

**ASESMEN GEOTEKNIK KERETAKAN COLD WATER PIPE (CWP) PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP DAN REKOMENDASI PERBAIKAN****Heri Khoeri<sup>1,2\*</sup>, Badaruddin<sup>2</sup>, Wisnu Isvara<sup>3</sup>**<sup>1</sup> Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Jakarta<sup>2</sup> PT. Hesa Laras Cemerlang, <https://hesa.co.id><sup>3</sup> Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia\*Email: [heri.khoeri@umj.ac.id](mailto:heri.khoeri@umj.ac.id)**Abstrak**

Pipa air dingin (Cold Water Pipe, CWP) sebuah PLTU mengalami kebocoran setelah 7 tahun beroperasi karena retaknya CWP yang mengakibatkan PLTU shutdown. Perbaikan sudah dilakukan termasuk dengan aplikasi pile jet grouting tepat di bawah CWP namun kebocoran masih terjadi. CWP tersebut diletakkan di atas tanah lunak setebal 35m (Nspt 2 s/d 4) dengan tambahan timbunan 3m sebelum pemasangan CWP tanpa soil improvement. Asesmen dilakukan untuk mengevaluasi penyebab terjadinya kebocoran pipa, mengevaluasi efektivitas pile jet grouting, dan memberikan rekomendasi perbaikan yang tidak menimbulkan masalah baru di kemudian hari. Hasil analisis menunjukkan penurunan tanah akibat konsolidasi setelah 7 tahun beroperasi telah mencapai 60% yaitu 46cm. Nilai ini mendekati hasil pengukuran lapangan yang nilainya antara 30 cm s/d 50 cm. Masih ada potensi penurunan hingga derajat konsolidasi 90%, yang diestimasi 60cm di tahun ke-15 setelah operasi, artinya dalam 8 tahun berikutnya potensi penurunan masih 20cm. Kebocoran teridentifikasi akibat perbedaan penurunan antara CWP yang menumpu pada pile cap dengan yang langsung di tanah, mencapai 4 cm sesaat setelah pipa ditanam, meningkat menjadi 5.5cm pada tahun ke-7, dan 5,7cm pada tahun ke-15. Pipa sepanjang 12m dengan penurunan 5.5cm akan berotasi 0.53° pada tumpuannya, nilai ini melebihi batas ijinnya yang dibatasi 0.5°. Aplikasi jet grouting setempat justru berpotensi menambah penurunan. Mengingat masih ada potensi penurunan namun tidak sebesar di 7 tahun pertama, maka merekomendasikan pemasangan camp plate sebagai alat monitoring dan adjustable support untuk menaikkan pipa jika camp plate mengindikasikan penurunan mendekati batas ijinnya.

**Kata kunci:** asesmen geoteknik, konsolidasi, penurunan tanah, perbaikan tanah

**Abstract**

The Cold Water Pipe (CWP) of a power plant experienced leakage after 7 years of operation due to cracks in the CWP, resulting in the shutdown of the power plant. Repairs have been carried out, including the application of pile jet grouting directly beneath the CWP, but leakage still occurs. The CWP was placed on soft soil with a thickness of 35m (Nspt 2 to 4), with an additional 3m embankment before CWP installation without soil improvement. An assessment was conducted to evaluate the causes of pipe leakage, assess the effectiveness of pile jet grouting, and provide repair recommendations that do not create new problems in the future. The analysis results showed that soil settlement due to consolidation after 7 years of operation had reached 60%, which is 46cm. This value is close to field measurement results ranging from 30cm to 50cm. There is still potential for settlement up to 90% consolidation degree, estimated at 60cm in the 15th year of operation, meaning there is still a potential settlement of 20cm in the next 8 years. Leakage was identified due to the difference in settlement between the CWP supported on the pile cap and directly on the ground, reaching 4cm shortly after pipe installation, increasing to 5.5cm in the 7th year, and 5.7cm in the 15th year. A 12m-long pipe with a 5.5cm settlement will rotate 0.53° at its support, exceeding its allowable limit of 0.5°. Localized jet grouting applications may potentially exacerbate settlement. Considering the ongoing potential settlement, though not as significant as in the first 7 years, it is recommended to install camp plates as monitoring devices and adjustable supports to raise the pipe if camp plates indicate settlement approaching its allowable limit.

**Keywords:** geotechnical assessment, consolidation, settlement, soil improvement

**1. PENDAHULUAN**

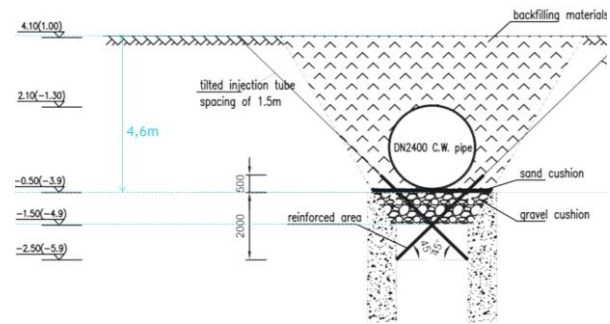
CWP (Cold Water Pipe) pada sebuah PLTU dibangun diatas tanah lunak dengan ketebalan mencapai 35 m dengan nilai NSPT 2 s/d 4. Diatas tanah lunak tersebut dilakukan pekerjaan persiapan lahan berupa penimbunan

dengan ketebalan mencapai 3m tanpa soil improvement. Setelah 7 tahun beroperasi, ditemukan sejumlah kerusakan struktur dan mekanikal CWP yang terjadi pada sejumlah titik. Kerusakan yang dimaksud berupa pecahnya pipa CWP yang mengakibatkan PLTU shutdown.

Sifat mudah terkompresi dari tanah lunak membuatnya rentan terhadap masalah geoteknik seperti kegagalan kapasitas dukung, pergeseran lateral, dan penurunan konsolidasi (Khoeri and Isvara, 2024; Meilani *et al.*, 2020). Kekuatan geser rendah dari tanah-tanah ini memerlukan perbaikan yang signifikan karena kapasitas dukung alaminya sangat rendah (Negesa, 2022). Pada saat konstruksi, jenis tanah di sekitar pipa memiliki pengaruh signifikan pada deformasinya selama penimbunan kembali galian jika beban utama bersifat vertikal (Grosel *et al.*, 2018). Penurunan permukaan dengan mudah menyebabkan deformasi dan kegagalan pipa yang tertanam. Interaksi antara pipa yang tertanam dan tanah menyebabkan deformasi dan tekanan tambahan pada pipa (Ding *et al.*, 2021). Ada banyak metode untuk memprediksi total penurunan konsolidasi yang terjadi, diantaranya metode analitis yang dikembangkan Terzaghi atau metode elemen hingga dengan bantuan software (Surbakti, 2021).

Pengendalian penurunan pipa sangat penting untuk tanah lunak. Penggunaan tiang beton untuk meningkatkan sifat-sifat tanah mungkin menjadi solusi; namun, biayanya mahal. Beberapa alternatif solusi alternatif untuk masalah ini, diantaranya dengan penambahan sistem kolom dengan pencampuran semen dalam tanah (*cement deep mixing, CDM*) (Duc Pham *et al.*, 2021), piled embankment untuk menahan tekanan lateral dan mengurangi penurunan (Hong and Hong, 2017), grouting tanah untuk peningkatan kapasitas beban, pengendalian infiltrasi air, pengurangan penurunan tanah, dan perbaikan stabilitas tanah (Bhuiyan *et al.*, 2024; Khoeri *et al.*, 2024), penggantian material timbunan dengan beton ringan berbuis (*Foam Light Concrete, FLC*) (Jiang *et al.*, 2022), pemasangan *box culvert* dan penggantian timbunan di atas pipa dengan *geofoam* (Gultom *et al.*, 2022), penggunaan *geocell* (Khalaj *et al.*, 2017) dan lainnya.

Penelitian ini dilakukan untuk mengidentifikasi penyebab keretakan yang mengakibatkan kebocoran CWP, mengevaluasi perbaikan yang sudah dilakukan dengan penggunaan *jet grouting* dan memberikan rekomendasi perbaikan yang reliabel, mudah dikerjakan, dan tidak menimbulkan masalah baru di kemudian hari, yang mengganggu operasional..



Gambar 1. Potongan melintang CWP



Gambar 2. CWP yang retak

## 2. METODE PENELITIAN

Penelitian dilakukan dengan tahapan: (1) Penyelidikan tanah, (2) Verifikasi *as built drawing*, (3) Analisis konsolidasi untuk validasi model, (4) Evaluasi terhadap penyebab keretakan CWP, (5) Evaluasi terhadap efektifitas *jet grouting*, dan (6) Rekomendasi perbaikan.

### 2.1. Penyelidikan Tanah

Investigasi dilakukan dengan pengeboran, *standard penetration test (SPT)*, pengambilan contoh tanah tidak terganggu (*UDS*) (BSN, 2019), dan pengujian laboratorium *UDS (index dan engineering properties)* (BSN, 1998), (ASTM, 2017) (BSN, 2008), (ASTM, 2020), (BSN, 2018), (ASTM, 2018), (ASTM, 2023).

### 2.2. Verifikasi *As Built Drawing*

Verifikasi *as built drawing* dilakukan dengan membandingkannya dengan kondisi lapangan. Jika ada perbedaan, maka yang digunakan untuk analisis adalah data lapangan.

### 2.3. Analisis Konsolidasi untuk Validasi Model

Analisis dilakukan terhadap pemodelan tanah dengan membandingkan hasil prediksi model settlement dengan hasil pengukuran aktual di lapangan. Analisis dilakukan dengan *Midas GTS NX* yang merupakan *software* berbasis *finite element* (MIDAS, n.d.). Analisis konsolidasi dilakukan dengan memperhitungkan tahapan konstruksi seperti pada Tabel 1.

Tabel 1

**Tahapan analisis untuk validasi model**

Tahapan	Deskripsi
Tahap 1	Analisa kondisi awal (hitung tegangan awal) pada <i>massa</i> tanah agar berkesesuaian dengan kondisi lapangan.
Tahap 2	Penimbunan layer 1 (1 m)
Tahap 3	Dibiarkan berkonsolidasi selama 90 hari
Tahap 4	penimbunan layer ke 2 (1 m)
Tahap 5	Dibiarkan berkonsolidasi selama 90 hari
Tahap 6	penimbunan layer ke 3 (1 m)
Tahap 7	Dibiarkan berkonsolidasi selama 90 hari
Tahap 8	Dibiarkan konsolidasi 30 tahun, evaluasi settlement, check dengan aktual, prediksi sampai 90% derajat konsolidasi

2.4. **Analisis konsolidasi untuk evaluasi penyebab keretakan CWP**  
Analisis konsolidasi untuk mengevaluasi penyebab keretakan CWP seperti tahapan Tabel 2.

**Tabel 2**  
**Tahapan analisis konsolidasi untuk evaluasi penyebab keretakan CWP**

Tahapan	Deskripsi
Tahap 1-6	Sama dengan Tabel 1
Tahap 7	Dibiarkan terjadi konsolidasi selama 90 hari
Tahap 8	Penggalian sampai elevasi <i>bottom of support</i> dilanjutkan memasang pile, <i>pile cap</i> dan pipa CWP dan melakukan penimbunan kembali
Tahap 9	Membiarkan konsolidasi selama 7 tahun, kemudian melakukan evaluasi <i>deflection CWP</i>

2.5. **Analisis konsolidasi untuk evaluasi efektivitas jet grouting**  
Analisis konsolidasi evaluasi efektifitas perbaikan tanah seperti tahapan Tabel 3.

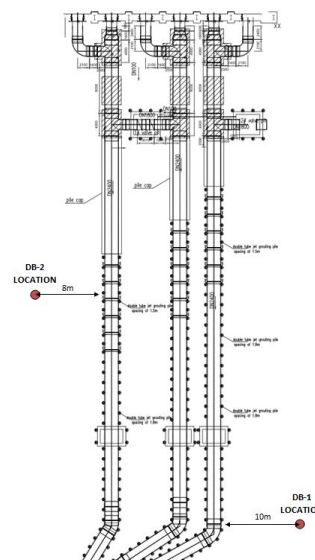
**Tabel 3**  
**Tahapan analisis konsolidasi untuk evaluasi efektifitas perbaikan tanah**

Tahapan	Deskripsi
Tahap 1- 6	Sama dengan Tabel 1
Tahap 7	Dibiarkan konsolidasi selama 90 hari
Tahap 8	Penggalian sampai elevasi <i>bottom of support</i> , <i>install piling</i> dan CWP dan penimbunan kembali
Tahap 9	Membiarkan konsolidasi selama 7 tahun, evaluasi <i>deflection CWP</i>
Tahap 10	instalasi <i>jet grouting</i>
Tahap 11	Melanjutkan konsolidasi hingga 90% derajat konsolidasi, evaluasi CWP dan pengaruh <i>jet grouting</i>

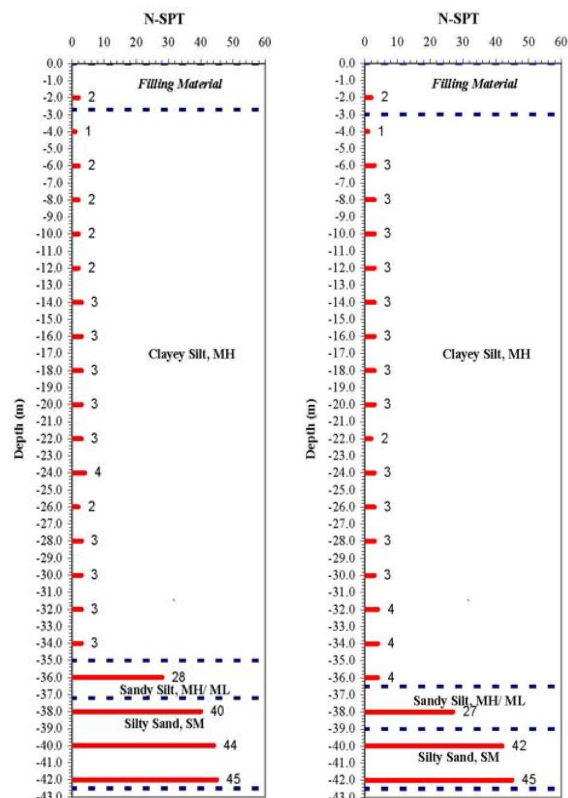
**3. HASIL DAN PEMBAHASAN**

**3.1. Hasil Penyelidikan Tanah**

Lokasi penyelidikan tanah dan NSPT seperti diberikan pada Gambar 4.



**Gambar 3. Lokasi Penyelidikan tanah**



**Gambar 4. Bor Log DB-1 (kiri) dan DB-2 (kanan)**

Selanjutnya berdasarkan interpretasi dari penyelidikan lapangan ditentukan penentuan parameter yang akan digunakan dalam pemodelan dan analisis, hasilnya seperti pada Tabel 4:

**Tabel 4**  
**Parameter kekuatan & kompresibilitas material massa tanah**

Lapisan tanah	Tipe tanah	Kedalaman (m)	N-Spt	$K_x = K_y$ (m/hari)	$C_u$ (kPa)	$\phi$ (°)	$E$ (kPa)	$\gamma_{sat}$	$\gamma_{dry}$
Timbunan	Sand	3		$6 \cdot 10^{-1}$	10	25	20000	18	16
Layer-1	Clay, silty sand	32	1	$6 \cdot 10^{-5}$	4	2	1000	16	12
Layer-2	Sand	3	20	$6 \cdot 10^{-5}$	80	30	20000	18	17
Layer-3	Sand stone	6	60	$6 \cdot 10^{-5}$	240	45	60000	19	17

**Tabel 5**  
**Parameter material struktur**

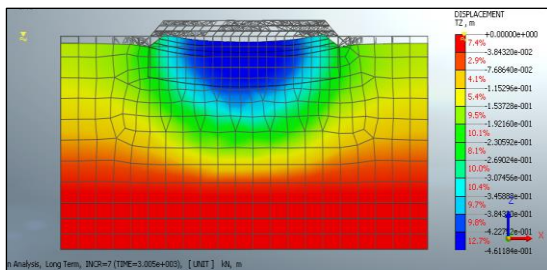
Tipe struktur	Tipe Material	$E$ (kPa)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\nu$
Pipe support	Beton	21.000.000	24	0.3
CWP	HDPE	300.000	20	0.3
Jet grouting	Beton	21.000.000	24	0.3

Parameter tiang yang digunakan memiliki gaya gesek ultimit = 50 kN/m<sup>2</sup>, modulus kekakuan geser = 10000 kN/m<sup>3</sup>, daya dukung ujung = 1100 kN dan kekakuan ujung = 110000 kN/m.

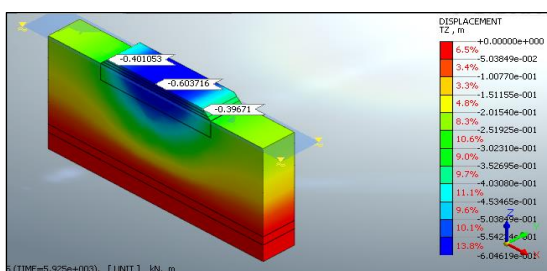
**3.2. Hasil analisis konsolidasi untuk validasi**

Simulasi numerik konsolidasi 3D dilakukan untuk validasi parameter tanah (Tabel 4) yang akan digunakan dalam model untuk prediksi penurunan 90% derajat konsolidasi. Validasi dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi dengan kondisi aktual. Model dinyatakan baik bila deviasinya kurang dari 20%.

Di akhir masa konstruksi penurunan pada badan timbunan diset 0 sehingga yang ditinjau adalah penurunan vertikal. Profil penurunan vertikal setelah 7 tahun seperti pada Gambar 5 dan pada 15 tahun pada Gambar 6.

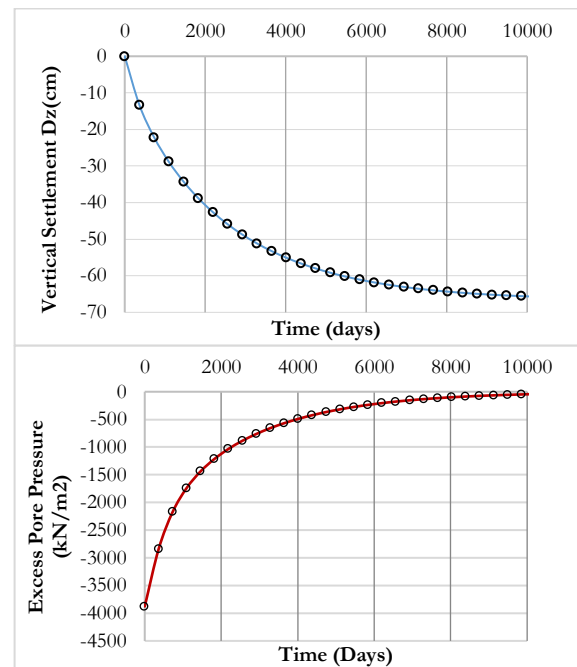


**Gambar 5. Penurunan vertikal setelah tahun ke-7**



**Gambar 6. Penurunan vertikal setelah 15 tahun**

Grafik hubungan waktu dan penurunan vertikal dan grafik hubungan waktu dan *excess pore pressure* seperti pada Gambar 7.



**Gambar 7. Penurunan vertikal, Dz (atas) dan excess pore pressure (bawah) terhadap waktu**

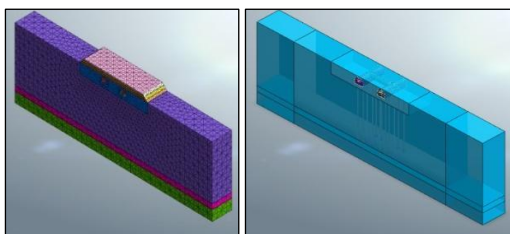
Dari hasil pengukuran, rerata penurunan pada badan timbunan berkisar antara 30 s/d 50 cm (7 tahun setelah PLTU dioperasikan). Hasil analisis numerik menunjukkan penurunan maksimum pada badan timbunan adalah 46 cm sementara penurunan minimum terjadi pada tepi timbunan sekitar 30 cm. Dari hasil ini maka model beserta pengambilan parameter tanah sudah ideal sehingga dapat digunakan untuk basis analisis.

Pada Gambar 6, dan Gambar 7 dipaparkan analisis lanjutan untuk memprediksi penurunan maksimum yang terjadi pada 90% derajat konsolidasi tercapai. Berdasarkan grafik yang terdapat pada Gambar 6 diketahui bahwa 90% derajat konsolidasi tercapai pada tahun ke-15, dimana setelah tahun ke-15 gradien kurva penurunan vertikal cenderung horizontal dan *Excess pore Pressure* yang tersisa kurang dari 10% maksimum *Excess pore Pressure* pada end

of construction. Maksimum penurunan vertikal yang terjadi mencapai setelah tahun ke-15 adalah 60.3 cm pada tengah badan timbunan dan 40 cm pada tepi timbunan.

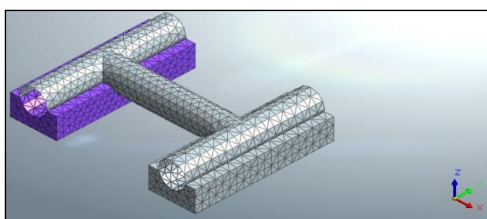
**3.3. Analisis untuk evaluasi kerusakan CWP**

Pada model, *massa* tanah dimodelkan dengan lebar 12 m, dengan panjang badan timbunan 36 m dan tanah asli sisi kanan kiri timbunan mencapai 40 m dengan maksud untuk memberikan ruang yang cukup untuk terjadinya konsolidasi melalui keluarnya *excess pore*.



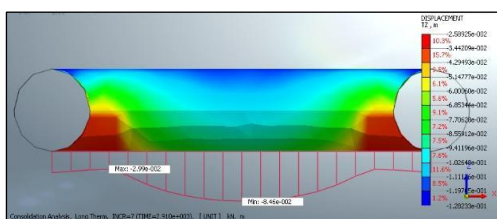
**Gambar 8.** Model numerik massa tanah dan CWP setelah meshing (kiri) dan pipe support, tiang pancang, CWP dan massa tanah (kanan)

Jalur CWP utama dimodelkan sepanjang lebar tanah lengkap dengan *pile cap* dimana CWP diletakan. Tiang pancang yang menopang *pile cap* berupa PC *spun pile* dia. 600 mm dengan panjang 33 m hingga duduk pada tanah keras.



**Gambar 9.** Pipe support & CWP setelah dimesh

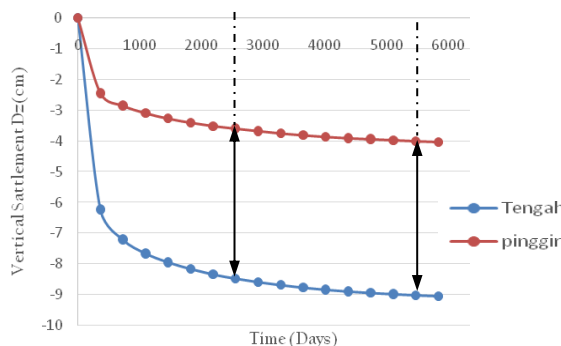
Penurunan profil pipa setelah 7 tahun operasi seperti Gambar 11. Dari Gambar 11, setelah beroperasi 7 tahun perbedaan penurunan mencapai 5,5 cm. Pada sisi tumpuan pipa 2,9 cm sementara pada sisi tengah 8,4 cm. Dengan perbedaan 5,5. cm, maka untuk bentang 12 m nilai ini ekuivalen dengan rotasi 0,52<sup>0</sup> yang melebihi ijin (Tabel 6), sehingga di pada tahun ke-7 pipa mengalami kebocoran.



**Gambar 11.** Profil penurunan CWP

**Tabel 6**  
**Defleksi rotasi (*angular deflection angle*) pipa GRP yang diijinkan**

Dia. pipa nominal (mm)	Rotasi nominal (°)
<500	3
>500 sampai <900	2
>900 sampai <1800	1
>1800	0.5

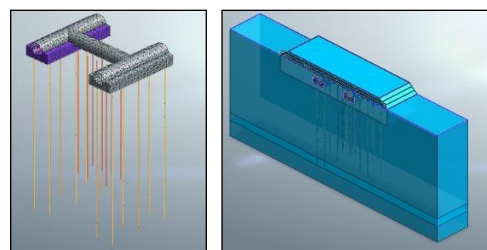


**Gambar 13.** Grafik penurunan vertikal pipa terhadap waktu

Pada tahun ke-15, konsolidasi mencapai 90%, nilai perbedaan penurunan meningkat hingga 5.7 cm. Menunjukkan akan terus terjadi kebocoran CWP selama operasinya jika tidak dilakukan penanganan. Pada Gambar 13 terlihat nilai perbedaan penurunan antara pipa sisi tumpuan dan pipa sisi tengah yang terlihat makin membesar berdasarkan fungsi waktu dan cenderung konstan setelah melewati tahun ke-15.

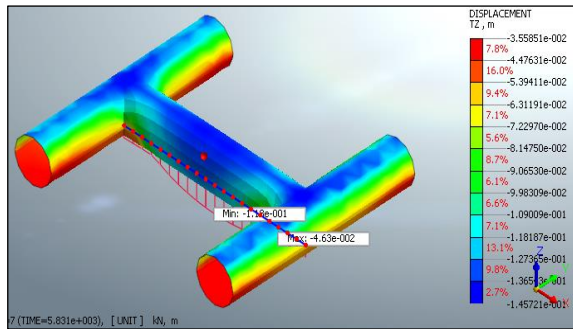
**3.4. Analisis konsolidasi evaluasi jet grouting**

Upaya perbaikan dengan jet grouting dimodelkan *floating pile* yang mengandalkan *friction* dengan tanah lunak. (Gambar 14).



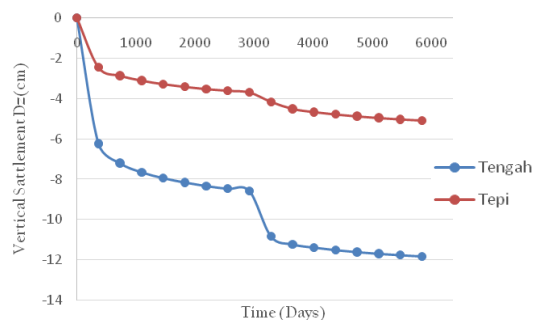
**Gambar 14.** Geometri CWP, pile cap, pile jet grouting (kiri) dan geometri CWP, pile cap, pile jet grouting dan massa tanah (kanan)

Estimasi profil penurunan CWP pada tahun ke-15, dengan pemasangan *jet grouting* pada tahun ke-7 seperti pada Gambar 15.



**Gambar 15. Profil penurunan CWP-3D view (atas) dan 2D view (bawah)**

Penambahan *jet grouting* tidak efektif untuk menurunkan atau mengurangi perbedaan penurunan pada pipa CWP (Gambar 16), nilai perbedaan penurunan malah bertambah, dimana terjadi lompatan setelah tahun ke 7 sesaat setelah *pile jet grouting* diaktifkan.



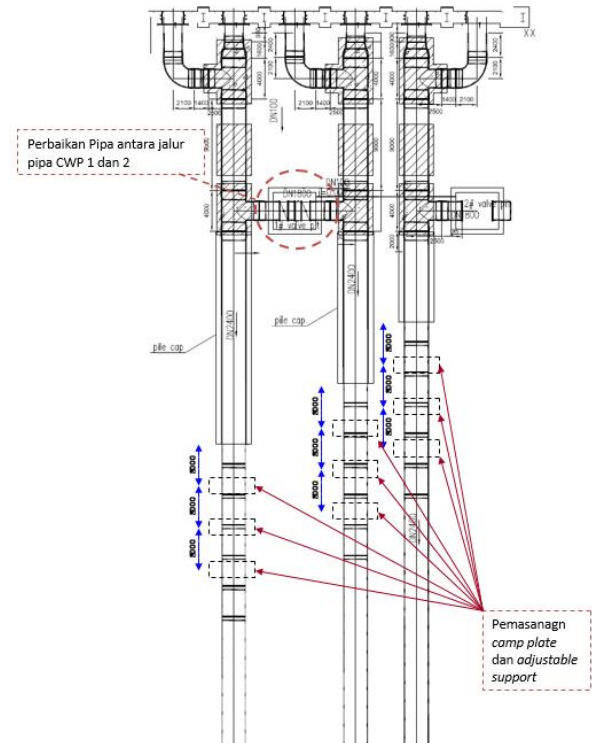
**Gambar 16. Grafik perbedaan penurunan CWP**

Hasil analisis numerik walaupun dengan simplifikasi model, namun setidaknya dari hasil analisis dapat diketahui bahwa keberadaan tiang *jet grouting* tidak efektif untuk mengurangi perbedaan penurunan pada pipa karena tiang *jet grouting* ini sifatnya mengambang (*floating*) pada *massa* tanah lunak yang terus mengalami penurunan akibat proses konsolidasi dari material tanah timbunan.

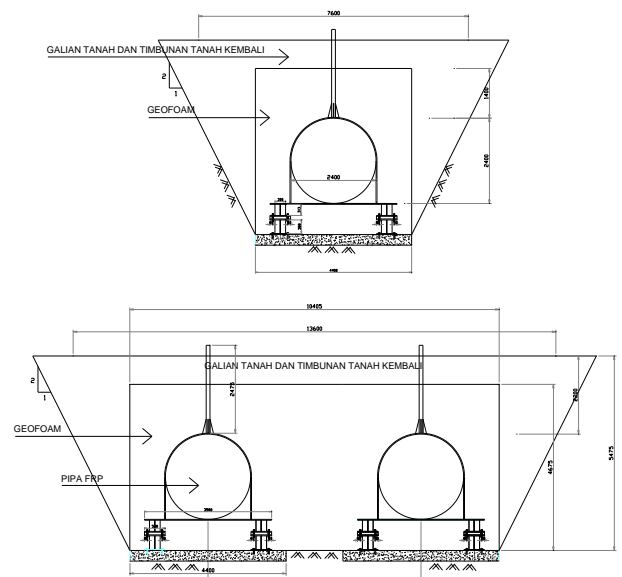
### 3.5. Usulan Desain Perbaikan dan Perkuatan

60% konsolidasi sudah terjadi dan diestimasi masih akan ada penurunan dan baru pada tahun ke-15 mulai konstan, beberapa alternatif solusi dapat dilakukan seperti mengganti timbunan dengan material yang lebih ringan, atau merelase timbunan, namun alternatif perbaikan tersebut untuk CWP sepanjang 2 km biayanya cukup besar, karena walaupun masih ada potensi penurunan, namun nilainya tidak sebesar 7 tahun pertama. Untuk itu merekomendasikan alternatif solusi praktis dengan memasang *camp plate* dan *adjustable*

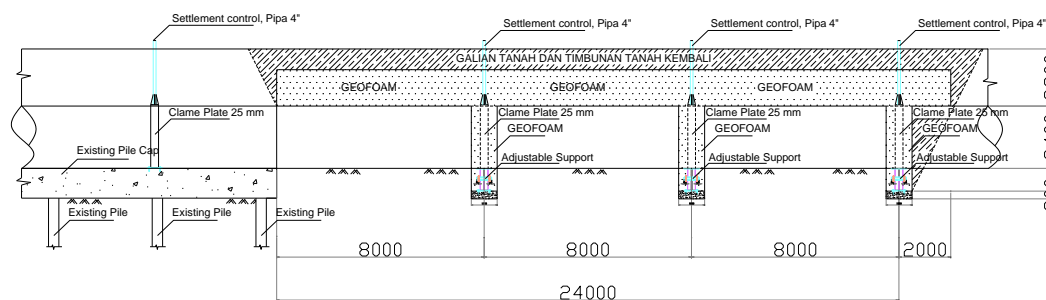
*support* (Gambar 19) di beberapa titik kritis dan pada penghubung antara CWP 1 dan 2 (Gambar 17). *Clamp plate* yang menempel pada pipa berfungsi untuk memonitor secara berkala perbedaan penurunan tersebut, sedangkan *adjustable support* untuk mengatur elevasi dasar pipa sehingga tidak melebihi defleksi sudut pipa yang diijinkan ( $0.5^\circ$ ).



**Gambar 17. Denah pemasangan clamp plate dan adjustable support**



**Gambar 18. Potongan melintang pemasangan clamp plate dan adjustable support**



**Gambar 19. Potongan memanjang pemasangan clamp plate dan adjustable support**

#### 4. KESIMPULAN

Penurunan tanah akibat proses konsolidasi mencapai 60% setelah 7 tahun PLTU beroperasi. Maksimum penurunan vertikal hasil analisis mencapai 46 cm, sementara hasil pengukuran berkisar 30 cm s/d 50 cm, dengan nilai tersebut pemodelan sudah merepresentasikan kondisi aktual. Timbunan masih berpotensi mengalami penurunan signifikan hingga derajat konsolidasi 90%. Penurunan pada 90% derajat konsolidasi diestimasikan 60 cm pada tahun ke-15 setelah operasi. Bararti dalam 8 tahun berikutnya potensi penurunan akibat konsolidasi diperkirakan masih bertambah 20 cm. Perbedaan penurunan pada CWP yang menumpu pada *pile cap* dan yang menumpu di atas tanah asli mencapai 4 cm sesaat setelah pipa ditanam dan meningkat menjadi 5.5 cm pada tahun ke-7 dan diestimasikan 5.7 cm pada tahun ke-15 akibat proses konsolidasi. Untuk panjang pipa 12 meter maka dengan penurunan 5.5 cm ekuivalen dengan sudut  $0.53^\circ$ . Nilai ini melebihi batas ijin yang dikeluarkan oleh manufaktur dimana untuk pipa dia.  $> 1.8$  m harus kurang dari  $0.5^\circ$ . Upaya penambahan *jet grouting* setempat yang telah dilakukan dinilai kurang efektif untuk mengurangi perbedaan penurunan.

Merekomendasikan untuk memasang clamp plate dan adjustable support di beberapa titik kritis. *clamp plate* yang menempel pada pipa berfungsi untuk memonitor secara berkala perbedaan penurunan tersebut, sedangkan *adjustable support* untuk mengatur elevasi dasar pipa sehingga tidak melebihi defleksi sudut pipa yang diijinkan ( $0.5^\circ$ ).

#### DAFTAR PUSTAKA

- ASTM. (2017), *ASTM D4318-17e1, Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils*.
- ASTM. (2018), *D2573M-18, Standard Test Method for Field Vane Shear Test in Saturated Fine-Grained Soils*.
- ASTM. (2019), *ASTM D4161-14, Standard Specification for "Fiberglass" (Glass-*

*Fiber-Reinforced Thermosetting-Resin) Pipe Joints Using Flexible Elastomeric Seals*.

ASTM. (2020), *ASTM D4767-20, Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils*.

ASTM. (2023), *ASTM D2850-23, Standard Test Method for Unconsolidated-Undrained Triaxial Compression Test on Cohesive Soils*.

Bhuiyan, M.R., Masum, S.R., Parvej, M.T. and Sanuwar, S.M. (2024), "An Overview of Soil Improvement through Ground Grouting", *Journal of Geoscience and Environment Protection*, Vol. 12 No. 01, pp. 51–63, doi: 10.4236/gep.2024.121004.

BSN. (1998), *SNI 03-4804-1998, Metode Pengujian Berat Isi Dan Rongga Udara Dalam Agregat*, Indonesia.

BSN. (2008), *SNI 3423: 2008, Cara Uji Analisis Ukuran Butir Tanah*, Indonesia.

BSN. (2018), *SNI 2813: 2018, Cara Uji Kuat Geser Langsung Tanah Terkonsolidasi Dan Terdrainase*.

BSN. (2019), *SNI 4153:2019, Metode Uji Penetrasi Standar (SPT) Dan Pengambilan Contoh Tanah Dengan Tabung Belah (ASTM D 1586-11, IDT)*, Indonesia.

DIN. (2009), *EN 1119:2009, Plastics Piping Systems - Joints for Glass-Reinforced Thermosetting Plastics (GRP) Pipes and Fittings - Test Methods for Leaktightness and Resistance to Damage of Non-Thrust Resistant Flexible Joints with Elastomeric Sealing Elements*.

Ding, Y., Yang, H., Xu, P., Zhang, M. and Hou, Z. (2021), "Coupling Interaction of Surrounding Soil-Buried Pipeline and Additional Stress in Subsidence Soil", *Geofluids*, Vol. 2021, pp. 1–16, doi: 10.1155/2021/7941989.

- Duc Pham, T., Duc Bui, N., Trong Vu, Q., Thanh Duong, H. and Chi Phan, H. (2021), "Mitigating effect of embankment to adjacent pipe with CDM columns", *E3S Web of Conferences*, Vol. 263, p. 02053, doi: 10.1051/e3sconf/202126302053.
- Grosel, S., Pachnicz, M., Rózański, A., Sobótka, M. and Stefaniuk, D. (2018), "Influence of bedding and backfill soil type on deformation of buried sewage pipeline", *Studia Geotechnica et Mechanica*, Vol. 40 No. 4, pp. 313–320, doi: 10.2478/sgem-2018-0035.
- Gultom, J., Pratikso and Rochim, A. (2022), "Floating road construction on soft soil", *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 955 No. 1, p. 012016, doi: 10.1088/1755-1315/955/1/012016.
- Hong, W.P. and Hong, S. (2017), "Piled embankment to prevent damage to pipe buried in soft grounds undergoing lateral flow", *Marine Georesources & Geotechnology*, Vol. 35 No. 5, pp. 719–729, doi: 10.1080/1064119X.2016.1227406.
- ISO. (2023), *ISO 8639:2023, Glass-Reinforced Thermosetting Plastics (GRP) Pipes and Fittings*.
- Jiang, Z., Gao, X., Feng, X. and Chen, D. (2022), "Research on the Application of Foamed Lightweight Concrete (FLC) in the Construction of Highway Soft Soil Foundation Engineering with Buried High-Pressure Gas Pipes", *Applied Sciences*, Vol. 12 No. 19, p. 10119, doi: 10.3390/app121910119.
- Khalaj, O., Joz Darabi, N., Moghaddas Tafreshi, S.N. and Mašek, B. (2017), "Protection of Buried Pipe under Repeated Loading by Geocell Reinforcement", *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 95, p. 022030, doi: 10.1088/1755-1315/95/2/022030.
- Khoeri, H. and Isvara, W. (2024), *Analisis Penurunan Konsolidasi Depo Kontainer Dan Penerapan Pre-Loading Dengan Prefabricated Vertical Drain*, Vol. 14.
- Khoeri, H., Pradana, R., Isvara, W. and Irwanto, R. (2024), "Geotechnical Stability Assessment and Soil Improvement Recommendations using Soil Grouting and Drainage Tunnels (Case study: Retaining wall displacement at a transmission tower site)", *BENTANG: Jurnal Teoritis Dan Terapan Bidang Rekayasa Sipil*, Vol. 12 No. 2.
- Meilani, A., Ahmad, R. and Fikri, F. (2020), "Analysis of settlement prediction due to preloading and vertical drain applications on runway construction", *E3S Web of Conferences*, Vol. 156, p. 02002, doi: 10.1051/e3sconf/202015602002.
- MIDAS. (n.d.). "GTS NX Analysis Reference".
- Negesa, A.B. (2022), "Settlement Analysis of Pipe Culvert Situated in Soft Clay Treated with Prefabricated Vertical Drains", *Advances in Civil Engineering*, Vol. 2022, pp. 1–8, doi: 10.1155/2022/9569077.
- Surbakti, R. (2021), "Prediksi Penurunan Konsolidasi Tanah Lunak Dengan Metode Analitis Dan Metode Element Hingga", *JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING BUILDING AND TRANSPORTATION*, Vol. 5 No. 2, pp. 83–91, doi: 10.31289/jcebt.v5i2.5773.