JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil
Vol. 7, No. 4, November 2024: hlm 1407-1416 EISSN 2622-545X

ANALISIS PENGARUH EKSTRAKSI PERKUATAN GALIAN SEMENTARA PADA JALUR PIPA GAS BAWAH PERMUKAAN

Zakwan Gusnadi[1], Iman Handiman[2], dan Indra Mahdi[3]

[1]Jurusan Teknik Sipil, Universitas Siliwangi, Jl. Siliwangi No. 24 Tasikmalaya
zakwangusnadi@unsil.ac.id

[2]Jurusan Teknik Sipil, Universitas Siliwangi, Jl. Siliwangi No. 24 Tasikmalaya
imanhandiman@unsil.ac.id

[3]Jurusan Teknik Sipil, Universitas Siliwangi, Jl. Siliwangi No. 24 Tasikmalaya
indramahdi@unsil.ac.id

Masuk: 13-06-2024, revisi: 06-08-2024, diterima untuk diterbitkan: 14-08-2024

ABSTRACT

The gas pipeline constructed below the surface requires a reinforcement system to prevent excavation collapse during the construction process. The reinforcement system used can be either permanent or temporary. Temporary reinforcement is used so that after the pipeline work is completed, the excavation area is backfilled, and the reinforcement system is then removed. During excavation and pipeline construction, critical conditions occur at the end of the excavation period; hence, the stability of the excavation and its impact on the surrounding area must be reviewed. Additionally, the effect of backfilling on the installed gas pipeline must also be considered. This study examines the stability conditions of the slope at the end of construction and the effect of backfilling to control stability behavior and its impact on the gas pipeline. The excavation construction modeling uses a two-dimensional finite element method. Excavation reinforcement using SSP-II steel sheet piles and H-Beam struts has proven effective in maintaining slope stability during construction. The safety factor at the end of construction is 1.87 with a maximum sheet pile deflection of 4.74 cm. The maximum ground settlement around the excavation area is 29.8 mm at a distance of 6 m from the reinforcement wall, and the settlement around the excavation affects up to a radius of 35 m. The ratio of maximum wall deflection to excavation depth is 0.37%, and the ratio of maximum settlement to excavation depth is 0.23.

Keywords: 2D finite element; temporary excavation; reinforcement; gas pipe; stability

ABSTRAK

Jalur pipa gas yang dikonstruksi di bawah permukaan memerlukan suatu sistem perkuatan untuk menjaga agar tidak terjadi keruntuhan galian pada saat konstruksi berlangsung. Sistem perkuatan yang digunakan dapat berupa perkuatan permanen ataupun perkuatan sementara. Sistem pekuatan sementara merupakan perkuatan yang digunakan setelah pekerjaan pipa dilakukan maka area galian ditimbun kembali dan sistem perkuatan kemudian dilepas. Dalam pekerjaan galian dan konstruksi pipa kondisi kritis terjadi pada saat akhir masa galian, sehingga harus ditinjau kondisi stabilitas galian dan juga pengaruhnya terhadap area sekitar. Selain itu juga harus diperhitungkan pengaruh penimbunan kembali terhadap pipa gas yang telah terpasang. Penelitian ini meninjau kondisi kestabilan lereng tersebut saat akhir konstruksi dan pengaruh penimbunan kembali agar dapat dikontrol perilaku stabilitas dan pengaruhnya terhadap pipa gas. Pemodelan konstruksi galian menggunakan metode elemen hingga 2 dimensi. Perkuatan galian dengan menggunakan *sheet pile* baja SSP-II dan *strut H-Beam* terbukti efektif menjaga kestabilan lereng selama konstruksi. Faktor keamanan pada akhir konstruksi sebesar 1,87 dengan defleksi maksimum *sheet pile* 4,74 cm. Penurunan tanah disekitar area galian maksimum 29,8 mm pada jarak 6 m dari dinding perkuatan, serta penurunan disekitar galian terdampak hingga radius 35 m. Rasio defleksi maksimum dinding terhadap kedalaman galian sebesar 0,37% dan rasio antara penurunan maksimum terhadap kedalaman galian sebesar 0,23%.

Kata kunci: elemen hingga 2D; galian sementara; perkuatan; pipa gas; stabilitas

1. PENDAHULUAN

Sumber daya gas bumi yang saat ini digunakan sebagai bahan bakar mejadi salah satu sumber energi utama yang dibutuhkan hampir disetiap lapisan masyarakat Indonesia (Rahmayanti et al., 2021). Dalam proses pengolahannya bahan mentah gas bumi didistribusikan dari lokasi penambangan kelokasi pengolahan melalui jalur distribusi. Jalur

pipa gas bawah tanah merupakan salah satu media yang umum digunakan dalam proses distribusi tersebut. Jalur pipa gas sendiri bisa ditempatkan diatas permukaan ataupun di bawah permukaan tanah. Untuk jalur pipa gas yang berada di bawah permukaan tanah perlu pertimbangan yang matang dalam konstruksi galiannya (Desilia et al., 2024). Dalam pelaksanaan konstruksinya jalur pipa gas ini membutuhkan suatu perkuatan yang mampu mengatasi masalah kestabilan agar tidak mempengaruhi struktur pipa gas itu sendiri serta bangunan disekitarnya (Finno et al., 2005; Wang & Whittle, 2024).

Dalam penanganan masalah stabilitas galian salah satu metode yang bisa dilakukan adalah dengan menggunakan perkuatan *sheet pile*. Metode perkuatan *sheet pile* efektif untuk menangani masalah stabilitas. Untuk kasus tertentu perkuatan sheet pile ini juga dapat dikombinasikan dengan beberapa perkuatan lain diantaranya *struting*, *ground anchor*, *counterweight*, dan lain-lain (Sari et al., 2024).

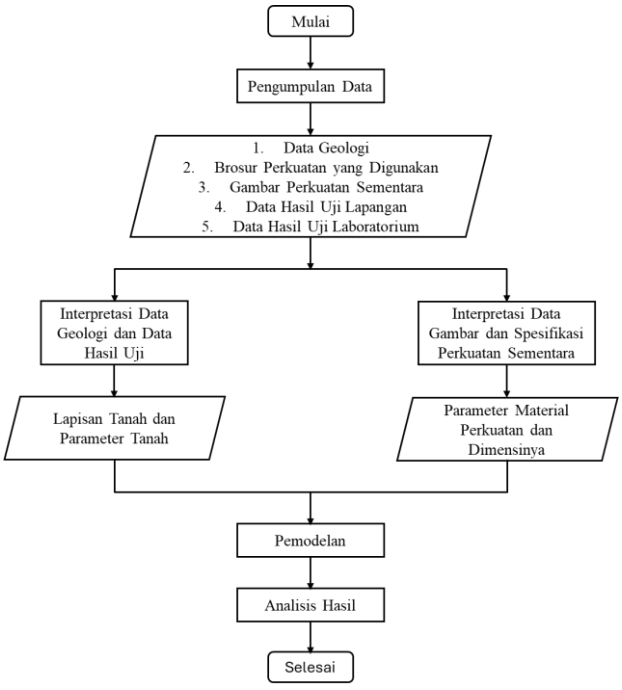
Masalah stabilitas yang perlu diperhitungkan diantaranya pada saat paling kritis yaitu proses konstruksi galian sedang berlangsung dan saat proses penimbunan serta ekstraksi sistem perkuatan galian setelah pipa dipasang dibawah permukaan (Wu et al., 2021). Pada saat konstruksi galian berlangsung perlu diperhatikan faktor keamanan stabilitas dan deformasi lateral pada dinding perkuatan serta efeknya pada penurunan tanah disekitar area galian (Lim & Ou, 2016; Ou & Lim, 2016). Kemudian saat proses penimbunan kembali dan ekstraksi sistem perkuatan perlu diperhatikan efek tekanan tanah lateral maupun vertikal terhadap jalur pipa yang sudah dikonstruksi, agar jalur pipa tersebut aman dan dapat beroperasi dengan baik.

Penelitian ini membahas mengenai pengaruh sistem perkuatan galian tersebut, baik pada saat proses galian maupun saat ekstraksi perkuatan dilakukan. Melalui analisis yang dilakukan perilaku stabilitas dan deformasi sistem perkuatan dapat diprediksi sehingga diharapkan dapat meminimalisir potensi kerusakan yang dapat terjadi pada jalur pipa gas bawah permukaan

2. METODE PENELITIAN

Penelitian dilakukan dalam beberapa tahap mulai dari pengumpulan data hingga analisis hasil seperti yang ditunjukan pada Gambar 1.

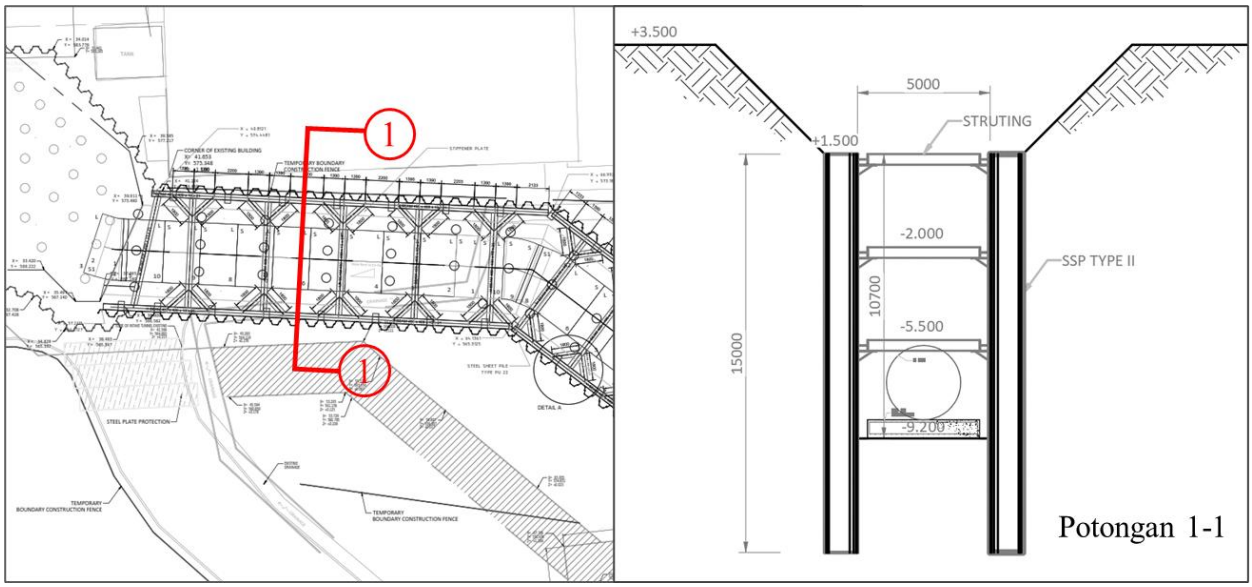
1. Pengumpulan data : Data-data yang dikumpulkan merupakan data sekunder yang terdiri dari data geologi, brosur perkuatan, gambar perkuatan, hasil uji tanah lapangan, dan hasil uji tanah laboratorium.
2. Interpretasi Data : Data yang telah dikumpulkan kemudian diolah menjadi lapisan tanah, parameter tanah, serta parameter input perkuatan sementara.
3. Pemodelan : Pemodelan dilakukan pada dua kondisi, pada saat konstruksi galian dan saat penimbunan kembali area galian.
4. Analisis Hasil : Hasil dari pemodelan kemudian dibandingkan terhadap syarat ijin SNI dan dilihat perilaku deformasi dari tanah disekitar galian.



Gambar 1. Tahapan penelitian

Deskripsi dan Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian berada pada salah satu segmen pekerjaan perkuatan galian sementara jalur pipa gas di Semarang, Jawa Tengah. Dalam pekerjaan ini perkuatan sementara yang dilakukan menggunakan perkuatan *steel sheet pile* (SSP) dan *struting* baja profil H. Total kedalaman galian hingga dasar plat pipa gas adalah sedalam 12,7 m, dengan lebar galian perkuatan adalah 5 m. Konstruksi galian terdiri dari 2 bagian yaitu, bagian galian *open cut* dan bagian galian dengan perkuatan sementara.



Gambar 2. Tampak atas perkuatan dan potongan 1-1

Gambar 2 menunjukan tampak dan detail dari perkuatan galian sementara yang dilakukan. Pada elevasi +3,5 hingga elevasi +1,5 dilakukan galian dengan metode *open cut* kemiringan 45^{o}, kemudian dinding perkuatan SSP dipasang pada elevasi +1,5 hingga kedalaman penetrasi 15 m. Sebagai pengaku dinding SSP dilakukan *struting* dengan menggunakan baja profil H 300×300. *Struting* ini dipasang pada jarak 3,5 m secara vertikal dan 5 m pada arah memanjang galian. Setelah proses galian pipa gas (*CS pipe* D340) dipasang pada elevasi dasar galian dan proses penimbunan kembali dilakukan setelahnya diiringi dengan pelepasan *struting* dan SSP.

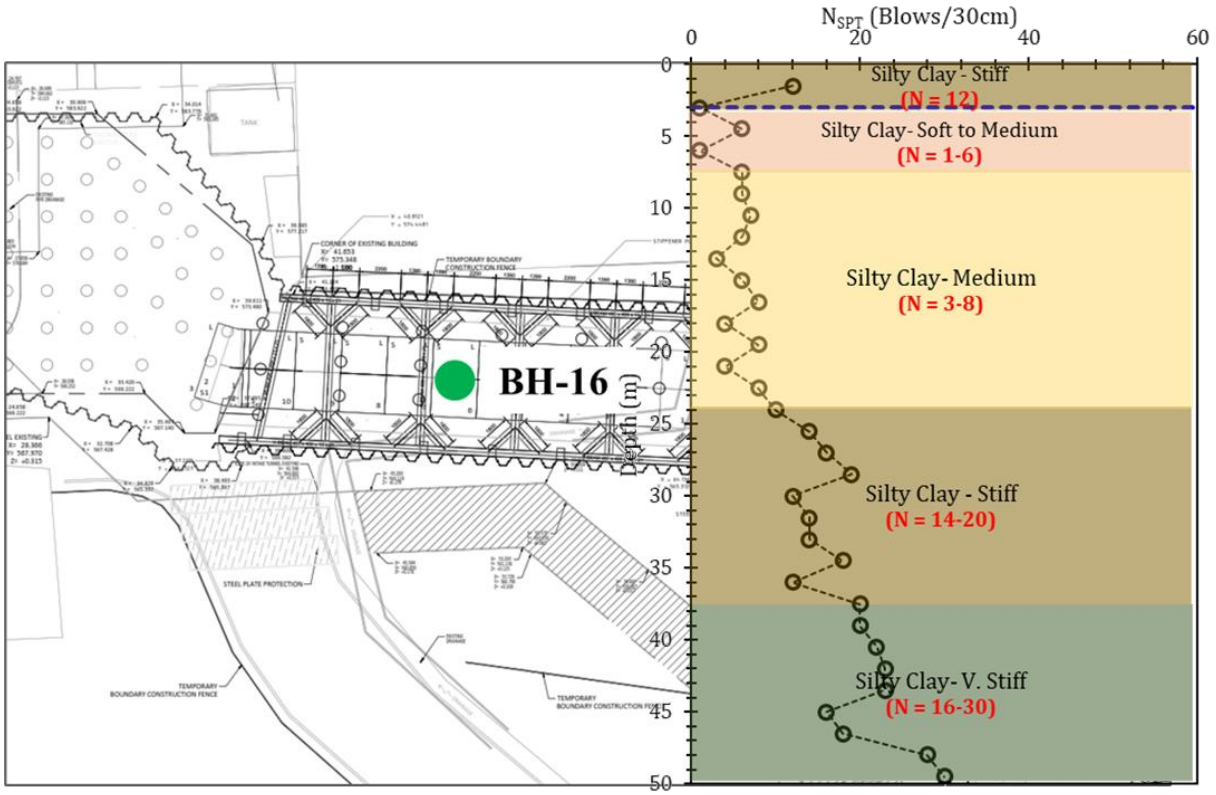
Faktor Aman Lereng dan Defleksi Dinding Perkuatan

Faktor keamanan untuk lereng galian sementara minimum 1,3 dan batasan ijin defleksi dinding perkuatan sebesar 0,7 % dari tinggi galian (BSNI, 2017).

Kondisi Tanah Lokasi Penelitian

Penyelidikan tanah yang dilakukan pada lokasi tinjauan adalah uji bor dalam (BH-16) yang disertai dengan uji standar penetrasi (SPT). Titik uji berada pada elevasi tanah asli ditengah rencana galian. Titik uji dan pelapisan tanah ditunjukan pada Gambar 3. Hasil uji menunjukan bahwa lapisan tanah dasar didominasi oleh tanah *silty clay*. Pada tanah permukaan hingga kedalaman 3 m merupakan tanah *silty clay* dengan konsistensi *stiff*. Selanjutnya pada kedalaman 3 – 7,5 m tanah *silty clay* yang ditemukan memiliki konsistensi *soft* – *medium*. Pada kedalaman 7,5 – 37,5 merupakan tanah *silty clay* dengan konsistensi *medium* – *stiff*. Tanah dengan konsistensi *very stiff* ditemukan pada kedalaman 37,5 – 50 m. Kemudian dari hasil pengamatan lubang bor diketahui bahwa muka air tanah cukup tinggi yakni pada kedalaman 6,5 m.

Berdasarkan hasil uji diatas diketahui bahwa ujung perkuatan SSP berada pada lapisan tanah *silty clay* dengan konsistensi *stiff*, sedangkan kepala SSP berada pada lapisan tanah lunak. Tanah permukaan yang digali dengan metode open cut merupakan lapisan tanah dengan konsistensi *stiff*. Konsistensi tanah yang bervariasi akan sangat berpengaruh pada besaran dan pola pergerakan perkuatan galian, juga terhadap tanah disekitarnya.



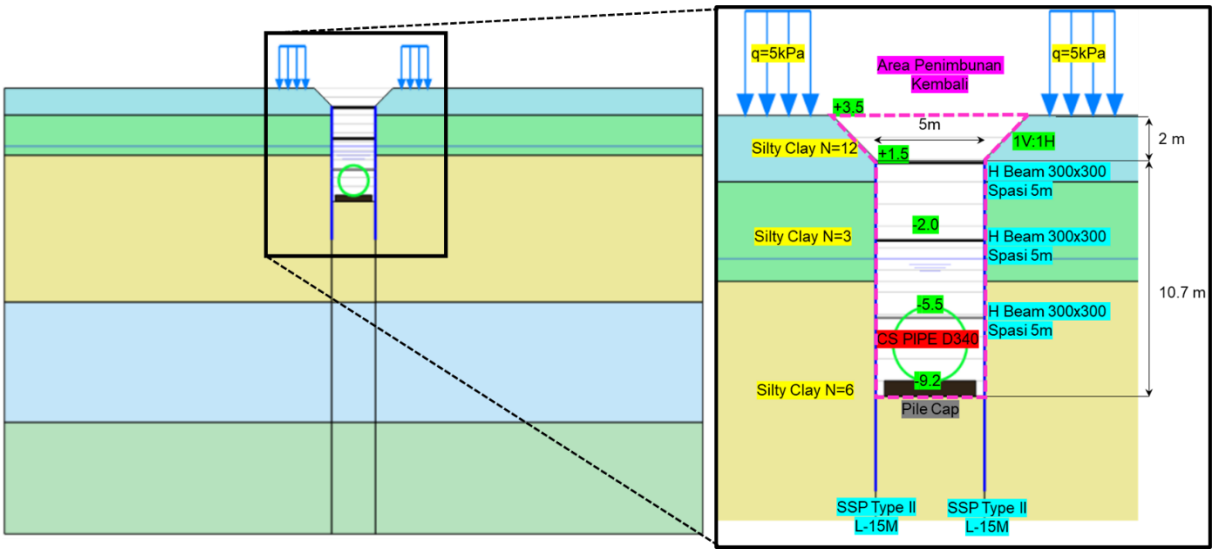
Gambar 3. Titik penyelidikan tanah dan pelapisan tanah

Model Elemen Hingga

Pemodelan dilakukan dengan bantuan salah satu program bantu elemen hingga dua dimensi. Lapisan tanah terdiri dari 5 bagian sesuai hasil interpretasi tanah yang telah dilakukan sebelumnya. Model konstitutif tanah dasar yang digunakan adalah *hardening soil*. Beberapa penelitian sebelumnya menunjukan bahwa model material *hardening soil* lebih mendekati kondisi aktual dalam memodelkan kekakuan tanah untuk konstruksi galian (Phien-wej et al., 2012) (Nguyen & Nikiforova, 2018). Model konstitutif *hardening soil* ini memiliki karakteristik nilai kekakuan yang *non-linier* seiring bertambahnya tegangan yang bekerja, dimana nilai kekakuan pada beban awal bekerja adalah *initial modulus* (E_i) dan nilai kekakuan pada 50% tegangan adalah modulus 50% (E_{50}). Selanjutnya pada kondisi pengurangan beban maka nilai modulus yang digunakan adalah modulus *unload-reload* (E_{ur}). Dalam program elemen hingga yang digunakan nilai modulus pada model konstitutif *hardening soil* perlu disesuaikan dengan tegangan referensi acuan (E_{50}^{ref}, E_{oed}^{ref}, dan E_{ur}^{ref}). Tabel 1 menunjukan parameter tanah tiap lapisan yang telah ditentukan berdasarkan korelasi terhadap nilai N_{SPT} lapangan dan disesuaikan dengan tegangan referensi.

Tabel 1. Input parameter lapisan tanah

Jenis Tanah	Model Konstitutif	Kedalaman (m)			c' (kPa)	ϕ' (°)	E_{oed}^{ref} (kPa)	E_{50}^{ref} (kPa)	E_{ur}^{ref} (kPa)	m	γ (kN/m³)
Silty Clay	*Hardening Soil*	0	-	3	5	30	19200	19200	96000	0,5	16
Silty Clay	*Hardening Soil*	3	-	7,5	3	27	6000	6000	30000	1	15
Silty Clay	*Hardening Soil*	7,5	-	24	5	30	8000	8000	40000	0,75	15
Silty Clay	*Hardening Soil*	24	-	37,5	5	30	22400	22400	112000	0,5	16
Silty Clay	*Hardening Soil*	37,5	-	50	10	43	41067	41067	205333	0,5	17



Gambar 4. Model elemen hingga 2D

Gambar 4 menunjukkan model elemen hingga yang dilakukan. Total kedalaman galian adalah 12,7 m dengan konstruksi *open cut* pada galian 2m pertama. Kemudian 10,7 m berikutnya galian ditahan dengan SSP-II yang dimodelkan sebagai *element plate* dengan panjang 15 m, serta dikombinasikan dengan *H-Beam* 300×300 jarak memanjang 5 m yang dimodelkan dengan *element node to node*. Di dasar galian terdapat *pile cap* dudukan pipa gas yang dimedelkan sebagai klaster tanah dengan model material linier-elastik. Pipa gas sendiri dimodelkan sebagai *plate element* yang dipasang setelah konstruksi galian dan pemasangan *pile cap* selesai dilakukan. Pada kiri dan kanan lereng dimodelkan beban merata sebesar 5 kPa untuk mengakomodir beban alat yang berada disekitar area galian. Tipe *element meshing* dalam model merupakan *element* segitiga dengan 15 *node* dan tipe kepadatan *element* medium. Parameter input struktur perkuatan yang digunakan dalam model ditunjukan pada Tabel 2.

Tabel 2. Input parameter struktur perkuatan dan pipa gas

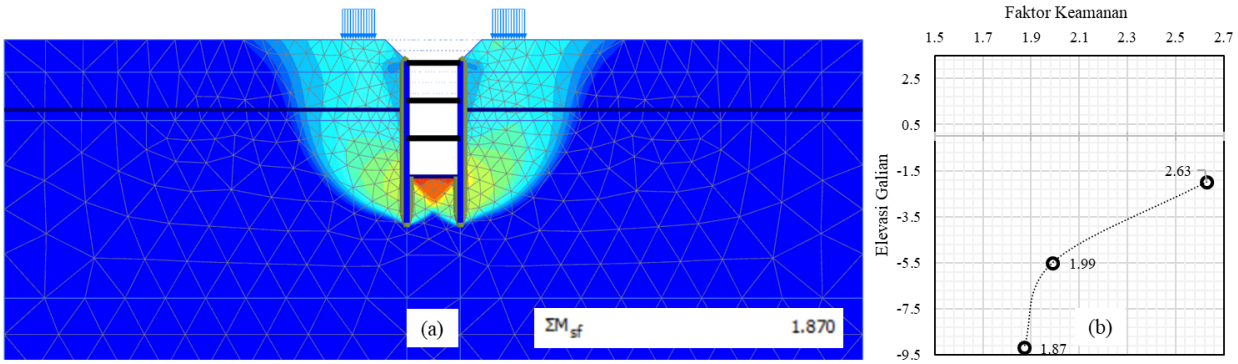
ID	SSP-II	*H-Beam* 300×300	CS *Pipe* D340
Tipe *Element*	*Plate*	*node to node*	*Plate*
EA (kN/m)	3210000	2396000	63500000
EI (kN.m^2/m)	18400	-	90200000
w (kN/m/m)	1.504	-	19.53
Momen Crack (kN.m/m)	178	-	-
ν	0.2	-	0.2
Spasi (m)	-	5	-

Tahapan konstruksi yang dibuat dalam model elemen hingga dimulai dari penentuan *initial stress* sesuai lapisan tanah dan muka air tanah. Selanjutnya dilakukan proses penggalian dengan metode *opencut* dengan kedalaman galian 2m (elevasi +1,5). Pada elevasi +1,5 kemudian dilakukan pemasangan SSP-II dan *H-Beam* 300×300 yang dimodelkan sebagai *element plate* dan *node to node*. Selanjutnya proses penggalian dilanjutkan hingga elevasi akhir galian yang dalam prosesnya terdapat pemasangan *H-beam* pada 2 baris berikutnya. Setelah konstruksi galian selesai dilakukan selanjutnya jalur pipa gas dipasang. Penimbunan kembali dilakukan diiringi dengan proses ekstraksi perkuatan SSP-II dan *H-Beam*. Penimbunan kembali dilakukan hingga elevasi +3,5.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Kondisi Akhir Galian

Saat mencapai dasar gailan merupakan kondisi paling kritis pada konstruksi galian sementara karena tekanan tanah aktif berada pada kondisi maksimum dan tanah pada area galian sudah digali seluruhnya. Hal ini terbukti dari hasil analisis yang ditunjukan pada Gambar 5 dimana faktor keamanan pada tiap tahapan galian mengalami penurunan seiring bertambahnya kedalaman galian. Pada elevasi galian di -2,0 faktor keamanan sebesar 2,63, kemudian pada elevasi galian -5,5 faktor keamanan berkurang hingga 1,99 dan terus menurun hingga elevasi akhir galian -9,2 sebesar 1,87.



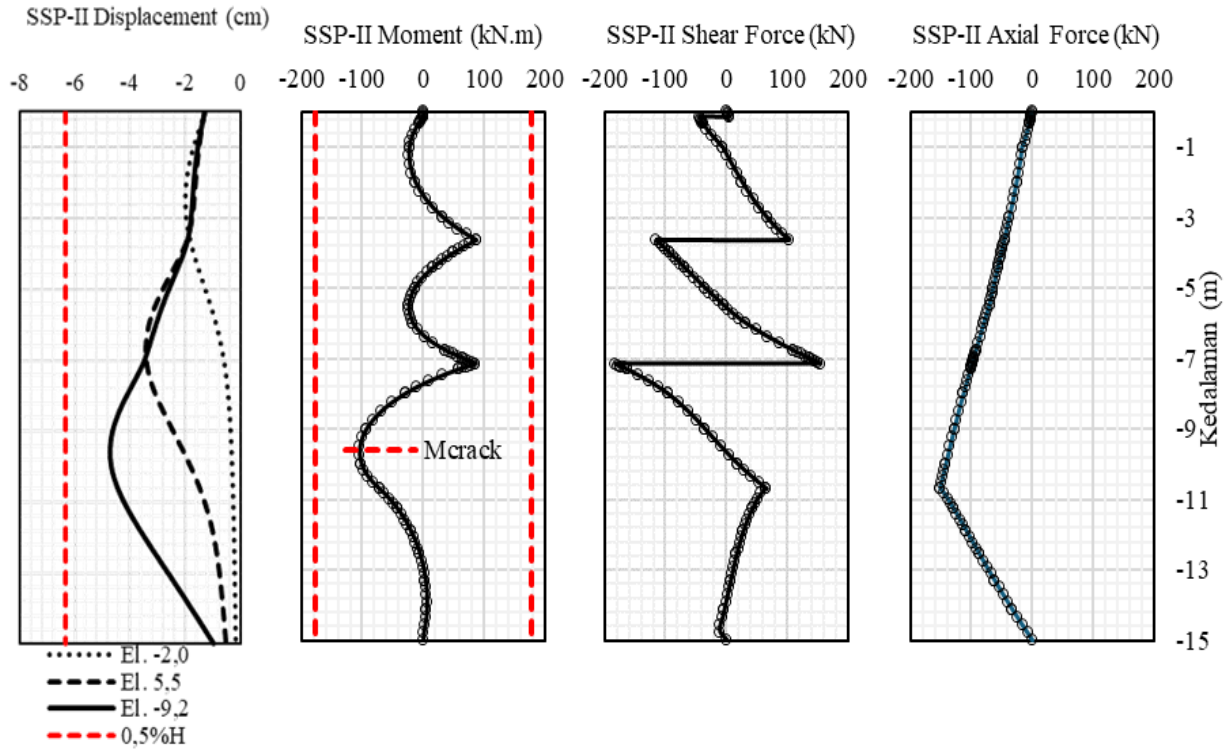
Gambar 5. (a) Bidang keruntuhan dan faktor keamanan akhir galian (b) Faktor keamanan tahapan galian

Akibat dari pekerjaan galian dinding perkuatan SSP-II mengalami *stress* dan berdefleksi. Besar defleksi dinding akibat proses galian berbanding lurus dengan kedalaman galian, semakin dalam galian maka defleksi yang terjadi pada dinding juga akan semakin membesar. Hal ini ditunjukan dari hasil analisis pada Gambar 6. Hasil analisis menunjukan bahwa defleksi maskimum yang terjadi pada elevasi galian -2,0 sebesar 1,99 cm dan pada elevasi galian -5,5 sebesar 3,43 cm, serta defleksi maksimum pada akhir galian sebesar 4,74 cm. Rasio besar defleksi dinding (δ_{hm}) terhadap kedalaman galian (H) yang dihasilkan adalah 0,37%. Besar rasio defleksi dinding ini menjadi *overestimation* apabila dibandingkan terhadap hasil penelitian (G.Wayne & O'Rourke, 1990) dan (Chou et al., 2022) yang memprediksi besar rasio sekitar 0,2%. Namun jika dibandingkan terhadap hasil penelitian (Kung et al., 2007) yang menganalisis galian dengan dinding perkuatan dan pengaku pada tanah lempung dimana rasio yang dihasilkan berkisar antara 0,2% - 0,6% dengan estimasi rata-rata 0,3 % maka hasil analisis cukup relevan. Penelitian tersebut dilakukan dalam 33 variasi kedalaman galian dan rasio defleksi semakin membesar seiring bertambahnya kedalaman galian. Sehingga hal ini cukup menjelaskan kenapa rasio defleksi yang dihasilkan dalam penelitian ini cukup besar.

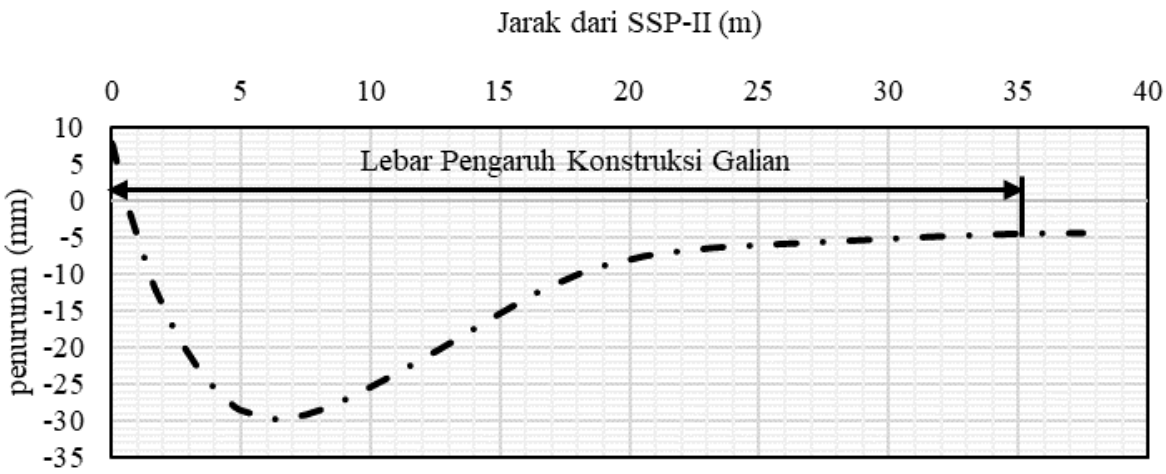
Hasil analisis juga menunjukan pola perubahan posisi defleksi maksimum yang terjadi juga ikut berubah. Seiring bertambahnya kedalaman galian posisi defleksi maksimum juga berpindah kearah bawah area galian. Hal ini terjadi akibat efek dari pemasangan strut *H-Beam* di beberapa titik kedalaman galian. Jika dibandingkan terhadap batasan maksimum defleksi dinding dalam SNI 8460:2017 sebesar 0,5%H maka deflleksi yang terjadi pada dinding SSP-II masih memenuhi syarat tersebut. Apabila ditinjau terhadap gaya yang bekerja momen yang terjadi pada SSP-II juga masih lebih kecil dari kapasitasnya.

Selain mengakibatkan defleksi pada dinding konstruksi galian juga mengakibatkan penurunan tanah dasar disekitar area galian. Besar penurunan maksimum yang terjadi akibat pekerjaan galian sebesar 29,8 mm sejarak 6 m dari dinding penahan yang ditunjukan pada Gambar 7. Pengaruh galian pada tanah disekitar terjadi hingga 35 m, dimana besar penurunan semakin mengecil apabila jarak terhadap batas galian semakin jauh. Rasio besar penurunan maksimum (δ_{vm}) terhadap kedalaman galian (H) yang dihasilkan adalah 0,23%. Hasil ini cukup dekat dengan beberapa penelitian sebelumnya yaitu pada penelitian (G.Wayne & O'Rourke, 1990) dengan trendline sebesar 0,15% dan pada penelitian (Chou et al., 2022) sebesar <0,2%.

JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil
Vol. 7, No. 4, November 2024: hlm 1407-1416 EISSN 2622-545X



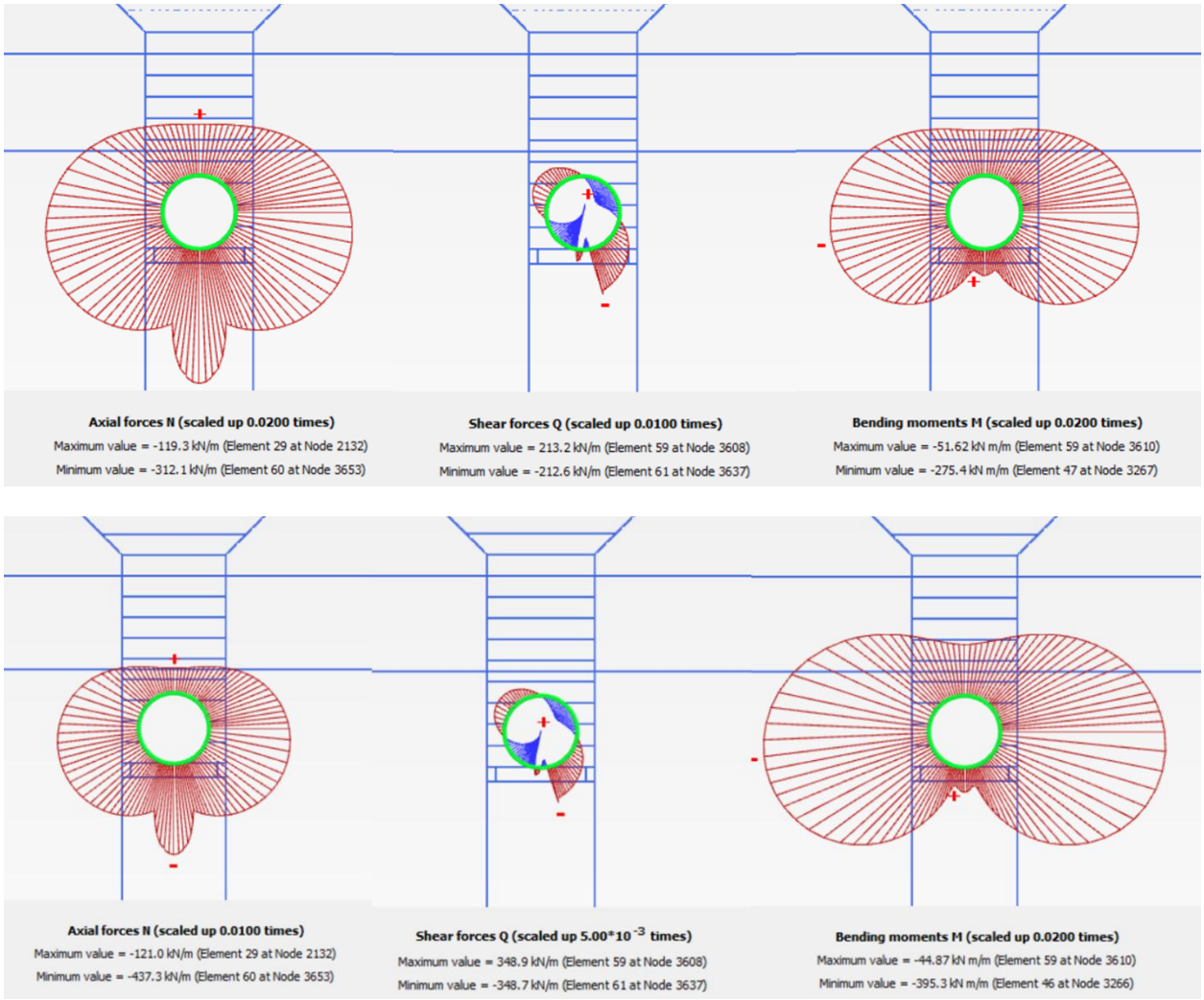
Gambar 6. Defleksi dan gaya dalam yang bekerja pada SSP-II



Gambar 7. Penurunan Disekitar Area Galian

Pengaruh Penimbunan Kembali

Pekerjaan penimbunan kembali area galian setelah proses pemasangan jalur pipa tentu akan berpengaruh terhadap pipa baja itu sendiri. Hasil analisis pada Gambar 8 menunjukan pipa baja mengalami gaua kerja *axial*, *shear*, dan *moment* masing-masing sebesar 473,3 kN, 348,7 kN, dan 395,3 kN.m. Gaya kerja ini merupakan akumulasi dari proses penimbunan kembali dan ekstraksi perkuatan yang menjadi penahan galian. Semakin besar volume penimbunan kembali maka semakin besar pula gaya yang bekerja pada pipa baja. Dari hasil analisis juga dapat dilihat pertambahan gaya kerja sebelum SSP-II dicabut dan setelah SSP-II dicabut. Selisih gaya kerja yang terjadi akibat proses ekstraksi SSP-II masing masing sebesar 125 kN *axial force*, 135,7 kN *shear force*, dan 119,9 kN.m *moment*.



Gambar 8. Gaya kerja pada pipa baja akibat penimbunan kembali

4. KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang dilakukan diketahui faktor keamanan stabilitas galian sementara semakin berkurang seiring dengan bertambahnya kedalaman galian. Faktor keamanan pada elevasi galian terakhir sebesar 1,87. Besar defleksi dinding juga ikut bertambah selama konstruksi galian dilakukan, dimana besar rasio defleksi (δ_{hm}) terhadap kedalaman galian (H) diperoleh sebesar 0,37%. %. Gaya kerja yang terjadi pada SSP-II masih dibawah kapasitas strukturalnya. Selain besar defleksi posisi defleksi maksimum yang terjadi juga ikut berubah selama pekerjaan galian. Semakin dalam galian posisi defleksi maksimum juga bergerak kebawah. Hal ini diakibatkan oleh efek tahanan *strut H-Beam* yang dipasang pada beberapa kedalaman galian. Efek dari proses galian tidak hanya mempengaruhi defleksi pada dinding melainkan juga mengakibatkan penurunan tanah disekitar area galian. dari hasil analisis diperoleh penurunan maksimum akibat konstruksi galian sebesar 229,8 mm pada jarak 6 m dari dinding SSP-II. Pengaruh akibat proses galian ini terjadi hingga 35 m disekitar area galian. Besar rasio penurunan maksimum (δ_{vm}) terhadap kedalaman galian (H) sebesar 0,23. Kemudian tinjauan terhadap efek dari ekstraksi perkuatan pada pipa baja menunjukan bahwa pipa baja mengalami gaya kerja maksimum sebesar 473,3 kN (*axial force*), 348,7 kN (*shear force*), dan 395,3 kN.m (*moment*). Jika dibandingkan kondisi sebelum SSP-II diekstraksi dan setelah SSP-II diekstraksi, pipa baja mengalami peningkatan gaya kerja sebesar 125 kN (*axial force)*, 135,7 kN (*shear force)*, dan 119,9 kN.m (*moment)*.

DAFTAR PUSTAKA

Badan Standardisasi Nasional. (2017). *Persyaratan perancangan geoteknik* (SNI 8460:2017). http://sispk.bsn.go.id/SNI/DaftarList

Chou, V. F., Rahardjo, P. P., & Lim, A. (2022). Analisis Galian Dalam dengan Metode Konstruksi Top Down Menggunakan Analisis Elemen Hingga 2-Dimensi dan 3-Dimensi. *Jurnal Teknik Sipil*, *29*(1), 37–48. https://doi.org/10.5614/jts.2022.29.1.4

Desilia, A., Nababan, F. R. P., & Gusnadi, Z. (2024). Upaya Mitigasi Kelongsoran Lereng pada Jalur Pipa Penstock Eksisting. *Akselerasi: Jurnal Ilmiah Teknik Sipil*, *5*(2), 57–64.

Finno, R. J., Voss, F. T., Rossow, E., & Blackburn, J. T. (2005). Evaluating Damage Potential in Buildings Affected by Excavations. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, *131*(10), 1199–1210. https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0241(2005)131:10(1199)

G.Wayne, C., & O'Rourke, T. D. (1990). Construction induced movements of insitu walls. *Journal of Geotechnical Engineering*, *118*(4), 439–470. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1992)118:4(662.2)

Kung, G. T., Juang, C. H., Hsiao, E. C., & Hashash, Y. M. (2007). Simplified Model for Wall Deflection and Ground-Surface Settlement Caused by Braced Excavation in Clays. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, *133*(6), 731–747. https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0241(2007)133:6(731)

Lim, A., & Ou, C. (2016). Numerical study on buttress wall configuration to limit deformations induced by braced excavation. *19th Southeast Asian Geotechnical Conference & 2nd AGSSEA Conference (19SEAGC & 2AGSSEA)*, *19 (1)*, 29–34.

Nguyen, V. H., & Nikiforova, N. (2018). The choice of soil models in the design of deep excavation in soft soils of Viet Nam. *MATEC Web of Conferences*, *251*, 10–13. https://doi.org/10.1051/matecconf/201825104033

Ou, C., & Lim, A. (2016). Keynote lecture : Evaluation of three different measures in reducing the movements in deep excavations. *Proceedings of Geotechnics for Sustainable Infrastructure Development*, *1*(1), 281–287.

Phien-wej, N., HUmza, M., & Aye, Z. Z. (2012). Numerical modeling of diaphragm wall behavior in Bangkok soil using hardening soil model. *Proceedings of Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, 536–537. https://doi.org/10.1007/978-3-319-73568-9_174

Rahmayanti, L., Rahmah, D. M., & Larashati, D. (2021). Analisis Pemanfaatan Sumber Daya Energi Minyak Dan Gas Bumi Di Indonesia. *Jurnal Sains Edukatika Indonesia (JSEI)*, *3*(2), 9–16.

Sari, N. K., Gusnadi, Z., & Sarifah, F. (2024). Analisis Stabilitas Cofferdam Jembatan dengan Kombinasi Perkuatan pada Jembatan Wampu Sumatera Utara. *JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil*, *7*(2), 427–434.

Wang, Z. Z., & Whittle, A. J. (2024). Effects of Movement Induced by Ground Improvement on the Performance of an Excavation Support System in Underconsolidated Clay. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, *150*(2). https://doi.org/10.1061/jggefk.gteng-11588

Wu, L., Sun, J., & Tong, Y. (2021). Parametric Sensitivity Study of Deep Excavation in Singapore Old Alluvium Formation. *Advances in Civil Engineering*, *2021*(1), 1–11. https://doi.org/10.1155/2021/8644288