

Evaluasi Rembesan dan Stabilitas Bendungan Pidekso Menggunakan Back Analysis Berbasis Data Instrumentasi

Nur Muhammad Aquana Akhsanul Huda¹, Mahendra Andiek Maulana², Trihanydio Rendy Satrya³

Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), Surabaya, Indonesia.

E-mail: aquanaakhsanul@gmail.com

Keywords:

Back Analysis; Embankmen
Dam; Geotechnical Parameters;
SEEP/W; SLOPE/W;

Abstract

The geotechnical parameters obtained from the initial site investigation may not accurately represent the actual condition of an embankment dam after reservoir impoundment and long-term operational loading. This study aims to determine the calibrated geotechnical parameters of Pidekso Dam through instrument-based back analysis and to evaluate their applicability to seepage and slope stability assessments. The analyses were conducted at cross-sections STA 0+180, STA 0+280, and STA 0+320 under reservoir water levels of +174.00 m, +185.00 m, and +186.67 m. The input data consisted of the initial geotechnical parameters, reservoir water levels, piezometer readings, pressure cell measurements, V-notch discharge records, and settlement monument data. The calibration process was performed in two stages by adjusting the hydraulic conductivity based on pore water pressure and seepage discharge trends, followed by calibration of the mechanical parameters based on effective stress, factor of safety, and the reasonableness of the predicted failure surface using SEEP/W and SLOPE/W. The calibrated core parameters obtained from the back analysis were $k = 1.65 \times 10^{-10}$ m/s, $\gamma_{sat} = 19.50$ kN/m³, $c' = 29.00$ kPa, and $\phi' = 24.00^\circ$. The results demonstrate that instrument-based back analysis provides more representative geotechnical parameters and can serve as a reliable basis for evaluating seepage behavior and slope stability of Pidekso Dam during its operational period.

Kata Kunci:

Back Analysis; Bendungan
Urugan; Parameter Geoteknik;
SEEP/W; SLOPE/W;

Abstrak

Parameter geoteknik hasil investigasi awal belum tentu merepresentasikan kondisi aktual bendungan urugan setelah mengalami penggenangan dan pembebanan selama masa operasi. Penelitian ini bertujuan memperoleh parameter geoteknik terkalibrasi Bendungan Pidekso melalui analisis balik (*back analysis*) berbasis data instrumentasi serta mengevaluasi kesesuaiannya terhadap kondisi rembesan dan stabilitas lereng. Analisis dilakukan pada penampang STA 0+180, STA 0+280, dan STA 0+320 dengan variasi elevasi muka air waduk +174,00 m, +185,00 m, dan +186,67 m. Data yang digunakan meliputi parameter geoteknik awal, elevasi muka air waduk, piezometer, *pressure cell*, V-notch, dan patok geser. Kalibrasi dilakukan secara bertahap melalui penyesuaian koefisien permeabilitas berdasarkan tekanan air pori dan kecenderungan debit rembesan, kemudian dilanjutkan dengan kalibrasi parameter mekanik berdasarkan tegangan efektif, faktor keamanan, dan kewajaran bidang longsoran menggunakan SEEP/W dan SLOPE/W. Hasil analisis balik menghasilkan parameter inti terkalibrasi berupa $k = 1,65 \times 10^{-10}$ m/det, $\gamma_{sat} = 19,50$ kN/m³, $c' = 29,00$ kPa, dan $\phi' = 24,00^\circ$. Hasil penelitian menunjukkan bahwa analisis balik berbasis data instrumentasi mampu

PENDAHULUAN

Bendungan urugan merupakan infrastruktur sumber daya air yang berperan penting dalam penyediaan air baku, irigasi, pengendalian banjir, dan pembangkit listrik (ICOLD, 2020; USBR, 2011). Keamanan bendungan selama masa operasi sangat dipengaruhi oleh kondisi geoteknik material penyusunnya, terutama yang berkaitan dengan rembesan dan distribusi tekanan air pori (Fell et al., 2015). Mengingat bendungan merupakan infrastruktur dengan umur layanan yang panjang dan tingkat risiko yang tinggi apabila terjadi penurunan kinerja geoteknik, evaluasi keselamatan bendungan perlu dilakukan secara berkala berdasarkan kondisi aktual di lapangan. Perubahan kondisi hidraulik selama operasi dapat memengaruhi karakteristik material sehingga parameter geoteknik hasil investigasi awal belum tentu mampu merepresentasikan kondisi aktual bendungan (Duncan, 2000).

Seiring bertambahnya umur layanan bendungan, parameter geoteknik dapat berubah akibat proses konsolidasi, perubahan kadar air, maupun pembebanan jangka panjang (Duncan, 2000; Fell et al., 2015). Penggunaan parameter desain tanpa mempertimbangkan perubahan tersebut berpotensi menghasilkan perbedaan antara hasil analisis numerik dan kondisi aktual di lapangan (Alonso et al., 1990). Oleh karena itu, diperlukan pendekatan yang mampu mengidentifikasi parameter geoteknik aktual berdasarkan respons bendungan selama masa operasi sehingga evaluasi keamanan dapat dilakukan secara lebih andal.

Salah satu metode yang banyak digunakan adalah *back analysis*, yaitu proses kalibrasi parameter geoteknik melalui perbandingan hasil pemodelan numerik dengan data monitoring lapangan (Griffiths & Lane, 1999). Data instrumentasi seperti piezometer, *pressure cell*, *V-notch*, dan patok geser memberikan informasi mengenai tekanan air pori, deformasi, serta debit rembesan sehingga dapat digunakan sebagai dasar dalam memperoleh parameter material yang lebih representatif (Dunnicliff, 1988). Pendekatan ini mampu meningkatkan tingkat keakuratan model numerik dalam menggambarkan kondisi aktual bendungan (Fell et al., 2015).

Beberapa penelitian terdahulu menunjukkan bahwa penerapan *back analysis* mampu meningkatkan kesesuaian antara hasil pemodelan numerik dan kondisi aktual bendungan. Duncan (2000) menjelaskan bahwa perubahan karakteristik geoteknik akibat proses konsolidasi dan pembebanan jangka panjang menyebabkan parameter hasil investigasi awal perlu diperbarui agar analisis rembesan dan stabilitas lereng menjadi lebih representatif. Fell et al. (2015) menyatakan bahwa pemanfaatan data instrumentasi secara berkelanjutan dapat meningkatkan keandalan evaluasi keselamatan bendungan selama masa operasi. Foster et al. (2000) menunjukkan bahwa salah satu penyebab utama kegagalan bendungan urugan adalah rembesan yang tidak terkendali akibat ketidaksesuaian karakteristik material terhadap kondisi aktual di lapangan. Selain itu, Griffiths dan Lane (1999) menjelaskan bahwa kalibrasi parameter geoteknik melalui *back analysis* mampu meningkatkan akurasi analisis stabilitas lereng berbasis metode elemen hingga dibandingkan penggunaan parameter investigasi awal tanpa proses kalibrasi.

Meskipun demikian, sebagian besar penelitian tersebut masih berfokus pada evaluasi rembesan atau stabilitas lereng secara terpisah serta belum mengintegrasikan berbagai jenis data instrumentasi dalam proses kalibrasi parameter geoteknik. Selain itu, penerapan *back analysis* pada bendungan urugan di Indonesia yang memanfaatkan kombinasi data piezometer, *pressure cell*, *V-notch*, dan patok geser masih relatif terbatas, khususnya pada Bendungan

Pidekso. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa masih diperlukan penelitian yang mampu mengintegrasikan data instrumentasi dengan pemodelan numerik untuk memperoleh parameter geoteknik yang lebih representatif terhadap kondisi aktual bendungan.

Bendungan Pidekso merupakan bendungan urugan zonal yang telah dilengkapi sistem instrumentasi untuk memantau perilaku bendungan selama masa operasi. Penelitian ini menawarkan kebaruan berupa integrasi data piezometer, *pressure cell*, *V-notch*, dan patok geser dalam proses *back analysis* untuk mengkalibrasi parameter hidraulik dan mekanik secara bertahap, kemudian memvalidasinya melalui analisis rembesan menggunakan SEEP/W dan analisis stabilitas lereng menggunakan SLOPE/W. Dengan pendekatan tersebut diharapkan diperoleh parameter geoteknik aktual yang lebih representatif sehingga dapat meningkatkan kesesuaian model numerik terhadap kondisi lapangan.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan melakukan *back analysis* berdasarkan data instrumentasi dan pemodelan numerik pada penampang STA 0+180, STA 0+280, dan STA 0+320 untuk memperoleh parameter geoteknik aktual Bendungan Pidekso. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi dasar dalam kegiatan monitoring berkala, pembaruan parameter desain, serta pengambilan keputusan teknis dalam pengelolaan keselamatan bendungan selama masa operasi.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif melalui analisis numerik yang dipadukan dengan data hasil monitoring Bendungan Pidekso, Kabupaten Wonogiri. Analisis dilakukan pada penampang STA 0+180, STA 0+280, dan STA 0+320 yang dipilih karena mewakili kondisi geometri, material, dan ketersediaan data instrumentasi bendungan.

Data penelitian terdiri atas data primer berupa hasil monitoring piezometer, *pressure cell*, *V-notch*, dan patok geser, serta data sekunder yang meliputi geometri bendungan, zonasi material, parameter geoteknik hasil investigasi awal, dan elevasi muka air waduk. Seluruh data digunakan sebagai dasar dalam pemodelan numerik dan proses *back analysis*.

Analisis rembesan dilakukan menggunakan perangkat lunak **SEEP/W** berbasis **Finite Element Method (FEM)** untuk memperoleh distribusi tekanan air pori pada tubuh bendungan (GeoStudio, 2024; Krahn, 2004). Pemodelan awal menggunakan parameter geoteknik hasil investigasi tanah sebagai kondisi awal. Selanjutnya dilakukan *back analysis* dengan membandingkan hasil simulasi terhadap data pembacaan piezometer. Parameter yang dikalibrasi meliputi koefisien permeabilitas (k), kohesi (c'), dan sudut geser dalam (ϕ'), dengan **koefisien permeabilitas sebagai parameter yang paling sensitif** karena paling berpengaruh terhadap distribusi tekanan air pori hasil analisis rembesan. Kalibrasi dilakukan secara iteratif (*trial and error*) hingga diperoleh hasil simulasi yang paling sesuai dengan data monitoring lapangan (Duncan, 2000; Fell et al., 2015).

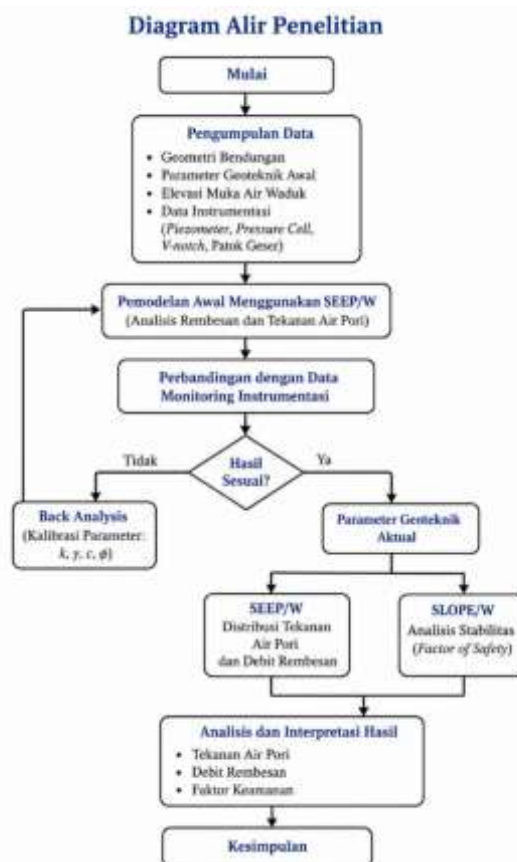
Kriteria konvergensi ditetapkan ketika perubahan nilai parameter antar iterasi tidak lagi menghasilkan perubahan yang signifikan terhadap distribusi tekanan air pori hasil simulasi, serta selisih antara hasil simulasi dan data piezometer telah memenuhi batas toleransi. Tingkat kesesuaian model dievaluasi menggunakan **Mean Absolute Percentage Error (MAPE)**, dan proses kalibrasi dinyatakan memenuhi apabila diperoleh **nilai MAPE kurang dari 5%**. Parameter hasil kalibrasi yang memenuhi kriteria tersebut ditetapkan sebagai parameter geoteknik aktual Bendungan Pidekso.

Tahapan penelitian ditunjukkan pada **Gambar 2.1**. Penelitian diawali dengan pengumpulan data geometri bendungan, parameter geoteknik hasil investigasi awal, elevasi

muka air waduk, serta data instrumentasi yang terdiri atas piezometer, *pressure cell*, *V-notch*, dan patok geser. Selanjutnya dilakukan pemodelan numerik menggunakan perangkat lunak SEEP/W dengan parameter awal. Hasil simulasi distribusi tekanan air pori dibandingkan dengan data hasil pembacaan piezometer. Apabila terdapat perbedaan yang signifikan, dilakukan proses *back analysis* melalui penyesuaian parameter geoteknik secara iteratif hingga diperoleh kesesuaian antara hasil pemodelan dan data monitoring (Fell et al., 2015). Parameter hasil kalibrasi selanjutnya ditetapkan sebagai parameter geoteknik aktual Bendungan Pidekso dan digunakan sebagai dasar interpretasi kondisi bendungan.

Proses kalibrasi dilakukan secara iteratif (*trial and error*) dengan menyesuaikan nilai koefisien permeabilitas serta parameter mekanik hingga diperoleh kesesuaian terbaik antara hasil simulasi dan data instrumentasi. Tingkat kesesuaian dievaluasi berdasarkan persentase selisih tekanan air pori hasil simulasi terhadap data piezometer. Kalibrasi dianggap memenuhi kriteria apabila selisih hasil simulasi berada di bawah batas toleransi 5%.

Parameter geoteknik hasil *back analysis* selanjutnya digunakan sebagai data masukan pada perangkat lunak **SLOPE/W** untuk mengevaluasi pengaruh parameter hasil kalibrasi terhadap stabilitas lereng bendungan. Analisis stabilitas dilakukan menggunakan distribusi tekanan air pori yang diperoleh dari hasil analisis SEEP/W sehingga kondisi hidraulik yang digunakan pada analisis stabilitas sesuai dengan kondisi aktual bendungan. Nilai faktor keamanan (*Factor of Safety*) hasil analisis selanjutnya dibandingkan dengan model yang menggunakan parameter investigasi awal untuk mengevaluasi efektivitas parameter hasil *back analysis* dalam merepresentasikan kondisi bendungan selama masa operasi (GeoStudio, 2024; Krahn, 2004).



Gambar 1 Diagram Alir

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Analisis Balik (*Back Analysis*) Parameter Geoteknik

Proses *back analysis* dilakukan melalui kalibrasi model numerik terhadap data instrumentasi Bendungan Pidekso yang meliputi pembacaan piezometer, *pressure cell*, dan *V-notch*. Kalibrasi dilakukan secara bertahap dengan menyesuaikan parameter geoteknik hingga distribusi tekanan air pori hasil simulasi mendekati hasil pengamatan di lapangan. Pendekatan ini menghasilkan parameter geoteknik aktual yang lebih representatif dibandingkan parameter hasil investigasi awal karena telah mempertimbangkan kondisi bendungan setelah mengalami proses operasi dalam jangka waktu tertentu.

Hasil kalibrasi menunjukkan bahwa parameter material inti bendungan mengalami perubahan dibandingkan kondisi desain awal. Perubahan tersebut terutama terjadi pada nilai koefisien permeabilitas, kohesi, dan sudut geser dalam yang merupakan parameter paling sensitif dalam analisis rembesan (Krahn, 2004). Penurunan nilai permeabilitas mengindikasikan bahwa material inti mengalami proses konsolidasi sehingga kemampuan tanah meloloskan air menjadi lebih kecil dibandingkan saat awal konstruksi (Duncan, 2000). Sementara itu, peningkatan kohesi dan sudut geser dalam menunjukkan adanya peningkatan kekuatan material akibat proses densifikasi selama masa operasi bendungan (Terzaghi, 1943).

Penurunan nilai permeabilitas tersebut menyebabkan garis freatik hasil pemodelan berada tetap di dalam zona inti dan sistem filter bendungan. Kondisi ini menunjukkan bahwa jalur rembesan masih dapat dikendalikan sehingga tidak berkembang menuju lereng hilir yang berpotensi memicu terjadinya piping. Selain itu, distribusi tekanan air pori memperlihatkan bahwa tekanan air tertinggi terkonsentrasi pada bagian hulu inti bendungan, kemudian berangsur menurun menuju sistem drainase di sisi hilir. Pola tersebut sesuai dengan karakteristik bendungan urugan zonal, di mana inti kedap air berfungsi mengurangi gradien hidraulik sedangkan filter dan drainase mengendalikan aliran rembesan agar tetap aman (Fell et al., 2015; USBR, 2011).

Berdasarkan hasil analisis tersebut, zona yang perlu mendapat perhatian utama dalam kegiatan monitoring adalah area transisi antara inti bendungan, filter, dan pondasi, karena perubahan distribusi tekanan air pori pada zona tersebut dapat memengaruhi stabilitas lereng maupun potensi peningkatan debit rembesan. Selama garis freatik tetap berada di dalam inti dan tidak memotong lereng hilir, kondisi rembesan masih menunjukkan perilaku yang aman.

Table 1. Perbandingan Parameter Geoteknik Awal dan Parameter Aktual Hasil *Back Analysis*

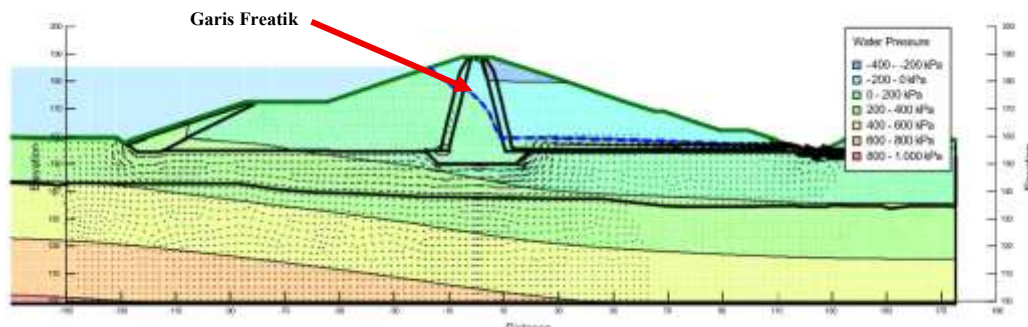
Parameter	Nilai Awal	Nilai Aktual
Kohesi (c)	22,00 Kpa	29,00 kPa
Sudut geser dalam (ϕ)	21,00°	24,00°
<i>Void ratio</i> (e_0)	0,832	0,781
<i>Compression index</i> (C_c)	0,359	0,342
Permeabilitas (k)	$2,00 \times 10^{-9}$ m/s	$1,65 \times 10^{-10}$ m/s
Berat isi jenuh (γ_{sat})	18,50 kN/m ³	19,50 kN/m ³

Pemodelan Numerik Menggunakan Parameter Aktual

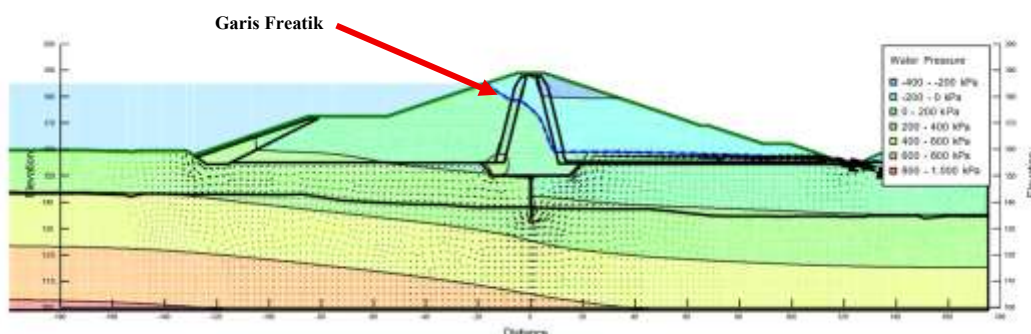
Parameter geoteknik hasil *back analysis* selanjutnya digunakan sebagai data masukan pada pemodelan numerik menggunakan perangkat lunak SEEP/W (GeoStudio, 2024).

Pemodelan dilakukan pada tiga kondisi elevasi muka air waduk, yaitu elevasi +174,00 m, +185,00 m, dan +186,67 m untuk mengevaluasi perubahan distribusi tekanan air pori dan debit rembesan pada tubuh bendungan.

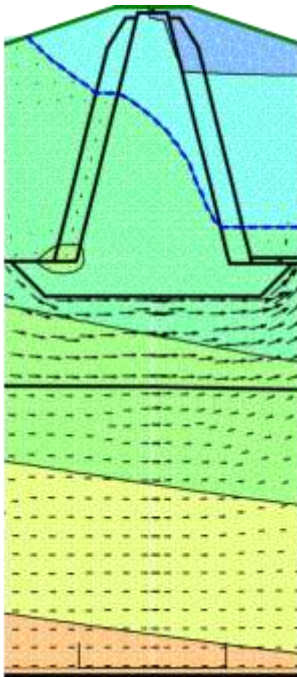
Hasil simulasi menunjukkan bahwa distribusi garis freatik masih berada di dalam inti bendungan sehingga aliran rembesan dapat dikendalikan oleh sistem filter dan drainase. Seiring meningkatnya elevasi muka air waduk, distribusi tekanan air pori juga meningkat, namun masih berada dalam kondisi yang dapat dikendalikan oleh sistem kedap bendungan. Hal ini menunjukkan bahwa parameter hasil *back analysis* mampu merepresentasikan kondisi aktual Bendungan Pidekso dengan lebih baik dibandingkan parameter desain awal.



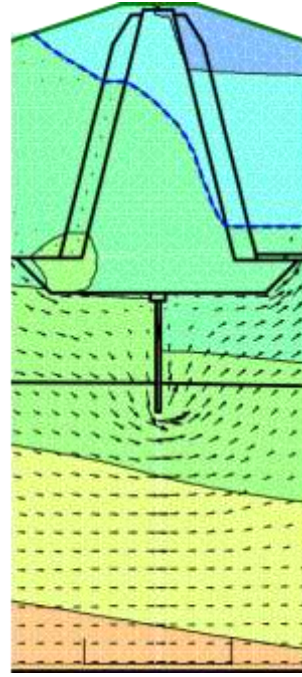
Gambar 2 Aliran rembesan dan kontur tekanan air pada bendungan tanpa sistim *cutoff* elevasi +185 m di STA 0+180



Gambar 3 Aliran rembesan dan kontur tekanan air pada bendungan dengan *cutoff* elavesi +185 m di STA 0+180

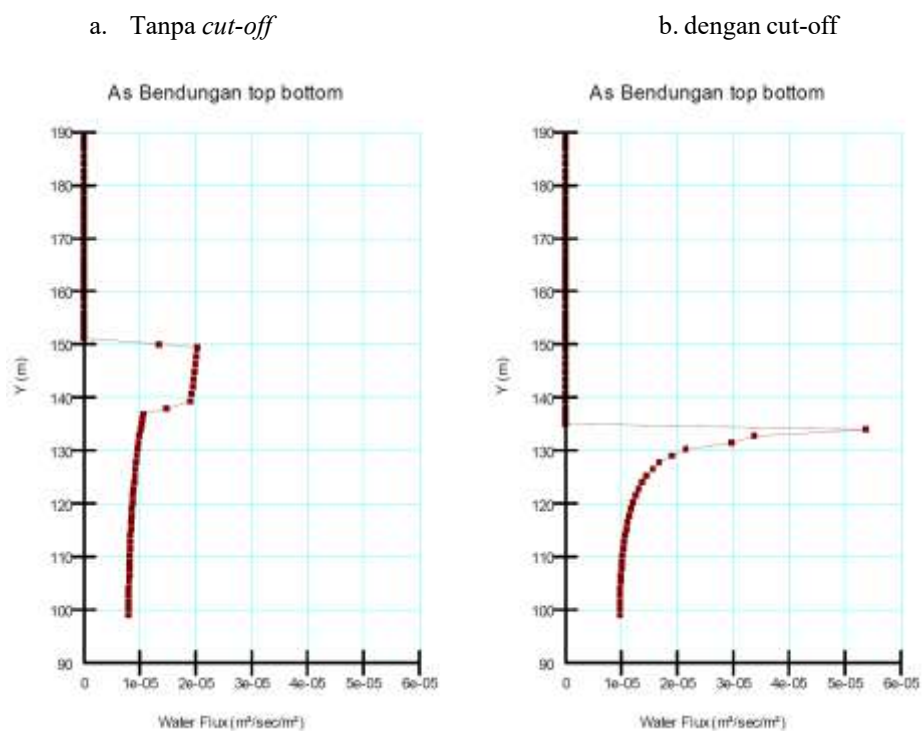


a. Tanpa cut-off

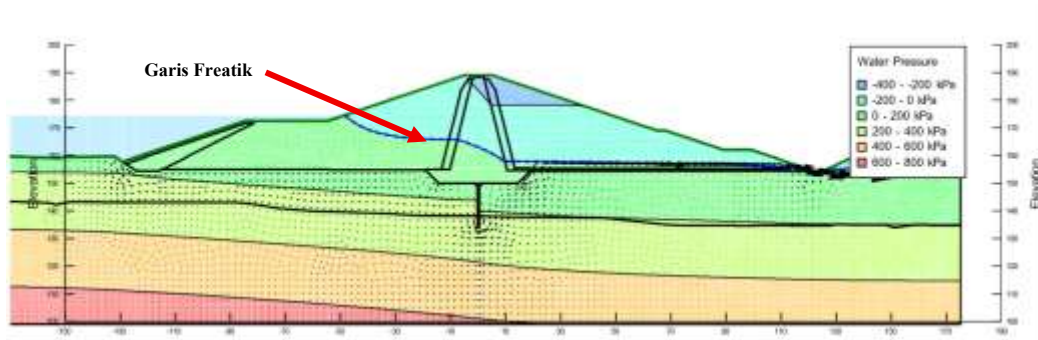


b. dengan cut-off

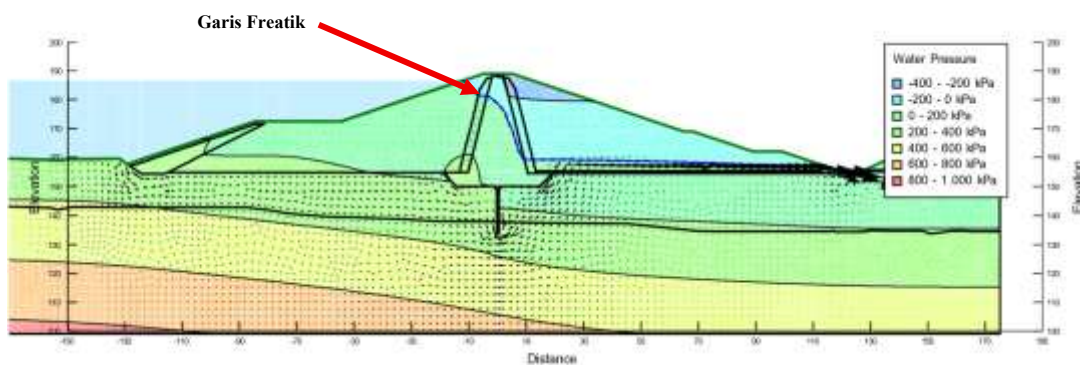
Gambar 4 Pengaruh *cut-off* dibawah inti bendungan pada elevasi +185.00 m di STA 0+180.



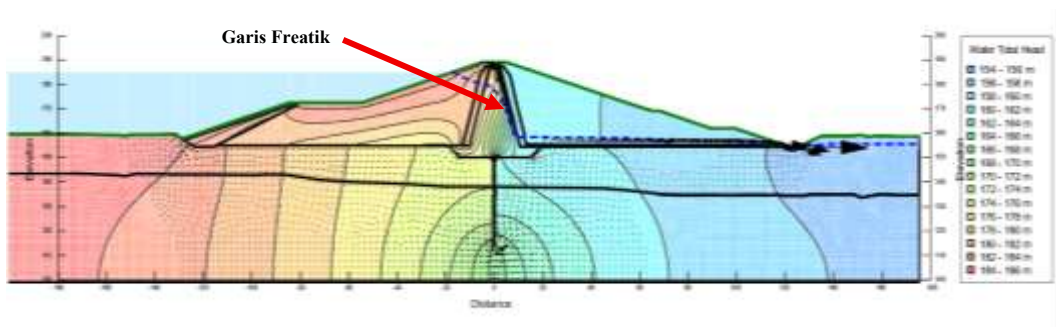
Gambar 5 Pengaruh *cut off* pada rembesan bendungan untuk elevesi +185.00 m di STA 0+180



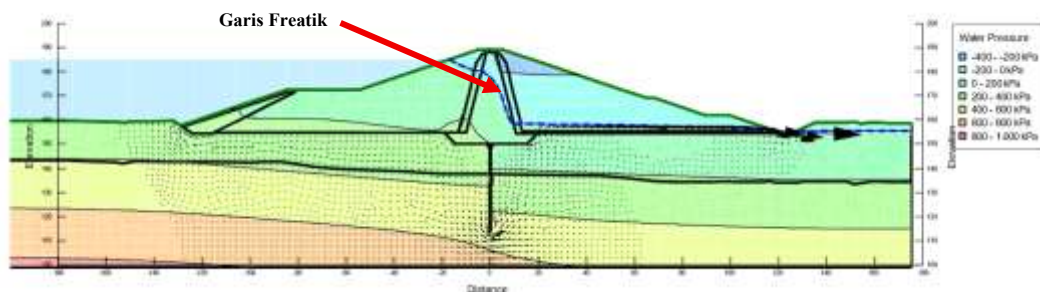
Gambar 6 Arah aliran rembesan dan kontur tekanan air, elevesi reservoir +174 m di STA 0+180 dengan *cut-off* 15 m.



Gambar 7 Arah aliran rembesan dan kontur tekanan air, elevesi reservoir +174 m di STA 0+180 dengan *cut-off* 15 m.



Gambar 8 Kontur equipotensial, reservoir +186,67 m di STA 0+180 dengan *cut off* 35 m



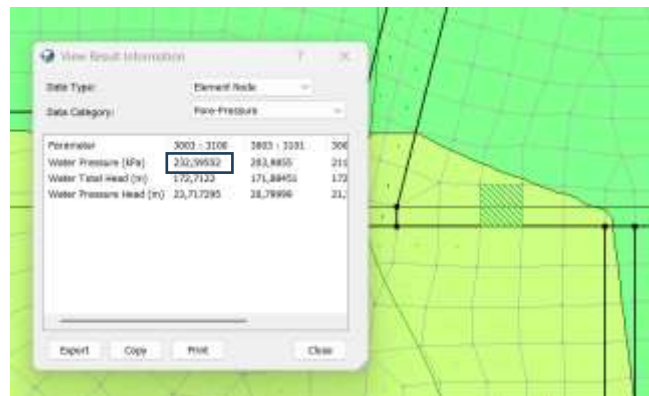
Gambar 9 Kontur tekanan air, reservoir +186,67 m di STA 0+180 dengan *cut off* 35 m

Validasi Model Berdasarkan Data Instrumentasi

Validasi dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi numerik terhadap data hasil monitoring lapangan (Dunnicliff, 1988). Data piezometer digunakan sebagai acuan utama

dalam mengevaluasi distribusi tekanan air pori, sedangkan data *V-notch* digunakan untuk mengevaluasi debit rembesan yang keluar melalui sistem drainase bendungan. Proses kalibrasi dilakukan secara iteratif hingga diperoleh tingkat kesesuaian yang memadai antara hasil simulasi dan hasil monitoring.

Hasil validasi menunjukkan bahwa parameter hasil *back analysis* menghasilkan pola distribusi tekanan air pori yang lebih mendekati kondisi aktual dibandingkan parameter hasil investigasi awal. Hal tersebut menunjukkan bahwa penggunaan data instrumentasi sebagai dasar kalibrasi mampu meningkatkan reliabilitas model numerik dalam menggambarkan perilaku bendungan selama masa operasi (Fell et al., 2015). Dengan demikian, parameter aktual yang diperoleh dapat digunakan sebagai dasar evaluasi kondisi geoteknik secara lebih realistis.



Gambar 10 Tekanan air pori hasil simulasi model dengan parameter aktual STA 180 elevasi 174.5

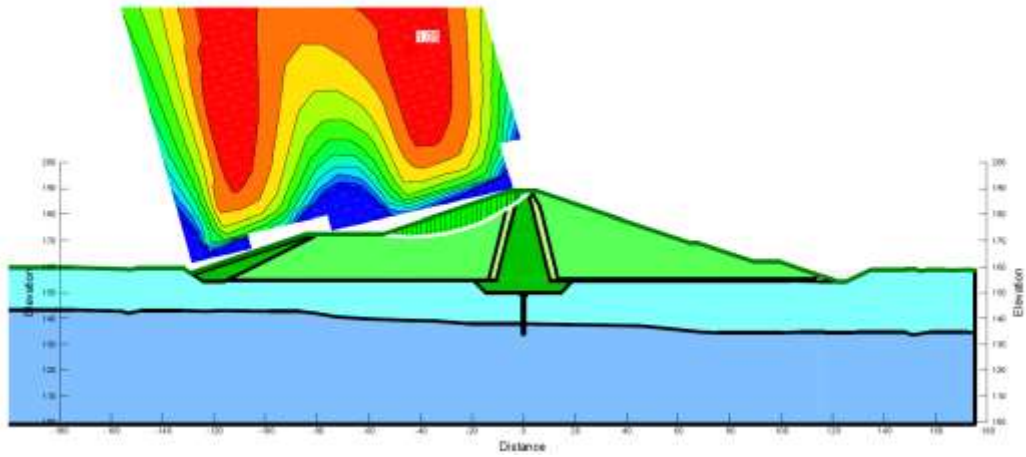
Table 2 Perbandingan Tekanan Air Pori Piezometer dan Hasil Simulasi Model *Back Analysis*

STA	Piezometer	Model Back Analysis	Koreksi	
180	230,58 Kpa	232,60 kPa	0,87 %	AMAN

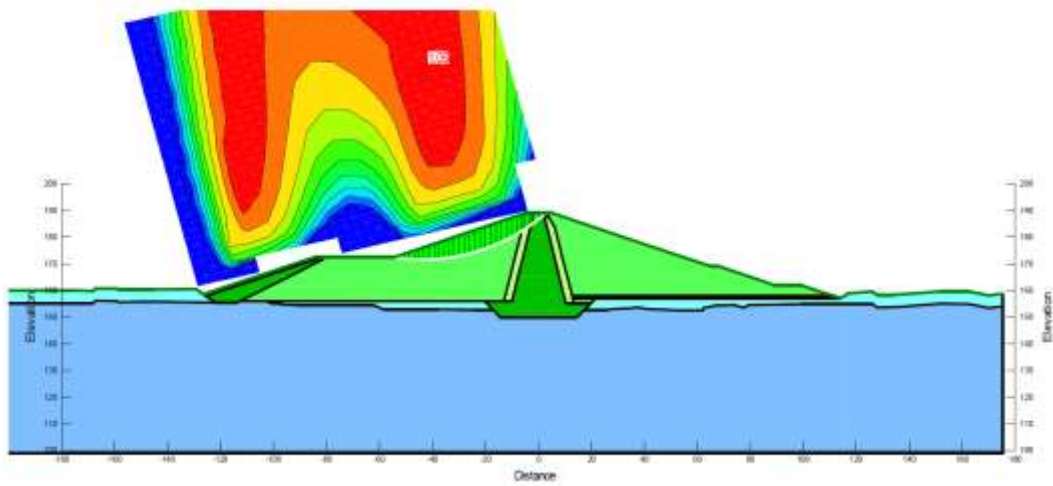
Validasi model pada penelitian ini dilakukan menggunakan data piezometer sebagai acuan utama karena instrumen tersebut secara langsung merepresentasikan distribusi tekanan air pori di dalam tubuh bendungan. Meskipun hasil kalibrasi menunjukkan tingkat kesesuaian yang baik antara hasil simulasi dan data lapangan, jumlah titik validasi masih terbatas sehingga distribusi tekanan air pori pada seluruh zona bendungan belum dapat diverifikasi secara menyeluruh. Penambahan jumlah titik pembacaan piezometer maupun instrumen lain seperti pressure cell dan observation well pada penelitian berikutnya akan meningkatkan tingkat kepercayaan hasil kalibrasi model numerik.

Validasi Parameter Geoteknik Menggunakan SLOPE/W

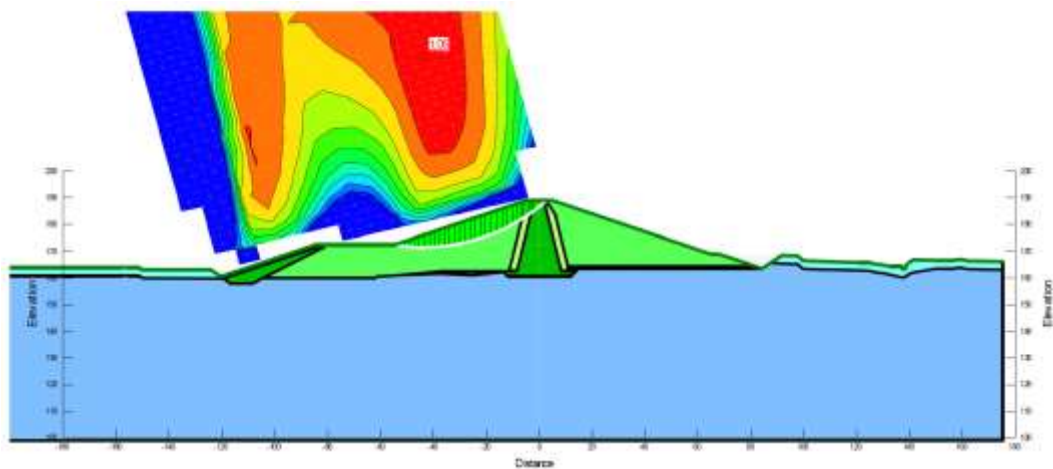
Setelah parameter geoteknik aktual diperoleh melalui proses *back analysis*, parameter tersebut digunakan sebagai data masukan dalam analisis stabilitas menggunakan perangkat lunak SLOPE/W. Distribusi tekanan air pori yang dihasilkan dari pemodelan SEEP/W diintegrasikan ke dalam analisis stabilitas sehingga kondisi hidraulik yang digunakan sesuai dengan kondisi aktual bendungan. Pendekatan ini memungkinkan evaluasi pengaruh perubahan parameter geoteknik terhadap nilai faktor keamanan lereng bendungan.



Gambar 11 Stabilitas lereng saat reservoir kosong di sisi *upstream* STA 0+180, pada kondisi gempa MDE $Y/H = 1$



Gambar 12 Stabilitas lereng tanpa air sisi *upstream* STA 0+280, gempa MDE $Y/H = 1$



Gambar 13 Stabilitas lereng tanpa air sisi *upstream* STA 0+320, gempa MDE $Y/H = 1$

Hasil analisis menunjukkan bahwa penggunaan parameter geoteknik hasil *back analysis* menghasilkan nilai faktor keamanan yang berbeda dibandingkan model yang menggunakan parameter investigasi awal. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa parameter hasil kalibrasi mampu menggambarkan karakteristik material bendungan secara lebih representatif sehingga hasil analisis stabilitas menjadi lebih mendekati kondisi aktual. Dengan demikian, parameter hasil *back analysis* tidak hanya meningkatkan kesesuaian analisis rembesan, tetapi juga memberikan dasar yang lebih andal dalam evaluasi stabilitas bendungan.

Tabel 3 Perbandingan Faktor Keamanan Menggunakan Parameter Awal dan Parameter Hasil *Back Analysis*

STA	FK Awal	FK Aktual
0+180	1,18	1,24
0+280	1,21	1,27
0+320	1,16	1,22

Perubahan Parameter Geoteknik Hasil *Back Analysis*

Hasil *back analysis* menunjukkan bahwa koefisien permeabilitas material inti menurun dari $2,19 \times 10^{-9}$ m/s menjadi $1,65 \times 10^{-10}$ m/s, atau mengalami penurunan sebesar **24,66%**. Selain itu, nilai kohesi meningkat dari **25,70 kPa** menjadi **29,00 kPa**, sedangkan sudut geser dalam meningkat dari **22,31°** menjadi **24,00°**. Perubahan tersebut mengindikasikan bahwa material inti bendungan telah mengalami proses konsolidasi dan penyesuaian struktur tanah sehingga memiliki karakteristik mekanik yang lebih baik dibandingkan kondisi desain awal (Duncan, 2000).

Penurunan permeabilitas menyebabkan debit rembesan yang dihitung melalui model numerik menjadi lebih kecil dibandingkan model awal. Hasil simulasi menunjukkan penurunan debit rembesan sebesar **11,87%** pada STA 0+180, **11,97%** pada STA 0+280, dan **12,40%** pada STA 0+320. Penurunan tersebut menunjukkan bahwa parameter aktual mampu memberikan estimasi perilaku hidrolik bendungan yang lebih sesuai dengan kondisi lapangan.

Tabel 4 Perbandingan Debit Rembesan Model Awal dan Model Aktual.

STA	Q Awal ($\times 10^{-6}$)	Q Aktual ($\times 10^{-6}$)	Penurunan
0+180	6,15	5,42	11,87%
0+280	5,85	5,15	11,97%
0+320	6,05	5,30	12,40%

Hasil penelitian menunjukkan bahwa pendekatan *back analysis* berbasis data instrumentasi mampu meningkatkan representasi model numerik terhadap kondisi aktual Bendungan Pidekso (Fell et al., 2015). Dibandingkan penggunaan parameter investigasi awal, parameter hasil kalibrasi menghasilkan distribusi tekanan air pori dan debit rembesan yang lebih mendekati hasil monitoring lapangan (Duncan, 2000). Hal ini menunjukkan bahwa perubahan karakteristik material selama masa operasi perlu diperhitungkan dalam evaluasi bendungan agar hasil analisis lebih akurat (Griffiths & Lane, 1999).

Perubahan parameter geoteknik yang diperoleh melalui *back analysis* menunjukkan bahwa proses konsolidasi dan densifikasi material inti memberikan pengaruh terhadap karakteristik hidrolik maupun mekanik bendungan (Terzaghi, 1943). Penggunaan parameter hasil *back analysis* pada analisis stabilitas menggunakan SLOPE/W menunjukkan bahwa

perubahan karakteristik material tidak hanya memengaruhi distribusi tekanan air pori, tetapi juga memengaruhi nilai faktor keamanan lereng bendungan. Integrasi hasil analisis SEEP/W dan SLOPE/W menghasilkan evaluasi yang lebih komprehensif karena kondisi hidraulik yang digunakan dalam analisis stabilitas berasal dari parameter yang telah dikalibrasi berdasarkan data instrumentasi. Pendekatan ini meningkatkan keandalan evaluasi perilaku bendungan dibandingkan penggunaan parameter investigasi awal tanpa proses kalibrasi. Kondisi tersebut sejalan dengan konsep bahwa parameter tanah dapat berubah selama masa operasi akibat interaksi jangka panjang antara tanah dan air (Duncan, 2000). Oleh karena itu, penggunaan parameter hasil *back analysis* lebih disarankan dalam evaluasi bendungan yang telah beroperasi dibandingkan hanya mengandalkan parameter hasil investigasi awal (Fell et al., 2015).

Kontribusi utama penelitian ini terletak pada integrasi data instrumentasi dengan pemodelan numerik melalui proses *back analysis*. Pendekatan tersebut menghasilkan parameter geoteknik aktual yang tidak hanya meningkatkan tingkat kesesuaian model numerik, tetapi juga dapat digunakan sebagai dasar evaluasi kondisi bendungan secara berkelanjutan. Dengan demikian, *back analysis* menjadi metode yang efektif dalam mendukung kegiatan monitoring dan pengelolaan keselamatan bendungan.

Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian (Fell et al., 2015) yang menyatakan bahwa proses *back analysis* berbasis data instrumentasi mampu menghasilkan parameter geoteknik yang lebih representatif dibandingkan penggunaan parameter investigasi awal. Penelitian (Griffiths dan Lane, 1999) juga menunjukkan bahwa penggunaan parameter hasil kalibrasi meningkatkan akurasi analisis stabilitas berbasis metode elemen hingga karena kondisi hidraulik yang digunakan lebih mendekati kondisi aktual di lapangan.

Meskipun demikian, penelitian ini masih memiliki beberapa keterbatasan. Proses *back analysis* dilakukan menggunakan pendekatan trial and error sehingga hasil parameter sangat dipengaruhi oleh pengalaman analis dalam menentukan parameter yang paling sesuai. Selain itu, model numerik menggunakan asumsi kondisi dua dimensi (2D) sehingga variasi geometri maupun heterogenitas material pada arah memanjang bendungan belum sepenuhnya terwakili. Ketidakpastian sifat material tanah akibat variasi spasial juga masih menjadi salah satu sumber ketidakpastian dalam proses kalibrasi.

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa pendekatan *back analysis* berbasis data instrumentasi mampu menghasilkan parameter geoteknik Bendungan Pidekso yang lebih representatif dibandingkan parameter hasil investigasi awal. Hasil kalibrasi menunjukkan bahwa koefisien permeabilitas material inti menurun dari $2,19 \times 10^{-9}$ m/s menjadi $1,65 \times 10^{-10}$ m/s, atau mengalami penurunan sebesar 24,66%. Selain itu, nilai kohesi meningkat dari 25,70 kPa menjadi 29,00 kPa, sedangkan sudut geser dalam meningkat dari $22,31^\circ$ menjadi $24,00^\circ$, yang mengindikasikan peningkatan karakteristik mekanik material akibat proses konsolidasi selama masa operasi bendungan.

Parameter hasil *back analysis* menghasilkan evaluasi rembesan dan stabilitas yang lebih mendekati kondisi aktual bendungan. Nilai faktor keamanan (*Factor of Safety*) meningkat dari 1,18 menjadi 1,24 pada STA 0+180, dari 1,21 menjadi 1,27 pada STA 0+280, dan dari 1,16 menjadi 1,22 pada STA 0+320. Sementara itu, debit rembesan hasil simulasi mengalami

penurunan sebesar 11,87% pada STA 0+180, 11,97% pada STA 0+280, dan 12,40% pada STA 0+320 dibandingkan model yang menggunakan parameter investigasi awal.

Hasil penelitian menegaskan bahwa integrasi data instrumentasi dengan pemodelan numerik melalui *back analysis* merupakan metode yang efektif untuk memperbarui parameter geoteknik bendungan urugan yang telah beroperasi. Parameter hasil kalibrasi dapat digunakan sebagai dasar dalam evaluasi rembesan, analisis stabilitas lereng, kegiatan monitoring berkala, pembaruan parameter desain, serta pengambilan keputusan teknis dalam pengelolaan keselamatan Bendungan Pidekso secara berkelanjutan.

REFERENSI

- Alonso, E. E., Gens, A., & Josa, A. (1990). A constitutive model for partially saturated soils. *Géotechnique*, 40(3), 405–430.
- Badan Standardisasi Nasional. (2017). SNI 8460:2017 Persyaratan Perancangan Geoteknik. Badan Standardisasi Nasional.
- Casagrande, A. (1937). Seepage Through Dams. *Journal of the New England Water Works Association*.
- Duncan, J. M. (2000). Factors of Safety and Reliability in Geotechnical Engineering. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126(4), 307–316.
- Dunnicliff, J. (1988). *Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance*. John Wiley & Sons.
- Fell, R., MacGregor, P., Stapledon, D., Bell, G., & Foster, M. (2015). *Geotechnical Engineering of Dams* (2nd ed.). CRC Press.
- Foster, M., Fell, R., & Spannagle, M. (2000). The Statistics of Embankment Dam Failures and Accidents. *Canadian Geotechnical Journal*, 37(5), 1000–1024.
- Fredlund, D. G., & Rahardjo, H. (1993). *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. John Wiley & Sons.
- Fredlund, D. G., Xing, A., & Huang, S. (1994). Predicting the Permeability Function for Unsaturated Soils Using the Soil-Water Characteristic Curve. *Canadian Geotechnical Journal*, 31(4), 533–546.
- Geo-Slope International Ltd. (2024). *GeoStudio 2024 Engineering Methodology*. Calgary, Canada.
- Geo-Slope International Ltd. (2024). *SEEP/W Theory Manual*. Calgary, Canada.
- Geo-Slope International Ltd. (2024). *SEEP/W User's Guide*. Calgary, Canada.
- Geo-Slope International Ltd. (2024). *SLOPE/W Theory Manual*. Calgary, Canada.
- Geo-Slope International Ltd. (2024). *SLOPE/W User's Guide*. Calgary, Canada.
- Griffiths, D. V., & Lane, P. A. (1999). Slope Stability Analysis by Finite Elements. *Géotechnique*, 49(3), 387–403.
- ICOLD. (2020). *Bulletin on Dam Safety Management*. International Commission on Large Dams.
- ICOLD. (2022). *Bulletin on Dam Safety Management*. International Commission on Large Dams.
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. (2021). *Pedoman Operasi, Pemeliharaan, dan Pemantauan Keselamatan Bendungan*. Direktorat Jenderal Sumber Daya Air.

- Krahn, J. (2004). Stability Modeling with SLOPE/W. Geo-Slope International Ltd.
- Morris, M., Hassan, M., & Vaskinn, K. (2008). Improving the Safety of Earth Dams. CRC Press.
- Ng, C. W. W., & Menzies, B. (2007). Advanced Unsaturated Soil Mechanics and Engineering. CRC Press.
- Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 37 Tahun 2010 tentang Bendungan.
- Richards, L. A. (1931). Capillary Conduction of Liquids Through Porous Mediums. *Physics*, 1(5), 318–333.
- Terzaghi, K. (1943). Theoretical Soil Mechanics. John Wiley & Sons.
- Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 17 Tahun 2019 tentang Sumber Daya Air.
- USBR. (2011). Best Practices in Dam and Levee Safety Risk Analysis. United States Bureau of Reclamation.