



Analisis Perhitungan Struktur *Cellar* Pemboran pada *Wellpad* Proyek Penyiapan Infrastruktur PLTP Mataloko

Indra Harfani Soesanto^{1,*}, Agus Suprihanto^{1,2}, Sumardi^{1,3}

¹Program Studi Program Profesi Insinyur, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro,

²Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro,

³Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro,

Jl. Prof. Soedarto, SH, Kampus UNDIP Tembalang, Semarang, Indonesia 50275

^{*}Corresponding author: indra.harfani@plne.co.id

(Received: January 3, 2025; Accepted: March 18, 2025)

Abstract

Analysis of Drilling *Cellar* Structure Calculation on *Wellpad* of Mataloko Geothermal Power Plant Infrastructure Preparation Project. Stability and strength of *cellar* structure are very important to ensure operational safety and prevent structural failure during geothermal drilling process. This study aims to analyze the design of drilling *cellar* structure on the *wellpad* of Mataloko Geothermal Power Plant project, focusing on bearing capacity, stability and strength of the structure. Laboratory data from soil investigation are used to perform structural calculations, which are analyzed using STAADPro software. These calculations include the design of floor and wall slabs under vertical and lateral loading conditions to ensure structural resistance to various types of loads that occur during drilling operations. The results of the study show that the *cellar* design has a bearing capacity safety factor of more than 3, as well as a safety factor against overturning and sliding of more than 2, which means that the structure is safe enough to withstand the load. The thickness of the floor slab is 200 mm with D13-140 reinforcement and the thickness of the wall slab is 300 mm with D19-110 reinforcement is proven to provide adequate strength to withstand the given load. This study concludes that the proposed structural design meets the stability and strength requirements to support safe geothermal drilling infrastructure.

Keywords: *cellar* structure, geothermal, safety factor, structural design, STAAD.Pro

Abstrak

Stabilitas dan kekuatan struktur *cellar* sangat penting untuk menjamin keselamatan operasional dan mencegah kegagalan struktural selama proses pengeboran panas bumi. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan analisis desain struktur *cellar* pemboran pada *wellpad* proyek Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi Mataloko, dengan fokus pada daya dukung, stabilitas dan kekuatan struktur. Data laboratorium dari penyelidikan tanah digunakan untuk melakukan perhitungan struktur, yang dianalisis menggunakan perangkat lunak STAADPro. Perhitungan ini mencakup desain pelat lantai dan dinding dalam kondisi pembebanan vertikal dan lateral untuk memastikan ketahanan struktural terhadap berbagai jenis beban yang terjadi selama operasi pengeboran. Hasil penelitian menunjukkan bahwa desain *cellar* memiliki faktor keamanan daya dukung lebih dari 3, serta faktor keamanan terhadap guling dan geser lebih dari 2, yang berarti strukturnya cukup aman dalam menahan beban. Ketebalan pelat lantai 200 mm dengan tulangan D13-140 dan ketebalan pelat dinding 300 mm dengan tulangan D19-110 terbukti memberikan kekuatan yang memadai untuk menahan beban yang diberikan. Penelitian ini menyimpulkan bahwa desain struktur yang diusulkan memenuhi persyaratan stabilitas dan kekuatan untuk mendukung infrastruktur pengeboran panas bumi yang aman.

Kata kunci: struktur *cellar*, panas bumi, faktor keamanan, desain struktural, STAAD.Pro

How to Cite This Article: Soesanto, I. H., Suprihanto, A., & Sumardi, S. (2025). Analisis Perhitungan Struktur *Cellar* Pemboran pada Wellpad Proyek Penyiapan Infrastruktur PLTP Mataloko. *JPII*, 3(1), 25-33. DOI: <https://doi.org/10.14710/jpii.2025.25706>

PENDAHULUAN

Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) adalah salah satu solusi untuk energi terbarukan yang semakin mendapat perhatian di tengah meningkatnya kebutuhan akan sumber energi yang ramah lingkungan dan berkelanjutan. Indonesia memiliki potensi energi panas bumi sebesar 28,5 Gigawatt, namun hingga September 2018 baru sekitar 1.948,5 Megawatt yang dimanfaatkan melalui pengoperasian 12 Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) di seluruh Indonesia (Batubara, 2018). Kedua belas PLTP tersebut tersebar di beberapa wilayah, yaitu Sumatera Utara (PLTP Sibayak dengan kapasitas 12 Megawatt dan PLTP Sarulla 110 Megawatt), Lampung (PLTP Ulubelu 220 Megawatt), Jawa Barat (PLTP Patuha 55 Megawatt, PLTP Darajat 270 Megawatt, PLTP Wayang Windu 227 Megawatt dan PLTP Kamojang 235 Megawatt), Jawa Tengah (PLTP Dieng 60 Megawatt), Sulawesi Utara (PLTP Lahendong 120 Megawatt) dan Nusa Tenggara Timur (PLTP Mataloko 2,5 Megawatt serta PLTP Ulumbu 10 Megawatt). Secara teori, Indonesia baru memanfaatkan sekitar 7% dari total potensi panas buminya (Batubara, 2018).

Pemboran panas bumi merupakan salah satu metode untuk mengekstraksi energi panas yang tersimpan di dalam bumi dan digunakan sebagai sumber energi terbarukan untuk pembangkitan listrik, pemanasan ruangan, atau aplikasi industri lainnya. Sebelum proses pengeboran dilakukan, eksplorasi geologi, geofisika dan geokimia sangat penting untuk mengidentifikasi potensi sumber panas bumi di bawah permukaan, guna menentukan keberadaan reservoir panas yang dapat dimanfaatkan (Armstead, 1983).

Kedalaman dan suhu sumber daya panas bumi sangat bervariasi. Beberapa pembangkit listrik, (misalnya, Steamboat Hills, Nevada dan Mammoth Lakes, California) beroperasi dengan fluida bersuhu lebih rendah (di bawah 200°C) yang diproduksi dari kedalaman sekitar 330 m, tetapi sumur di The Geysers menghasilkan uap kering (di atas 240°C) dan biasanya berada di kedalaman 2.500 hingga 3.000 m. Dalam kasus yang ekstrem, sebuah sumur eksplorasi dengan suhu lubang bawah 500°C pada kedalaman sekitar 3350 m telah diselesaikan di Jepang dan lubang eksperimental ke dalam batuan cair (di atas 980°C) telah dibor di Hawaii dan di Islandia (Finger & Blankenship, 2010).

Wellpad geothermal adalah area yang dirancang khusus untuk menempatkan beberapa sumur produksi dan/atau injeksi yang diperlukan dalam pengembangan lapangan panas bumi. *Wellpad* ini tidak hanya berfungsi

sebagai lokasi pemboran tetapi juga sebagai pusat pengelolaan operasi, termasuk instalasi peralatan, pengangkutan material dan pengelolaan limbah pemboran. Sumur standar pada panas bumi merupakan komponen fundamental dalam penelitian dan pemanfaatan panas bumi serta peningkatan pemahaman sistem panas bumi. Sumur panas bumi menyediakan akses yang memungkinkan banyak pengujian langsung dan pengukuran di kondisi kedalaman. Sumur pemboran standar panas bumi memiliki kedalaman 1500-3000 meter. Peran utama dari sumur panas bumi yaitu sebagai gradien suhu, eksplorasi, penilaian produksi atau sebagai monitor sumur (Axelsson, 2013). Berbeda dengan sumur minyak, sumur panas bumi tidak menggunakan *tubing* dan juga tidak diperforasi (Saptadji, n.d.).

Salah satu aspek kunci dalam proses produksi energi dari panas bumi adalah kegiatan pemboran untuk mengeksplorasi dan mengekstraksi uap atau air panas dari reservoir bawah tanah. Salah satu infrastruktur penting dalam operasi pemboran panas bumi adalah struktur *cellar*. Menurut Standar Nasional Indonesia (SNI 9247:2024) tentang Pengeboran Sumur Panas Bumi, *cellar* dirancang untuk memenuhi kebutuhan operasional pengeboran dan pemanfaatan sumur di masa depan. Ukuran *cellar* disesuaikan dengan jenis *rig* dan menjadi satu kesatuan dengan fondasi *rig*, sementara dindingnya dapat terbuat dari beton bertulang atau logam. Untuk meminimalkan kedalaman *cellar* dan mengurangi potensi ruang terbatas, perencanaan harus dimulai dengan membuat *Blow Out Preventer (BOP) stacking plan* dan konfigurasi *S-bend* pipa uap produksi. *Cellar* juga harus mampu menahan semua beban yang ditimbulkan oleh peralatan dan operasi pengeboran, serta dirancang untuk menempatkan titik jangkar pengikat kepala sumur. Keselamatan personel menjadi prioritas, sehingga *cellar* harus dilengkapi dengan kisi-kisi penutup untuk mencegah jatuh dan berfungsi sebagai *platform* kerja. Jika ada potensi gas beracun, akses ke *cellar* harus dikendalikan dan harus ada fasilitas akses yang aman serta sistem pembuangan untuk mengatasi genangan fluida.

Desain *cellar* yang baik harus mampu menahan beban struktural dari peralatan berat serta menanggulangi tantangan lingkungan, seperti potensi erosi akibat hujan, air tanah, atau bahkan kondisi geologi yang tidak stabil. Selain itu, *cellar* juga memberikan akses yang aman bagi operator untuk melakukan pemeliharaan dan pengawasan terhadap peralatan pemboran selama operasi berlangsung. Keberadaan *cellar* yang andal dan kokoh tidak hanya memastikan kelancaran operasi, tetapi juga

merupakan komponen penting dalam menjaga keselamatan kerja, meminimalkan potensi kecelakaan, dan menghindari kerusakan pada peralatan pemboran yang bernilai tinggi.

Dalam mendesain *cellar* pemboran, perlu dilakukan perhitungan terhadap dinding *cellar* pemboran, agar dinding *cellar* pemboran tidak runtuh pada saat melakukan aktivitas pemboran. Dinding dengan rasio perbandingan tinggi terhadap panjang yang lebih kecil memiliki kekuatan yang lebih besar dibandingkan dengan dinding yang memiliki rasio perbandingan lebih besar (Teng & Candra, 2016). Keruntuhan pada *cellar* pemboran akan berpengaruh pada tapakan/landasan fondasi *rig* pada saat operasional, sehingga perlu dilakukan perhitungan untuk mengetahui kekuatan dinding *cellar* pemboran tersebut. Untuk menganalisis gaya lentur yang diterima oleh struktur dinding penahan, perlu dilakukan perhitungan yang mempertimbangkan momen-momen yang timbul akibat beban yang bekerja, termasuk gaya horizontal yang berasal dari tekanan tanah. (Jumaidi, 2019).

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kemampuan struktur *cellar* pemboran dalam menahan beban-beban yang bekerja dengan mengevaluasi faktor keamanan (FK) untuk daya dukung, stabilitas guling dan geser, serta memastikan bahwa hasil perhitungan memenuhi atau melampaui persyaratan yang ditentukan. Selain itu, penelitian ini bertujuan untuk menentukan desain optimum bagi pelat lantai dan pelat dinding struktur *cellar*, termasuk ketebalan dan spesifikasi penulangan yang mampu menahan beban sesuai dengan analisis momen ultimit yang telah dilakukan. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan desain struktur yang aman dan efisien pada aplikasi konstruksi *cellar*.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini memiliki lingkup pembahasan terkait analisis struktur *cellar* pemboran yang terdapat pada proyek penyiapan infrastruktur PLTP Mataloko, yang berfokus pada salah satu rencana *wellpad* yaitu *wellpad* A di PLTP Mataloko. Penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahapan, dimulai dari studi literatur yang bertujuan untuk memahami teori-teori dasar, penelitian terdahulu, serta standar-standar yang relevan dengan topik penelitian.

Setelah proses studi literatur, dilakukan pengambilan data yang meliputi pengumpulan informasi tentang beban yang bekerja pada objek penelitian, kombinasi beban yang mungkin terjadi, serta data spesifikasi material yang digunakan dalam desain dan konstruksi struktur. Penelitian ini menggunakan sumber data yang terdiri dari data primer dan data sekunder. Data primer berupa data yang diperoleh dari hasil pekerjaan penyelidikan tanah di lapangan sebagai sumber parameter tanah. Data sekunder merupakan data teknis yang terdiri

dari spesifikasi bahan dan material, peraturan dan standar yang berlaku serta literatur ilmiah dan publikasi terkait.

Tahap berikutnya adalah analisis data *input*. Dalam penelitian ini, data yang diolah meliputi tiga aspek utama, yaitu:

a. Beban

Data mengenai beban kerja yang bekerja pada struktur dianalisis berdasarkan *American Society of Civil Engineers* (ASCE 7-16) dan Standar Nasional Indonesia (SNI 1727:2020). Beban yang bekerja pada stuktur *cellar* meliputi seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Rekapitulasi pembebanan yang bekerja

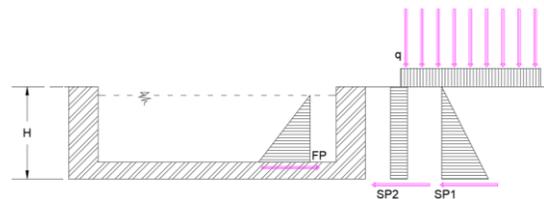
Notasi	Deskripsi	Keterangan
D	<i>Dead</i>	Beban mati
L	<i>Live</i>	Beban hidup
SP	<i>Soil Pressure</i>	Beban tekanan tanah
FP	<i>Fluid Pressure</i>	Beban tekanan air

Adapaun perhitungan beban yang bekerja pada struktur *cellar* didapatkan berdasarkan persamaan (1), yang kemudian digunakan sebagai input pada *software* STAAD.Pro.

Gaya tekanan tanah aktif yang diterapkan pada dinding *cellar* kemudian dapat dihitung menggunakan rumus berikut (Bowles,1996):

$$\sigma_a = K_a \times \gamma \times H \tag{1}$$

di mana σ_a merupakan tekanan tanah aktif (kN/m²), K_a merupakan koefisien tekanan tanah aktif, H merupakan kedalaman struktur (m) dan γ merupakan berat jenis tanah (kN/m³).



Gambar 1. Ilustrasi tekanan tanah pada dinding cellar

Di mana q merupakan beban merata *rig* (kN/m²), SP1 merupakan tekanan tanah (kN/m²), SP2 merupakan tekanan tanah akibat beban *rig* (kN/m²) dan FP merupakan tekanan air (kN/m²).

b. Kombinasi Beban

Kombinasi beban yang bekerja pada struktur dianalisis berdasarkan *American Society of Civil Engineers* (ASCE 7-16) dan Standar Nasional Indonesia (SNI 1727:2020). Dalam analisis struktur *cellar* ini, kombinasi beban yang digunakan mengikuti 2 pendekatan utama, yaitu kombinasi beban untuk desain kekuatan (LRFD) dan kombinasi beban untuk tegangan izin (ASD). Kombinasi beban untuk desain kekuatan

digunakan untuk memastikan bahwa struktur memiliki kapasitas yang cukup untuk menahan beban maksimum hingga mencapai kekuatan ultimit. Kombinasi beban desain tegangan izin digunakan agar tegangan yang dihasilkan dari kombinasi beban harus tetap berada di bawah tegangan yang diizinkan.

c. Spesifikasi Material

Data spesifikasi material yang digunakan dalam konstruksi dianalisis untuk menentukan kekuatan, karakteristik dan kesesuaian material dengan beban yang harus ditahan. Data spesifikasi yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Rekapitulasi spesifikasi struktur *cellar*

Spesifikasi	Nilai
Lebar <i>cellar</i>	3,2 m
Panjang <i>cellar</i>	3,2 m
Tinggi <i>cellar</i>	1,2 m
Tebal pelat dinding	300 mm
Tebal pelat lantai	200 mm
Mutu beton	K-250
Mutu baja	BJTS 420B

Data kondisi tanah juga dimasukkan ke dalam *software* STAAD.Pro, yaitu data *modulus subgrade reaction* yang dihitung berdasarkan persamaan (2). Nilai tersebut di-input sebagai konstanta pegas vertikal (*vertical spring constant*).

Modulus subgrade reaction (k_s) merupakan parameter penting dalam perancangan fondasi untuk menggambarkan interaksi antara tanah dan struktur di atasnya. Nilai *modulus subgrade reaction* ini sering digunakan sebagai *input* dalam analisis elemen hingga, seperti pada *software* STAAD.Pro, di mana nilai tersebut di-input sebagai konstanta pegas vertikal (*vertical spring constant*) untuk mensimulasikan respon elastis tanah terhadap beban vertikal yang diterima fondasi. Salah satu pendekatan untuk menghitung nilai *modulus subgrade reaction* adalah menggunakan rumus empiris (Bowles, 1996):

$$k_s = 40 \times FK \times q_a \quad (2)$$

di mana k_s merupakan *modulus subgrade reaction* (kN/m³), FK merupakan faktor keamanan dan q_a merupakan beban izin atau *allowable bearing pressure* tanah (kPa).

Nilai k_s ini kemudian digunakan sebagai konstanta pegas vertikal dalam *software* STAAD.Pro untuk mensimulasikan interaksi antara fondasi dan tanah. Pada model struktur di STAAD.Pro, tanah sering dimodelkan sebagai lapisan yang mendukung fondasi dengan karakteristik pegas elastis, di mana konstanta pegas vertikal mewakili daya dukung tanah per unit penurunan (*displacement*). *Input* ini penting untuk menghitung distribusi beban pada fondasi secara lebih

realistis, terutama dalam analisis fondasi *slab on grade* (STAAD.Pro User Manual, 2023).

Selanjutnya analisis hasil pemodelan dilakukan menggunakan aplikasi STAAD.Pro untuk mengevaluasi gaya, momen, deformasi dan tegangan yang dihasilkan setelah proses *running* aplikasi tersebut. Analisis stabilitas harus memenuhi persyaratan Standar Nasional Indonesia (SNI 8460:2017), dengan daya dukung izin fondasi dihitung melalui pembagian daya dukung ultimit dengan faktor keamanan minimal 3 untuk fondasi dangkal dan 2,5 untuk fondasi dalam. Desain struktur *cellar* juga harus memenuhi persyaratan lainnya, yaitu ketahanan terhadap geser (*sliding resistance*) harus minimal 1,5 kali lebih besar daripada gaya geser yang dihasilkan oleh beban rencana, ketahanan terhadap pengangkatan (*uplift resistance*) harus minimal 1,5 kali lebih besar daripada gaya angkat beban dan ketahanan terhadap guling (*overturning resistance*) harus minimal 2 kali lebih besar daripada momen guling.

Analisis penulangan untuk pelat lantai dan pelat dinding struktur *cellar* dilakukan berdasarkan hasil perhitungan momen ultimit yang diperoleh dari simulasi menggunakan *software* STAAD.Pro. Nilai momen ultimit (M_u) yang dihasilkan dari simulasi STAAD.Pro digunakan sebagai acuan utama dalam perhitungan kebutuhan penulangan. Nilai momen ultimit tersebut digunakan untuk menghitung kebutuhan luas penulangan (A_s) pada setiap elemen pelat sesuai dengan persamaan berikut.

$$A_s = \rho \times b \times d \quad (3)$$

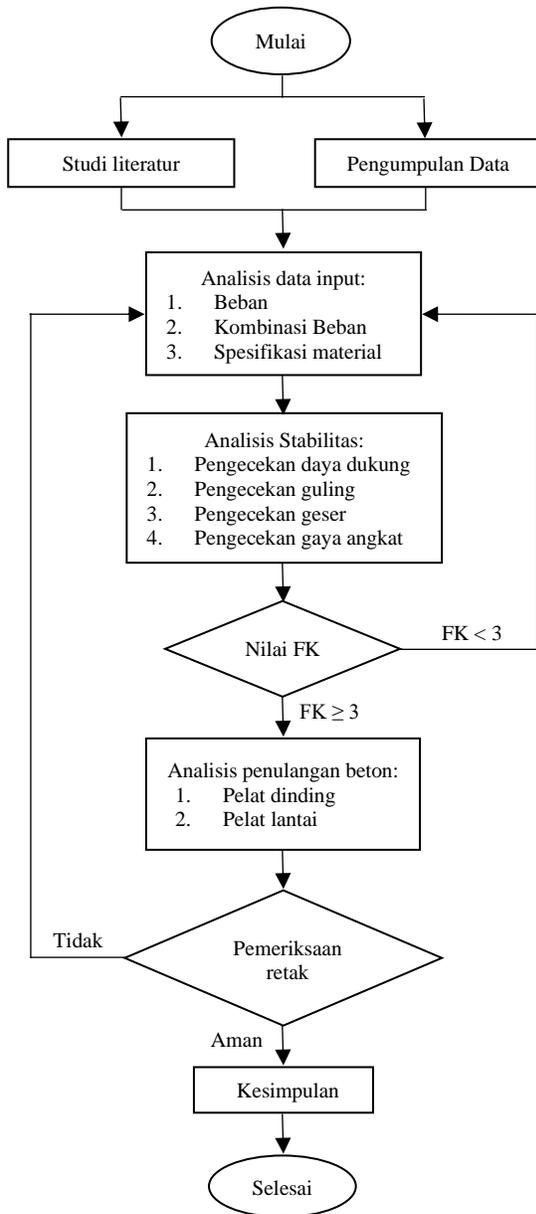
di mana A_s merupakan luas penulangan yang diperlukan (mm²), ρ merupakan rasio penulangan, b merupakan lebar penampang (mm) dan d merupakan tinggi efektif penampang (mm).

Pengecekan terhadap retak (*crack*) juga perlu diperhatikan. Berdasarkan *American Concrete Institute* (ACI 350M-06) (persamaan 10-4), nilai $f_{s,max}$ harus minimal 140 MPa untuk satu arah dan 165 MPa untuk dua arah, serta tidak boleh melebihi batas maksimum 250 MPa. Untuk area pemaparan lingkungan normal, $f_{s,max}$ dihitung berdasarkan persamaan berikut:

$$f_{s,max} = \frac{56000}{\beta \sqrt{s^2 + 4(50 + d_b/2)^2}} \quad (4)$$

di mana $f_{s,max}$ merupakan tegangan maksimum yang diizinkan dalam tulangan pada beban layanan (MPa), β merupakan faktor tinggi (1,2 untuk tebal > 400 mm, 1,35 untuk tebal < 400 mm), d_b merupakan diameter tulangan (mm) dan s merupakan jarak antar tulangan (mm).

Dalam penelitian ini, tahapan penelitian secara umum dilakukan seperti yang ditunjukkan pada diagram alir pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram alir penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

Parameter Tanah

Hasil uji laboratorium tanah dari dua (2) titik *bore hole* (BH) terdekat dengan lokasi struktur *cellar* dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Rekapitulasi data laboratorium tanah

BH	Kedalaman (m)	c (kN/m ²)	φ (°)	γ (kN/m ³)
BH-4	5-5,5	31	33,27	19,91
BH-4	11-11,5	29	33,79	18,04
BH-5	5-5,5	33	32,44	19,52
BH-5	11-11,5	35	32,94	19,61

Data laboratorium yang digunakan berdasarkan kedalaman terdangkal dan nilai kohesi yang paling rendah. Kapasitas daya dukung menggambarkan kemampuan tanah dalam menahan gaya geser untuk mencegah penurunan akibat beban, yaitu geseran yang dapat dihasilkan oleh tanah sepanjang bidang-bidang gesernya (Hardiyatmo, 2011). Berikut hasil analisa daya dukung berdasarkan persamaan Terzaghi, Meyerhor, Hansen dan Vesic ditunjukkan pada Tabel 4.

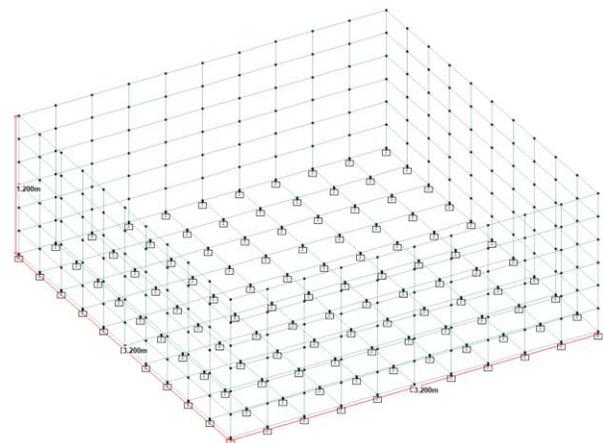
Tabel 4. Rekapitulasi daya dukung

Persamaan	qa (kPa)
Terzaghi	1214,96
Meyerhof	1511,23
Hansen	1318,62
Vesic	1414,97
Digunakan	1214,96

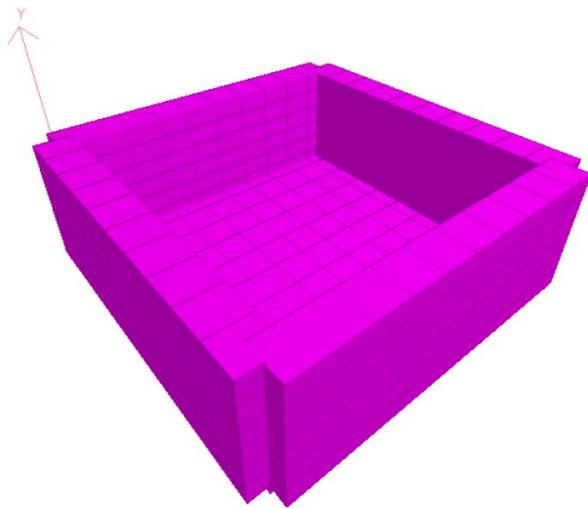
Berdasarkan hasil analisis dengan menggunakan rumus persamaan Terzaghi, Meyerhof, Hansen dan Vesic di atas, dapat disimpulkan bahwa nilai daya dukung struktur *cellar* yang diperoleh tidak menunjukkan perbedaan signifikan di antara setiap persamaan. Namun untuk mendapatkan hasil yang konservatif, analisis selanjutnya digunakan hasil nilai daya dukung yang paling rendah, yaitu hasil dari analisis daya dukung berdasarkan rumus persamaan Terzaghi sebesar 1214,96 kPa.

Pemodelan Struktur

Cellar pemboran dianalisis dengan melakukan pemodelan struktur menggunakan *software* STAAD.Pro, geomteri pemodelan struktur *cellar* pemboran dimodelkan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3 dan Gambar 4.

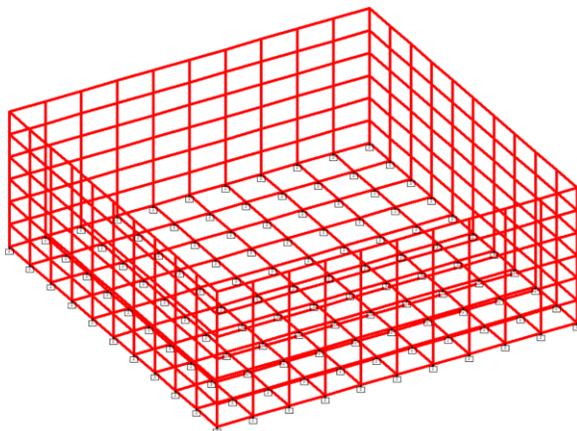


Gambar 3. Geometri pemodelan



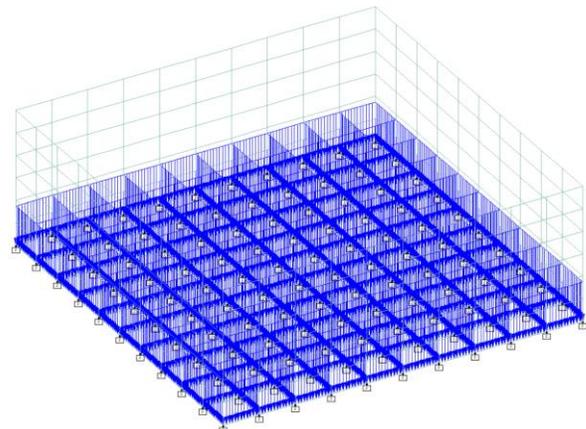
Gambar 4. Perspektif 3D pemodelan

Beban yang bekerja pada *cellar* pemboran mempertimbangkan hasil pembebanan (*support reaction*), beban mati, beban hidup, beban tekanan tanah, beban tambahan dan beban tekanan air. Beban mati sebagai beban sendiri stuktur dihitung secara otomatis langsung oleh STAAD.Pro sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Beban sendiri struktur

Beban hidup yang digunakan mengacu kepada *American Society of Civil Engineers* (ASCE 7-16) dan Standar Nasional Indonesia (SNI 1727: 2020) yaitu sebesar 5 kN/m². *Input* data beban hidup ditunjukkan pada Gambar 6.



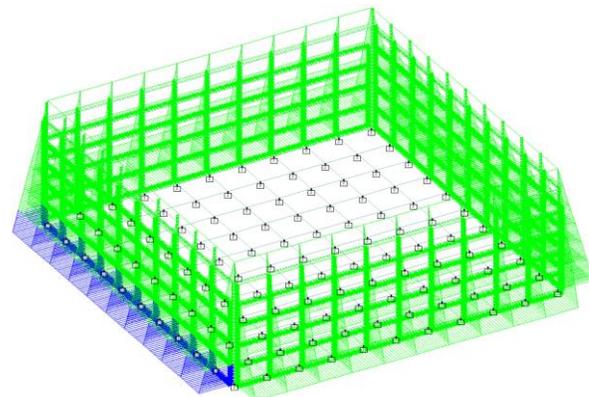
Gambar 6. Beban hidup

Rumus yang digunakan untuk menghitung koefisien tekanan tanah aktif (K_a) menurut Rankine adalah sebagai berikut (Bowles, 1996):

$$K_a = \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\phi}{2} \right) \quad (5)$$

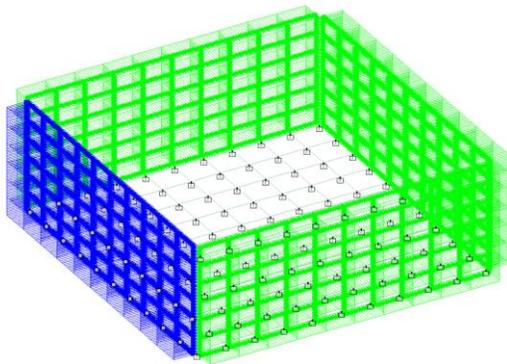
di mana K_a merupakan koefisien tekanan tanah aktif dan ϕ merupakan sudut geser dalam tanah. Berdasarkan persamaan (5), nilai koefisien tekanan tanah aktif diperoleh sebesar 0,285.

Teori Rankine memberikan pendekatan sederhana untuk menghitung koefisien tekanan tanah aktif pada kondisi dinding vertikal dan permukaan tanah yang datar, tanpa gesekan antara tanah dan dinding. Beban tekanan tanah didapatkan berdasarkan hasil perhitungan dari persamaan (1), *input* data beban tekanan tanah ditunjukkan pada Gambar 7.



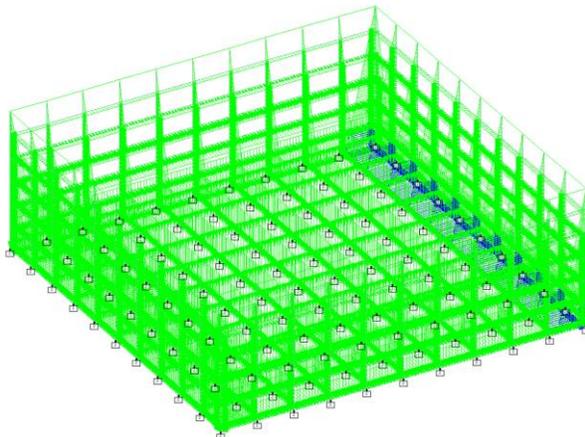
Gambar 7. Beban tekanan tanah

Beban tambahan yang terjadi merupakan beban dari berat total merata memanjang *rig/rig foot print* sebesar 602,81 kN/m². *Input* data beban tekanan tanah tambahan ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Beban tekanan tanah tambahan

Beban tekanan air yang terjadi diasumsikan pada saat kondisi area *cellar* terendam air secara penuh. *Input* data beban tekanan air ditunjukkan pada Gambar 9.



Gambar 9. Beban tekanan air

Kombinasi beban dalam penelitian ini menggunakan kombinasi beban sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Kombinasi beban

LC	Deskripsi
100	1D
101	1D+1L
102	1D+1SP
103	1D+1L+1SP
104	1D+1SP+1FP
105	1D+1L+1SP+1FP
106	1D+0.75L
200	1.4D
201	1.2D+1.6L
202	1.2D+1.6L+1.6SP
203	1.2D+1.6L+1.6SP+1.6FP
204	1.2D+1L
205	1.2D+1L+1SP

Analisis Desain

Hasil dari pemodelan pada STAAD.Pro berdasarkan kombinasi beban didapatkan nilai beban yang bekerja sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 6.

Tabel 6. Rekapitulasi *support reaction*

LC	Fx (kN)	Fy (kN)	Fz (kN)	Mx (kNm)	Mz (kNm)
100	-9.8E-06	156.8	-1E-05	0	0
101	-9.8E-06	207.0	3E-05	0	0
102	-6.3E-03	156.8	1E-05	0	0
103	-6.3E-03	207.0	2E-05	0	0
104	-6.3E-03	277.3	7E-15	0	0
105	-6.3E-03	327.5	3E-15	0	0
106	-9.8E-06	194.5	-1E-05	0	0

Berdasarkan *support reaction* yang terjadi pada pemodelan struktur *cellar* pemboran, maka dapat dilakukan pengecekan pada kapasitas daya dukung struktur *cellar* pemboran. Hasil analisa kapasitas daya dukung struktur *cellar* pemboran ditunjukkan pada Tabel 7.

Tabel 7. Hasil analisis daya dukung struktur

LC	q (kN/m ²)	FK
100	15.32	79,33 > 3
101	20.22	60,09 > 3
102	15.32	79,33 > 3
103	20.22	60,09 > 3
104	27.08	44,86 > 3
105	31.99	37,98 > 3
106	18.99	63,97 > 3

Dari hasil analisis di atas, dapat disimpulkan bahwa daya dukung struktur *cellar* pemboran yang dihasilkan memiliki kapasitas daya dukung yang besar dibandingkan dengan daya dukung tanahnya dan sudah melebihi nilai faktor keamanan (FK) lebih dari 3. Kemudian dilakukan pengecekan terhadap guling dan geser, sehingga didapatkan hasil dari analisis terhadap guling seperti yang ditunjukkan pada Tabel 8 dan analisis terhadap geser seperti yang ditunjukkan pada Tabel 9.

Tabel 8. Hasil analisis terhadap guling

LC	SF _x	SF _z
100	2.13E+07	2.13E+07
101	2.81E+07	9.38E+06
102	3.34E+04	2.13E+07
103	4.38E+04	1.41E+07
104	5.91E+04	5.10E+16
105	6.93E+04	1.65E+17
106	2.64E+07	2.64E+07

Tabel 9. Hasil analisis terhadap geser

LC	H (kN)	H _r (kN)	FK
100	1.4E-05	62.73	4.52E+06 > 2

101	3.1E-05	82.81	2.67E+06	> 2
102	6.3E-03	62.73	1.00E+04	> 2
103	6.3E-03	82.81	1.32E+04	> 2
104	6.3E-03	110.93	1.77E+04	> 2
105	6.3E-03	131.02	2.08E+04	> 2
106	1.4E-05	77.79	5.61E+06	> 2

Berdasarkan hasil analisis di atas, dapat diketahui bahwa nilai faktor keamanan (FK) yang terjadi terhadap guling dan geser pada struktur *cellar* pemboran adalah lebih dari 2. Sedangkan untuk nilai terhadap gaya angkat struktur dianggap tidak terjadi dikarenakan berdasarkan hasil uji investigasi tanah, nilai muka air tanah tidak ditemukan sampai pada kedalaman lebih dari 30 meter.

Desain penulangan beton dilakukan analisis berdasarkan nilai *moment ultimate* yang terjadi pada desain struktur *cellar* pemboran sebagaimana tercantum pada Tabel 10.

Tabel 10. Rekapitulasi nilai *moment ultimate*

Pelat lantai		Pelat dinding	
$M_{ul\ x}$ (kNm)	$M_{ul\ y}$ (kNm)	$M_{ul\ x}$ (kNm)	$M_{ul\ y}$ (kNm)
24,36	24,62	26,62	131,148

Berdasarkan hasil analisis dengan menggunakan *software* STAAD.Pro, diketahui bahwa nilai *moment ultimate* pada area pelat lantai cenderung hampir sama antara arah x dan arah y. Sedangkan untuk area pelat dinding, terdapat perbedaan yang cukup signifikan, dimana *moment ultimate* arah y memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan dengan arah x.

Perencanaan penulangan beton mengacu pada *American Concrete Institute* (ACI 318-14) dan Standar Nasional Indonesia (SNI 2847-2019). Dari hasil analisis perhitungan, tulangan pelat lantai dengan tebal pelat sebesar 200 mm direncanakan menggunakan tulangan D13-140 mm dengan luas tulangan rencana 948,08 mm², yang sudah melebihi luas tulangan perlu sebesar 606,39 mm². Sedangkan untuk pelat dinding dengan tebal pelat sebesar 300 mm direncanakan menggunakan tulangan D19-110 mm dengan luas tulangan rencana sebesar 2577,5 mm², yang sudah melebihi luas tulangan perlu sebesar 1838,03 mm². Rekapitulasi desain penulangan pelat lantai dan pelat dinding *cellar* pemboran disajikan pada Tabel 11 dan rekapitulasi rasio tulangan pada Tabel 12.

Tabel 11. Rekapitulasi desain pelat lantai & dinding
Pelat Lantai 200 mm

Tulangan	As req (mm ²)	As prov (mm ²)	fs max (Mpa)	fs (Mpa)	Ket.
D13-120	606,39	1106,10	251,6	184,2	Ok
D13-130	606,39	1021,01	240,8	199,6	Ok
D13-140	606,39	948,08	230,5	214,9	Ok

D13-150	606,39	884,88	220,8	230,3	No
Pelat Dinding 300 mm					
Tulangan	As req (mm ²)	As prov (mm ²)	fs max (Mpa)	fs (Mpa)	Ket.
D13-100	1838,0	1327,3	274,9	443,5	No
D16-100	1838,0	2010,6	270,8	294,8	No
D19-100	1838,0	2835,3	266,8	210,5	Ok
D19-110	1838,0	2577,5	255,9	231,5	Ok
D19-120	1838,0	2362,7	245,4	252,6	No

Tabel 12. Rekapitulasi rasio tulangan

Pelat Lantai 200 mm		
Tulangan	ρ_{max}	ρ_{aktual}
D13-120	1,98%	0,93%
D13-130	1,98%	0,86%
D13-140	1,98%	0,80%
D13-150	1,98%	0,75%
Pelat Dinding 300 mm		
Tulangan	ρ_{max}	ρ_{aktual}
D13-100	1,98%	0,61%
D16-100	1,98%	0,93%
D19-100	1,98%	1,32%
D19-110	1,98%	1,20%
D19-120	1,98%	1,10%

KESIMPULAN

Berdasarkan perhitungan analisis yang telah dilakukan, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Struktur *cellar* pemboran dapat menahan beban-beban yang terjadi berdasarkan nilai faktor keamanan (FK) yang didapatkan telah melebihi dari persyaratan yang ditentukan pada analisis daya dukung, guling dan geser.
2. Desain struktur *cellar* menggunakan pelat lantai dengan tebal 200 mm dan tulangan D13-140, serta pelat dinding dengan tebal 300 mm dan tulangan D19-110.

Penelitian lanjutan dapat dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh suhu tinggi terhadap kinerja struktur *cellar*, mengingat kondisi operasional panas bumi yang ekstrem. Simulasi termal dan eksperimen material dapat memberikan wawasan lebih mendalam mengenai efektivitas desain beton bertulang dalam menghadapi paparan suhu tinggi serta dampaknya terhadap umur panjang struktur.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih disampaikan kepada PT PLN Enjiniring atas kesempatan dan dukungannya dalam pelaksanaan Program Profesi Insinyur di Fakultas Teknik Universitas Diponegoro.

DAFTAR PUSTAKA

American Concrete Institute. (2006). *Code Requirements for Environmental Engineering Concrete Structures and Commentary* (ACI 350-06).

- Farmington Hills, MI: American Concrete Institute.
- American Concrete Institute. (2014). *Building Code Requirements for Structural Concrete* (ACI 318-14). Farmington Hills, MI: American Concrete Institute.
- American Society of Civil Engineers. (2016). *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures* (ASCE/SEI 7-16). Reston, VA: American Society of Civil Engineers.
- Armstead, H. C. H. (1983). *Geothermal Energy: Its Past, Present and Future Contributions to the Energy Needs of Man*. London, New York: E and F.N. Spon.
- Axelsson, G. (2013). *Geothermal Well Testing. Short Course V on Conceptual Modelling of Geothermal Systems*. Santa Tecla, El Salvador: United Nations University - Geothermal Training Programme and LaGeo.
- Badan Standardisasi Nasional. (2017). *Persyaratan Perancangan Geoteknik (SNI 8460:2017)*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. (2019). *Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung dan Penjelasan (SNI 2847:2019)*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. (2020). *Beban Desain Minimum dan Kriteria Terkait untuk Bangunan Gedung dan Struktur Lain (SNI 1727:2020)*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. (2024). *Pengeboran Sumur Panas Bumi (SNI 9247:2024)*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Batubara, M. (2018). *Pengembangan Panas Bumi: Sebagai Energi Kearifan Lokal di Indonesia*. Yayasan Pengkajian Sumber Daya Indonesia (YPSI/IRESS).
- Bentley Systems, Inc. (2023). *STAAD.Pro User Manual*. PA: Bentley Systems, Inc.
- Bowles, J. E. (1996). *Foundation Analysis and Design* (5th ed.). The McGraw-Hill Companies, Inc.
- Das, B. M. (2016). *Principles of Foundation Engineering* (8th ed.). Cengage Learning.
- Finger, J & Blankenship, D. (2010). *Handbook of Best Practices for Geothermal Drilling*. Sandia Report.
- Hardiyatmo, H. C. (2011). *Analisa dan Perancangan Fondasi Bagian I (p. 103)*. Gajah Mada University Press.
- Jumaidi, Habir. H., Suratmi. (2019). Perancangan Struktur Dinding Penahan Tanah pada Pekerjaan Penanganan Longsoran Jalan Batu Cermin Samarinda. *Jurnal Penelitian dan Kajian Bidang Teknik Sipil. Cantilever*, 10(2), 85-89.
- Saptadji, N. M. (n.d.). *Teknik Panasbumi*. Unpublished manuscript.
- Teng, S., & Chandra, J. (2016). Cyclic Shear Behavior of High Strength Concrete Structural Walls. *ACI Structural Journal*, 113(6), 1335-1345.
- Wagh, K. K., Akshay, K. G., & Deepak, N. G. (2021). Design and Analysis of Underground Water Tank by using Staad Pro. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, (8). 4527-4532.