Presisi: Jurnal Teknologi Rekayasa dan Inovasi Teknik
Volume: 1, Nomor: 3, (2026), September: 168 - 190
Website: https://ejournal.ojs-lppm.com/index.php/Presisi/article/view/470
E-ISSN: 3164-4694

ANALISIS STABILITAS LERENG TUBUH TANGGUL SUNGAI WULAN DI RUAS MIJEN-DEMAK

Alicia Candra Rahma Aulia[1], Rifqi Brilyant Arief[2], Lisa Fitriyana[3]
Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Islam Sultan Agung, Semarang, Indonesia [1,2,3]
Corresponding Author: *rhma3439@gmail.com[1*]*

Info Artikel
Received: *26 Agustus 2026*
Revised : *10 September 2026*
Accepted: *19 September 2026*
Published: *30 September 2026*

Keywords: *safety factor, embankment, Plaxis 2D, slope stability, river stone, seepage.*

Abstract
The Wulan River embankment along the Mijen-Demak section, Demak Regency, plays an important role in protecting settlements, infrastructure, and agricultural land from river overflow. Throughout 2024, this embankment was reported to have breached several times due to high rainfall and increased river discharge, raising concerns about the stability of the embankment body's slope, particularly under flood conditions. A rise in river water level has the potential to increase pore water pressure and reduce soil shear strength, which can trigger slope failure as well as seepage leading to piping erosion. This study aims to calculate the safety factor value of the embankment body's slope at various construction stages and water level conditions, evaluate the effect of river stone reinforcement on slope stability, and analyze the seepage conditions within the embankment body, including under rapid drawdown conditions. The analysis was carried out using the finite element method with the assistance of Plaxis 2D software, based on secondary data in the form of soil investigation results, soil mechanics laboratory tests, and embankment cross-section data obtained from PT ADHI-SMS as the implementing contractor. Modeling was performed in stages, starting from the initial phase, the excavation stage, the embankment and reinforcement stage under normal water level, the flood water level condition, up to the rapid drawdown condition or the rapid decrease of flood water level, with the safety factor value obtained through the phi-c reduction feature. The analysis results show that the embankment body's slope remained stable at all stages examined. The safety factor value at the initial phase was 6.403, decreasing to 4.251 after the embankment and reinforcement stage under normal water level, then to 3.096 under flood water level conditions, and reaching its lowest value of 1.587 under rapid drawdown conditions. Although it decreased along with the increasing construction load and rising water level, all these values remained above the minimum requirement of SF ≥ 1.5 according to SNI 8460:2017, so the embankment slope is categorized as safe against the potential for slope failure. River stone reinforcement on the outer side of the embankment also had an effect on the safety factor value and slope deformation compared to the unreinforced condition. On the other hand, the seepage analysis results show that the seepage discharge increased along with the rising water level, with the ground water head value ranging from -21.39 m to 12.85 m, so the potential for piping erosion still needs to be watched for in the long term.

Abstrak
Tanggul Sungai Wulan di ruas Mijen-Demak, Kabupaten Demak,

Kata Kunci*: faktor keamanan,*

tanggul, Plaxis 2D, stabilitas lereng, batu kali, rembesan.

berperan penting dalam melindungi permukiman, infrastruktur, dan lahan pertanian dari luapan air sungai. Sepanjang tahun 2024, tanggul ini beberapa kali dilaporkan jebol akibat tingginya curah hujan dan meningkatnya debit aliran sungai, sehingga menimbulkan kekhawatiran terhadap stabilitas lereng tubuh tanggul, terutama pada kondisi banjir. Penelitian ini bertujuan untuk menghitung nilai faktor keamanan (*safety factor*) lereng tubuh tanggul pada berbagai tahapan konstruksi dan kondisi muka air, mengevaluasi pengaruh perkuatan batu kali terhadap stabilitas lereng, serta menganalisis kondisi rembesan pada tubuh tanggul termasuk pada kondisi *rapid drawdown*. Analisis dilakukan menggunakan metode elemen hingga (*finite element method*) dengan bantuan perangkat lunak Plaxis 2D, berdasarkan data sekunder berupa hasil penyelidikan tanah, uji laboratorium mekanika tanah, dan data potongan melintang tanggul yang diperoleh dari PT ADHI-SMS selaku kontraktor pelaksana. Pemodelan dilakukan secara bertahap mulai dari kondisi awal (*initial phase*), tahap galian, tahap timbunan dan perkuatan pada muka air normal, kondisi muka air banjir (MAB), hingga kondisi *rapid drawdown* atau penurunan muka air banjir secara cepat, dengan nilai faktor keamanan diperoleh melalui fitur *phi-c reduction.* Hasil analisis menunjukkan bahwa lereng tubuh tanggul berada dalam kondisi stabil pada seluruh tahapan yang ditinjau. Nilai faktor keamanan pada kondisi *initial phase* sebesar 6,403, menurun menjadi 4,251 setelah tahapan timbunan dan perkuatan pada muka air normal, kemudian menjadi 3,096 pada kondisi muka air banjir, dan mencapai nilai terendah sebesar 1,587 pada kondisi *rapid drawdown*. Meskipun mengalami penurunan seiring bertambahnya beban konstruksi dan kenaikan muka air, seluruh nilai tersebut masih berada di atas syarat minimum SF ≥ 1,5 sesuai SNI 8460:2017, sehingga lereng tanggul dikategorikan aman terhadap potensi kelongsoran. Perkuatan batu kali pada sisi luar tanggul turut memberikan pengaruh terhadap nilai faktor keamanan dan deformasi lereng dibandingkan kondisi tanpa perkuatan. Di sisi lain, hasil analisis rembesan menunjukkan debit rembesan yang meningkat seiring naiknya muka air, dengan nilai *ground water head* berkisar antara -21,39 m hingga 12,85 m, sehingga potensi erosi buluh (*piping*) tetap perlu diwaspadai dalam jangka panjang.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License.
Publisher: Lembaga Penerbit Penelitian Multidisipliner

PENDAHULUAN

Sungai Wulan merupakan salah satu sungai utama di Kabupaten Demak yang memiliki peran penting dalam sistem pengendalian banjir di wilayah pesisir Jawa Tengah. Keberadaan tanggul di sepanjang sungai ini menjadi elemen penting untuk melindungi kawasan permukiman, infrastruktur, serta lahan pertanian di sekitarnya dari limpasan air sungai. Kondisi tanggul Sungai Wulan di lokasi penelitian ditunjukkan pada Gambar 1 berdasarkan dokumentasi dari PT ADHI-SMS.



Gambar 1. *Kondisi tanggul Sungai Wulan di ruas Mijen-Demak (Sumber: PT ADHI-SMS, 2025)*

Berdasarkan laporan dari Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB), pada awal tahun 2024 terjadi banjir di Demak akibat jebolnya tanggul Sungai Wulan yang dipicu oleh tingginya curah hujan dan meningkatnya debit aliran sungai (BNPB, 2024). Kejadian ini terjadi lebih dari satu kali. Pada bulan Februari 2024, tanggul Sungai Wulan dilaporkan jebol dan menyebabkan banjir yang cukup luas. Selanjutnya, pada pertengahan Maret 2024 terjadi kembali kerusakan tanggul setelah hujan dengan intensitas tinggi mengguyur wilayah Jawa Tengah (Detik, 2024). Laporan dari Detik menyebutkan bahwa kejadian tersebut mengakibatkan terganggunya aktivitas masyarakat serta lumpuhnya jalur transportasi di kawasan tersebut (Detik, 2024).

Kejadian jebolnya tanggul yang terjadi lebih dari satu kali menunjukkan adanya tekanan hidraulik yang cukup besar pada struktur tanggul, terutama pada saat kondisi muka air sungai tinggi. Secara geoteknik, kondisi ini dapat menyebabkan tanah pada tubuh tanggul menjadi jenuh, sehingga kuat geser tanah menurun dan tekanan air pori meningkat. Selain itu, kenaikan muka air juga dapat menyebabkan terjadinya rembesan air ke dalam tubuh tanggul. Kondisi tersebut berpotensi menimbulkan ketidakstabilan lereng yang dapat berujung pada kegagalan struktur tanggul.

Berdasarkan permasalahan tersebut, analisis stabilitas lereng tubuh tanggul perlu dilakukan guna mengevaluasi tingkat keamanan struktur tanggul Sungai Wulan, khususnya pada kondisi kritis saat banjir. Analisis ini dilakukan dengan memperhitungkan parameter geoteknik tanah serta pengaruh kenaikan muka air sungai terhadap stabilitas lereng tanggul, termasuk peningkatan tekanan air pori akibat rembesan.

Selain itu, penelitian ini juga menganalisis pengaruh sistem perkuatan pada tanggul, seperti geotextile, cerucuk bambu, batu kali, atau parapet, untuk mengetahui pengaruhnya terhadap peningkatan stabilitas lereng. Dengan demikian, analisis dilakukan pada kondisi tanpa perkuatan dan

dengan perkuatan guna mengevaluasi efektivitas perkuatan yang digunakan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis stabilitas lereng tubuh tanggul Sungai Wulan di ruas Mijen–Demak menggunakan metode numerik pada kondisi banjir. Hasil analisis diharapkan dapat memberikan gambaran mengenai tingkat keamanan lereng tanggul, serta menilai efektivitas perkuatan dalam meningkatkan stabilitas lereng dan mengurangi potensi kegagalan.

METODE PENELITIAN

Lokasi Penelitian

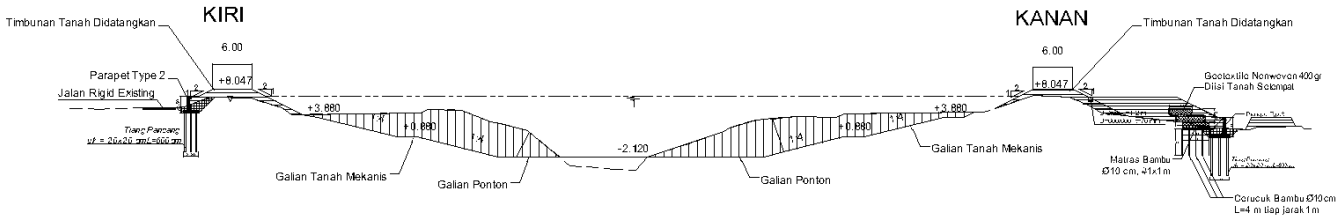
Penelitian ini dilakukan pada tubuh tanggul Sungai Wulan yang terletak di ruas Mijen-Demak. Lokasi penelitian berada di Kecamatan Mijen, Kabupaten Demak, Provinsi Jawa Tengah. Sungai Wulan merupakan salah satu sungai penting yang mengalir melintasi wilayah Kabupaten Demak dan bermuara di Laut Jawa. Lokasi penelitian dipilih karena ruas tanggul di Mijen-Demak memiliki karakteristik geoteknik yang perlu dianalisis stabilitasnya, terutama mengingat fungsi tanggul sebagai pengendali banjir dan pelindung permukiman, infrastruktur, serta lahan pertanian di sekitarnya. Peta lokasi penelitian ditunjukkan pada Gambar 2 berikut.



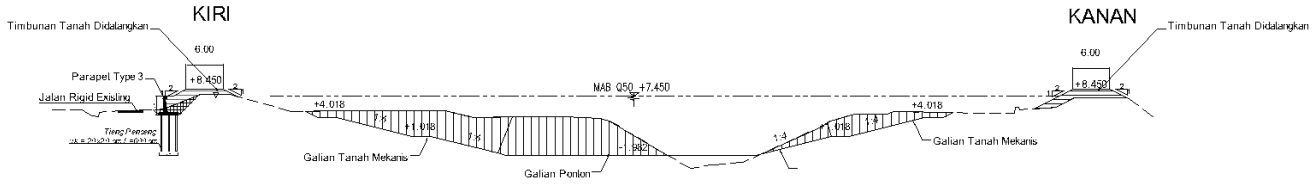
Gambar 2. *Peta lokasi penelitian tanggul Sungai Wulan di ruas Mijen-Demak (Sumber: Google Earth, 2025)*

Pengumpulan Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data sekunder yang diperoleh dari PT ADHI-SMS selaku kontraktor pelaksana pembangunan tanggul Sungai Wulan di ruas Mijen-Demak. Data tersebut mencakup data penyelidikan tanah, hasil uji laboratorium mekanika tanah, dan data potongan sungai yang ditunjukkan pada Gambar 3 dan 4.



Gambar 3. *Penampang tanggul dengan perkuatan*
(Sumber: PT ADHI-SMS, 2025)



Gambar 4. *Penampang tanggul tanpa perkuatan*
(Sumber: PT ADHI-SMS, 2025)

Variabel Penelitian

Variabel dalam penelitian ini disusun untuk memberikan fokus dan kejelasan terhadap aspek-aspek yang dianalisis dalam evaluasi stabilitas lereng. Variabel yang digunakan terdiri atas variabel bebas dan variabel terikat. Adapun variabel tersebut adalah sebagai berikut:

a. Variabel bebas: Parameter geoteknik tanah dari hasil uji laboratorium, geometri tanggul, dan kondisi muka air.
b. Variabel terikat: Faktor keamanan (FK) lereng tanggul dan lokasi bidang gelincir kritis.

Peralatan Penelitian

Peralatan yang digunakan dalam tugas akhir ini dibagi menjadi tiga kategori yaitu peralatan dasar, perangkat lunak pengolahan data, dan media penulisan serta penyajian.

1. Peralatan Dasar

Peralatan dasar yang digunakan dalam penelitian ini mencakup alat tulis seperti pulpen, pensil, dan penggaris untuk keperluan sketsa dan pencatatan data.

2. Perangkat Lunak Pengolahan Data

Perangkat lunak (*software*) yang digunakan untuk analisis dan pengolahan data dalam penelitian ini adalah:

a. Plaxis 2D: Plaxis 2D merupakan *software* geoteknik berbasis metode elemen hingga yang digunakan untuk analisis stabilitas lereng dan deformasi struktur tanggul. Penggunaan *software* ini memungkinkan pemodelan perilaku tanah secara akurat sesuai dengan kondisi lapangan yang

sebenarnya.

b. AutoCAD: Untuk pembuatan gambar teknis, potongan melintang tanggul, dan visualisasi geometri.
c. *Google Earth*: Untuk identifikasi lokasi penelitian.

3. Media Penulisan dan Penyajian

Media penulisan dan penyajian hasil penelitian menggunakan Word untuk penyusunan laporan tugas akhir sesuai format yang ditetapkan. Sementara itu untuk pembuatan bahan presentasi menggunakan PowerPoint.

Langkah Penelitian

Langkah penelitian ini disusun secara berurutan dimulai dari pengumpulan data, pengolahan data, analisis menggunakan metode numerik Plaxis 2D, hingga interpretasi hasil dan penarikan kesimpulan.

Pembuatan Model Elemen Hingga

Tahap awal pemodelan adalah membuat geometri tanggul berdasarkan data desain. *Input* parameter material tanah dilakukan berdasarkan hasil pengujian laboratorium. *Output* yang dihasilkan dari pemodelan meliputi faktor keamanan, distribusi tegangan, rembesan, dan bidang gelincir kritis yang terbentuk pada kondisi keruntuhan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

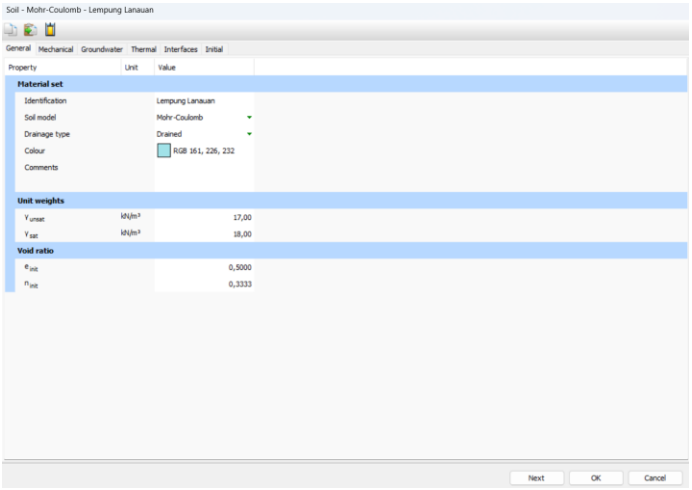
Parameter

Langkah pertama analisis dimulai dengan pembuatan struktur lapisan tanah pada Plaxis 2D berdasarkan data N-SPT yang didapatkan dari lokasi proyek konstruksi Sungai Wulan. Berdasarkan data N-SPT tersebut, diidentifikasikan kedalaman tanah pada material lempung pasiran dengan kedalaman 2,6 m, sedangkan material lempung lanauan memiliki kedalaman 27,4 m. Setelah diidentifikasikan data N-SPT dan kedalaman tanah, selanjutnya *input* data parameter yang nanti akan dimasukkan ke masing-masing lapisan tanah, timbunan tanah, maupun struktur perkuatan.

Tabel 1. *Parameter Tanah*

Parameter	Timbunan	Perkuatan	Lempung Pasiran	Lempung Lanauan
Depth (m)	-	-	2,6	27,4
Material	Mohr-	Mohr-	Mohr-	Mohr-

Model	Coulomb (Drained)	Coulomb (Non porous)	Coulomb (Drained)	Coulomb (Drained)
γ (kN/m3)	18,00	20,00	20,32	17,00
γsat (kN/m3)	18,00	20,00	20,32	18,00
E(kN/m2)	10,000	50,000	8,000	11,500
Poisson's ratio	-	-	-	-
Cohesion C	100,0	150,0	40,00	100,0
Friction angle (Ø)	-	-	-	-
Compression index Cc	-	-	-	-
Swelling index Cs	-	-	-	-
Permeability Kx (m/day)	0,000001	0,000	0,000001	0,000001
Permeability Ky (m/day)	0,000001	0,000	0,000001	0,000001

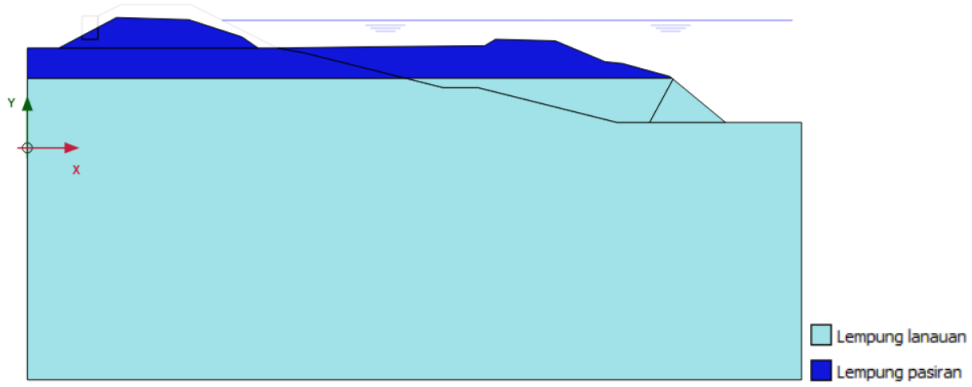


Gambar 5. *Input data parameter*
(Sumber: Dokumentasi Penulis)

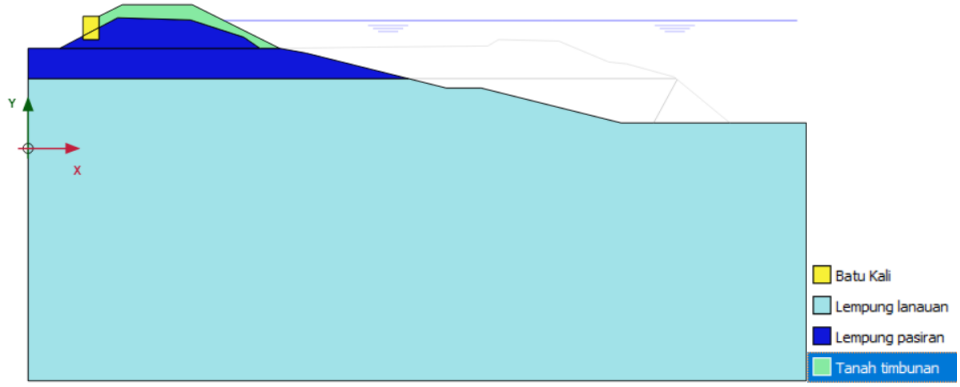
Setelah *input* data parameter, kemudian dimasukkan ke dalam masing-masing lapisan tanah sesuai kondisi *existing* yang dianalisa. Pada analisis kali ini material yang di-*input* sesuai dengan data parameter uji tanah yang dilakukan pada proyek normalisasi Sungai Wulan.

Pembuatan Geometri *Existing* dan Perkuatan

Analisis stabilitas lereng tubuh tanggul ini menggunakan kondisi *existing* pada penampang tanggul STA P.493+25 di bagian sisi kiri. Kondisi MAB (Muka Air Banjir) pada *existing* ini memiliki elevasi +7,047. Berikut merupakan geometri *existing,* perkuatan tanggul, dan jenis-jenis lapisan tanah.



Gambar 6. *Geometri tanggul existing*
(Sumber: Dokumentasi Penulis)



Gambar 7. *Geometri tanggul dengan perkuatan*
(Sumber: Dokumentasi Penulis)

Pemodelan Plaxis 2D

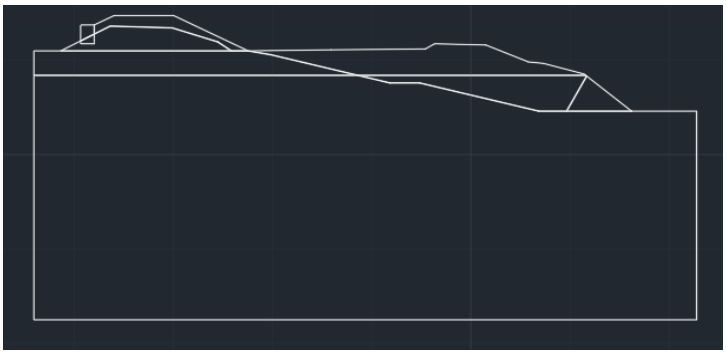
Setelah seluruh data yang diperlukan terkumpul, langkah selanjutnya adalah melakukan proses pengolahan dan pemodelan menggunakan Plaxis 2D. Tahapan pemodelan dan analisis yang dilakukan disajikan sebagai berikut.

Secara umum, alur pemodelan pada PLAXIS 2D dimulai dari pembuatan geometri lereng berdasarkan data topografi dan hasil penyelidikan tanah, dilanjutkan dengan input parameter material tanah pada setiap lapisan, penentuan kondisi muka air dan aliran air tanah, pembuatan mesh elemen hingga, hingga akhirnya dilakukan tahapan perhitungan bertahap (*staged construction*) untuk

mengevaluasi kondisi stabilitas lereng pada setiap fase yang disimulasikan.

1. Model CAD

Guna mempermudah tahap pemodelan pada Plaxis, geometri awal digambar terlebih dahulu menggunakan perangkat lunak CAD. Hasil pemodelan geometri beserta susunan lapisan tanah ditampilkan pada Gambar 8. File CAD tersebut selanjutnya disimpan dalam format dxf sehingga dapat diimpor langsung ke Plaxis untuk proses pemodelan tahap berikutnya.

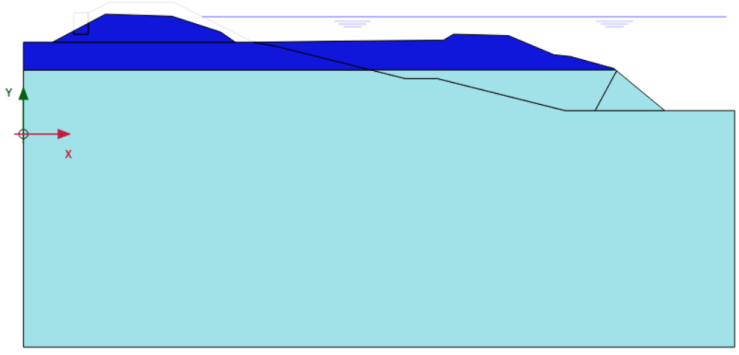


Gambar 8. *CAD model*
(Sumber: Dokumentasi Penulis)

2. Pemodelan Geometri

Pemodelan geometri merupakan tahap awal dan paling mendasar dalam analisis stabilitas lereng menggunakan PLAXIS 2D, yaitu proses menggambarkan bentuk fisik lereng beserta lapisan-lapisan tanah penyusunnya ke dalam model dua dimensi yang merepresentasikan kondisi lapangan sesungguhnya.

File dxf yang dibuat kemudian diimpor ke Plaxis sebagai geometri dasar. Selanjutnya geometri tersebut sebagai acuan dalam pemberian properti parameter tanah pada setiap lapisan.

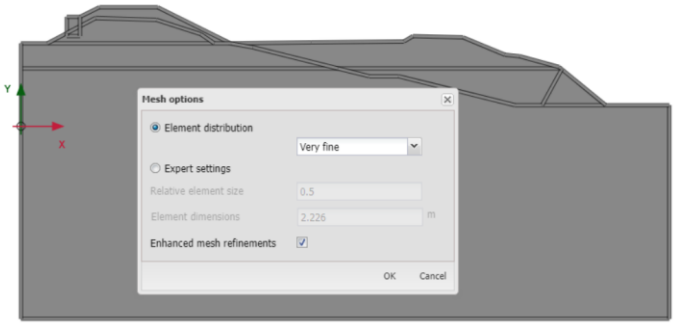


Gambar 9. *Geometri Plaxis 2D*
(Sumber: Dokumentasi Penulis)

3. Meshing

Pada tahap *meshing*, sebelum masuk kedalam tahap ini pastikan data parameter yang sudah dibuat sudah dimasukkan kedalam masing masing tanah. Proses *meshing analysis* ini digunakan tipe

mesh very fine. Pemilihan *mesh* yang lebih kecil bertujuan untuk menghasilkan ketelitian perhitungan yang lebih tinggi.

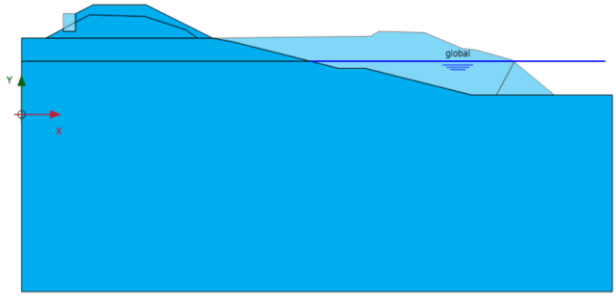


Gambar 10. *Meshing*
(Sumber: Dokumentasi Penulis)

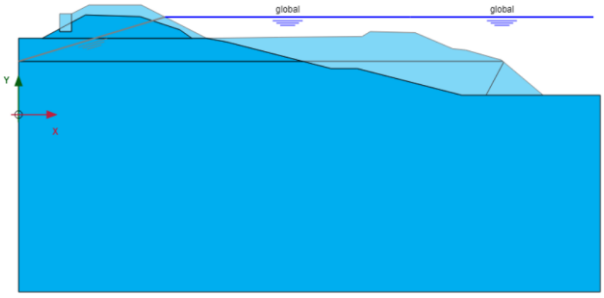
4. Input Flow Conditions

Flow conditions adalah tahap pemodelan yang berkaitan dengan kondisi aliran air dan tekanan air pori (*pore water pressure*) di dalam tanah, yang sangat berpengaruh terhadap perhitungan stabilitas lereng karena keberadaan air dapat mengurangi kekuatan geser tanah dan menambah gaya pendorong pada lereng.

Dalam analisis ini digunakan kondisi dua Muka Air dalam permodelan. Simulasi permodelan ini dilakukan untuk merepresentasikan kondisi lereng tanggul terhadap rembesan.



Gambar 11. *Kondisi Muka Air Normal*
(Sumber: Dokumentasi Penulis)



Gambar 12. *Kondisi MAB (Muka Air Banjir)*
(Sumber: Dokumentasi Penulis)

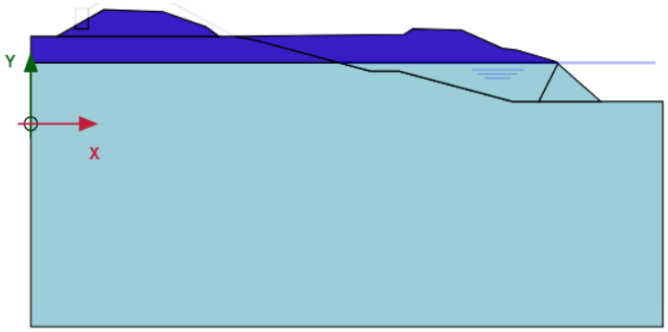
Gambar diatas melampirkan hasil masing masing di mana posisi letak antara Muka Air Normal dan Muka Air Banjir, dilakukan 2 pemodelan muka air untuk merepresentasikan hasil hitungan yang lebih detail pada kondisi normal maupun banjir.

Stage Konstruksi

Setelah *input* semua parameter tahap terakhir yaitu stage konstruksi yang menggambarkan proses konstruksi dilapangan. Setelah mengatur stage konstruksi dilakukan proses running.

1. Intial Phase

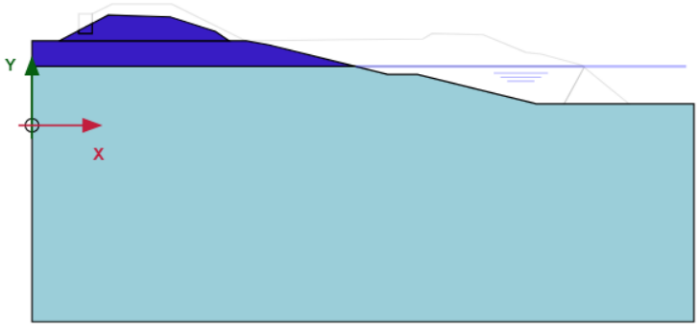
Proses konstruksi dimodelkan secara bertahap untuk merepresentasikan kondisi pelaksanaan di lapangan. Analisis dimulai dengan kondisi *intial phase* atau kondisi tanah asli. Kondisi awal ditunjukkan pada Gambar 13 di bawah ini.



Gambar 13. *Kondisi Awal (intial phase)*
(Sumber: Dokumentasi Penulis)

2. Galian

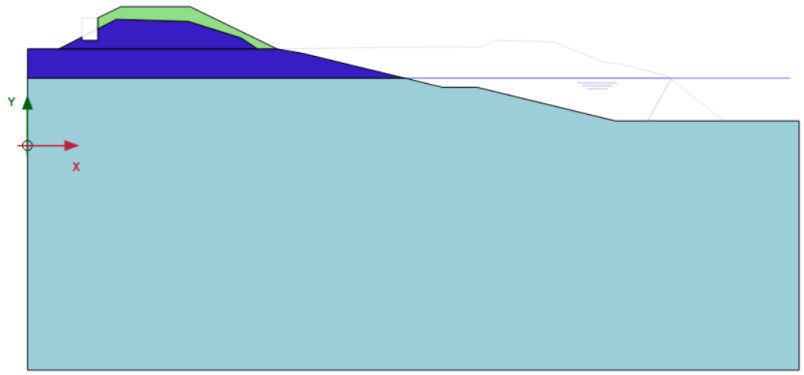
Setelah memodelkan kondisi awal pada PLAXIS tahap selanjutnya adalah konstruksi galian yang di mana tahap konstruksi ini terdapat 2 galian yang berupa galian mekanis dan galian ponton, serta adanya titik galian untuk perkuatan. kondisi ini akan mepresentasikan bagaimana kondisi *existing* setelah dilakukan galian. Konstruksi geometri galian akan ditampilkan pada Gambar 14 di bawah ini.



Gambar 14. *Geometri Pasca Galian*
(Sumber: Dokumentasi Penulis)

3. Timbunan

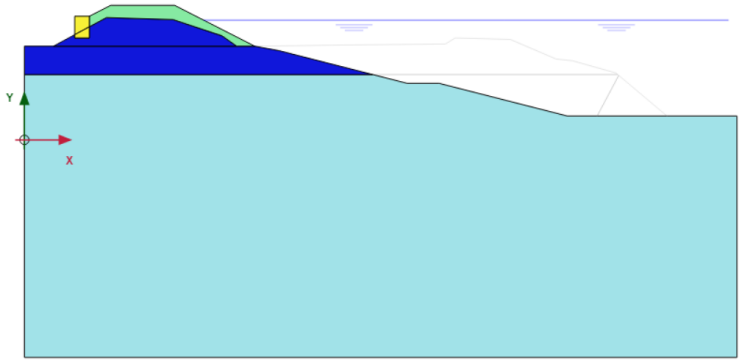
Setelah tahap konstruksi galian selesai dimodelkan, tahap selanjutnya adalah konstruksi timbunan yang di mana pada tahap ini dilakukan penambahan material timbunan di atas kondisi existing untuk membentuk geometri tanggul/timbunan sesuai desain rencana. Kondisi ini akan mempresentasikan bagaimana kondisi *existing* setelah dilakukan penimbunan. Konstruksi geometri timbunan akan ditampilkan pada Gambar 15 di bawah ini.



Gambar 15. *Geometri Timbunan*
(Sumber: Dokumentasi Penulis)

4. Timbunan dan Perkuatan

Setelah tahap konstruksi timbunan selesai dimodelkan pada kondisi muka air normal, tahap selanjutnya adalah memodelkan kondisi timbunan dan perkuatan pada saat terjadi muka air banjir (MAB) dengan elevasi +7,047. Kondisi ini merepresentasikan pengaruh kenaikan muka air terhadap timbunan dan perkuatan yang telah terbangun, sehingga dapat diketahui perilaku dan kestabilan struktur pada kondisi banjir. Konstruksi geometri timbunan dan perkuatan pada kondisi MAB akan ditampilkan pada Gambar 16 di bawah ini.



Gambar 16. *Pemodelan Timbunan dan Perkuatan*
(Sumber: Dokumentasi Penulis)

Setelah keseluruhan geometri, parameter tanah, dan kondisi aliran air selesai dimodelkan,

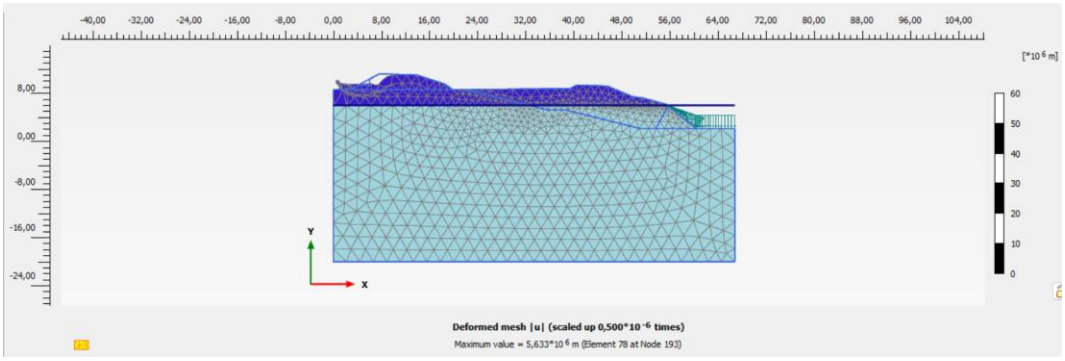
analisis dilanjutkan pada tahap *staged construction* untuk mensimulasikan kondisi lereng secara bertahap mulai dari kondisi awal (*initial phase*), kondisi pembebanan, hingga kondisi kritis lereng sebelum akhirnya dilakukan perhitungan faktor keamanan pada tahap akhir.

Hasil Analisa

Dalam analisis ini digunakan kondisi dua Muka Air dalam permodelan. Simulasi permodelan ini dilakukan untuk merepresentasikan kondisi lereng tanggul terhadap rembesan.

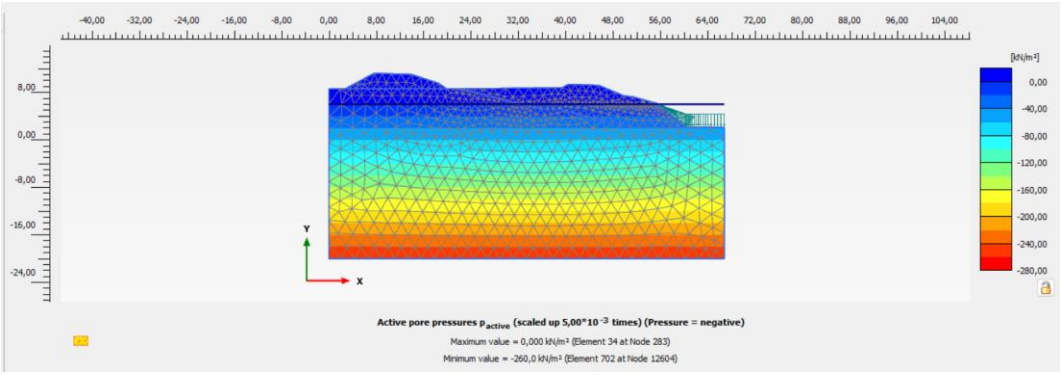
1. Safety Factor Initial Phase

Berdasarkan hasil analisis stabilitas lereng tubuh tanggul Sungai Wulan pada ruas Mijen-Demak yang telah dilakukan menggunakan perangkat lunak Plaxis 2D, diperoleh nilai faktor keamanan (*safety factor*) lereng pada kondisi normal sebagaimana disajikan pada Gambar 17 dan 18.



Gambar 17. *Deformation Kondisi Initial Phase*
(Sumber: Dokumentasi Penulis)

Berdasarkan hasil analisis menggunakan Plaxis 2D, diperoleh nilai faktor Deformasi lereng tubuh tanggul Sungai Wulan ruas Mijen-Demak pada kondisi muka air normal sebesar $5{,}633*10^{6}$ m.



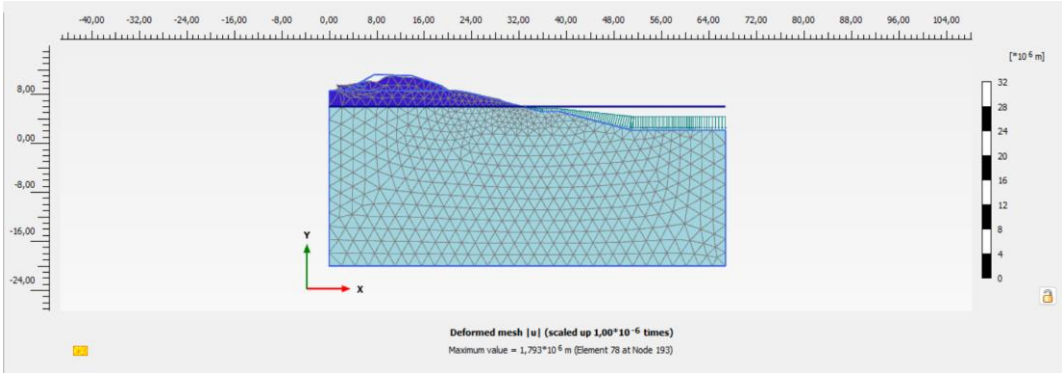
Gambar 18. *Safety Factor Kondisi Intial Phase*
(Sumber: Dokumentasi Penulis)

Berdasarkan hasil analisis menggunakan Plaxis 2D, diperoleh nilai faktor keamanan (*safety factor*) lereng tubuh tanggul Sungai Wulan ruas Mijen-Demak pada kondisi muka air normal sebesar 6,403. Nilai tersebut menunjukkan bahwa lereng tanggul dalam kondisi stabil, karena lebih besar dari

nilai faktor keamanan minimum yang disyaratkan yaitu sebesar 1,5 berdasarkan SNI 8460:2017. Kondisi ini malampirkan bagaimana nilai *safety factor* pada tahapan konstruksi, dengan *stage construction phreatic*.

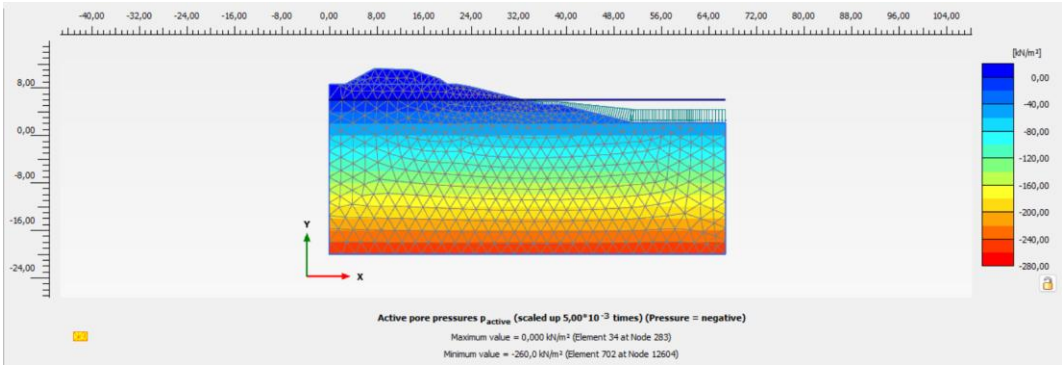
2. Safety Factor Galian

Berdasarkan hasil analisis stabilitas pada tahapan konstruksi galian Sungai Wulan pada ruas Mijen-Demak dilakukan menggunakan perangkat lunak Plaxis 2D, diperoleh nilai faktor keamanan (*safety factor*) lereng pada kondisi normal sebagaimana disajikan pada Gambar 19 dan 20.



Gambar 19. *Deformation Kondisi Galian*
(Sumber: Dokumentasi Penulis)

Berdasarkan hasil analisis menggunakan Plaxis 2D, diperoleh nilai faktor Deformasi lereng tubuh tanggul Sungai Wulan ruas Mijen-Demak pada kondisi muka air normal sebesar $5{,}633*10^{6}$ m.

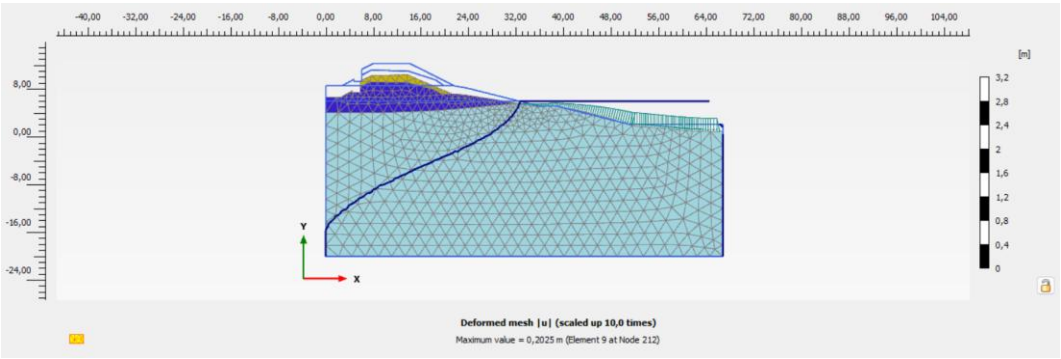


Gambar 20. *Kondisi Safety Factor Galian*
(Sumber: Dokumentasi Penulis)

Berdasarkan hasil analisis menggunakan Plaxis 2D, diperoleh nilai faktor keamanan (*safety factor*) lereng tubuh tanggul Sungai Wulan ruas Mijen-Demak pada kondisi muka air normal sebesar 6,404. Nilai tersebut menunjukkan bahwa lereng tanggul dalam kondisi stabil, karena lebih besar dari nilai faktor keamanan minimum yang disyaratkan yaitu sebesar 1,5 berdasarkan SNI 8460:2017. Kondisi ini melampirkan bagaimana nilai *safety factor* pada tahapan konstruksi, dengan *stage construction phreatic*.

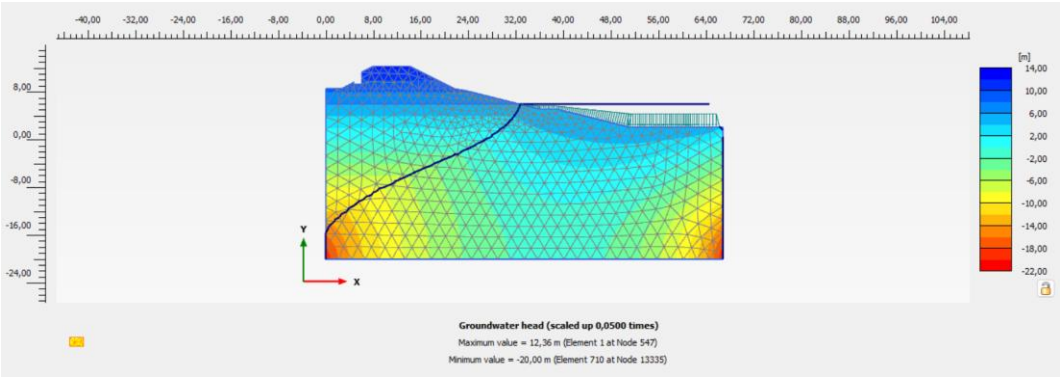
3. Safety Factor Timbunan Kondisi Muka Air Normal

dilakukan analisis aliran air (*groundwater flow*) menggunakan metode elemen hingga dengan bantuan perangkat lunak Plaxis 2D untuk menganalisis nilai *safety factor*. Hasil pemodelan tersebut menunjukkan pola rembesan berupa garis aliran (*flow lines*) serta besar debit rembesan (*discharge*) yang melewati tubuh tanggul, dan deformasi pada lereng tanggul sebagaimana diuraikan pada pembahasan berikut.



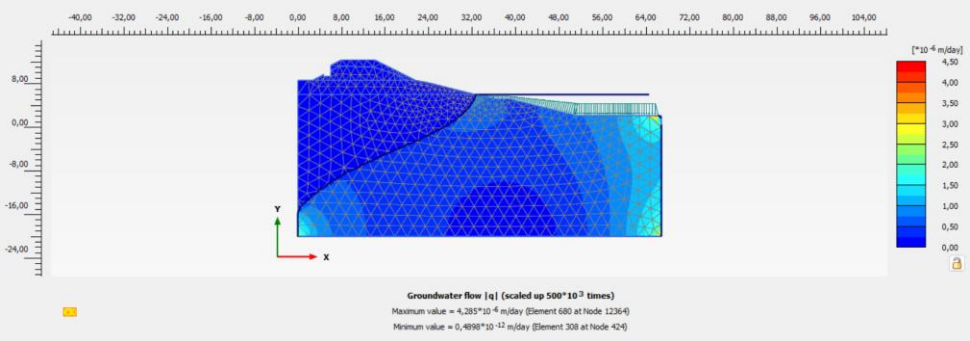
Gambar 21. *Deformation Kondisi Muka Air Normal*
(Sumber: Dokumentasi Penulis)

Berdasarkan hasil analisis menggunakan Plaxis 2D, diperoleh nilai faktor Deformasi lereng tubuh tanggul Sungai Wulan ruas Mijen-Demak pada kondisi muka air normal dengan analisis menggunakan *steady state* sebesar 0,2025 m.



Gambar 22. *Hasil Analisa Ground Water Head*
(Sumber: Dokumentasi Penulis)

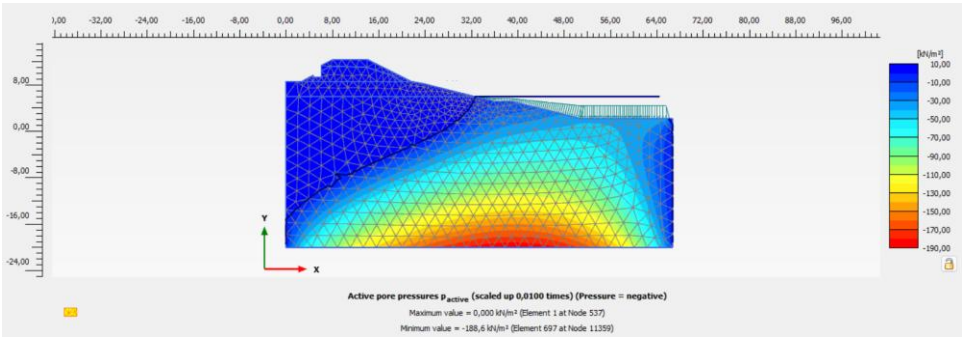
Berdasarkan hasil analisis pada kondisi *ground water head* angka *maximum value* sebesar 12,36 m sedangkan angka minimum sebesar – 20,00 m.



Gambar 23. *Hasil Analisa Ground Water Flow*
(Sumber: Dokumentasi Penulis)

Pada hasil analisa *ground water flow* didapat angka debit aliran rembesan dengan angka maksimal sebesar $4{,}285*10^{-6}$.

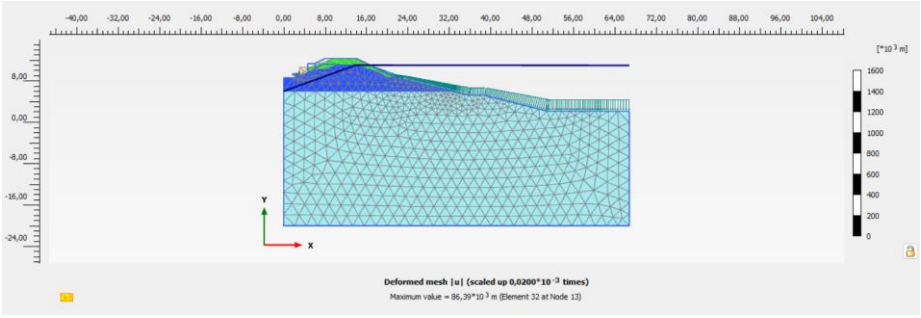
Dan pada hasil analisa keseluruhan pada lereng tubuh tanggul nilai *safety factor* yang diperoleh sebesar 3,096. Nilai tersebut menunjukkan bahwa lereng tanggul dalam kondisi stabil, karena lebih besar dari nilai faktor keamanan minimum yang disyaratkan yaitu sebesar 1,5 berdasarkan SNI 8460:2017. Hasil tersebut akan ditampilkan pada Gambar 24 di bawah ini.



Gambar 24. *Hasil Analisa Pore Pressure Muka Air Normal*
(Sumber: Dokumentasi Penulis)

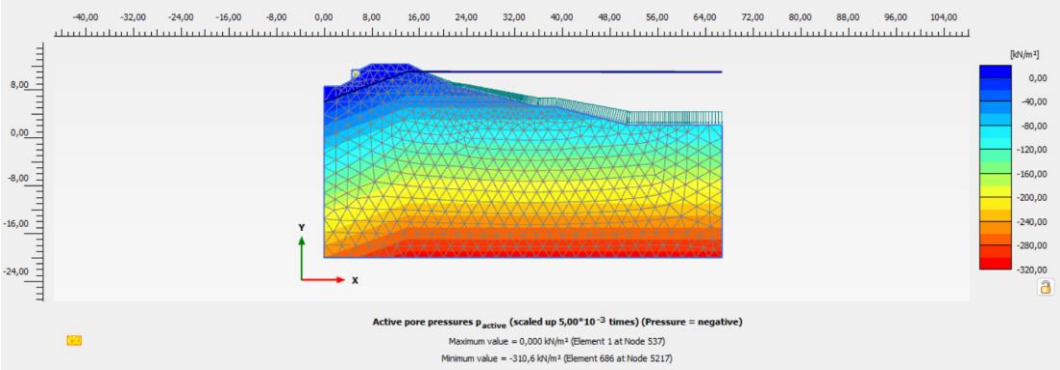
4. Safety Factor Timbunan dan Perkuatan Kondisi Muka Air Banjir

Pada tahap ini hasil analisis dilakukan dengan Muka Air banjir yang sebagaimana hasil analisis akan disajikan.



Gambar 25. *Deformation Timbunan dan Perkuatan*
(Sumber: Dokumentasi Penulis)

Berdasarkan hasil analisis menggunakan Plaxis 2D, diperoleh nilai faktor Deformasi lereng tubuh tanggul Sungai Wulan ruas Mijen-Demak pada kondisi tahapan konstruksi Timbunan dan Perkuatan pada muka air banjir sebesar 86,39*10^3 m.

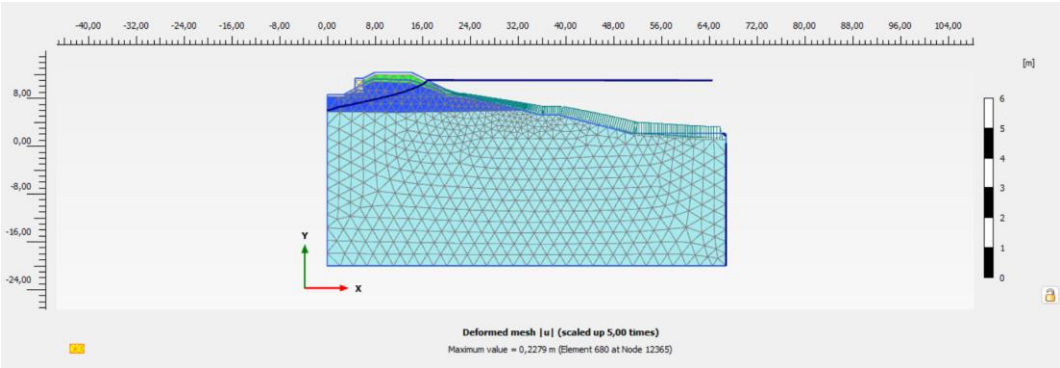


Gambar 26. *Deformation Timbunan dan Perkuatan*
(Sumber: Dokumentasi Penulis)

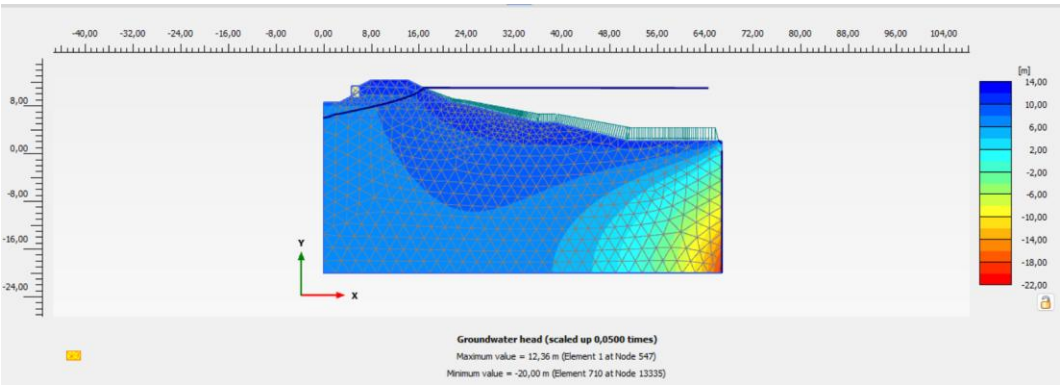
Berdasarkan hasil analisis menggunakan Plaxis 2D, diperoleh nilai faktor keamanan (*safety factor*) lereng tubuh tanggul Sungai Wulan ruas Mijen-Demak pada kondisi muka air banjir sebesar 4,251. Nilai tersebut menunjukkan bahwa lereng tanggul dalam kondisi stabil, karena lebih besar dari nilai faktor keamanan minimum yang disyaratkan yaitu sebesar 1,5 berdasarkan SNI 8460:2017. Kondisi ini malampirkan bagaimana nilai *safety factor* pada tahapan konstruksi, dengan *stage construction phreatic*. Serta Nilai pada *pore pressure active* sebesar -310,6 KN/m^2.

5. Safety Factor Kondisi Muka Air Banjir

Berdasarkan hasil analisis menggunakan Plaxis 2D, diperoleh nilai faktor Deformasi lereng tubuh tanggul Sungai Wulan ruas Mijen-Demak pada kondisi muka air banjir dengan analisis menggunakan *steady state* sebesar 0,2279m. Hasil tersebut akan dilampirkan pada Gambar 27 di bawah ini.

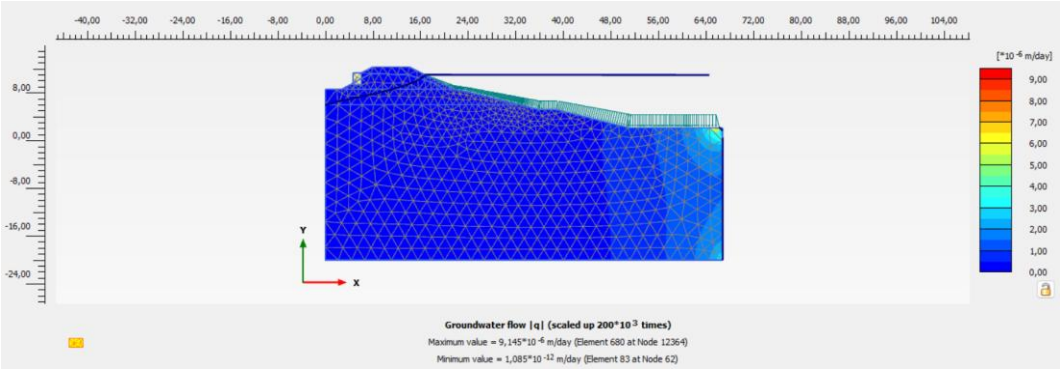


Gambar 27. *Deformation Muka Air Banjir*
(Sumber: Dokumentasi Penulis)



Gambar 28. *Hasil Analisa Ground Water Head*
(Sumber: Dokumentasi Penulis)

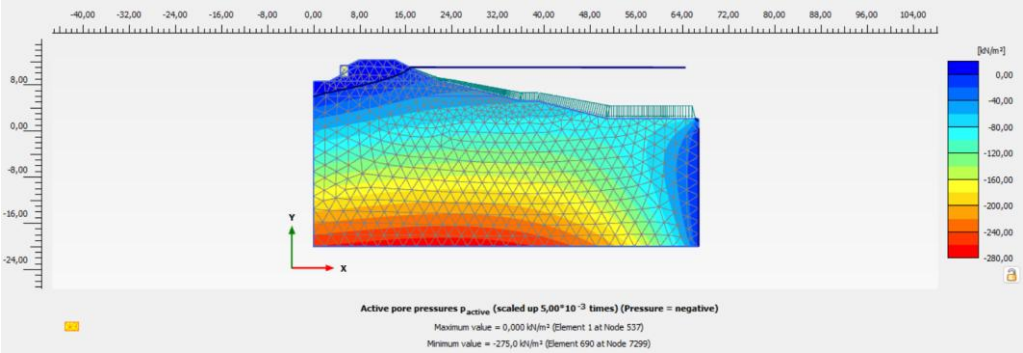
Berdasarkan hasil analisis pada tahapan *ground water pressure*, diperoleh distribusi tekanan air pori yang menunjukkan pola peningkatan tekanan secara linear seiring bertambahnya kedalaman di bawah muka air tanah, dengan nilai tekanan air pori maksimum terjadi pada titik terdalam. Hasil analisis pada kondisi *ground water head* angka *maximum value* sebesar 12,36 m sedangkan angka minimum sebesar – 20,00 m.



Gambar 29. *Hasil Analisa Ground Water Flow*
(Sumber: Dokumentasi Penulis)

Pada hasil analisa *ground water flow* didapat angka debit aliran rembesan dengan angka maksimal sebesar $9{,}145*10^{-6}$.

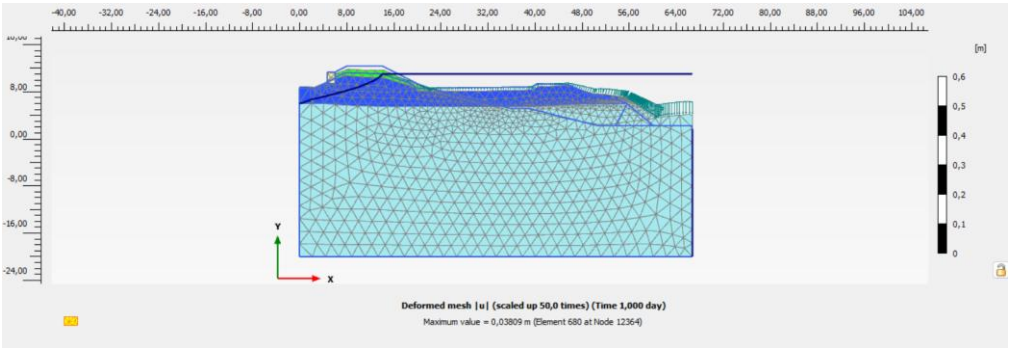
Dan pada hasil analisa keseluruhan pada lereng tubuh tanggul nilai *safety factor* yang diperoleh sebesar 3,096. Nilai tersebut menunjukkan bahwa lereng tanggul dalam kondisi stabil, karena lebih besar dari nilai faktor keamanan minimum yang disyaratkan yaitu sebesar 1,5 berdasarkan SNI 8460:2017. Hasil tersebut akan ditampilkan pada Gambar 30 di bawah ini.



Gambar 30. *Hasil Analisa Pore Pressure*
(Sumber: Dokumentasi Penulis)

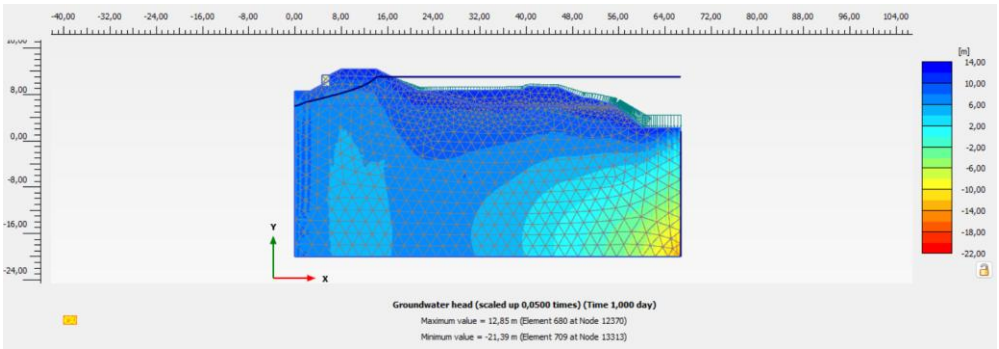
6. Safety Factor Rapid Drawdown

Pada tahap ini hasil analisis dilakukan dengan Muka Air Banjir yang sebagaimana hasil analisis akan disajikan.



Gambar 31. *Hasil Deformasi Rapid Drawdown*
(Sumber: Dokumentasi Penulis)

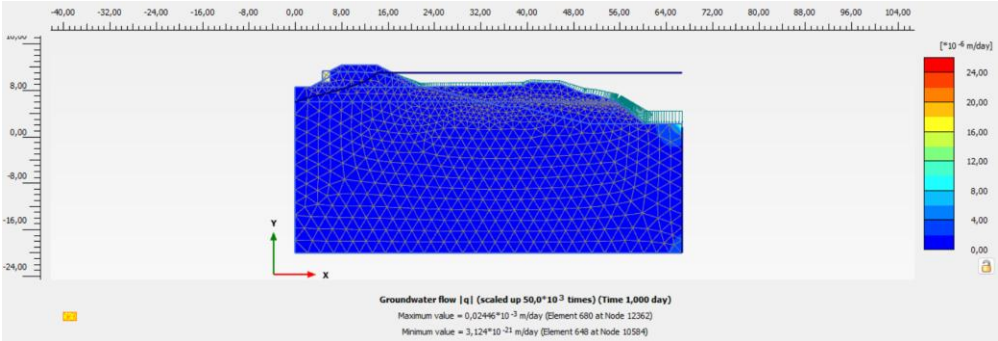
Berdasarkan hasil analisis menggunakan Plaxis 2D, diperoleh nilai faktor Deformasi lereng tubuh tanggul Sungai Wulan ruas Mijen-Demak pada kondisi muka air banjir dengan analisis menggunakan *rapid drawdown* sebesar 0,03809 m. Hasil tersebut akan dilampirkan pada Gambar 31 di atas.



Gambar 32. *Hasil Analisa Ground Water Head*
(Sumber: Dokumentasi Penulis)

Berdasarkan hasil analisis pada tahapan *ground water pressure*, diperoleh distribusi tekanan

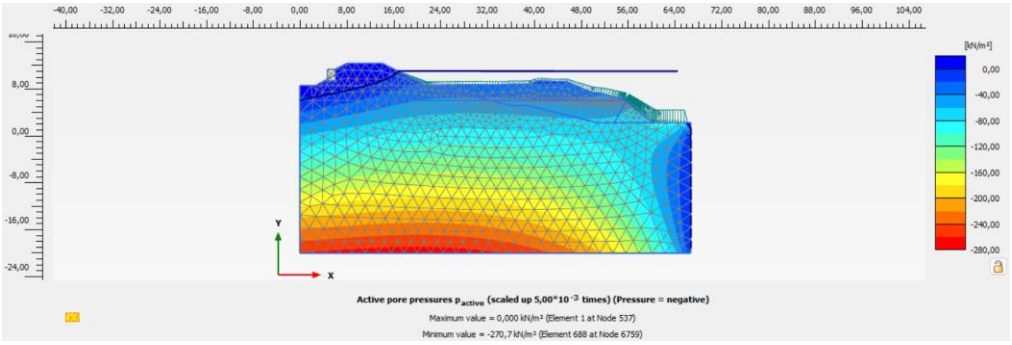
air pori yang menunjukkan pola peningkatan tekanan secara linear seiring bertambahnya kedalaman di bawah muka air tanah, dengan nilai tekanan air pori maksimum terjadi pada titik terdalam. Hasil analisis pada kondisi *ground water head* angka *maximum value* sebesar 12,85 m sedangkan angka minimum sebesar – 21,39 m.



Gambar 33. *Hasil Analisa Ground Water Flow*
(Sumber: Dokumentasi Penulis)

Pada hasil analisa *ground water flow* didapat angka debit aliran rembesan dengan angka maksimal sebesar $3{,}124*10^{-21}$.

Dan pada hasil analisa keseluruhan pada lereng tubuh tanggul nilai *safety factor* yang diperoleh sebesar 1,587. Nilai tersebut menunjukkan bahwa lereng tanggul dalam kondisi stabil, karena lebih besar dari nilai faktor keamanan minimum yang disyaratkan yaitu sebesar 1,5 berdasarkan SNI 8460:2017. Hasil tersebut akan ditampilkan pada gambar 34 di bawah ini.



Gambar 34. *Hasil Analisa Pore Pressure*
(Sumber: Dokumentasi Penulis)

SIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis stabilitas lereng dan rembesan pada tubuh tanggul Sungai Wulan ruas Mijen-Demak menggunakan perangkat lunak Plaxis 2D, dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Faktor keamanan Berdasarkan hasil analisis stabilitas lereng dan rembesan pada tubuh tanggul Sungai Wulan ruas Mijen-Demak menggunakan perangkat lunak Plaxis 2D, dapat disimpulkan bahwa lereng tubuh tanggul berada dalam kondisi stabil pada seluruh tahapan konstruksi maupun kondisi muka air yang ditinjau. Pada kondisi awal (*initial phase*) dengan muka air normal, diperoleh nilai faktor keamanan sebesar 6,403, kemudian menurun menjadi 4,251 setelah tahapan timbunan dan perkuatan pada muka air normal. Pada kondisi muka air banjir, nilai faktor keamanan yang diperoleh sebesar 3,096, dan pada kondisi paling kritis yaitu *rapid drawdown* atau penurunan muka air banjir secara cepat, nilai faktor keamanan turun menjadi 1,587. Meskipun terjadi penurunan nilai faktor keamanan seiring bertambahnya beban konstruksi dan kenaikan muka air, seluruh nilai tersebut masih berada di atas syarat minimum SF ≥ 1,5 yang disyaratkan SNI 8460:2017, sehingga lereng tubuh tanggul dapat dikategorikan aman terhadap potensi kelongsoran, termasuk pada kondisi kritis sekalipun.
2. Penambahan perkuatan berupa pasangan batu kali pada sisi luar tanggul turut memberikan pengaruh terhadap perilaku lereng, baik dari sisi nilai faktor keamanan maupun deformasi yang terjadi, dibandingkan dengan kondisi tanpa perkuatan. Hal ini menunjukkan bahwa perkuatan batu kali berperan cukup baik dalam membantu menahan pergeseran material timbunan akibat tekanan air, sehingga dapat dijadikan salah satu alternatif sistem perkuatan pada tanggul dengan karakteristik tanah dan kondisi hidraulik yang serupa.
3. Sementara itu, hasil analisis rembesan menunjukkan bahwa debit rembesan yang melewati tubuh tanggul meningkat seiring naiknya muka air, dari kondisi normal hingga kondisi banjir, dengan nilai *ground water head* berkisar antara -21,39 m sampai 12,85 m serta tekanan air pori aktif yang juga meningkat pada kondisi muka air banjir. Kondisi ini mengindikasikan bahwa meskipun nilai faktor keamanan terhadap kelongsoran masih tergolong aman, potensi terjadinya erosi buluh (*piping*) akibat rembesan tetap perlu diwaspadai dalam jangka panjang, mengingat tanggul ini pernah mengalami kejadian jebol berulang akibat kondisi hidraulik ekstrem pada musim hujan.

DAFTAR PUSTAKA

Arifin, M. A., & Fathurrozie. (2019). Tinjauan Nilai Permeabilitas Tanah Tanggul Canal Blocking. *Jurnal Gradasi Teknik Sipil*, *3*(1), 7-14.

Azimi, S. R. (2016). *Soil Slope Stability Techniques: A Comprehensive Analysis* (Master's Thesis, Curtin University).

Azmi, M. H., Hendrawan, A. P., & Sisinggih, P. (2022). Studi Perencanaan Tanggul Parapet dan Bronjong Sebagai Salah Satu Upaya Penanggulangan Banjir di Sungai Musi Kabupaten Empat Lawang Provinsi Sumatera Selatan. *Jurnal Teknologi dan Rekayasa Sumber Daya Air*, *2*(2), 2-14.

Badan Nasional Penanggulangan Bencana. (2024). *Kepala BNPB Tinjau Kondisi Tanggul Sungai Wulan di Demak*. https://www.bnpb.go.id/berita/kepala-bnpb-tinjau-kondisi-tanggul-sungai-wulan-di-demak

Badan Standardisasi Nasional. (2017). *SNI 8460:2017: Persyaratan Perancangan Geoteknik (SNI 8460:2017)*. Jakarta: BSN.

Dandel, R., Sendow, T. K., Sangkertadi. (2025). Analisis Stabilitas Timbunan Tanah dengan Perkuatan Dinding Penahan dan Geotextile. *Jurnal Sosial dan Teknologi (SOSTECH)*, *5*(11), 4250-4263.

Das, B. M. (1993). *Mekanika Tanah: (Prinsip-Prinsip Rekayasa Geoteknis) Jilid 2*. Penerbit Erlangga.

Detik. (2024). *Tanggul Sungai Wulan Jebol Lagi, Pantura Demak Lumpuh, Warga Ngungsi*. https://www.detik.com/jateng/berita/d-7246791/tanggul-sungai-wulan-jebol-lagi-pantura-demak-lumpuh-warga-ngungsi

Fauzi, D. A., Marsudi, S., & Cahya, E. N. (2023). Analisa Rembesan Terhadap Terjadinya Piping pada Bendungan Cijurey Kabupaten Bogor Provinsi Jawa Barat. *Jurnal Teknologi dan Rekayasa Sumber Daya Air*, *3*(2), 151–164. https://doi.org/10.21776/ub.jtresda.2023.003.02.013

Hamdhan, I. N., Iskandar, F. F., & Maulana, G. (2018). Analisis Debit Rembesan di Bawah Tubuh Bendung dengan Pendekatan Metode Grafis dan Numerik. Dalam H. Setiawan, F. Raharjo, Siswadi, A. E. Lianasari, & J. Ardianto (Eds.), *Prosiding Konferensi Nasional Teknik Sipil 12 (KoNTekS 12)* (hlm. GT-67 – GT-76). Yogyakarta: Program Studi Teknik Sipil Universitas Atma Jaya Yogyakarta.

Hardiyatmo, H. C. (2002). *Mekanika Tanah II* (Edisi-3). Gadjah Mada University Press.

Holtz, R. D., & Kovacs, W. D. (1981). *An Introduction to Geotechnical Engineering. Englewood Cliffs, NJ*: Prentice-Hall.

Latifulloh, H. (2020). *Kajian Kerusakan dan Penanggulangan Tanggul di Lokasi Kedung Bokor Sungai Citarum Hilir Kabupaten Bekasi* (Doctoral dissertation, Institut Teknologi Nasional Bandung).

Maruf, M. F., Hidayah, E., Wahyuni, S., Sisinggih, D., & Putra, P. P. (2023). Load Sharing Mechanism of Bamboo Pile Mattress for Reinforced Embankment. *International Journal of GEOMATE*, *25*(107), 133-140. https://doi.org/10.21660/2023.107.3833

Pratiwi, D. S., Yakin, Y. A., & Mahaputra, A. (2022). Analisis Stabilitas Lereng Batuan dengan Pendekatan Kriteria Keruntuhan Hoek-Brown dan Mohr Coulomb Menggunakan Metode Numerik Plaxis 2D. *Publikasi Riset Orientasi Teknik Sipil (Proteksi)*, *4*(2), 74-81.

https://doi.org/10.26740/proteksi.v4n2.p74-81

Setiawan, B., Chrismaningwang, G., & Rifa'i, F. (2023). Analisis Debit Rembesan pada Sumur Resapan dengan Variasi Diameter Menggunakan Software GeoStudio SEEP/W. *Jurnal Matriks Teknik Sipil*, *11*(4), 362-368.

Sosrodarsono, S., & Tominaga, M. (1985). *Perbaikan dan Pengaturan Sungai*. Jakarta: Pradnya Paramita.

Supratikno, Aini, S., Ratnanik, & Ghaosmarino, R. M. A. (2024). Kajian perbandingan harga renovasi talud sepanjang 200 meter dengan pasangan batu muka dan slab beton dengan tulangan wiremesh. *Jurnal Teknik Sipil ITP, 11*(1), 77–82. https://doi.org/10.21063/JTS.2024.V1101.077-82

Terzaghi, K., & Peck, R. B. (1967). *Mekanika Tanah dalam Praktek Rekayasa* (Kedua ed.). Penerbit Erlangga.

U.S. Army Corps of Engineers. (2000). *Design and Construction of Levees* (EM 1110-2-1913). Department of the Army.

Zudri, A. T., & Anaperta, Y. M. (2019). Analisis Kestabilan Lereng Jalan Tambang di Area Zona 4 PT. Bintang Sumatra Pasifik di Koto Alam Kabupaten 50 Kota. *Jurnal Bima Tambang*, *4*(4), 59-70.