

## Optimasi Desain Tubuh Bendung Boreng di Sungai Asem Kabupaten Lumajang

Lutfianto Cahya Rachmadan, Yudhi Lastiasih

Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Indonesia

Email: [lutfianto.cahya@gmail.com](mailto:lutfianto.cahya@gmail.com), [yudhi\\_lastiasih@ce.its.ac.id](mailto:yudhi_lastiasih@ce.its.ac.id)

---

<b>Kata Kunci</b>	<b>Abstrak</b>
Bendung, optimasi, plaxis, rembesan, stabilitas	<p>Latar belakang penelitian ini adalah kerusakan parah pada Bendung Boreng di Kabupaten Lumajang akibat bencana alam, yang mengganggu fungsi irigasi dan pengendalian banjir. Perbedaan signifikan antara desain tahun 2017 dan 2024, baik dari segi biaya maupun struktur, mendorong perlunya analisis lebih lanjut untuk menentukan desain yang optimal. Tujuan penelitian adalah membandingkan kedua desain tersebut dalam hal stabilitas, rembesan, dan efisiensi biaya, serta melakukan optimasi untuk mendapatkan solusi terbaik. Metode penelitian dimulai dari menganalisis perbedaan antara hasil desain tahun 2017 dengan desain tahun 2024, selanjutnya akan dilakukan perhitungan terhadap daya dukung pondasi tiang. Dengan menggunakan aplikasi Plaxis, dilakukan pemodelan metode elemen hingga (finite element method) terhadap stabilitas tubuh bendung serta pemeriksaan terhadap rembesan. Dari hasil penelitian didapatkan, selisih harga yang besar dari desain 2017 dan 2024 dikarenakan perbedaan tipe mercu bendung yang berpengaruh terhadap volume beton, penggunaan beton K-300 untuk desain 2017 hanya terdapat pada selimut mercu sampai dengan kolam olak saja, sedangkan desain 2024 juga menggunakannya pada struktur lantai hulu, kemudian untuk desain 2017 tidak menggunakan pondasi tiang pancang beton sebanyak 245 titik seperti desain 2024. Stabilitas bendung desain 2017 dan 2014 sama – sama menunjukkan tingkat keamanan yang baik dengan nilai safety factor diatas 1,5 sehingga tidak perlu penambahan perkuatan namun pada desain 2017 tidak memenuhi angka persyaratan rembesan lane dengan nilai minimum 8,5 untuk tanah pasir kelanauan sehingga dilakukan optimasi terhadap desain 2024 dengan 2 model modifikasi yaitu mengurangi kedalaman tiang pancang dari semula 6 meter menjadi 3 meter dan merubah dimensinya semula berukuran 40 x 40 cm menjadi 25 x 25 cm. Analisa biaya material untuk modifikasi 1 terdapat efisiensi biaya terhadap desain awal sebesar Rp. 259.554.225,00, sedangkan untuk modifikasi 2 mendapatkan efisiensi sebesar Rp. 884.561.475,00. Implikasi penelitian ini adalah rekomendasi untuk menerapkan modifikasi desain 2024 dengan tiang pancang 3 meter dan dimensi 25 x 25 cm sebagai solusi optimal yang aman dan ekonomis.</p>
<b>Keywords:</b> Moisture, optimization, seepage, stability, plaxis.	<p style="text-align: center;"><b>Abstract</b></p> <p><i>The background of this research is the severe damage to the Boreng Dam in Lumajang Regency due to natural disasters, which disrupted irrigation and flood control functions. Significant differences between the 2017 and 2024 designs, both in terms of cost and structure, necessitate further analysis to determine the optimal design. The objective of this study is to compare the two designs in terms of stability, seepage, and cost efficiency, and to perform optimization to obtain the best solution. The research method starts from analyzing the difference between the 2017 design results and the 2024 design, then a calculation will be made on the bearing capacity of the pillar foundation. Using the Plaxis application, finite element method modeling was carried out on the stability of the weir body and examination of seepage. From the results of the study, the large price difference from the 2017 and 2024 designs is due to the difference in the type of weir markers that affect the volume of concrete,</i></p>

---

---

*the use of K-300 concrete for the 2017 design is only found in the landmark blanket to the olak pond only, while the 2024 design also uses it on the upstream floor structure, then for the 2017 design does not use concrete pile foundations as many as 245 points like the 2024 design. The stability of the weir in the 2017 and 2014 designs both show a good level of safety with a safety factor value above 1.5 so that there is no need for additional reinforcement, but in the 2017 design it does not meet the lane seepage requirement with a minimum value of 8.5 for bare sandy soil, so optimization of the 2024 design is carried out with 2 modified models, namely reducing the depth of the pile from the original 6 meters to 3 meters and changing the dimensions to the original size of 40 x 40 cm to 25 x 25 cm. Material cost analysis for modification 1 showed a cost efficiency over the initial design of Rp. 259,554,225.00, while for modification 2 there was an efficiency of Rp. 884,561,475.00. The implication of this study is a recommendation to implement the 2024 design modification with 3-meter piles and dimensions of 25 x 25 cm as a safe and economical optimal solution.*

---



## PENDAHULUAN

Irigasi berfungsi mendukung produktivitas usaha tani guna meningkatkan produksi pertanian dalam rangka ketahanan pangan nasional dan kesejahteraan masyarakat, khususnya petani yang diwujudkan melalui keberlanjutan sistem irigasi (Fachrie et al., 2019; Jupri Berutu et al., 2022; Kementerian Pekerjaan Umum dan Pekerjaan Rakyat, 2019; Miftahul Walid et al., 2022; Setiadi & Abdul Muhaemin, 2018). Keberlanjutan sistem irigasi ditentukan oleh keandalan air irigasi dan kondisi sarana dan prasana irigasi, sehingga perlu dilakukan pengembangan dan pengelolaan sistem irigasi dengan baik (Hove et al., 2022; Jumiati et al., 2023; Naumar et al., 2021; Siregar, 2023; Suriasih et al., 2017). Pengelolaan tersebut dapat dipengaruhi oleh salah satu faktor berupa kelayakan fungsi dan kondisi fisik dari bangunan utama (headworks). Salah satu bangunan utama tersebut adalah bendung yang berfungsi meninggikan muka air sungai agar masuk ke dalam intake saluran irigasi serta berfungsi sebagai pengendali banjir sehingga menjadikan bendung memiliki tingkat risiko dan ancaman terhadap geser maupun guling (Larasati et al., 2021).

Berdasarkan Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Nomor 14 Tahun 2015 tentang Kriteria dan Penetapan Status Daerah Irigasi, luasan daerah irigasi (DI) dibawah 1.000 Ha merupakan kewenangan Pemerintah Kabupaten/Kota, sedangkan pada rentang luasan 1.000 – 3.000 Ha dikelola oleh Pemerintah Provinsi dan daerah irigasi (DI) yang memiliki luas diatas 3.000 Ha serta berada di lintas Kabupaten/Kota merupakan kewenangan pemerintah pusat.

Pada penelitian ini, diambil lokasi studi di Bendung Boreng dengan luas baku sawah sebesar 306 Ha yang mana kewenangan irigasinya dimiliki oleh Pemerintah Kabupaten Lumajang. Bendung tersebut berada di Desa Rogotruman Kecamatan Lumajang Kabupaten Lumajang. Bendung ini mengalami kerusakan yang disebabkan oleh bencana alam berupa intensitas hujan yang tinggi serta ditambah dengan lahar vulkanis Gunung Semeru yang melintas sehingga mengakibatkan tubuh bendung tersebut mengalami kehancuran.

Sebagai hipotesa awal, ditinjau dari segi rencana anggaran biaya hasil desain pada Tahun 2017 menunjukkan bahwa untuk melaksanakan pembangunan bendung membutuhkan dana sebesar kurang lebih 9 (sembilan) milyar rupiah dimana jumlah tersebut setengah dari biaya hasil review design Tahun 2024 yaitu sebesar kurang lebih 18 (delapan belas) milyar rupiah. Dari segi struktur bangunan bendung pada hasil review design Tahun 2024

menggunakan perkuatan tanah berupa pemancangan mini pile dengan jumlah 245 titik berbeda dengan hasil desain Tahun 2017 dimana tidak memakai perkuatan tanah, meski dilihat dari hasil penyelidikan tanah menunjukkan jenis tanah berupa pasir kelanauan dengan nilai Standart Penetration Test (SPT) sebesar 39 pada kedalaman 6 meter pada salah satu titik. Beberapa hal tersebut menunjukkan bahwa perlu dilakukan penelitian terkait perbandingan hasil desain Tahun 2017 dengan review desain Tahun 2024 dari beberapa aspek meliputi stabilitas, rembesan, efisiensi desain sampai dengan perhitungan biaya material tubuh bendung boreng.

Bendung sebagai infrastruktur vital dalam sistem irigasi dan pengendalian banjir telah banyak diteliti, termasuk aspek stabilitas dan efisiensi desain. Studi sebelumnya oleh Zhang et al. (2020) dalam *Journal of Hydraulic Engineering* menekankan pentingnya analisis stabilitas bendung menggunakan pemodelan elemen hingga (FEM) untuk memprediksi deformasi dan faktor keamanan. Penelitian lain oleh Kumar dan Sharma (2019) dalam *Water Resources Management* mengkaji optimasi biaya konstruksi bendung dengan memodifikasi dimensi pondasi tiang pancang, namun belum menyertakan analisis rembesan secara mendalam. Sementara itu, studi oleh Chen et al. (2021) dalam *Geotechnical and Geological Engineering* menyoroti peran metode Lane dalam mengevaluasi rembesan pada bendung, tetapi terbatas pada kondisi tanah homogen. Meskipun penelitian-penelitian ini memberikan dasar yang kuat, masih terdapat kesenjangan dalam integrasi analisis stabilitas, rembesan, dan efisiensi biaya secara komprehensif, terutama pada bendung dengan kondisi tanah heterogen seperti pasir kelanauan.

Urgensi penelitian ini didasarkan pada kerusakan parah Bendung Boreng akibat bencana alam, yang mengancam fungsi irigasi dan pengendalian banjir di Kabupaten Lumajang. Perbedaan signifikan antara desain tahun 2017 dan 2024, baik dari segi biaya maupun struktur, menunjukkan perlunya evaluasi mendalam untuk memastikan keamanan dan efisiensi. Selain itu, temuan awal bahwa desain 2017 tidak memenuhi persyaratan rembesan Lane mempertegas pentingnya penelitian ini untuk menghindari risiko kegagalan struktur di masa depan. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya relevan secara teknis tetapi juga memiliki dampak sosial-ekonomi yang besar bagi masyarakat setempat.

Kebaruan penelitian ini terletak pada pendekatan holistik yang menggabungkan analisis stabilitas menggunakan Plaxis 2.0, evaluasi rembesan dengan metode Lane, dan optimasi biaya material melalui modifikasi desain. Berbeda dengan studi sebelumnya, penelitian ini membandingkan dua desain bendung secara langsung dan mengusulkan solusi optimasi berbasis hasil pemodelan numerik. Selain itu, integrasi data tanah aktual dari uji N-SPT dan analisis daya dukung tiang pancang dengan metode Meyerhoff dan Decourt memberikan kontribusi metodologis yang signifikan. Pendekatan ini memungkinkan identifikasi desain yang tidak hanya aman tetapi juga ekonomis, yang belum banyak dibahas dalam literatur terdahulu.

Tujuan penelitian ini adalah untuk: (1) membandingkan kinerja desain Bendung Boreng tahun 2017 dan 2024 dalam hal stabilitas, rembesan, dan biaya konstruksi; (2) mengevaluasi kebutuhan pondasi tiang pancang pada desain 2024; dan (3) mengusulkan modifikasi desain yang optimal berdasarkan hasil pemodelan dan analisis biaya. Dengan demikian, penelitian ini bertujuan menjawab pertanyaan apakah desain 2024 sudah memenuhi kriteria keamanan dan efisiensi, atau masih dapat dioptimasi lebih lanjut.

Manfaat penelitian ini meliputi aspek teknis dan praktis. Secara teknis, temuan penelitian dapat memperkaya literatur tentang integrasi analisis stabilitas, rembesan, dan optimasi biaya pada bendung. Secara praktis, hasil penelitian ini dapat menjadi rekomendasi bagi pemerintah dan pihak terkait dalam pembangunan kembali Bendung Boreng, sehingga menghasilkan infrastruktur yang aman, berkelanjutan, dan efisien dari segi biaya. Selain itu, metodologi yang dikembangkan dapat diaplikasikan pada studi serupa di lokasi lain dengan kondisi tanah dan hidrologis yang mirip.

Dengan pendekatan tersebut, penelitian ini diharapkan dapat memberikan solusi yang terukur untuk perbaikan Bendung Boreng, sekaligus menjadi model bagi penelitian serupa di masa depan. Implikasi jangka panjangnya adalah terciptanya standar desain bendung yang lebih andal dan efisien, khususnya di daerah rawan bencana dengan kondisi tanah yang kompleks.

## **METODE PENELITIAN**

Penelitian ini menggunakan metode kuantitatif dengan tahapan sebagai berikut: (1) pengumpulan data tanah dan desain bendung; (2) analisis daya dukung tiang pancang; (3) pemodelan stabilitas dan rembesan menggunakan Plaxis 2.0; dan (4) optimasi desain berdasarkan hasil pemodelan dan analisis biaya. Data utama diperoleh dari desain tahun 2017 dan 2024, serta laporan penyelidikan tanah lapangan. Pemodelan dilakukan untuk berbagai skenario, termasuk kondisi muka air normal dan banjir, untuk memastikan hasil yang komprehensif.

Tahap studi literatur dilakukan dengan mengumpulkan dan mempelajari berbagai literatur serta penelitian terdahulu yang menjadi acuan penelitian. Literatur yang digunakan meliputi perhitungan gaya-gaya yang bekerja pada bendung, analisis stabilitas bendung menggunakan aplikasi, serta perhitungan daya dukung pondasi tiang. Selanjutnya, tahap pengumpulan data dilakukan untuk mendukung proses analisis, meliputi data kondisi eksisting bendung, data desain tubuh bendung, serta data tanah. Data ini digunakan untuk menganalisis parameter yang menjadi dasar pemodelan tubuh Bendung Boreng di Desa Rogotrunan, Kabupaten Lumajang. Tiga sumber data utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah desain tahun 2017, review desain tahun 2024, dan Soil Investigation Report Proyek Perencanaan Pengendalian Banjir Anak Sungai Bondoyudo Baru Kabupaten Lumajang tahun 2020.

Tahap berikutnya adalah pengolahan data tanah, yang diperoleh dari hasil borlog N-SPT (Standard Penetration Test) dari dua konsultan perencana desain bendung dan satu konsultan penyelidikan tanah. Dari data tersebut dapat diketahui kekuatan tanah, jenis, dan sifat-sifat tanah (soil properties), yang kemudian dibuat stratigrafi lapisan tanah dari titik-titik borlog yang tersedia. Data tanah ini menjadi input pada menu material properties dalam aplikasi Plaxis 2.0. Selain itu, dilakukan perhitungan daya dukung pondasi tiang untuk menganalisis review desain Bendung Boreng tahun 2024, yang menambahkan pondasi tiang pancang mini pile sebanyak 245 titik pada tubuh bendung hingga kolam olak, berbeda dengan desain tahun 2017. Metode yang digunakan adalah analisis Meyerhoff (1976) dan Luciano Decourt (1996) untuk menentukan daya dukung tiang ultimit ( $Q_u$ ), yang kemudian dianalisis terkait kebutuhan dan efisiensi jumlah tiang pancang.

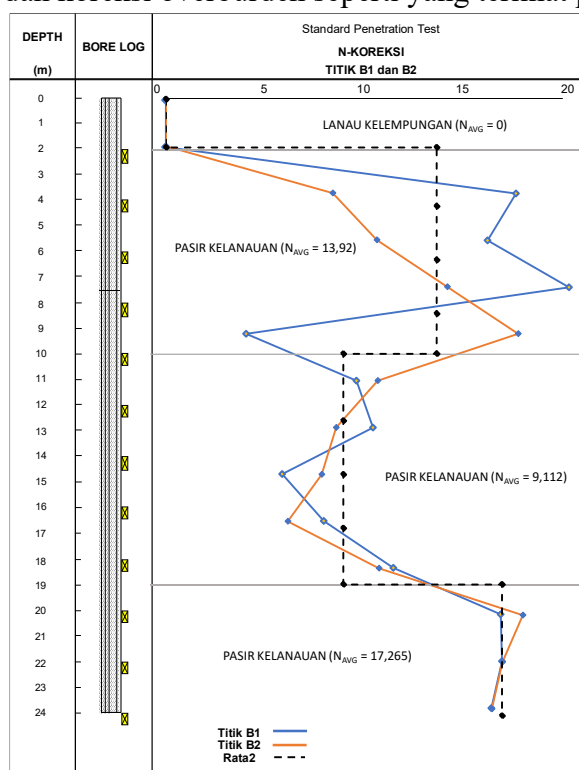
Analisis stabilitas bendung terhadap piping menggunakan metode empiris Lane (weighted creep ratio method) dengan beberapa kondisi desain, yaitu desain 2017 dan 2024

pada kondisi muka air normal maupun banjir. Selanjutnya dilakukan pemodelan stabilitas menggunakan aplikasi Plaxis 2.0, dengan memasukkan material properties dan geometri bendung sebagai data awal. Pemodelan ini dilakukan untuk menganalisis stabilitas bendung terhadap gaya guling dan geser, sehingga diperoleh nilai safety factor (SF). Pemodelan dilaksanakan untuk berbagai skenario, yaitu geometri desain 2017 dan 2024 pada kondisi tanpa genangan air, dengan muka air normal, serta dengan muka air banjir. Selain itu, pemodelan juga dilakukan pada hasil analisis geometri bendung yang ditambahkan perkuatan.

Jika hasil analisis menunjukkan bahwa stabilitas bendung tidak terpenuhi (safety factor < standar), dilakukan penambahan perkuatan pada bangunan. Metode perkuatan yang dapat dilakukan antara lain injeksi semen (grouting), penggantian lapisan tanah dasar bendung, soil nailing atau ankur, serta pemasangan bore pile. Terakhir, dilakukan perhitungan biaya, yang diawali dengan analisis perbandingan Rencana Anggaran Biaya (RAB) antara desain tahun 2017 dengan review desain tahun 2024 untuk mengetahui penyebab perbedaan biaya yang signifikan. Pada tahap akhir, analisis biaya dirangkum berdasarkan hasil pemodelan sehingga diperoleh rencana anggaran biaya akhir dari penelitian.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis daya dukung tiang pancang dilakukan menggunakan data N-SPT yang diperoleh dari dua data penyelidikan tanah yaitu B1 dan B2 seperti yang terlihat pada layout Gambar 3. Sebelum data NSPT pada titik B1 dan B2 digunakan sebagai dasar korelasi antar parameter tanah untuk input perhitungan, data tersebut perlu dikoreksi terlebih dahulu terhadap tekanan muka air tanah dan koreksi overburden seperti yang terlihat pada Gambar 4.



Gambar 1. Grafik kedalaman vs N-SPT

Perhitungan daya dukung tiang pancang tunggal dan kelompok menggunakan metode Meyerhoff (1956) dan metode Luciano Decourt (1966). Perhitungan dilakukan terhadap tiang pancang yang terdapat pada review design Tahun 2024. Diameter ukuran tiang pancang adalah 40 cm x 40 cm dengan panjang 8 meter, tiang yang masuk kedalam tanah sepanjang 6,5 meter. Hasil perhitungan daya dukung tiang pancang dengan kedua metode tersebut dapat dilihat pada Tabel 1.

**Tabel 1. Hasil Perhitungan Daya Dukung Tiang Pancang**

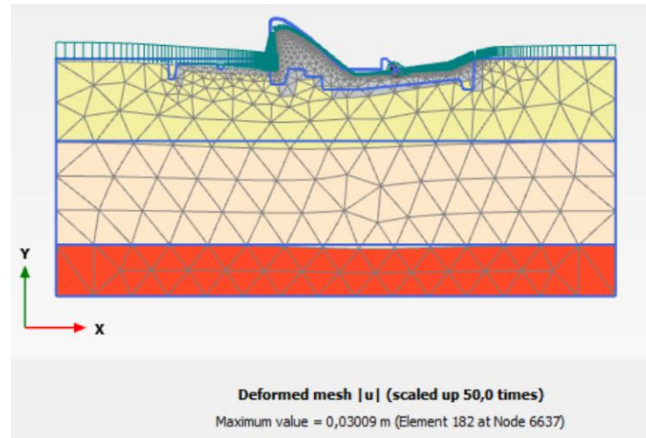
No.	Notasi	SPT N-Avg		Desain Tahun 2017	Review Desain Tahun 2024
		Mayerhoff	Luciano Decourt		
1	Qp	89,088	46,064	Tanpa pondasi tiang pancang	245 bh
2	Qs	28,9536	58,656		
3	Qult	118,0416	104,72		
4	Qall	39,3472	32,4107		
5	n	251	305		

Pemeriksaan dan perhitungan terhadap *pipping* dilakukan menggunakan Metode Lane dengan menentukan nilai angka rembesan ( $C_L$ ) pada tanah dibawah bendung. Pemeriksaan dilakukan pada desain 2017 dan desain 2024 dengan 2 kondisi muka air yaitu normal dan banjir, dan hasilnya terlihat pada Tabel 4. Kontrol pada desain 2017 tidak memenuhi angka keamanan minimum rembesan lane ( $> 8,5$ ) sesuai jenis tanah pada lokasi studi berupa tanah pasir kelanauan.

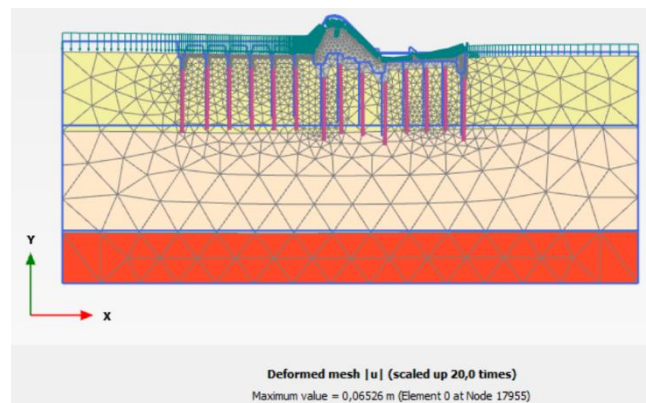
**Tabel 2. Hasil Perhitungan Rembesan Metode Lane**

No.	Desain	Kondisi Muka Air	Panjang Pondasi Bendung (m)		Tinggi Muka Air (m)		Cs	Kontrol (Tanah pasir kelanauan $>$ <b>8,5</b> )
			Vertikal	Horizontal	Hulu	Hilir		
1	2017	Normal	10,19	18,28	97,70	94,277	4,757	Tidak Oke
2		Banjir	10,19	18,28	100,46	98,23	7,302	Tidak Oke
1	2024	Normal	102,50	31,60	59,60	55,60	28,258	Oke
2		Banjir	102,50	31,60	62,06	58,59	32,574	Oke

Selain pemeriksaan terhadap piping, pada penelitian ini juga dilakukan pemeriksaan terhadap deformasi dan overall stability yang terjadi pada desain bendung tahun 2017 dan 2024. Perbedaan pemodelan antara kedua desain tersebut selain dari geometri tubuh bendung, juga terdapat tambahan input hasil perhitungan Axial Skin Resistance dan Base Resistance untuk tiang pancang pada desain 2024. Hasil deformasi dan output program Plaxis setelah dilakukan pemodelan terhadap kedua desain seperti pada Gambar 5 dan Gambar 6. Terlihat hasil deformasi yang terjadi pada desain 2017 kondisi muka air banjir sebesar 3 cm dan desain 2024 pada kondisi yang sama sebesar 6,5 cm. Sedangkan total displacement yang terjadi seperti pada Gambar 8 terlihat bahwa total deformasi terbesar terjadi pada kondisi muka air banjir, kecuali untuk desain 2017 yang menunjukkan total displacement lebih besar pada kondisi muka air normal. Dimana hal ini dikarenakan struktur pada bagian hulu tidak dapat menahan tekanan air pada kondisi muka air normal, dibuktikan dengan tambahan pemodelan pada cross section bagian hulu dengan titik pertama (15,00;28,00) dan titik kedua (15,00;17,00) seperti terlihat pada Gambar 7.

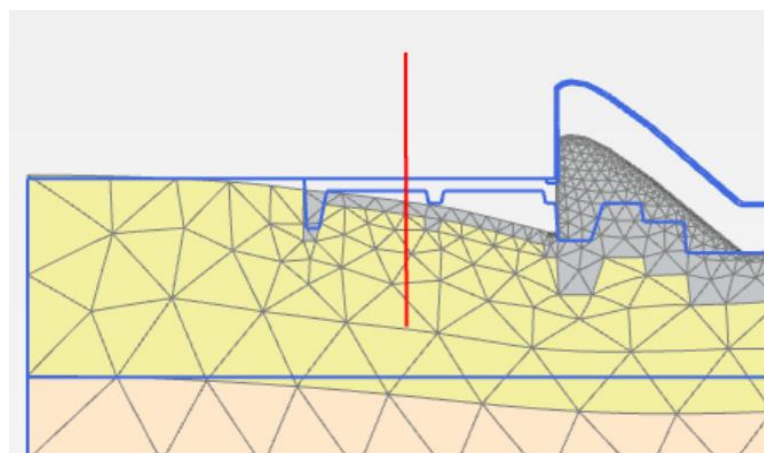


**Gambar 2. Deformed mesh pada Bendung 2017 Kondisi Muka Air Banjir**

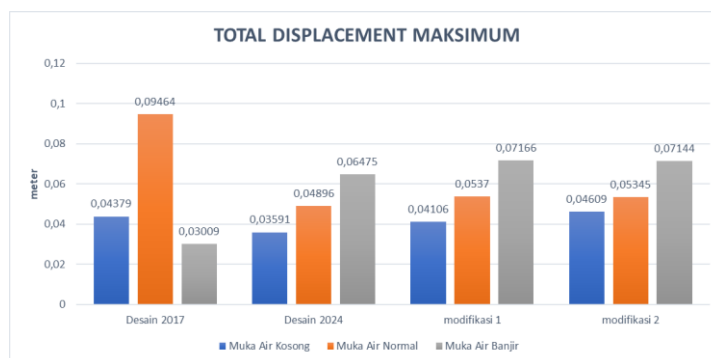


**Gambar 3. Deformed mesh pada Bendung 2024 Kondisi Muka Air Banjir**

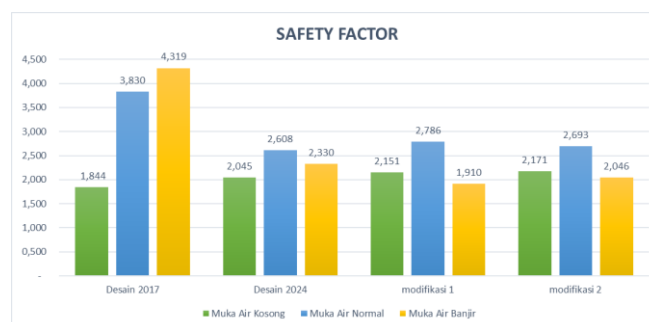
Adapun overall stability desain 2017 dan 2024 didapatkan hasil safety factor dengan nilai diatas 1,5 sehingga tidak perlu ditambah perkuatan. Namun desain tersebut dapat dilakukan optimasi untuk mendapatkan geometri terbaik serta mendapatkan desain yang efisien. Pemodelan selanjutnya memilih desain 2024 untuk dilakukan modifikasi dikarenakan secara perhitungan rembesan dan overall stability memenuhi angka keamanan yang disyaratkan.



**Gambar 4. Cross Section Hulu Pemodelan Desain**



Gambar 5. Perbandingan *Total Displacement* Keseluruhan Desain



Gambar 6. Perbandingan *Safety Factor* Keseluruhan Desain

## KESIMPULAN

This study comprehensively evaluated the stability, seepage, and cost efficiency of the Boreng Weir designs from 2017 and 2024, employing finite element modeling in Plaxis 2.0, Lane’s seepage analysis, and axial pile capacity calculations using Meyerhoff and Decourt methods. The results demonstrated that while both designs met stability requirements with safety factors exceeding 1.5, the 2017 design failed to satisfy the minimum Lane’s creep ratio (>8.5) for sandy loam soils, highlighting critical seepage risks. The 2024 design, incorporating 245 mini-piles, addressed this issue but incurred significantly higher costs. Optimization of the 2024 design through pile depth reduction (6m to 3m) and dimensional resizing (40×40 cm to 25×25 cm) yielded substantial cost savings (up to Rp884.5 million) while maintaining safety standards. These findings underscore the viability of modified pile configurations as a balanced solution for cost-effective and structurally sound weir rehabilitation in similar geotechnical contexts. Future studies should explore dynamic stability analysis under seismic loads, given Lumajang’s proximity to volcanic activity, to further validate the long-term resilience of optimized designs. Additionally, investigating alternative reinforcement materials (e.g., fiber-reinforced polymers) or techniques (e.g., soil nailing) could provide comparative insights into cost and performance. Field monitoring of the implemented modifications is also recommended to verify model predictions under real-world hydraulic and environmental conditions. Such advancements would enrich guidelines for sustainable infrastructure in disaster-prone regions with complex soil hydrology.

## DAFTAR PUSTAKA

- Chen, Y., Wang, L., Zhang, Q., & Li, H. (2021). Seepage analysis of earth dams using Lane's method under different soil conditions. *Geotechnical and Geological Engineering*, 39(5), 3547–3561. <https://doi.org/10.1007/s10706-021-01769-8>
- Decourt, L., & Quaresma, A. (1978). Koefisien tanah K dan koefisien selimut tiang  $\beta$ .
- Fachrie, S. M., Samsuar, S., & Achmad, M. (2019). Penilaian kinerja sistem irigasi utama daerah irigasi Bantimurung Kabupaten Maros. *Jurnal Agritechno*. <https://doi.org/10.20956/at.v12i1.187>
- Hove, M. Van, Barchia, M. F., Utama, S. P., Uker, D., & R, M. M. (2022). Analisis keberlanjutan produksi padi di lahan sawah daerah irigasi Rawa Air Hitam Bengkulu. *Naturalis: Jurnal Penelitian Pengelolaan Sumber Daya Alam dan Lingkungan*, 11(1). <https://doi.org/10.31186/naturalis.11.1.21162>
- Jumiati, J., Rumallang, A., Akbar, A., & Molla, S. (2023). Kelembagaan dalam pengelolaan daerah irigasi Kampili menurut perspektif keberlanjutan secara sosial, ekonomi dan lingkungan. *Agrikultura*, 34(1). <https://doi.org/10.24198/agrikultura.v34i1.41645>
- Jupri Berutu, A., Pranata, A., & Yetri, M. (2022). Proses sistem irigasi pada lahan jagung berbasis Arduino. *Jurnal Sistem Komputer Triguna Dharma (JURSIK TGD)*, 1(3). <https://doi.org/10.53513/jursik.v1i3.5278>
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Pekerjaan Rakyat. (2019). *Modul pengenalan sistem irigasi*. Kementerian Pekerjaan Umum dan Pekerjaan Rakyat.
- Kumar, R., & Sharma, R. K. (2019). Cost optimization of barrage foundation using modified pile dimensions. *Water Resources Management*, 33(12), 4113–4127. <https://doi.org/10.1007/s11269-019-02333-4>
- Larasati, P. D., Sayekti, R. W., & Soetopo, W. (2021). Studi optimasi air irigasi Bendungan Semantok untuk memaksimalkan luas layanan irigasi di Kabupaten Nganjuk. *Jurnal Teknologi dan Rekayasa Sumber Daya Air*, 1(1). <https://doi.org/10.21776/ub.jtresda.2021.001.01.29>
- Meyerhof, G. G. (1976). Bearing capacity and settlement of pile foundations. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 102(3), 197–228.
- Miftahul Walid, Hoiriyah, H., & Fikri, A. (2022). Pengembangan sistem irigasi pertanian berbasis Internet of Things (IoT). *Jurnal Mnemonic*, 5(1). <https://doi.org/10.36040/mnemonic.v5i1.4452>
- Naumar, A., Rahmat, & Djalir, N. (2021). Faktor penentu pengelolaan air irigasi untuk keberlanjutan ekonomi pertanian di Indonesia. *Jurnal Rekayasa*, 11(2). <https://doi.org/10.37037/jrftsp.v11i2.118>
- Setiadi, D., & Abdul Muhaemin, M. N. (2018). Penerapan Internet of Things (IoT) pada sistem monitoring irigasi (smart irigasi). *Infotronik: Jurnal Teknologi Informasi dan Elektronika*, 3(2). <https://doi.org/10.32897/infotronik.2018.3.2.108>
- Siregar, F. A. (2023). Pengembangan sistem pertanian berkelanjutan untuk mencapai keberlanjutan pangan. *Jurnal Universitas Medan Area*.
- Suriasih, E., Sriartha, I. P., & Citra, I. P. A. (2017). Pelaksanaan keberlanjutan sistem irigasi Embung Jurang Dao di Desa Mas-Mas Kecamatan Batukliang Utara Kabupaten Lombok Tengah. *Jurnal Pendidikan Geografi Undiksha*, 5(1). <https://doi.org/10.23887/jjpg.v5i1.20654>

Zhang, M., Liu, J., Chen, G., & Wang, Y. (2020). Stability analysis of concrete dams using finite element method with real-time deformation monitoring. *Journal of Hydraulic Engineering*, 146(3), 04020005. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001715](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001715)