

ANALISIS TEKANAN AIR PORI MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA DENGAN PEMODELAN MOHR-COULOMB PADA PLAXIS

Undayani Cita Sari¹, Sri Prabandiyani Retno Wardani², Suharyanto³ dan Windu Partono⁴

¹Departemen Teknik Sipil, Universitas Diponegoro, Jl. Prof. Soedarto, SH, Semarang
Email: undayanicita@yahoo.com

² Departemen Teknik Sipil, Universitas Diponegoro, Jl. Prof. Soedarto, SH, Semarang
Email: wardani_spr@yahoo.com / wardani@live.undip.ac.id

³Departemen Teknik Sipil, Universitas Diponegoro, Jl. Prof. Soedarto, SH, Semarang
Email: suharyanto20@yahoo.co.id

⁴Departemen Teknik Sipil, Universitas Diponegoro, Jl. Prof. Soedarto, SH, Semarang
Email: windu_bapake_dila@yahoo.com

ABSTRAK

Tekanan air pori merupakan salah satu faktor yang dapat mengakibatkan terjadinya rembesan dan mengganggu kestabilan timbunan, terutama timbunan pada struktur bendungan. Hal ini dikarenakan tekanan air pori menyebabkan kekuatan geser dari tanah menurun, disebabkan adanya air di dalam tanah sehingga parameter stabilitas tanah (kepadatan tanah, kohesi, dan sudut geser) menurun. Oleh karena itu diperlukan adanya instrumen pengamatan tekanan air pori dengan menggunakan instrumen piezometer, sehingga dapat dipantau besar dari tekanan pori tersebut untuk mengantisipasi terjadinya ketidakstabilan pada struktur bendungan. Saat ini dalam menganalisis struktur bendungan dapat lebih praktis menggunakan pemodelan pemrograman, salah satunya adalah PLAXIS dimana menerapkan prinsip metode elemen hingga. Namun, hasil yang diperoleh belum tentu sesuai dengan kondisi sebenarnya. Tulisan ini menyajikan hasil penelitian dari Bendungan Sermo dengan menggunakan PLAXIS dan memvalidasi hasil perhitungan dengan hasil pengamatan di lapangan. Perhitungan tekanan air pori dengan bantuan program PLAXIS ini menggunakan pemodelan Mohr-Coulomb. Parameter material pemodelan diperoleh dengan metode *back analysis* agar didapatkan hasil yang sesuai dengan kondisi sebenarnya dilapangan. Tinjauan penelitian terletak pada bagian hilir bendungan pada saat kondisi operasional bendungan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tekanan pori pemodelan PLAXIS lebih besar dari pada pengamatan sebenarnya di lapangan dengan menggunakan instrumen piezometer.

Kata kunci: Pemodelan PLAXIS, piezometer, tekanan air pori

1. PENDAHULUAN

Ketidakstabilan pada struktur bendungan dapat menyebabkan kegagalan pada bendungan. Berdasarkan *International Commission on Large Dams* dalam Chi et al. (2015) dari total seluruh bendungan yang mengalami keruntuhan, 70% diantaranya adalah bendungan urugan. Menurut Azdan dan Samekto (2008), kegagalan bendungan ini dapat disebabkan oleh berbagai faktor, antara lain adalah erosi yang dapat diakibatkan rembesan, retakan, longsor, *overtopping*, gempa, dan lain sebagainya. *Washington Departement of Ecology* (2005) menyampaikan bahwa peristiwa rembesan menepati peringkat kedua penyebab kegagalan bendungan setelah kegagalan akibat air melimpah (*overtopping*). Sehingga, perlu diperhatikan kestabilan terhadap rembesan sebagian salah satu syarat stabilitas bendungan. Peristiwa rembesan air disebabkan adanya ruang kosong diantara butiran air yang memungkinkan air mengalir didalamnya (Craig, 2004).

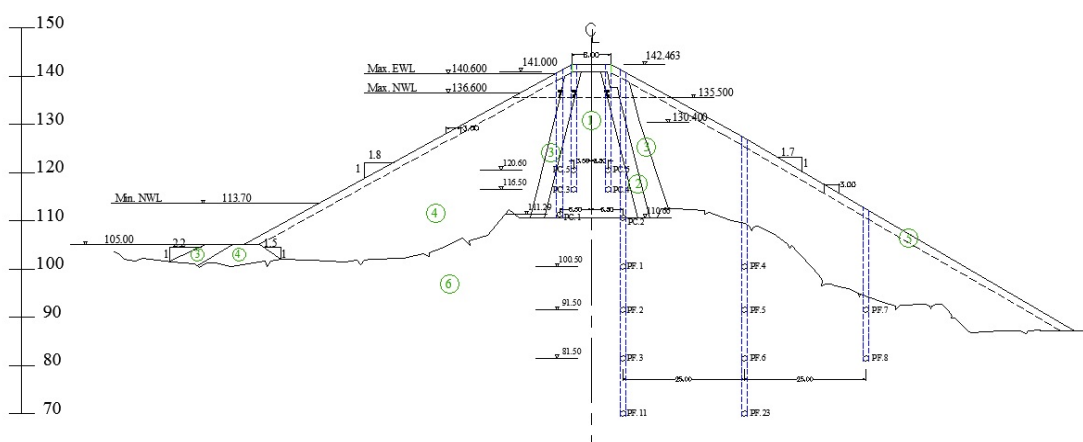
Kemampuan tanah dalam meloloskan air berbeda-beda, tergantung pada permeabilitas jenis tanah. Pada ruang-ruang kosong yang terdapat di antara butiran tanah, terdapat tekanan pori yang muncul karena adanya aliran air di antara butiran tanah tersebut. Tekanan air pori sebagai penyebab terjadinya rembesan dapat mengakibatkan terjadinya kebocoran bendungan dan dapat membahayakan stabilitas bendungan. Peningkatan kandungan air di dalam tubuh bendungan dapat menurunkan kepadatan dan kekuatan geser (kohesi dan sudut geser) antar partikel tanah sehingga stabilitas menurun. Smaalen (1980) dalam Indrawahyuni et al. (2009), menyampaikan bahwa tekanan air pori memiliki nilai besar sebagai tenaga pendorong terjadinya kelongsoran. Konsentrasi air dalam lapisan tanah dapat melunakkan lapisan tanah yang akhirnya mereduksi nilai kohesi dan sudut geser dalam sehingga kekuatan gesernya berkurang. Aliran air juga dapat menyebabkan erosi, sehingga keseimbangan lereng menjadi terganggu, karena kurangnya kepadatan dalam struktur tanah timbunan lereng.

US Army Corps of Engineers (2003) menyatakan bahwa tekanan air pori harus diketahui untuk menganalisis stabilitas bendungan saat selesai konstruksi dan selama pengoperasian. Peningkatan tekanan air pori terjadi karena perubahan ketinggian air pada hulu bendungan yang mempengaruhi besar rembesan pada bendungan. Selain itu, tekanan air pori yang terdapat di dalam batuan berpotensi menimbulkan retakan. Hal ini tentu berbahaya karena dapat mengganggu stabilitas dari bendungan tersebut, terutama apabila berada pada pondasi bendungan. Sosrodarsono (1977) menyebutkan bahwa pondasi bendungan harus mempunyai kemampuan daya dukung dan kuat geser yang aman untuk menahan semua jenis beban dan mempertahankan diri terhadap gaya-gaya yang ditimbulkan oleh aliran filtrasi.

Salah satu cara praktis yang saat ini sering digunakan untuk menganalisis tingkat kestabilan bendungan adalah dengan mengembangkan model struktur dengan bantuan perangkat lunak PLAXIS. Model analisis yang digunakan dengan menggunakan perangkat lunak ini adalah metode elemen hingga. Permasalahan yang sering muncul pada saat melakukan analisis stabilitas bendungan dengan PLAXIS adalah ketidaksesuaian antara hasil analisis model dengan kondisi nyata di lapangan. Oleh sebab itu maka verifikasi hasil perhitungan tekanan air pori dengan pendekatan model PLAXIS dan kondisi nyata di lapangan sangat diperlukan. Tulisan ini bertujuan menyampaikan hasil penelitian untuk melihat pengaruh pemodelan PLAXIS terhadap hasil sebenarnya di lapangan dengan membandingkan nilai tekanan pori hasil analisis PLAXIS dengan pengamatan di lapangan menggunakan instrumen piezometer. Dari hasil penelitian ini maka dapat diketahui bagaimana perbandingan nilai tekanan air pori hasil analisis PLAXIS dengan pengamatan sebenarnya di lapangan. Model PLAXIS yang diterapkan pada penelitian ini adalah model Mohr-Coulomb dengan parameter material ditentukan dengan metode *back analysis*. Penelitian ini mengambil lokasi studi pada Bendungan Sermo, yang terletak di Desa Hargowilis, Kecamatan Kokap, Kabupaten Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta. Bendungan Sermo ini merupakan bendungan tipe urugan batu dengan inti kedap air dari lempung. Sebagai batasan masalah pada penelitian ini maka tinjauan tekanan pori diambil pada nilai tekanan pori di zona *bedrock* dari Bendungan dimana dekat dengan lokasi penempatan V-Notch.

2. BENDUNGAN SERMO

Bendungan adalah bangunan berupa urugan tanah, urugan batu, beton, dan/ atau pasangan batu yang dibangun selain untuk menahan dan menampung air, juga untuk menahan dan menampung limbah tambang (*tailing*) atau menampung lumpur sehingga terbentuk waduk (PP No. 37 Th. 2010). Salah satu tipe bendungan adalah bendungan zonal, yang terdiri zona lolos air (*shell*), zona kedap air (*core*), dan zona *filter* (Sosrodarsono, 1977). Bendungan Sermo termasuk dalam tipe bendungan zonal. Pada zona *bedrock* dari Bendungan Sermo, yang merupakan pondasi dari bendungan, terdiri dari breksi andesit dengan beberapa interkalasi lava andesit. Formasi ini termasuk dalam Formasi Andesit Tua sebagai bagian dari salah satu formasi batuan yang berada di daerah Kulon Progo, dimana Bendungan Sermo berada, yang berumur Oligo-Miosen. Penelitian ini meninjau bagian melintang dari Bendungan Sermo tepatnya pada sta 12. Penampang melintang dan penempatan piezometer pada Bendungan Sermo yang ditinjau pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 1 (Departemen Pekerjaan Umum, 1994). Gambar 2 (a) menunjukkan posisi Bendungan Sermo pada bagian hulu, sedangkan Gambar 2 (b) menunjukkan bagian atas dari tubuh Bendungan Sermo.



Gambar 1 Penempatan Piezometer pada Penampang Melintang Bendungan Sermo (Departemen Pekerjaan Umum, 1994)

Keterangan:

1 = Zona inti kedap air (*core*), berupa urugan lempung.

- 2 = Zona *filter*, berupa pasir sedang berkerikil halus.
 3 = Zona transisi, berupa batuan breksi vulkanik diameter butir maks. 60 cm.
 4 = Zona urugan batuan (*shell*), berupa batuan breksi vulkanik diameter maks. 100 cm.
 5 = Zona rip-rap, berupa batuan breksi vulkanik berat maksimum setiap butir 450 kg.
 6 = *Bedrock*, berupa batuan breksi andesit dengan beberapa interkalasi lava andesit.
 PC = Piezometer *Core*.
 PF = Piezometer *Foundation*.



Gambar 2 (a) Hulu Bendungan Sermo



Gambar 2 (b) Bagian Atas Bendungan Sermo

3. PENGAMATAN TEKANAN AIR PORI PADA PIEZOMETER

Piezometer digunakan untuk mengetahui tekanan air pori yang bekerja pada bendungan (US Army Corps of Engineers, 1995). Bendungan Sermo menggunakan jenis piezometer elektrik. Cara kerja peralatan ini adalah dengan mengukur tekanan cairan pada peralatan piezometer dengan cara mengukur ketinggian permukaan cairan pada kolom cairan pada saat cairan di dalamnya naik setinggi H (melawan arah gravitasi), atau dengan menggunakan perangkat yang mengukur tekanan dari tanah pada titik tertentu. Nilai dari ketinggian kolom (H) ini kemudian dihitung dengan Persamaan 1 (Departemen Pekerjaan Umum, 2015), untuk mendapatkan tinggi piezometer dalam satuan meter yang dibaca oleh pengamat di lapangan secara otomatis pada komputer (nilai *reading*). Persamaan 1 menunjukkan formula untuk mengkonversikan tinggi cairan di dalam kolom piezometer dari satuan miliAmpere ke mH_2O .

$$reading = \frac{H - 4.0609}{0.0159362} \times 0.1022 \quad (1)$$

dengan

reading = Tinggi tekanan air pori piezometer (mH_2O),

H = Tinggi cairan pada kolom piezometer (miliAmpere)

Catatan : Setiap titik piezometer memiliki persamaan konversi yang berbeda-beda

Nilai *reading* ini kemudian digunakan untuk menentukan ketinggian atau elevasi dari tekanan piezometer tersebut, yang ditunjukkan pada Persamaan 2 (Departemen Pekerjaan Umum, 2015).

$$Hp' = reading + Hp \quad (2)$$

dengan

Hp' = Elevasi piezometer

Elevasi atau ketinggian tekanan air pori piezometer pada bendungan (m)

reading = Tinggi tekanan air pori piezometer (m)

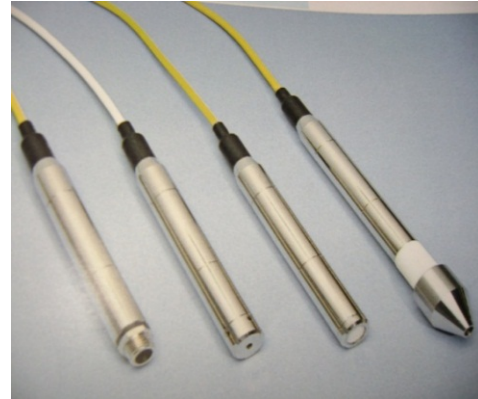
Hp = *Installed elevation*

Elevasi pemasangan piezometer yang ditinjau (m)

Contoh posisi penempatan piezometer yang dipasang di lapangan dapat dilihat pada Gambar 3 (a), yang penempatannya terletak pada Gambar 2 (b). Piezometer elektrik yang dipasang pada Bendungan Sermo, dapat dilihat pada Gambar 3 (b). Sedangkan Gambar 3 (c) menunjukkan multiplexer, yaitu alat transformasi pembacaan data piezometer dengan menggunakan software multilogger (dari pembacaan miliAmpere ke mH_2O).



Gambar 3 (a) Piezometer pada Bendungan
(Departemen Pekerjaan Umum, 2015)



Gambar 3 (b) Piezometer Elektrik
(Departemen Pekerjaan Umum, 2015)



Gambar 3 (c) Alat Multilogger
(Departemen Pekerjaan Umum, 2015)

4. PEMODELAN BENDUNGAN SERMO

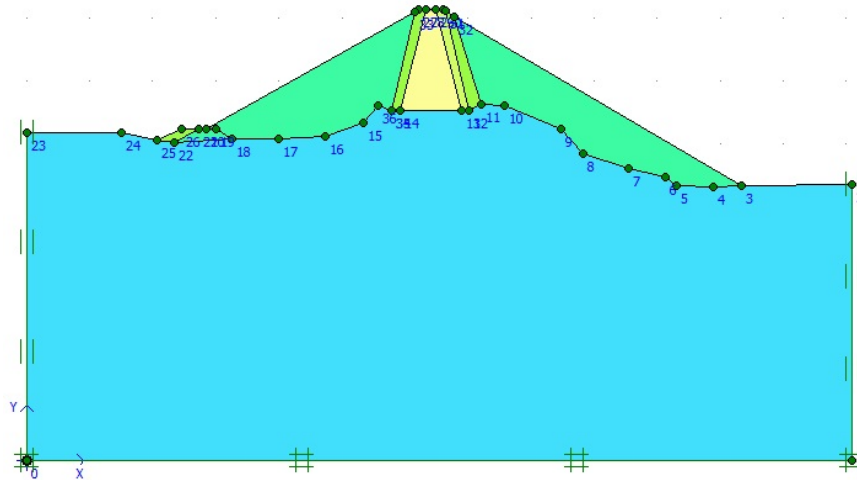
Metode elemen hingga adalah suatu cara penyelesaian numeris untuk menyelesaikan analisis sebuah struktur dengan cara diskretisasi (*meshing*) (Brinkgreve, 2007). Pada keadaan ini struktur bendungan dibagi menjadi elemen-elemen kecil yang dihubungkan dengan titik – titik nodal. Persamaan keseimbangan akibat gaya-gaya yang bekerja pada struktur yang dianalisis, kemudian dibuat dalam bentuk perpindahan pada tiap-tiap nodal elemen. Salah satu perangkat lunak yang dapat digunakan untuk membantu menerapkan prinsip dari metode elemen hingga pada bendungan adalah program PLAXIS.

Semakin halus diskretisasi yang dilakukan, maka makin banyak pula elemen-elemen yang terbentuk, sehingga hasil yang diperoleh akan semakin akurat. Hasil penelitian Galahi (2010) menyimpulkan bahwa dalam menganalisis PLAXIS 2D dengan menggunakan *meshing* kasar didapatkan error sebesar 3.0%, sedangkan bila menggunakan *meshing* yang lebih halus, maka didapat *error* sebesar 0.2%. Oleh karena itu, penghalusan (*meshing*) pada struktur sangat diperlukan. Dilain pihak, perhitungan menggunakan *meshing* yang lebih halus membutuhkan waktu analisis yang lebih lama. Pada penelitian ini menggunakan jenis *meshing* halus yang diharapkan dapat memberikan hasil yang lebih akurat karena memiliki jumlah elemen yang semakin banyak. Pemodelan penampang melintang Bendungan Sermo pada PLAXIS yang dianalisis pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 4.

Parameter material pemodelan

Pada penelitian ini menggunakan pemodelan Mohr-Coulomb. Pemodelan ini membutuhkan parameter material yang sesuai dengan desain setiap zona yang ada pada bendungan. Parameter material yang dibutuhkan yaitu berat volume, kohesi, sudut geser, koefisien permeabilitas, modulus Young dan angka Poisson. Parameter material pada Bendungan Sermo ini ditentukan berdasarkan data-data yang diperoleh dari penyelidikan tanah Caturbina Guna Persada (2005) untuk mendapatkan berat volume, kohesi, dan sudut geser. Sedangkan untuk parameter koefisien

permeabilitas menggunakan data pengujian pelaksanaan lapangan berdasarkan Departemen Pekerjaan Umum (1996). Pada data parameter *bedrock* menggunakan data desain Departemen Pekerjaan Umum (1985).



Gambar 4. Pemodelan Penampang Melintang Bendungan Sermo

Nilai parameter modulus Young dan angka Poisson pada zona *core* ditentukan menggunakan metode *back analysis* dengan kalibrasi menggunakan *settlement gauge*, sedangkan untuk nilai koefisien permeabilitas *bedrock* dikalibrasikan dengan debit rembesan V-Notch. Hal ini dikarenakan ternyata simulasi menunjukkan bahwa pada penelitian ini, permeabilitas *bedrock* memberikan pengaruh terhadap perhitungan debit rembesan. Sehingga diperoleh nilai parameter material yang ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Nilai Parameter Material PLAXIS Bendungan Sermo

No	Parameter	Unit	Core	Filter	Transisi	Shell	Bedrock****
1	$\gamma_{\text{saturated}}^*$	kN/m ³	18.74	21.00	21.70	21.00	21.82
	$\gamma_{\text{unsaturated}}^*$	kN/m ³	15.41	18.50	21.60	20.00	20.12
2	Kohesi (<i>c</i>)*	kN/m ²	8.3	0.001	0.001	0.001	680
3	Sudut geser dalam (ϕ)*	°	32	35	35	43	55
4	Koef. permeabilitas (<i>k</i>)**	m/hari	2.32×10^{-4}	134.10	14.292	12154.69	8.53
5	Modulus Young (<i>E</i>)***	kN/m ²	5500	6000	8000	200000	210000
6	Angka Poisson (ν)***	-	0.45	0.30	0.30	0.35	0.45

Berdasarkan hasil analisis tahun 2016, dengan :

- * Penyelidikan lapangan Caturbina Guna Persada, 2005
- ** Core : Penyelidikan lapangan Caturbina Guna Persada, 2005
- Filter, Transisi, Shell : Data Gradasi butir pelaksanaan lapangan, Departemen Pekerjaan Umum 1996
- Bedrock : Kalibrasi debit rembesan pada V-Notch
- *** Kalibrasi penurunan pada *settlement gauge*
- **** Data desain Departemen Pekerjaan Umum, 1985

Penentuan tinggi muka air

Penelitian dilakukan dengan melakukan simulasi pemodelan PLAXIS, pada ketinggian muka air 126.33 meter, 133.47 meter, 136.60 meter, dan 136.71 meter. Pemilihan ketinggian muka air ini disesuaikan dengan pencatatan piezometer dimana mempengaruhi ketersediaan data pencatatan tekanan air porinya. Nilai tekanan air pori kemudian di-plot-kan pada penampang melintang bendungan, sehingga dapat diperoleh nilai maksimum tekanan air pori pada bagian hilir bendungan beserta koordinatnya.

Pada hasil analisis pemodelan dengan PLAXIS, didapat nilai tekanan air pori pada setiap *stress point*. Pemilihan *stress point* yang ditinjau adalah berdasarkan koordinat yang paling mendekati pada koordinat pencatatan tekanan air pori piezometer pada hilir bendungan. Sehingga dapat dibandingkan nilai tekanan air pori analisis menggunakan PLAXIS dan piezometer pada kondisi tinggi muka air yang dianalisis tersebut.

5. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan ketinggian muka air yang digunakan pada penelitian ini, maka didapat hasil tekanan air pori pencatatan piezometer dan koordinatnya sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2. Tabel 2 ini menampilkan tekanan air pori pencatatan piezometer pada sta 12 Bendungan Sermo. Berdasarkan Tabel 2 dapat dilihat bahwa pada tinggi muka air 126.33 meter tidak ada tekanan air pori yang berada di zona *shell* (dilihat dari koordinat y nya dan disesuaikan dengan Gambar 1). Begitu pula dengan tinggi muka air 133.47 meter; 136.60 meter, dan 136.71 meter. Oleh karena itu pada penelitian ini untuk sta 12 ditinjau pada bagian hilir di zona *bedrock*. Pemilihan piezometer yang digunakan adalah pada piezometer pondasi yang terletak pada bagian paling hilir sehingga dekat dengan penempatan V-Notch, yaitu PF-7 dan PF-8. Berdasarkan hasil penelitian pada Bendungan Duhok, Noori dan Ismael (2011) menyampaikan bahwa semakin bertambah tinggi muka air maka tekanan air porinya juga akan meningkat. Hal ini bertentangan dengan data pencatatan piezometer pada PF-7. Sehingga pada penelitian ini diambil data tekanan air pori pada PF-8.

Hasil komparasi tekanan air pori antara PLAXIS dengan pengamatan piezometer sta 12 pada kondisi operasional yang ditinjau pada PF-8 dapat dilihat pada Tabel 3. Sedangkan untuk perbandingan nilai *groundwater head*-nya dapat dilihat pada Tabel 4. Sehingga, dapat dibuat grafiknya yang ditunjukkan pada Gambar 5 dan Gambar 6.

Tabel 2. Hasil Tekanan Air Pori Pencatatan Piezometer dan Koordinatnya pada sta 12 (Departemen Pekerjaan Umum, 2015)

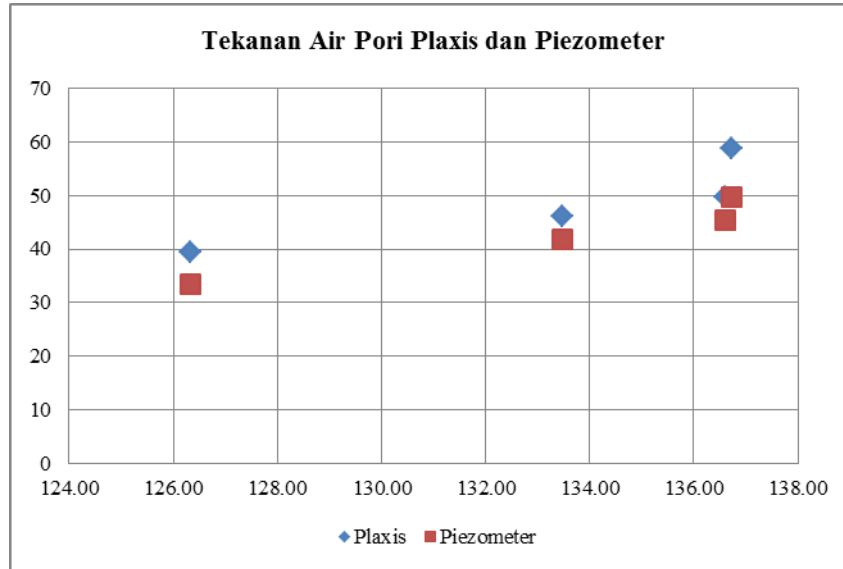
	Kondisi TMA 126.33 Meter			Kondisi TMA 133.47 Meter			Kondisi TMA 136.60 Meter			Kondisi TMA 136.71 Meter		
	Koord x	Koord y	Tekanan Air Pori (kPa)	Koord x	Koord y	Tekanan Air Pori (kPa)	Koord x	Koord y	Tekanan Air Pori (kPa)	Koord x	Koord y	Tekanan Air Pori (kPa)
PF-1	134.75	118.220	177.200	134.75	121.997	214.973	134.75	123.966	234.661	134.75	123.613	231.134
PF-2	134.75	116.710	252.100	134.75	120.379	288.787	134.75	122.213	307.128	134.75	118.456	269.559
PF-3	134.75	91.325	98.250	134.75	92.704	112.043	134.75	93.871	123.715	134.75	92.308	108.077
PF-4	159.75	99.686	-8.140	159.75	99.943	-5.573	159.75	99.789	-7.112	159.75	101.929	14.294
PF-5	159.75	92.559	10.590	159.75	93.046	15.462	159.75	93.559	20.592	159.75	93.331	18.306
PF-6	159.75	78.486	-50.140	159.75	78.768	-47.322	159.75	79.063	-44.372	159.75	102.230	187.301
PF-7	184.75	89.737	-17.630	184.75	89.731	-17.694	184.75	89.705	-17.950	184.75	90.898	-6.016
PF-8	184.75	84.842	33.420	184.75	85.682	41.820	184.75	86.048	45.475	184.75	86.460	49.603
PF-11	134.75	88.027	165.270	134.75	89.214	177.135	134.75	89.624	181.240	134.75	89.986	184.860
PF-23	159.75	90.092	185.920	159.75	90.426	189.256	159.75	90.676	191.757	159.75	84.865	133.651
PC-1	121.75	125.329	140.389	121.75	131.691	204.006	121.75	134.448	231.582	121.75	128.221	169.306
PC-2	134.75	114.258	35.984	134.75	116.618	59.584	134.75	118.029	73.693	134.75	115.846	51.863
PC-3	124.75	130.558	140.581	124.75	133.457	169.568	124.75	132.405	159.051	124.75	141.363	248.629
PC-4	131.75	119.701	32.008	131.75	120.214	37.138	131.75	120.541	40.409	131.75	131.338	148.382
PC-5	124.75	132.330	117.302	124.75	135.857	152.573	124.75	134.446	138.465	124.75	110.957	-96.432
PC-6	131.75	146.490	258.902	131.75	140.667	200.671	131.75	132.458	118.584	131.75	117.843	-27.574

Tabel 3. Hasil Analisis Tekanan Pori PLAXIS dan Piezometer sta 12 Bendungan Sermo

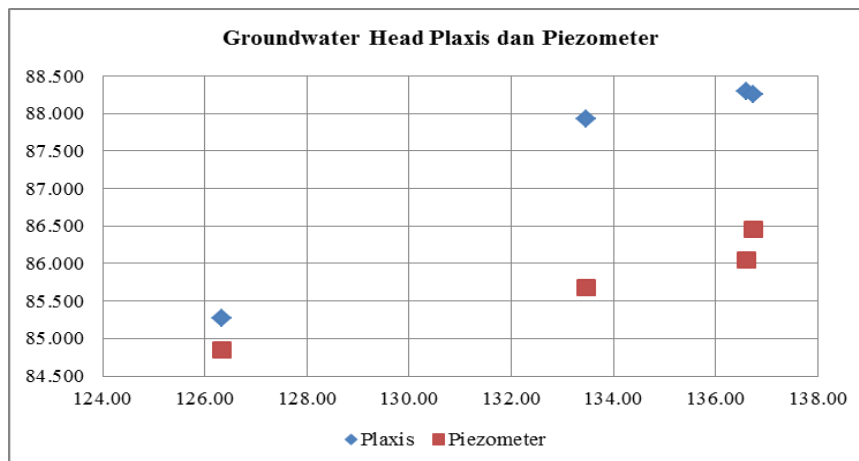
No	Operasional		Tekanan Air Pori (kPa)		
	Tanggal	TMA (m)	PLAXIS	Piezometer	Deviasi (%)
1	16-Okt-02	126.33	39.468	33.420	18.097
2	07-Jun-02	133.47	46.098	41.820	10.230
3	29-Apr-01	136.60	49.693	45.475	9.275
4	12-Feb-14	136.73	58.903	49.603	18.750

Tabel 4. Hasil Analisis *Groundwater Head* PLAXIS dan Piezometer sta 12 Bendungan Sermo

No	Operasional		<i>Groundwater Head</i> (m)		
	Tanggal	TMA (m)	PLAXIS	Piezometer	Deviasi (%)
1	16-Okt-02	126.33	85.268	84.842	0.502
2	07-Jun-02	133.47	87.933	85.682	2.627
3	29-Apr-01	136.60	88.300	86.048	2.617
4	12-Feb-14	136.73	88.25	86.46	2.070



Gambar 5. Perbandingan Tekanan Air Pori PLAXIS dan Piezometer



Gambar 6. Perbandingan *Groundwater Head* PLAXIS dan Piezometer

Hasil analisis tekanan air pori dan *groundwater head* secara numerikal dengan PLAXIS lebih besar dari pada hasil pengamatan pada lapangan dengan menggunakan piezometer, dengan deviasi yang cukup besar pada hasil komparasi tekanan air porinya. Deviasi yang besar ini dapat terjadi karena adanya waktu delay dimana air mengalir dari hulu ke hilir bendungan, yang berpengaruh pada ketepatan pengukuran instrumen. Nilai hasil analisis numerikal yang lebih besar dari pada pengamatannya sesuai dengan penelitian Akhtarpour, et al. (2015) pada Bendungan Masjid-E-Soleyman, bahwa hasil tekanan air pori yang dianalisis secara numerikal (dengan pemodelan PLAXIS) memiliki nilai yang lebih besar dari pada hasil pada pengamatan sebenarnya dengan menggunakan piezometer. Pada penelitian Akhtarpour, et al. (2015) tersebut, deviasi yang terjadi cukup besar mencapai 88% yang diukur pada saat pengisian pertama bendungan dimana nilai tekanan air pori numerikal adalah 956 kPa, sedangkan tekanan air pori pengamatan piezometer adalah sebesar 509 kPa.

Selain itu, penelitian yang dilakukan oleh Joseph (2013) yang membandingkan hasil tekanan pori pemodelan PLAXIS 2D dan 3D dengan dua instrumen piezometer di lapangan, yaitu P5 dan P6, pada timbunan lempung dengan menggunakan model *soft soil* pada material lempungnya. Hasil menunjukkan bahwa terdapat nilai tekanan pori P5 melebihi nilai dari analisis 2D dan 3D, sedangkan untuk analisis pada P6 menunjukkan bahwa nilai hasil tekanan air porinya kurang dari hasil analisis baik dengan 2D maupun 3D. Begitu pula dengan hasil penelitian Keyvanipour et al. (2013) pada Bendungan Sirjan dengan menggunakan PLAXIS dimana model yang digunakan adalah Mohr-Coulomb, bahwa nilai tekanan pori yang diamati pada dua piezometer ada yang lebih besar dan ada yang lebih rendah dari pada hasil analisis dengan PLAXIS, meskipun hasil secara numerikal secara umum lebih

besar dari pada pengamatan lapangan. Begitu pula dengan Morton et al. (2008) dengan hasil bahwa nilai tekanan pori piezometer ada yang lebih besar dan ada yang lebih kecil terhadap hasil analisis. Sedangkan, Fatahi et al. (2013) dengan menggunakan dua jenis pemodelan mendapatkan hasil bahwa tekanan pori piezometer lebih besar dari pada hasil tekanan pori dengan model *soft soil*, tetapi jika menggunakan model *soft soil creep* maka hasil yang diperoleh adalah sebaliknya.

Pada penelitian ini menggunakan metode Mohr-Coulomb, dimana menurut Keyvanipour et al. (2013) pada penelitiannya dengan membandingkan hasil pemodelan Mohr-Coulomb dan pemodelan Hardening menyatakan bahwa pemodelan dengan Mohr-Coulomb ini dapat diterima dan digunakan untuk mengetahui perilaku konstruksi. Sehingga, meskipun hasil penelitian tersebut berbeda-beda tergantung metode yang digunakan, tetapi memiliki kesamaan dalam pola yang ditunjukkan. Pada penelitian ini dapat dilihat bahwa semakin tinggi muka air yang digunakan dalam penelitian maka semakin tinggi pula tekanan air pori dan *groundwater head* yang terjadi. Sebagaimana pada penelitian Pandian et al. (2016) yang menggunakan program FEFLOW yang menerapkan prinsip metode elemen hingga, dimana nilai *groundwater head* pengukuran dengan simulasi memberikan deviasi yang besar tetapi memiliki pola yang sama.

6. KESIMPULAN

Penelitian ini dilakukan pada salah satu penampang melintang Bendungan Sermo, yaitu sta 12 dengan penentuan tinggi muka air berdasarkan ketersediaan data pencatatan piezometer. Komparasi pada pemrograman PLAXIS yang menerapkan prinsip metode elemen hingga dilakukan menggunakan pemodelan Mohr-Coulomb, dengan cara mengamati setiap *stress point* yang memiliki koordinat sama dengan piezometer yang ditinjau, yang terletak pada bagian hilir dekat dengan V-Notch (zona *bedrock*). Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai tekanan air pori PLAXIS lebih besar dari pada hasil pengamatan instrumen piezometer di lapangan pada bagian hilir bendungan tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

- Akhtarpour, A., Soroush, A., Salari, M. (2015). "Pore Water Pressure Development and Dissipation in Core of Masjed-E-Soleyman Rockfill Dam. Hydropower'15", Stavanger, Norway, 15-16 Juni 2015,.
- Azdan, M.D., dan Samekto, C. (2008). "Kritisnya Kondisi Bendungan di Indonesia". Seminar Nasional Bendungan Besar, Surabaya, 2 – 3 Juli 2008.
- Brinkgreve, R.B.J. (2007). *Manual Acuan PLAXIS 2D Versi 8*. Delft University of Technology & PLAXIS b.v, Belanda.
- Caturbina Guna Persada. (2005). *Pekerjaan Studi Faktor Lingkungan dan Stabilitas Lereng Bendungan Sermo Tahun 2005*. Yogyakarta.
- Chi, S., Ni, S., Liu, Z. (2015). "Back Analysis of the Permeability Coefficient of a High Core Rockfill Dam Based on a RBF Neural Network Optimized Using the PSO Algorithm". Hindawi Publishing Corporation, 1 – 15.
- Craig, R.F. (2004). *Soil Mechanics (7th ed.)*. Taylor & Francis Group, London, New York.
- Departemen Pekerjaan Umum. (1985). "Pekerjaan Disain Detail Proyek Bendungan Sermo". Direktorat Jenderal Pengairan, Direktorat Irigasi II, Proyek Irigasi Kali Progo, Yogyakarta.
- Departemen Pekerjaan Umum. (1994). "Laporan Ringkas Desain Waduk Sermo". Direktorat Jenderal Pengairan, Proyek Pembangunan Waduk Sermo, Yogyakarta.
- Departemen Pekerjaan Umum. (1996). "Laporan Kajian Pelaksanaan Pembangunan Waduk Sermo D.I. Yogyakarta". Direktorat Jenderal Pengairan, Unit Keamanan Bendungan, Yogyakarta.
- Departemen Pekerjaan Umum. (2015). "Bendungan Sermo". Satuan Kerja Balai Besar Wilayah Sungai Serayu Opak, Yogyakarta.
- Fatahi, B., Le, T.M., Le, M.Q., Khabbaz, H. (2013). "Soil Creep Effects on Ground Lateral Deformation and Pore Water Pressure Under Embankments". *Geomechanics and Geoengeering: An Internal Journal*, Vol. 8, No. 2, 107 - 124.
- Galahi, V. (2010). "Groundwater Flow, Fully Coupled Flow Deformation and Undrained Analyses in PLAXIS 2D and 3D". Internal Report Research Department.
- Indrawahyuni, H., Munawir, A., Damayanti, I. (2009). "Pengaruh Variasi Kepadatan Pada Permodelan Fisik Menggunakan Tanah Pasir Berlempung Terhadap Stabilitas Lereng". *Jurnal Rekayasa Sipil*, Vol. 3, No.3, 192-208.
- Joseph, Y.K.W. (2013). "Comparison of Drainage Line Elements in PLAXIS 2D and 3D applied in Consolidating Marine Clay Deposits". *Soft Soil Engineering International Conference*, Sarawak, Malaysia, 2013, 1- 8.

- Keyvanipour, M., Moharrampour, M., Ranjbar, M.K. (2013). *An Evaluation and Comparison of Sirjan's Embankment Behavior with Instrumentation Data and Software PLAXIS*. Industrial Science, Vol.1, Issue.1, Okt.2013, 1 – 7.
- Morton, K.L., Muresan, M.C., Debswana, F.R. (2008). *Importance of Pore Pressure Monitoring in High Walls*. The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 225 – 238.
- Noori, B.M.A dan Ismaeel, K.S. (2011). *Evaluation of Seepage and Stability of Duhok Dam*. Al-Rafidain Engineering, Vol. 19, No. 1, 42 – 58.
- Pandian, R.S., Nair, I.S., Lakshmanan, E. (2016). *Finite Element Modelling of a Heavily Exploited Coastal Aquifer for Assessing The Response of Groundwater Level to The Changes in Pumping and Rainfall Variation Due to Climate Change*. Hydrology Research, 42 – 60.
- Pemerintah Republik Indonesia. (2010). “PP No. 37 Tahun 2010 tentang Bendungan”.
- Sosrodarsono, S. (1977). *Bendungan Type Urugan*. Pradnya Paramita, Jakarta.
- US Army Corps of Engineers. (1995). *EM 1110-2-1908. Instrumentation of Embankment Dam and Levees*. Washington.
- US Army Corps of Engineers. (2003). *EM 1110-2-1902. Slope Stability*. Wahington.
- Washington Departement of Ecology. (2005). *Dam Safety Guidelines*. Washington.