

PERBANDINGAN KINERJA STRUKTUR DINDING TERTANAM MENGGUNAKAN SISTEM KANTILEVER, PENUNJANG ANGKUR, DAN RELIEVING PLATFORM TERHADAP KEDALAMAN GALIAN, MUKA AIR, SERTA KONDISI TANAH

Suwarno^{1*} dan Syahrul Fakhri Ramadhan¹

¹Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan, dan Kebumihan,
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Jl. Arief Rahman Hakim, Keputih, Surabaya 60111
*Email: suwarno.surabaya@gmail.com

Abstrak

Dinding tertanam (embedded walls) adalah struktur penahan tanah dimana stabilitasnya sebagian atau seluruhnya diperoleh dari tahanan pasif tanah yang terletak di bawah dasar galian (SNI 8460:2017). Secara sederhana sistem struktur embedded walls dapat diklasifikasi menjadi tiga tipe, yaitu: sistem kantilever, sistem penunjang, dan sistem relieving platform. Penelitian ini berfokus pada perbandingan kinerja sistem struktur embedded walls yang menggunakan tiga sistem struktur tersebut terhadap kedalaman galian, muka air, serta kondisi tanahnya. Penelitian ini dimulai dengan penentuan variabel penelitian, kemudian dilanjutkan dengan pemodelan dan analisis menggunakan metode beam-column (elasto-plastic non-linear analysis dengan program bantu Geo5). Berdasarkan analisis yang telah dilakukan, didapatkan kesimpulan bahwa sistem relieving platform memberikan kinerja rasio panjang total dibanding kedalaman galian (H_T/H) paling optimal, kemudian disusul sistem penunjang angkur, dan terakhir sistem kantilever; sedangkan sistem penunjang angkur memberikan kinerja momen optimum (M_{pred}) paling kecil sehingga lebih disukai dibanding sistem relieving platform dan kantilever. Stabilitas keseluruhan berbanding terbalik terhadap kedalaman galian dengan tren cenderung berbentuk polinomial untuk semua kondisi tanah dan muka air, sedangkan stabilitas dasar galian berbanding lurus dengan tren yang sama.

Kata kunci: embedded-walls, dinding tertanam, kantilever, angkur, relieving platform.

1. PENDAHULUAN

Dinding tertanam (*embedded walls*) adalah struktur penahan tanah dimana stabilitasnya sebagian atau seluruhnya diperoleh dari tahanan pasif tanah yang terletak di bawah dasar galian (SNI 8460:2017). *Embedded walls* dapat digunakan untuk mengamankan penggalian *basement* dalam, konstruksi dinding dermaga atau *quaywall*, menahan timbunan atau galian badan jalan pada daerah yang sempit, maupun untuk menstabilkan kondisi tanah seperti pada daerah yang berbukit (SNI 8460:2017). Dalam aplikasinya, *embedded walls* yang memiliki kekakuan dan modulus penampang tinggi lebih disukai karena kemampuannya untuk menahan deformasi berlebih dan untuk menahan tegangan yang tinggi tanpa terjadi keruntuhan.

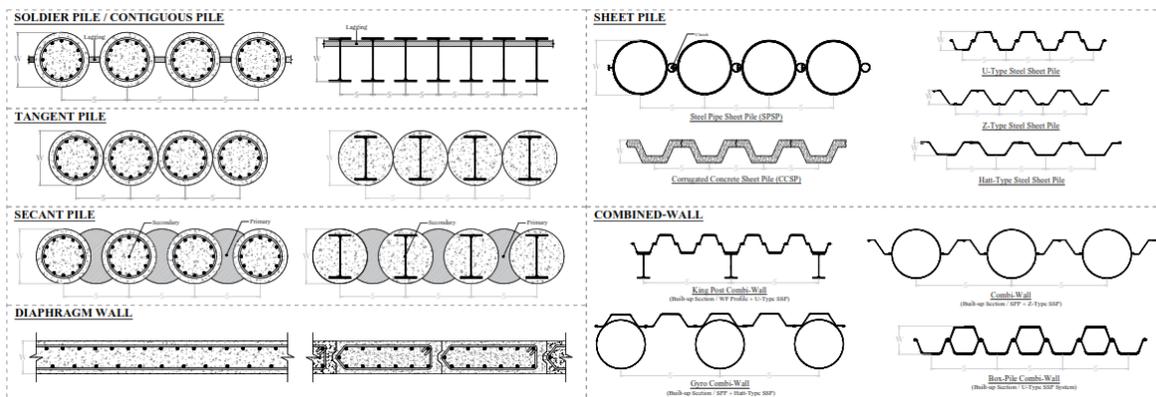
Berbagai jenis profil *embedded walls* ditampilkan pada **Gambar 1**. Menurut SNI 8460:2017, secara garis besar *embedded walls* dapat menggunakan sistem kantilever atau menggunakan sistem penunjang. Pada prinsipnya, *embedded walls* menggunakan sistem kantilever hanya mengandalkan tahanan lateral tanah untuk menjaga stabilitasnya. Sedangkan *embedded walls* menggunakan sistem penunjang berperilaku mirip seperti diberikan sendi pada bagian yang ditunjang. Adapun aplikasi *embedded walls* menggunakan sistem penunjang meliputi: angkur tanah, tiang pancang miring (*batter pile* atau *raking anchorage pile*), rantai *basement* terpilih, *strutting* baja (*wall-to-wall strut* atau *rakers*), atau *berm* sementara. Sistem penunjang *embedded walls* menggunakan *strut* baja atau *berm* sementara cocok diaplikasikan sebagai struktur penahan sementara agar proses konstruksi tidak menimbulkan deformasi berlebihan. Sistem penunjang *embedded walls* menggunakan rantai *basement* terpilih cocok diaplikasikan untuk *top-down construction method*. Penggunaan tiang pancang miring sebagai sistem penunjang *embedded walls* kurang disukai karena pengaplikasiannya rumit meskipun memiliki prinsip yang sama dengan angkur tanah dan memiliki kekakuan yang relatif lebih besar. Di sisi lain, sistem penunjang *embedded walls* menggunakan angkur tanah selalu menjadi pilihan pertama karena alasan

biaya dan kemudahan konstruksinya. Oleh karena itu, dapat dikatakan bahwa angkur tanah merupakan yang paling andal dibanding lima jenis sistem penunjang tersebut.

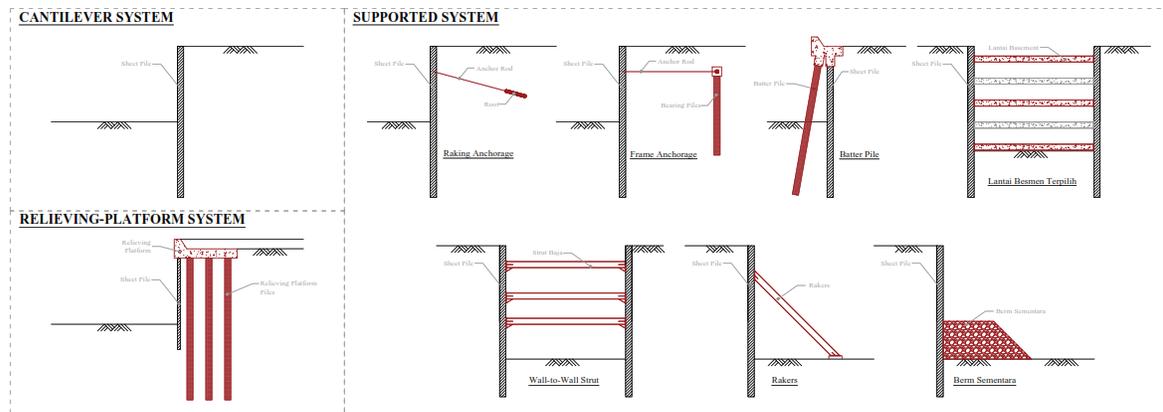
Selain itu, *embedded walls* dapat menggunakan sistem “*relieving platform*”. Sistem ini dapat digambarkan secara sederhana dengan mengilustrasikan *embedded walls* seperti “tirai” yang menggantung atau dijepit oleh “*platform*” di atasnya. Dengan demikian, dimensi profil dan kedalaman tertanam *sheet pile* akan jauh lebih kecil karena seluruh beban yang bekerja pada *embedded walls* dijepit dan diteruskan ke *platform* di atasnya kemudian diteruskan ke tiang pancang yang mendukung *platform* tersebut. Namun, kekurangan dari sistem ini adalah pengaplikasiannya rumit dan memakan waktu yang lama. Sistem struktur *embedded walls* ditampilkan pada **Gambar 2**.

Berdasarkan beberapa penjelasan tersebut, secara sederhana sistem struktur *embedded walls* dapat diklasifikasikan menjadi tiga tipe, yaitu: sistem kantilever yang hanya mengandalkan tahanan lateral tanah untuk menjaga stabilitasnya; sistem penunjang yang berperilaku mirip seperti diberikan sendi pada bagian yang ditunjang; dan sistem *relieving platform* yang berperilaku seperti dijepit di bagian atas. Dalam penelitian ini, akan dibahas lebih lanjut mengenai perbandingan kinerja dari tiga sistem struktur *embedded walls* tersebut terhadap kedalaman galian, muka air, serta kondisi tanahnya. Adapun rumusan masalah yang akan dijawab dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- Bagaimana perbandingan rasio panjang total dibanding kedalaman galian (H_T/H , kinerja profil) *embedded walls* menggunakan sistem struktur kantilever, penunjang angkur, dan *relieving platform* terhadap kedalaman galian, muka air, serta kondisi tanahnya?
- Bagaimana perbandingan momen maksimum yang diprediksi terjadi ($M_{pred\ max}$, kinerja profil) pada *embedded walls* yang menggunakan sistem struktur kantilever, penunjang angkur, dan *relieving platform* terhadap kedalaman galian, muka air, serta kondisi tanahnya?
- Bagaimana perbandingan stabilitas keseluruhan ($SF_{overall}$, kinerja stabilitas) *embedded walls* menggunakan sistem struktur kantilever, penunjang angkur, dan *relieving platform* terhadap kedalaman galian, muka air, serta kondisi tanahnya?
- Baimana perbandingan stabilitas dasar galian (SF_{heave} dan SF_{piping} , kinerja stabilitas) *embedded walls* menggunakan sistem struktur kantilever, penunjang angkur, dan *relieving platform* terhadap kedalaman galian, muka air, serta kondisi tanahnya?



Gambar 1 Jenis-jenis profil *embedded walls*

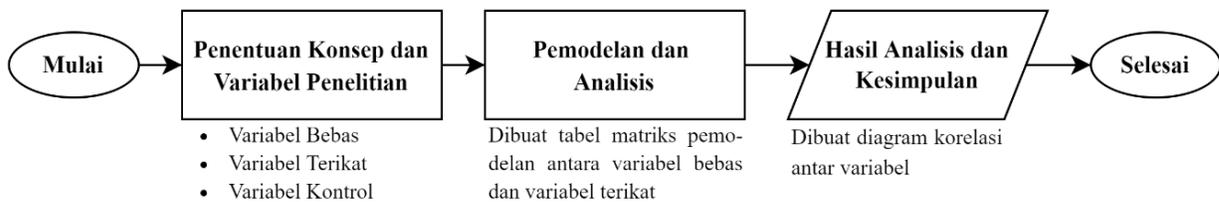


Gambar 2 Sistem struktur *embedded walls*

2. METODOLOGI

Diagram Alir

Diagram alir pada penelitian ini ditampilkan pada **Gambar 3**, dimulai dengan penentuan konsep dan variabel penelitian, kemudian dilanjutkan dengan pemodelan dan analisis, hingga didapatkan hasil analisis beserta kesimpulannya.



Gambar 3 Diagram alir penelitian

Konsep dan Variabel Penelitian

Penelitian ini berfokus untuk membandingkan kinerja struktur *embedded walls* yang menggunakan sistem kantilever, sistem penunjang angkur, dan sistem *relieving platform* terhadap kedalaman galian, muka air, serta kondisi tanahnya. Variabel penelitian ditampilkan seperti pada

Prinsip Pemodelan dan Analisis

Prinsip pemodelan dan analisis *embedded walls* dimulai dengan menentukan prakiraan awal (sistem struktur, kedalaman penetrasi, dan dimensi profil), profil dan parameter tanah, menentukan muka air, dan beban yang bekerja. Selanjutnya dilakukan analisis yang bersifat iteratif dan hasil analisis dibandingkan dengan kriteria SNI 8460:2017 meliputi stabilitas keseluruhan, stabilitas dasar galian, deformasi lateral maksimum, dan kecukupan dimensi dinding beserta sistem penunjangnya sehingga diperoleh hasil rancangan yang memenuhi seluruh kriteria.

Parameter tanah yang digunakan harus menghasilkan kondisi paling kritis, baik ketika menggunakan parameter tanah terdrainase dimana saat menerima beban air pori keluar dan beban ditanggung sepenuhnya oleh tanah, maupun ketika menggunakan parameter tanah tak terdrainase dimana ketika tekanan air pori berlebih tidak diizinkan untuk terdisipasi pada saat diberikan beban. Metode analisis yang dapat digunakan meliputi metode *limit equilibrium*, metode *beam column*, atau metode *finite element*. Dalam lingkup ini, digunakan program bantu Geo5 yang berbasis teori *elasto-plastic non-linear analysis (beam-column method)* atau teori *limit equilibrium*. Metode ini pada prinsipnya *embedded walls* dianggap sebagai balok linear elastik dengan kekakuan EI yang menahan tekanan tanah aktif dan tekanan air dan didukung tahanan pasif yang dimodelkan sebagai pegas linear atau non-linear terhadap defleksi *embedded walls*, dan pegas linear dari sistem penunjang. Hasil analisis

diagram tekanan tanah, diagram gaya geser, diagram gaya geser, dan estimasi deformasi tipikal untuk setiap sistem struktur ditampilkan pada

Gambar 5.

Tabel 1.

Prinsip Pemodelan dan Analisis

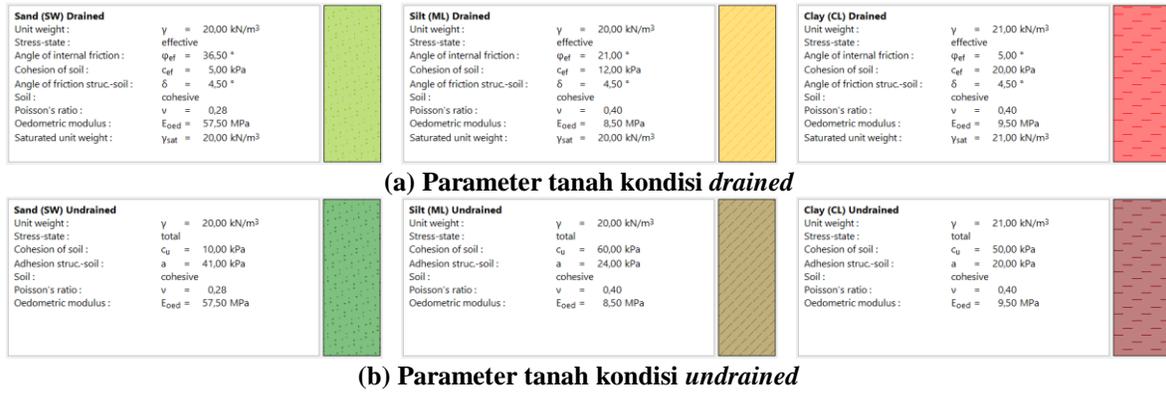
Prinsip pemodelan dan analisis *embedded walls* dimulai dengan menentukan prakiraan awal (sistem struktur, kedalaman penetrasi, dan dimensi profil), profil dan parameter tanah, menentukan muka air, dan beban yang bekerja. Selanjutnya dilakukan analisis yang bersifat iteratif dan hasil analisis dibandingkan dengan kriteria SNI 8460:2017 meliputi stabilitas keseluruhan, stabilitas dasar galian, deformasi lateral maksimum, dan kecukupan dimensi dinding beserta sistem penunjangnya sehingga diperoleh hasil rancangan yang memenuhi seluruh kriteria.

Parameter tanah yang digunakan harus menghasilkan kondisi paling kritis, baik ketika menggunakan parameter tanah terdrainase dimana saat menerima beban air pori keluar dan beban ditanggung sepenuhnya oleh tanah, maupun ketika menggunakan parameter tanah tak terdrainase dimana ketika tekanan air pori berlebih tidak diizinkan untuk terdisipasi pada saat diberikan beban. Metode analisis yang dapat digunakan meliputi metode *limit equilibrium*, metode *beam column*, atau metode *finite element*. Dalam lingkup ini, digunakan program bantu Geo5 yang berbasis teori *elasto-plastic non-linear analysis (beam-column method)* atau teori *limit equilibrium*. Metode ini pada prinsipnya *embedded walls* dianggap sebagai balok linear elastik dengan kekakuan EI yang menahan tekanan tanah aktif dan tekanan air dan didukung tahanan pasif yang dimodelkan sebagai pegas linear atau non-linear terhadap defleksi *embedded walls*, dan pegas linear dari sistem penunjang. Hasil analisis diagram tekanan tanah, diagram gaya geser, diagram gaya geser, dan estimasi deformasi tipikal untuk setiap sistem struktur ditampilkan pada

Gambar 5.

Tabel 1 Variabel penelitian

Variabel	Uraian		
Sistem Struktur		Sistem kantilever	
		Sistem penunjang dengan angkur	
		Sistem <i>relieving platform</i>	
Kedalaman Galian	Setiap interval 1,00 m mulai dari 2,00 m hingga 20,00 m		
Variabel Bebas	Muka Air	Konservatif umum	Belakang galian pada elevasi muka tanah Depan galian pada elevasi -1,00 m dari dasar galian
		Konservatif dermaga	Belakang galian pada elevasi muka tanah Depan galian pada elevasi -4,00 m dari muka tanah
	Kondisi Tanah	<i>Drained</i>	Parameter tanah tegangan efektif (Gambar 4 (a))
<i>Undrained</i>		Parameter tanah tegangan total (Gambar 4 (b))	
Variabel Terikat	Kinerja Profil	Rasio panjang total terhadap kedalaman galian (H_T/H)	
		Momen maksimum yang diprediksi terjadi pada <i>embedded walls</i> ($M_{pred\ max}$)	
		Modulus penampang yang diperlukan ($S_{x\ perlu}$) asumsi material baja, fy 295 MPa	
Kinerja Stabilitas	Deformasi lateral ($\delta_{pred\ max}$) < 0,50% H, dari profil terpilih sesuai $M_{pred\ max}$ (tidak diperhitungkan karena melibatkan pemilihan profil lebih lanjut)		
	Stabilitas keseluruhan	$SF_{overall} > 1,50$	
Variabel Kontrol	Beban	Stabilitas dasar galian	$SF_{basal\ heave} > 1,25$; $SF_{blow\ in} > 1,25$; $SF_{piping} > 1,50$
		Beban merata 15 kPa	
	Kondisi Gempa	Tidak diperhitungkan	
Metode Analisis	<i>Beam-column method (elasto-plastic non-linear analysis)</i> , program bantu Geo5		

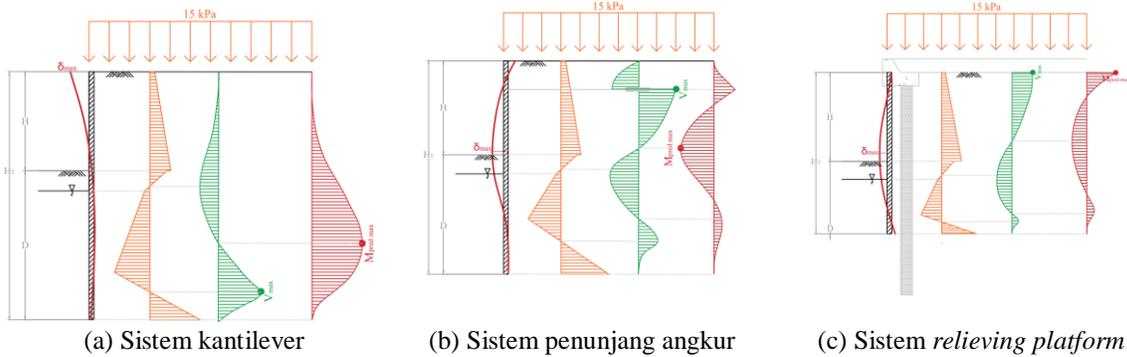


Gambar 4 Parameter tanah yang digunakan

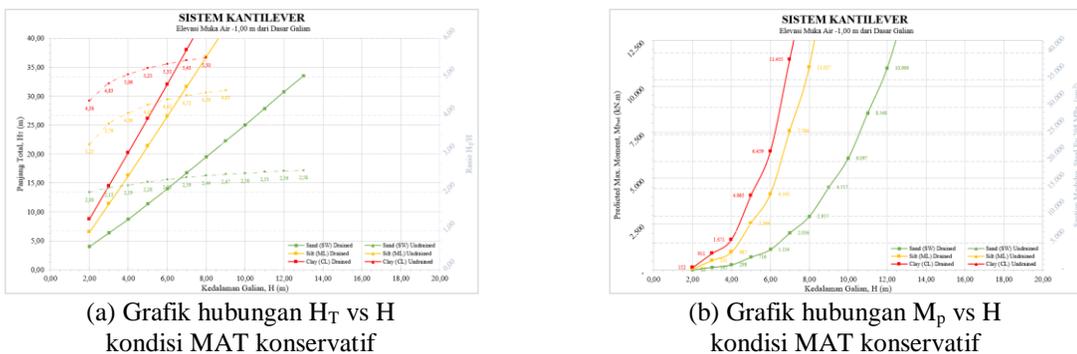
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

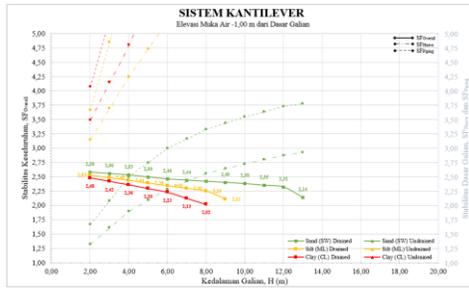
Embedded Walls dengan Sistem Kantilever

Rekapitulasi hasil analisis *embedded walls* dengan sistem kantilever ditampilkan pada **Gambar 6** untuk setiap variabel bebas. Dari grafik tersebut dapat diamati bahwa *embedded walls* dengan sistem kantilever dapat diaplikasikan secara umum hingga kedalaman galian 13,00 m untuk tanah pasir padat, 9,00 m untuk tanah lanau, dan 8,00 m untuk tanah lempung. Adapun untuk konstruksi dermaga (asumsi elevasi muka air -4,00 dari elevasi muka tanah) dapat menggunakan sistem kantilever hingga kedalaman 19,00 m untuk tanah pasir padat namun memerlukan profil yang sangat besar seperti SPSP (*Steel Pipe Sheet Pile*) atau *combined wall*. Pada sistem ini, umumnya masalah yang menjadi batasan pengaplikasian adalah *overstress*, sehingga profil tidak mampu menahannya.

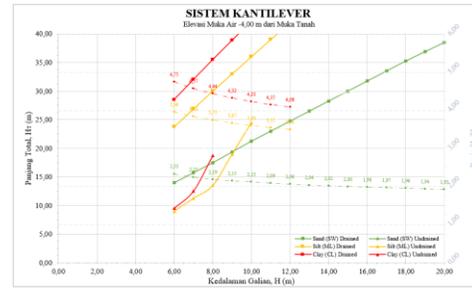


Gambar 5 Hasil analisis diagram tekanan tanah, gaya geser, momen, dan deformasi tipikal

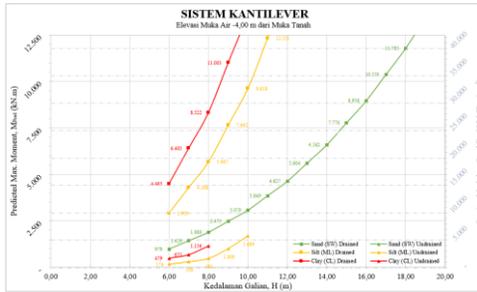




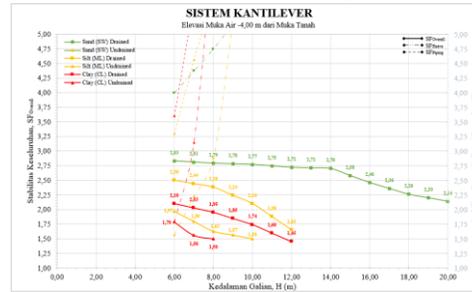
(c) Grafik hubungan SF vs H kondisi MAT konservatif



(d) Grafik hubungan H_T vs H kondisi MAT dermaga



(e) Grafik hubungan M_p vs H kondisi MAT dermaga

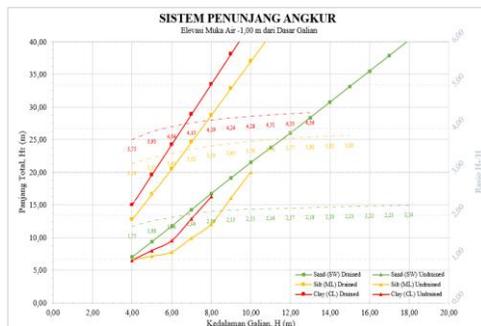


(f) Grafik hubungan SF vs H kondisi MAT dermaga

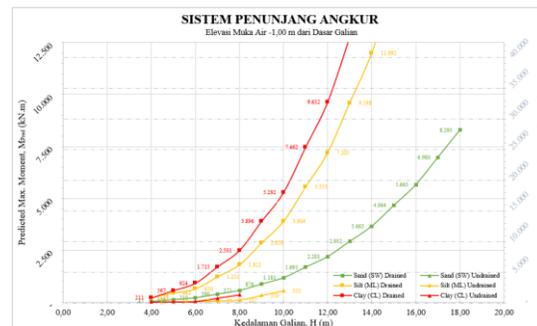
Gambar 6 Rekapitulasi hasil analisis *embedded walls* dengan sistem kantilever

Embedded Walls dengan Sistem Penunjang Angkur

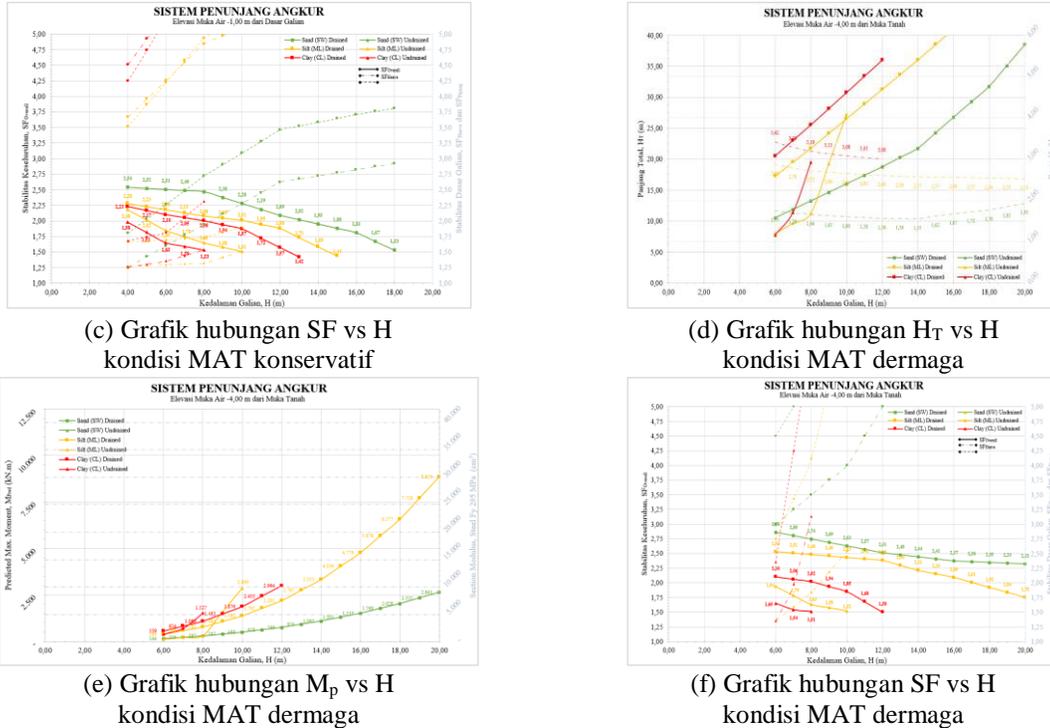
Dalam pemodelan ini angkur dimodelkan terletak di elevasi -1,50 m dari muka tanah dengan kemiringan 0° dari sumbu horizontal. Dalam lingkup ini, tidak ditinjau lebih lanjut untuk perancangan angkur. Rekapitulasi hasil analisis *embedded walls* ditampilkan dalam grafik hubungan antar variabel pada Gambar 7 untuk setiap variabel bebas. Dari grafik hubungan tersebut dapat diamati bahwa *embedded walls* dengan sistem penunjang angkur dapat diaplikasikan secara umum hingga kedalaman galian 18,00 m untuk tanah pasir padat, 10,00 m untuk tanah lanau, dan 8,00 m untuk tanah lempung. Jika dibandingkan dengan sistem kantilever, sistem ini dapat mengurangi panjang total *embedded walls* hingga rata-rata 12,5% untuk tanah pasir, 14% untuk tanah lanau, dan 20% untuk tanah lempung. Selain itu, sistem ini efektif untuk mengurangi tegangan yang bekerja pada profil secara signifikan.



(a) Grafik hubungan H_T vs H kondisi MAT konservatif



(b) Grafik hubungan M_p vs H kondisi MAT konservatif



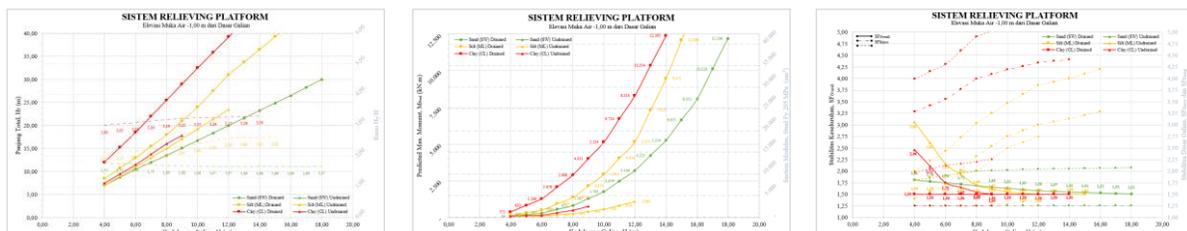
Gambar 7 Rekapitulasi hasil analisis *embedded walls* dengan sistem penunjang angkur

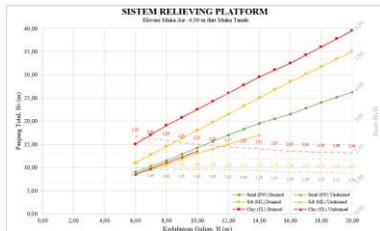
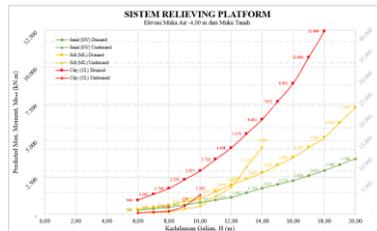
Embedded Walls dengan Sistem Relieving Platform

Dalam pemodelan dan analisis *embedded walls* dengan sistem *relieving platform*, *platform* di atas *embedded walls* dimodelkan sebagai jepit kemudian gaya dan momen hasil reaksi tersebut diteruskan ke tiang pancang yang mendukung *platform* sebagai pemikul utama. Oleh karena itu, dalam lingkup ini hanya perlu ditinjau kekuatan profil dan stabilitas dasar galian *embedded walls* saja. Untuk stabilitas keseluruhan idealnya dianalisis dengan melibatkan *platform* dan tiang pancang secara keseluruhan.

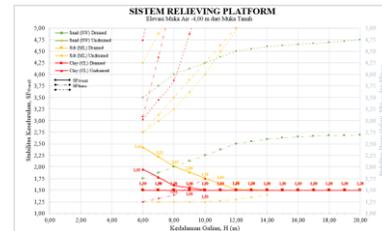
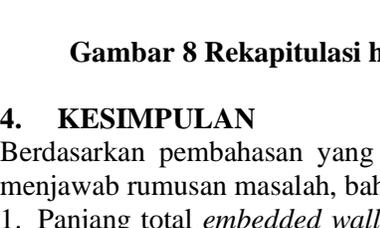
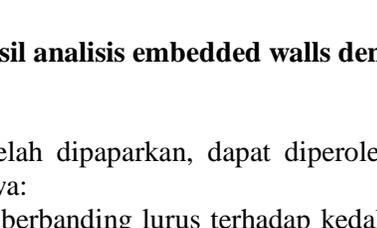
Rekapitulasi hasil analisis *embedded walls* dengan sistem penunjang angkur ditampilkan dalam grafik hubungan antar variabel pada

Gambar 8 untuk setiap variabel bebas. Dari grafik hubungan tersebut dapat diamati bahwa *embedded walls* dengan sistem *relieving platform* dapat diaplikasikan secara umum hingga kedalaman galian 18,00 m untuk tanah pasir padat, 12,00 m untuk tanah lanau, dan 9,00 m untuk tanah lempung. Jika dibandingkan dengan sistem kantilever, sistem ini dapat mengurangi panjang total *embedded walls* hingga rata-rata 28% untuk tanah pasir, 38,5% untuk tanah lanau, dan 45% untuk tanah lempung. Oleh karena itu, sistem ini efektif untuk mengurangi panjang dan dimensi profil secara signifikan karena bukan merupakan pemikul utama. Sistem ini cocok digunakan pada tanah lunak yang sangat dalam dimana ketika tekanan tanah pasif yang bekerja pada bagian tertanam *embedded walls* tidak cukup untuk menjaga stabilitasnya. Pada sistem ini, umumnya masalah yang menjadi batasan pengaplikasian adalah kerumitannya sebagai satu kesatuan sistem struktur.

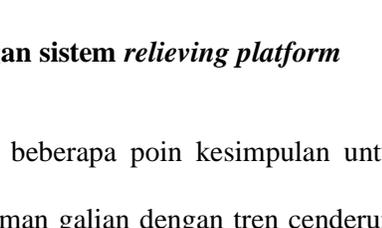


(a) Grafik hubungan H_T vs H kondisi MAT konservatif(b) Grafik hubungan M_p vs H kondisi MAT konservatif

(c) Grafik hubungan SF vs H kondisi MAT konservatif

(d) Grafik hubungan H_T vs H kondisi MAT dermaga(e) Grafik hubungan M_p vs H kondisi MAT dermaga

(f) Grafik hubungan SF vs H kondisi MAT dermaga

**Gambar 8** Rekapitulasi hasil analisis *embedded walls* dengan sistem *relieving platform*

4. KESIMPULAN

Berdasarkan pembahasan yang telah dipaparkan, dapat diperoleh beberapa poin kesimpulan untuk menjawab rumusan masalah, bahwa:

1. Panjang total *embedded walls* berbanding lurus terhadap kedalaman galian dengan tren cenderung berbentuk linear untuk semua kondisi tanah dan muka air. Sistem *relieving platform* memberikan kinerja rasio panjang total dibanding kedalaman galian (H_T/H) paling optimal, kemudian disusul sistem penunjang angkur, dan terakhir sistem kantilever.
2. Momen optimum berbanding lurus terhadap kedalaman galian dengan tren cenderung berbentuk eksponensial untuk semua kondisi tanah dan muka air. Sistem penunjang angkur memberikan kinerja momen optimum (M_{pred}) paling kecil sehingga lebih disukai dibanding sistem *relieving platform* dan kantilever.
3. Stabilitas keseluruhan berbanding terbalik terhadap kedalaman galian dengan tren cenderung berbentuk polinomial untuk semua kondisi tanah dan muka air.
4. Stabilitas dasar galian berbanding lurus terhadap kedalaman galian dengan tren cenderung berbentuk polinomial untuk semua kondisi tanah dan muka air.

DAFTAR PUSTAKA

- Badan Standarisasi Nasional. (2017). SNI 8460:2017 tentang Persyaratan Perancangan Geoteknik.
- Das, Braja M. (2010). Principle of Geotechnical Engineering. Cengage Learning.
- Fine Software. (2020). Geo5 Engineering Manual.
- Rowe, Peter W. (1955). Anchored Sheet Pile Wall. *Proceeding of The Institution of Civil Engineers*, (pp. 27-70). <https://doi.org/10.1680/iicep.1952.10942>
- Zhang, Ming et. al. (2020). Study on Model and Test of Sheet Pile Wall with a Relieving Platform. *Advances in Civil Engineering*, Vol. 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/8894601>