu perbandingan antara luas tulangan terhadap luas penampang beton. Nilai ini menjadi indikator kecukupan penampang dalam menahan gaya dalam, khususnya momen dan geser.

Dari konfigurasi yang digunakan, Alternatif 1, 3, 5, dan 7 menggunakan tulangan diameter 32 mm,

sedangkan Alternatif 2, 4, 6, dan 8 menggunakan tulangan diameter 25 mm, dengan jumlah batang yang disesuaikan untuk mencapai rasio tulangan yang relatif setara pada masing-masing kelompok diameter.

Tabel 9. Perbandingan tulangan CBP

Alt.	Dia. (mm)	Jml. (buah)	Cover (mm)	Rasio tulangan (%)	Util. Shear (%)	Util. Moment (%)
1	32,3	20	150	1,041	44,8	94,2
2	25,4	30	150	1,032	44,8	94,6
3	32,3	20	150	1,041	48,9	112,1
4	25,4	30	150	1,032	48,9	112,6
5	32,3	25	150	0,578	41,3	82,3
6	25,4	40	150	0,573	41,3	82,7
7	32,3	25	150	0,578	45,4	98,8
8	25,4	40	150	0,573	45,4	99,2

Sumber: Hasil analisis, 2025

Jika ditinjau berdasarkan diameter CBP, terlihat perbedaan yang cukup signifikan:

- CBP diameter 1,0 m (Alt. 1–4) membutuhkan rasio tulangan sekitar 1,03–1,04%.
- CBP diameter 1,5 m (Alt. 5–8) hanya membutuhkan rasio sekitar 0,57–0,58%.

Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan diameter struktur secara signifikan meningkatkan kapasitas penampang (*section modulus*), sehingga kebutuhan tulangan relatif menjadi lebih kecil untuk menahan gaya yang bekerja.

Dari sisi kinerja struktur:

- Alternatif 1 dan 2 masih dalam kondisi aman, dengan utilisasi momen sekitar 94–95% dan geser sekitar 44,8%.
- Alternatif 3 dan 4 menunjukkan utilisasi momen melebihi 100% ($\pm 112\%$), sehingga tidak aman dan memerlukan penambahan kapasitas (baik melalui peningkatan tulangan atau dimensi).
- Alternatif 5 dan 6 merupakan kondisi paling aman, dengan utilisasi momen hanya sekitar 82–83%.
- Alternatif 7 dan 8 berada pada kondisi mendekati batas kapasitas ($\pm 99\%$), sehingga masih tergolong aman namun cukup kritis.

Menariknya, untuk pasangan alternatif dengan diameter tulangan berbeda (misalnya Alt. 1 vs 2, 3 vs 4, dst.), terlihat bahwa perbedaan diameter tulangan (32 mm vs 25 mm) tidak memberikan perbedaan signifikan terhadap kinerja, selama rasio tulangan yang dihasilkan relatif sama. Hal

ini menegaskan bahwa dalam desain CBP, rasio tulangan lebih berpengaruh dibandingkan kombinasi diameter dan jumlah batang secara individual.

3.5. Diskusi

Berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan, temuan dalam penelitian ini menunjukkan konsistensi yang kuat serta memperkuat hasil penelitian sebelumnya sebagaimana disajikan dalam Sasikirana & Raharja (2026) terkait analisis stabilitas galian dalam menggunakan *contiguous bored pile* dengan perkuatan angkur berbasis Geo5.

Pada penelitian Sasikirana & Raharja (2026) tersebut dijelaskan bahwa diameter tulangan merupakan parameter paling dominan dalam menentukan kinerja struktural CBP, khususnya terhadap kapasitas momen lentur. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan tulangan diameter 25 mm tidak memenuhi persyaratan, sedangkan diameter 32 mm mampu memenuhi kapasitas struktur, terutama terhadap bending. Temuan ini selaras dengan hasil analisis pada studi ini, di mana alternatif dengan rasio tulangan yang tidak mencukupi (misalnya Alt. 3 dan 4) menunjukkan nilai utilisasi momen melebihi 100%, sehingga tidak aman. Sebaliknya, alternatif dengan konfigurasi tulangan yang memadai (seperti Alt. 1, 2, 5, dan 6) mampu memenuhi kriteria desain.

Lebih lanjut, Sasikirana & Raharja (2026) juga menyatakan bahwa variasi posisi angkur tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap stabilitas sistem CBP. Hasil penelitian ini memperkuat kesimpulan tersebut, di mana perubahan konfigurasi alternatif (yang mencakup variasi posisi angkur dan parameter lainnya) tidak menunjukkan perbedaan signifikan terhadap respons global seperti deformasi dan distribusi tekanan tanah, melainkan lebih dipengaruhi oleh parameter struktural seperti diameter CBP dan rasio tulangan.

Selain itu, hasil penelitian ini memberikan pengayaan terhadap studi sebelumnya dengan menunjukkan bahwa:

- Diameter CBP (1,0 m vs 1,5 m) berpengaruh signifikan terhadap deformasi dan momen lentur, di mana diameter yang lebih besar meningkatkan kekakuan dan menurunkan deformasi, namun meningkatkan gaya dalam (momen) (Zhao et al., 2018).
- Pada kondisi gempa, terjadi perubahan pola distribusi tekanan tanah dan deformasi, yang berdampak pada redistribusi momen sepanjang kedalaman dinding. Hal ini memperluas pemahaman dari penelitian

ANALISIS PARAMETRIK DAN EVALUASI KINERJA DINDING *CONTIGUOUS BORED PILE* PADA GALIAN DALAM

(Danang Setiya Raharja, Tiara Danti Sasikirana, dan Soerjandani Priantoro Machmoed)

sebelumnya yang lebih berfokus pada evaluasi kapasitas struktural.

- c) Interaksi antara kekakuan struktur, massa, dan beban dinamis menjadi faktor penting dalam menentukan respons CBP, khususnya pada kondisi gempa, yang belum dibahas secara mendalam pada penelitian sebelumnya.

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa hasil penelitian ini tidak hanya selaras, tetapi juga memperkuat dan memperluas temuan dalam jurnal tersebut, terutama dalam menegaskan bahwa:

- a) Rasio tulangan (yang dipengaruhi oleh diameter dan jumlah tulangan) adalah faktor kunci dalam desain struktural CBP.
 b) Parameter geometrik seperti diameter CBP berperan penting dalam mengontrol deformasi dan distribusi gaya dalam.
 c) Pengaruh parameter lain seperti posisi angkur relatif lebih kecil dibandingkan parameter struktural utama.

Secara keseluruhan, penelitian ini memberikan validasi tambahan terhadap hasil studi terdahulu sekaligus memperkaya interpretasi perilaku CBP, khususnya dalam konteks beban dinamis dan distribusi respons sepanjang kedalaman struktur.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis yang dilakukan, dapat disimpulkan bahwa kinerja struktur *Contiguous Bored Pile* (CBP) dalam menahan beban lateral sangat dipengaruhi oleh parameter geometrik dan struktural, khususnya diameter CBP dan rasio tulangan. CBP dengan diameter lebih besar (1,5 m) terbukti lebih kaku sehingga mampu mereduksi deformasi lateral pada kondisi statik sebesar 42%-43%, namun menghasilkan momen lentur yang lebih besar (23%-24%) serta respons yang lebih kompleks pada kondisi gempa akibat peningkatan massa dan gaya inersia. Analisis juga menunjukkan bahwa rasio tulangan merupakan faktor kunci dalam memenuhi kapasitas momen, di mana alternatif dengan rasio tidak mencukupi mengalami kegagalan lentur, sedangkan konfigurasi dengan rasio memadai berada dalam batas aman. Selain itu, pengaruh posisi angkur terhadap respons global relatif tidak signifikan dibandingkan pengaruh parameter struktural utama. Pada kondisi gempa, terjadi perubahan distribusi tekanan tanah yang menyebabkan perubahan pola deformasi dan distribusi momen sepanjang kedalaman dinding. Dengan demikian, alternatif ke-4 dengan diameter CBP 1 m, diameter tulangan 25 mm, dan posisi angkur pada elevasi 0,2 m dan 2,7 m merupakan konfigurasi paling optimal karena

menghasilkan deformasi lateral 22,3 mm serta kapasitas momen yang masih memenuhi persyaratan desain.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Al-Ne'aimi, R. M. S., & Nasir, H. K. (2023). Numerical study of design parameters influencing anchored diaphragm walls for deep excavation. *Innovative Infrastructure Solutions*, 8(11), 301. <https://doi.org/10.1007/s41062-023-01261-z>
- Ameratunga, J., Sivakugan, N., & Das, B. M. (2016). *Correlations of soil and rock properties in geotechnical engineering*. Springer.
- Carter, M., & Bentley, S. P. (2016). *Soil properties and their correlations*. John Wiley & Sons.
- Cui, Z., Li, Q., & Wang, J. (2019). Mechanical performance of composite retaining and protection structure for super large and deep foundation excavations. *Journal of Civil Engineering and Management*, 25(5), 431–440. <https://doi.org/10.3846/jcem.2019.9873>
- Debnath, A., & Pal, S. K. (2023). A numerical analysis on anchored sheet pile wall subjected to surcharge strip loading. *Journal of Engineering Research*, 11(3), 62–74. <https://doi.org/10.1016/j.jer.2023.100088>
- El-Nimr, M. T., Basha, A. M., Abo-Raya, M. M., & Zakaria, M. H. (2022). General deformation behavior of deep excavation support systems: A review. *Global Journal of Engineering and Technology Advances*, 10(1), 039–057. <https://doi.org/10.30574/gjeta.2022.10.1.0181>
- FINE Ltd. (2023). *GEO5 User Manual: Geotechnical Engineering Software*. Fine Software.
- Look, B. G. (2014). *Handbook of Geotechnical Investigation and Design Tables* (2nd ed.). CRC Press.
- Nasrudin, M., & Siswoyo, S. (2019). Perencanaan Ulang Dinding Penahan Tanah Underpass Mayjend Sungkono Surabaya. *Axial : Jurnal Rekayasa Dan Manajemen Konstruksi*, 7(3), 227. <https://doi.org/10.30742/axial.v7i3.779>
- Sasikirana, T. D., & Raharja, D. S. (2026). Analisis Stabilitas Galian Dalam Menggunakan *Contiguous Bored Pile* dengan Perkuatan Angkur Berbasis Geo5. *Jurnal Ilmu Pengetahuan Dan Teknologi*,

- 10(1), 26–33.
<https://doi.org/10.31543/jii.v10i1.418>
- Taghavi, S. A., Jalali, F. M., Moezzi, R., Khaksar, R. Y., Waclawek, S., Gheibi, M., & Annuk, A. (2024). Numerical Analysis of Bearing Capacity in Deep Excavation Support Structures: A Comparative Study of Nailing Systems and Helical Anchors. *Eng*, 5(2), 657–676.
<https://doi.org/10.3390/eng5020037>
- Zhao, W., Han, J.-Y., Chen, Y., Jia, P.-J., Li, S.-G., Li, Y., & Zhao, Z. (2018). A numerical study on the influence of anchorage failure for a deep excavation retained by anchored pile walls. *Advances in Mechanical Engineering*, 10(2).
<https://doi.org/10.1177/1687814018756775>