

UNJUK KERJA SISTEM DRAINASE *POROUS* DALAM PENANGANAN GENANGAN DI HALAMAN CANDI PRAMBANAN BERDASARKAN SIMULASI NUMERIK

F. A. Putri, A. Rifa'i* dan S. Siswosukarto

Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada

Email: ahmad.rifai@mail.ugm.ac.id

ABSTRAK

Candi Prambanan merupakan situs bersejarah yang terletak di daerah dengan curah hujan tinggi, DIY. Genangan air sering yang terbentuk pada halaman candi setelah terjadi hujan terjadi karena kurang efektifnya tanah dalam menginfiltrasi air. Sistem drainase berpori telah dirancang sebagai solusi permasalahan genangan di halaman Candi Prambanan yang terdiri dari drainase bawah permukaan dan *paving block* di permukaan tanah menggunakan material beton berpori. Beton berpori yang digunakan merupakan jenis beton non pasir dengan Bantak Merapi dan abu vulkanik sebagai agregatnya. Pembuatan beton tanpa menggunakan pasir menyebabkan meningkatnya pori-pori beton hingga mencapai 20-25% dengan koefisien permeabilitas sebesar 1.3×10^{-3} m/s, jauh lebih besar dari tanah pasir pada halaman candi yang sebesar 1.2×10^{-5} m/s. Sistem drainase dimodelkan dengan mewakili kondisi di halaman candi menjadi tiga potongan melintang menggunakan *software Seep/W* untuk melihat keefektifan saluran drainase dalam mengalirkan air. Fungsi hujan jam-jaman kondisi ekstrim dengan kala ulang 10 tahun sebesar 146.894 mm dan kala ulang 15 tahun sebesar 155.409 mm serta hujan bulanan pada bulan terbasah yaitu pada Februari 2013 digunakan pada kondisi awal saluran drainase. Dari fungsi hujan jam-jaman maksimum dapat dilihat bahwa ketika hujan, permukaan *paving* menjadi jenuh air, namun tidak membentuk genangan air. Sedangkan dari hasil simulasi hujan bulanan, dapat dilihat bahwa ketika terjadi hujan, *paving* dan saluran drainase menjadi jenuh. Namun setelah hujan berhenti, air dapat dengan cepat terinfiltrasi dari permukaan *paving* ke saluran drainase dan kemudian dilanjutkan ke dalam tanah. Sehingga penggunaan sistem drainase berpori dinilai efektif dalam mempercepat infiltrasi air hujan dan mencegah terbentuknya genangan.

Kata Kunci: drainase berpori, genangan, hujan, *Seep/W*

1. PENDAHULUAN

Candi Prambanan merupakan salah satu situs bersejarah yang terletak di Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta, Indonesia dengan iklim tropis dan curah hujan yang tinggi. Tingginya nilai curah hujan ini dapat menyebabkan terbentuknya genangan-genangan air pada halaman Candi ketika hujan, yang disebabkan oleh kurang efektifnya penyerapan air hujan oleh tanah. Oleh karena itu diperlukan sistem drainase yang baik pada halaman Candi Prambanan untuk mencegah terbentuknya genangan air setelah terjadi hujan. Pihak pengelola Candi Prambanan telah melakukan berbagai upaya perbaikan terhadap sistem drainase yang terdapat di halaman Candi Prambanan. Namun hingga saat ini upaya-upaya tersebut belum dapat dengan efektif mempercepat penyerapan air dari permukaan tanah. Sehingga banyak genangan-genangan air yang masih terbentuk ketika hujan dan setelah hujan mereda.

Rifa'i *dkk.*, (2016) telah melakukan perancangan sistem drainase berpori sebagai alternatif perbaikan yang dapat dilakukan terhadap sistem drainase di halaman Candi Prambanan. Perancangan sistem drainase tersebut berdasarkan kondisi hujan sampai dengan tahun 2014. Sistem drainase yang dirancang merupakan drainase *subsurface* dengan dimensi penampang 0.4×0.4 m² dan terletak pada kedalaman 1 m dari permukaan tanah. Dinding drainase ini menggunakan beton berpori dengan penggunaan Bantak Merapi dan abu vulkanik sebagai bahan tambah. Kinerja dari sistem drainase yang telah dirancang perlu ditinjau ulang untuk mengetahui keefektifannya dalam mendrainase air hujan di permukaan tanah. Unjuk kerja sistem drainase porous dalam mendrainase air hujan disimulasikan menggunakan perangkat lunak *Seep/W*.

2. LITERATUR DAN DASAR TEORI

2.1 Aliran Air pada Media Pori

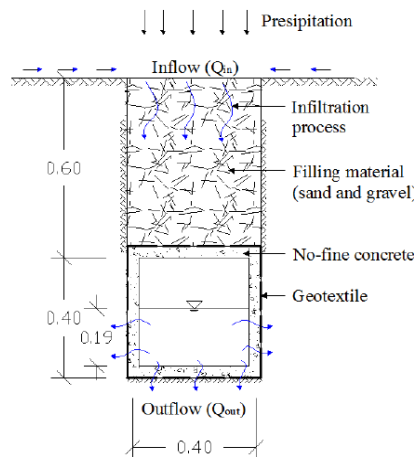
Menurut Hardiyatmo (2010) sumber pemasok utama air tanah adalah air yang berasal dari resapan air hujan yang mengalir dalam tanah. Aliran air terjadi apabila pori atau retakan pada tanah saling berhubungan satu dengan lainnya (*interconnected pore space*). Material dengan *interconnected pore space* memiliki kemampuan untuk mengalirkan air atau fluida, yang disebut dengan permeabilitas (Bell, 1992). Batu (1998) menyatakan bahwa permeabilitas suatu material dinyatakan dengan koefisien permeabilitas (*k*). Nilai koefisien permeabilitas pada tanah umumnya bergantung pada ukuran pori merata, distribusi ukuran butir, dan arah serta perpindahan butiran. Batu (1998) menyatakan bahwa nilai koefisien permeabilitas yang umumnya digunakan merupakan koefisien permeabilitas horizontal karena sangat kecilnya nilai dari koefisien permeabilitas vertikal, sekitar sepertiga dari nilai koefisien horizontal.

2.2 Sistem Drainase pada Halaman Candi Prambanan

Terzaghi dan Peck (1987) menyatakan bahwa drainase dalam praktik teknis berfungsi untuk menghilangkan tekanan rembesan, mengurangi bahaya atau kerusakan yang disebabkan udara dingin, atau untuk meningkatkan kekutan geser tanah dengan menurunkan tegangan netral. Drainase berfungsi untuk mengontrol aliran air tanah, termasuk juga penentuan jumlah dan arah rembesan air (Reddi, 2003). Sistem drainase yang digunakan di Halaman Candi Prambanan merupakan jenis drainase bawah permukaan. Drainase tipe ini dipilih dengan pertimbangan kenyamanan pengunjung dan keindahan halaman candi. Untuk memperbaiki sistem drainase yang telah ada, Rifai dkk. (2016) telah merancang alternatif sistem drainase dengan menggunakan beton berpori. Struktur drainase ini dirancang menggunakan material beton non pasir dengan Bantak Merapi dan abu vulkanik sebagai material pengganti pasir.

Beton non pasir merupakan salah satu jenis beton ringan. Dalam pembuatan beton non pasir, agregat yang digunakan hanya agregat kasar. Agregat halus, seperti pasir, tidak digunakan. Metode ini akan menghasilkan beton yang lebih ringan dari beton normal, dengan pori-pori sekitar 20%-25%. Penggunaan beton non pasir ini diharapkan dapat mempercepat proses infiltrasi dan drainasi air hujan. Material bantak yang digunakan pada beton merupakan kerikil yang berasal dari lereng Gunung Merapi. Bantak tergolong sebagai material dengan kuat tekan rendah, sehingga jarang digunakan untuk keperluan struktural. Abu vulkanik, menurut SK SNI S-04-1989-F dikategorikan sebagai pozzolan, salah satu zat aditif pada campuran beton. Material ini sering digunakan sebagai pengganti semen karena kemampuannya untuk mengeras ketika bereaksi dengan air.

Drainase yang dirancang oleh Rifa'i dkk. (2016) berdasarkan data hujan hingga tahun 2012. Hasil akhir dari perancangan tersebut ialah drainase bawah permukaan dengan dimensi $0.4 \times 0.4 \text{ m}^2$ dan terletak pada kedalaman 1 m di bawah permukaan tanah, seperti yang dapat dilihat pada Gambar 1. Diatas saluran drainase digunakan kerikil sebagai pengganti tanah hingga mencapai permukaan tanah. Diatas permukaan tanah diletakkan paving dengan material yang sama, yaitu beton berpori, setebal 6 cm untuk membantu mempercepat penyerapan air hujan dan mencegah terbentuknya genangan.



Gambar 1: Sketsa saluran drainase (Rifa'i dkk.,2016)

2.3 Konsep Dasar Aliran Air dalam Media

Air dalam media pori akan mengalir ketika adanya ketidakseimbangan energi. Air mengalir dari tempat dengan tingkat energi tinggi ke tempat dengan tingkat energi lebih rendah. Pada teori mekanika fluida, tinggi total energi suatu fluida dinyatakan dengan *head*, seperti *pressure head* atau *velocity head* yang nilainya dapat dihitung dengan Persamaan 1 yang biasa disebut sebagai Persamaan Bernoulli.

$$h = z + \frac{p}{\gamma_w} + \frac{v^2}{2g} \quad (1)$$

Dengan h = total head energy (m), z = elevasi (m), p = tekanan air pori (kN/m^2), γ_w = berat jenis air (kN/m^3), v = kecepatan aliran (m/s) dan g = percepatan gravitasi (m/s^2)

Pada tahun 1856, Darcy mempublikasikan persamaan sederhana untuk menentukan kecepatan pergerakan air pada tanah jenuh (Das, 2010) yang dapat dilihat pada Persamaan 2.

$$v = k \cdot i \quad (2)$$

Dengan v = kecepatan aliran (banyaknya air yang mengalir per satuan waktu), k = koefisien permeabilitas dan i = gradien hidrolis.

2.4 Analisis Hujan

Sumber pasokan utama air tanah berasal dari air hujan yang terinfiltrasi ke dalam tanah (Hardiyatmo, 2010). Oleh karena itu, besarnya nilai hujan dinilai penting dalam menganalisis sistem drainase. Data hujan yang digunakan dikumpulkan dari stasiun hujan yang terdekat dari Candi Prambanan dari tahun 2001-2015. Data hujan kemudian diuji dengan metode Chi-Kuadrat dan Smirnov-Kolmogorov dengan bantuan *software HAVARA*. Dari pengujian dengan kedua metode tersebut, akan digunakan distribusi hujan yang dinilai terbaik, distribusi normal, distribusi log-normal, Gumbel, atau log-Pearson III. Distribusi hujan yang digunakan adalah untuk hujan 10 tahunan dan 15 tahunan. Nilai hujan yang didapat dari distribusi terbaik kemudian digunakan dalam analisis numerik menggunakan *software Seep/W*.

Infiltrasi merupakan proses masuknya air dari permukaan ke dalam tanah dengan kapasitas tertentu. Kapasitas air maksimum yang dapat terinfiltrasi ke dalam tanah disebut kapasitas infiltrasi (Chow dkk., 1987). Pergerakan air dalam tanah melalui ruang pori dipengaruhi oleh gravitasi dan gaya kapilaritas. Gravitasi menyebabkan air mengalir ke tempat yang lebih rendah, dan kapilaritas menyebabkan air mengalir dari menuju area yang lebih kering.

2.5 Simulasi Numerik menggunakan Seep/W

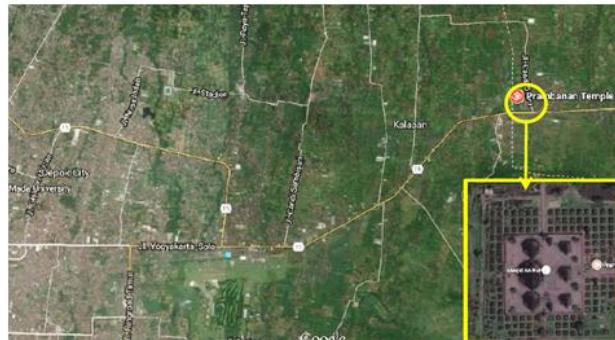
Seep/W merupakan *software* simulasi numerik yang mampu melakukan simulasi matematis dari proses fisik aliran air melalui media. Simulasi ini murni matematis sehingga hasil yang didapatkan akan berbeda dengan hasil permodelan di laboratorium ataupun di lapangan. Analisis infiltrasi dalam *Seep/W* berdasar kepada prinsip kapasitas tanah dalam menahan air dengan fungsi kadar air volumetrik (*volumetric water content*) dan *matric suction*. Terdapat beberapa cara untuk mengestimasi fungsi kadar air volumetrik dan *matric suction*. Cara pertama menggunakan parameter *specified curve-fitting*, dan yang kedua dengan menggunakan metode prediktif. *Seep/W* memiliki empat metode yang tersedia untuk mengestimasi fungsi kadar air volumetrik, yaitu metode berdasarkan distribusi ukuran butir. Metode lainnya berdasarkan fungsi dari set sampel yang telah tersedia pada *software* dan 2 metode menggunakan persamaan tertutup berdasarkan parameter *curve-fit*. Dua persamaan tertutup tersebut adalah persamaan Fredlund dan Raharjo (1994) dan Van Genuchten (1980).

3. METODE PENELITIAN

3.1 Lokasi Penelitian dan Data

Penelitian ini memodelkan sistem drainase berpori yang dirancang pada penelitian sebelumnya (Rifa'i dkk., 2016) yang direncanakan untuk diaplikasikan pada Halaman 1 Candi Prambanan, menggantikan drainase eksisting yang dinilai kurang efektif dalam mendainasi air. Candi Prambanan terletak di perbatasan Daerah Istimewa Yogyakarta dan Provinsi Jawa Tengah, seperti yang dapat dilihat pada Gambar 1. Halaman 1

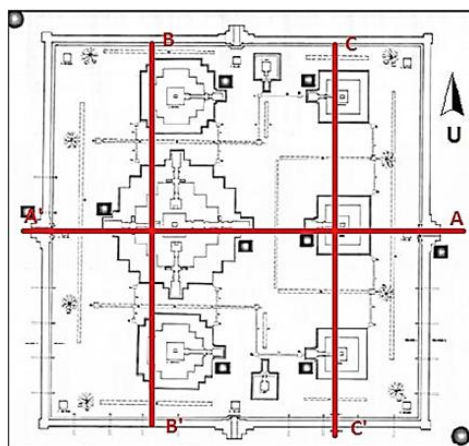
merupakan area yang dibatasi oleh pagar Candi Prambanan dengan luas area $110 \times 110 \text{ m}^2$. Data yang digunakan dalam penelitian ini ditampilkan pada Tabel 1. Pemodelan pada *Seep/W* dilakukan dengan mewakili kondisi sistem drainase Candi Pambanan pada tiga potongan melintang, yaitu potongan A-A', B-B', dan C-C', seperti yang dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 1: Peta lokasi Candi Prambanan

Tabel 1: Sumber data penelitian

	Data	Tipe	Sumber
1.	Denah sistem drainase Candi Prambanan	Sekunder	BPCB DIY
2.	Data hujan	Sekunder	BBWS
3.	Data bor	Sekunder	Penelitian terdahulu
4.	Properti tanah	Sekunder	Penelitian terdahulu
5.	Sifat dan rancangan saluran drainase	Sekunder	Penelitian terdahulu
6.	Dokumentasi	Primer	Personal



Gambar 2: Sketsa potongan melintang pada Halaman Candi Prambanan

3.2 Pemodelan dengan Seep/W

a. Tahap pemodelan

Penelitian ini melakukan pemodelan numerik terhadap tiga potongan melintang Halaman Candi Prambanan. Pada *software Seep/W* akan dimodelkan kondisi tanah dan sistem drainase pada halaman candi. Sifat dan karakteristik dari tanah dan material drainase digunakan dalam memodelkan kondisi awal dari simulasi (*steady state condition*). Tanah pada halaman Candi Prambanan merupakan tanah jenis Pasir berlanau (SM) dengan nilai kadar air jenuh 43.8% dan koefisien permeabilitas jenuh $1.2 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ (Putri, 2015). Material yang digunakan untuk struktur saluran drainase merupakan beton berpori dengan nilai

koefisien permeabilitas jenuh sebesar 1.33×10^{-3} m/s (Lestari, 2015). Kondisi muka air tanah juga di *input* pada pemodelan kondisi *steady state*. Dari pengukuran manual, muka air tanah pada halaman Candi Prambanan diketahui sedalam -9 m dari permukaan tanah.

b. *Input data hujan*

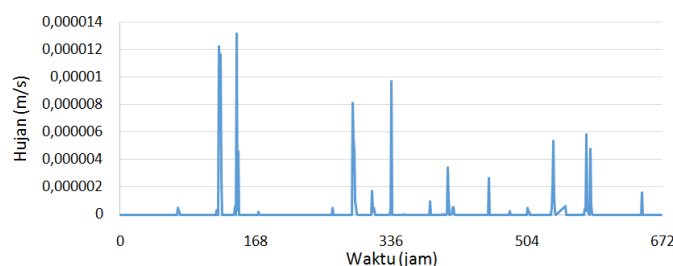
Kondisi hujan maksimum dan hujan pada bulan terbasah akan di-*input* pada *software*, dan hasil simulasi pengaruh hujan terhadap pergerakan air di dalam tanah dapat diamati. Nilai hujan jam-jaman maksimal dalam satu hari didapatkan dari analisis hujan menggunakan metode Chi-kuadrat dan Smirnov-Kolmogorov. Nilai hujan harian maksimum pada tiap tahunnya ditampilkan dalam Tabel 2 dan hasil analisis hujan menggunakan *software HAVARA* ditampilkan pada Tabel 3. Kondisi bulan terbasah ditentukan dari bulan hujan dengan jumlah dan curah hujan terbanyak pada periode tahun 2001-2015. Hujan bulan terbasah yang digunakan dalam penelitian ini adalah hujan pada bulan Februari 2013 dengan jumlah hujan seperti yang ditampilkan pada Gambar 3. Data hujan di *input* sebagai *boundary condition* pada pemodelan kondisi transien. Kondisi transien merupakan kondisi dimana pergerakan air dalam tanah dapat dilihat perubahannya terhadap waktu. Ketika kondisi *steady state* dan hujan sudah dimodelkan pada *software*, kondisi transien sudah dapat dijalankan dan diamati hasilnya.

Tabel 2: Data hujan

Tahun	Hujan harian maksimum (mm)	Tahun	Hujan harian maksimum (mm)
2001	89	2009	59
2002	86	2010	38.7
2003	173	2011	94.1
2004	128	2012	113
2005	100	2013	138.1
2006	49	2014	92
2007	99	2015	131.8
2008	49.5		

Tabel 3 Hujan harian *output software HAVARA*

P(x >= Xm)	T Kala- Ulang	Karakteristik Debit (m ³ /dt) Menurut Probabilitasnya							
		NORMAL		LOG-NORMAL		GUMBEL		LOG-PEARSON III	
		X _T	K _T	X _T	K _T	X _T	K _T	X _T	K _T
0.9	1.1	47.479	-1.282	51.027	-1.190	54.508	-1.100	50.123	-1.322
0.5	2.	97.187	0.000	89.442	-0.200	90.815	-0.164	92.808	0.084
0.2	5.	129.831	0.842	129.304	0.828	125.092	0.719	130.095	0.856
0.1	10.	146.894	1.282	156.778	1.536	147.787	1.305	152.207	1.214
0.067	15.	155.409	1.501	172.599	1.944	160.591	1.635	163.822	1.382
0.05	20.	160.986	1.645	183.815	2.233	169.556	1.866	171.615	1.488
0.01	100.	187.419	2.326	247.740	3.882	218.850	3.137	210.190	1.951
0.001	1,000.	217.047	3.090	346.164	6.419	288.622	4.936	255.370	2.396



Gambar 3: Hujan jam-jaman bulan terbasah (Februari 2013)

4. HASIL DAN DISKUSI

Dalam penelitian ini dilakukan tiga simulasi pada kondisi awal (*steady state*), yaitu potongan A-A', B-B', dan C-C'. Dari masing-masing kondisi awal tersebut kemudian dilanjutkan ke kondisi transien dimana fungsi hujan telah dimasukkan.

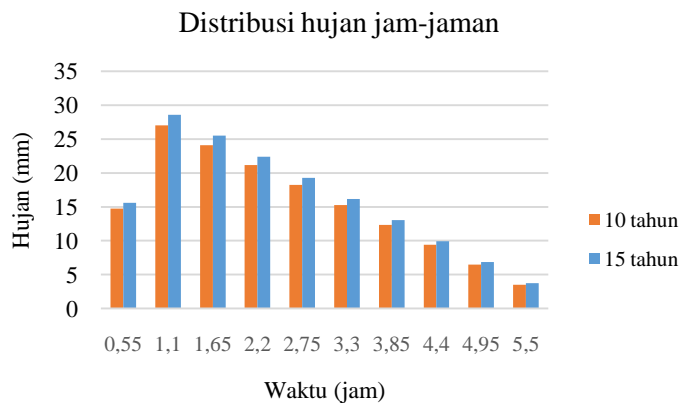
4.1 Analisis Hujan

Analisis hujan pada penelitian ini dibantu dengan *software HAVARA* untuk menentukan jam hujan harian pada kala ulang hujan 10 tahunan dan 15 tahunan seperti yang ditampilkan pada Tabel 2. Distribusi yang digunakan pada penelitian ini adalah distribusi normal, karena dari hasil pengujian Chi-kuadrat dan Smirnov-Kolmogorov pada *software HAVARA* diketahui bahwa distribusi dengan hasil terbaik merupakan distribusi normal. Untuk hujan harian maksimum kala ulang 10 tahun diperoleh curah hujan sebesar 146.894 mm dan untuk kala ulang 15 tahun diperoleh 155.409 mm seperti yang dapat dilihat di Tabel 3.

Untuk memodelkan hujan pada satu hari, perlu diketahui distribusi hujan hariannya. Terdapat berbagai metode dalam menentukan distribusi hujan harian. Persamaan yang digunakan ditampilkan pada Persamaan 3 dan hasil distribusi ditampilkan pada Gambar 4. Durasi hujan pada satu hari ditentukan dari analisis manual terhadap jam-jam hujan yang terjadi. Dari analisis manual yang dilakukan diperoleh durasi hujan rerata pada satu hari pada daerah Candi Prambanan sebesar 5.5 jam.

$$y = -0.01 x^2 + 2.14x - 10.38 \tag{3}$$

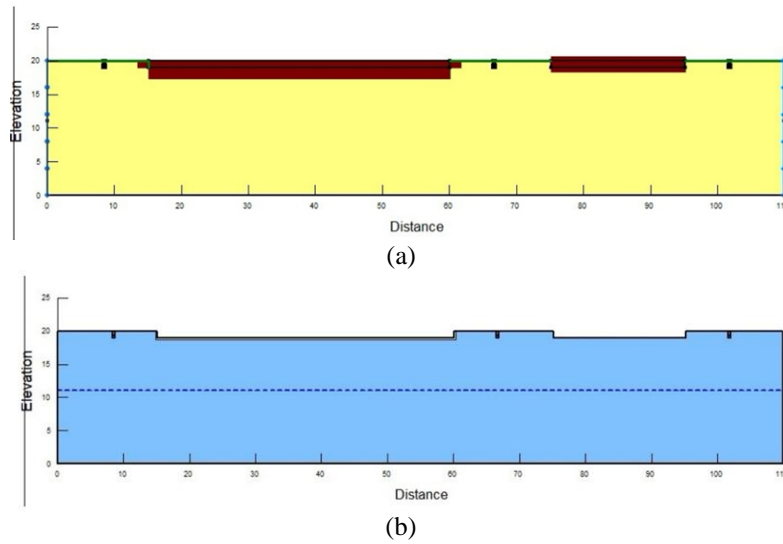
Dengan y adalah persen kumulatif hujan dan x adalah persen kumulatif waktu.



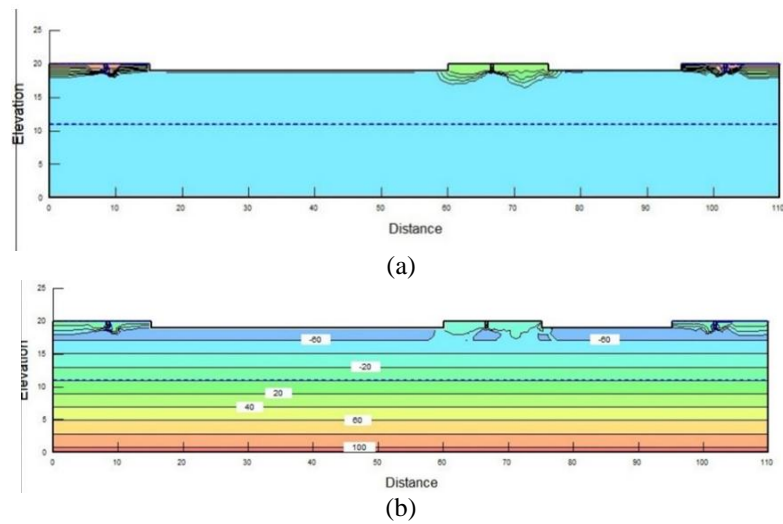
Gambar 4: Distribusi hujan

4.2 Potongan A-A'

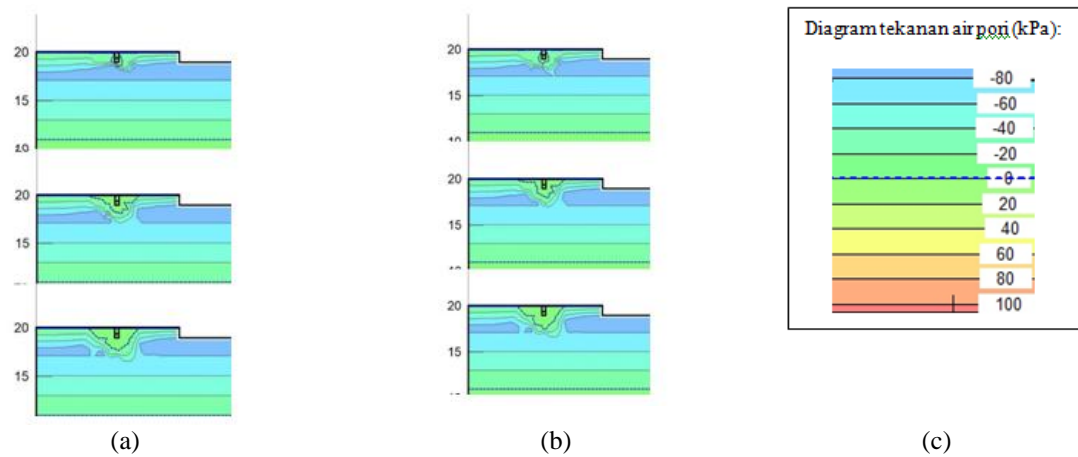
Potongan A-A' merupakan potongan melintang di tengah halaman candi dari timur-barat. Kondisi awal pada potongan ini ditampilkan pada Gambar 5. Pemodelan kondisi transien dilakukan terhadap dua kondisi *boundary conditions*, *boundary condition* hujan 10 tahunan dan hujan 15 tahunan. Hasil pemodelan transien kala ulang hujan 10 tahun dapat dilihat pada Gambar 6. Untuk dapat mengamati hasil simulasi dengan lebih jelas, pada penelitian ini hanya akan memperlihatkan satu bagian yang terkena pengaruh drainase (Gambar 7a). Untuk kala ulang hujan 15 tahun, hasil simulasi ditampilkan pada Gambar 7b dengan keterangan warna pada Gambar 8. Dari hasil simulasi tersebut, dapat dilihat bahwa ketika hujan terjadi, keberadaan saluran drainase mempercepat penyerapan air hujan, dan tidak menunjukkan terjadinya genangan air pada permukaan *paving*.



Gambar 5: (a) Kondisi *steady state* potongan A-A' (b) kondisi muka air awal



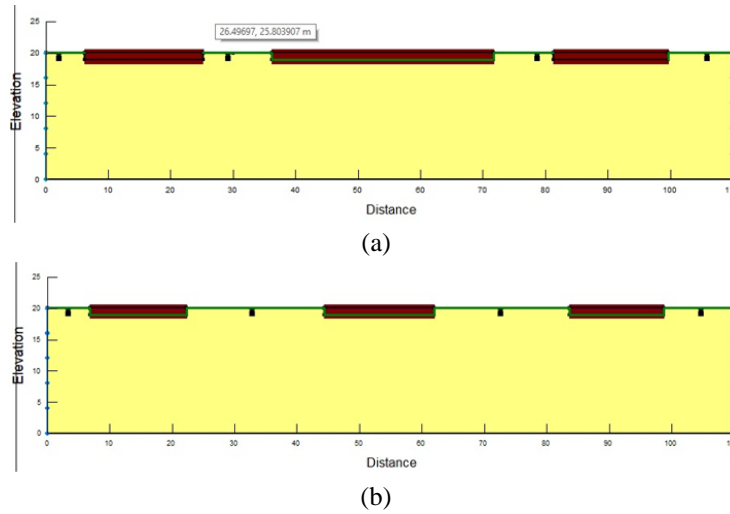
Gambar 6: Hasil simulasi potongan A-A' pada jam ke-1.1 (a) *total head* (b) tekanan air pori



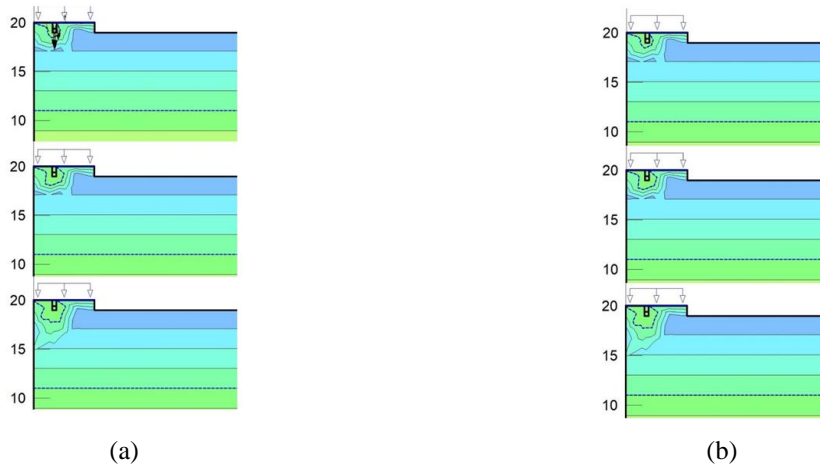
Gambar 7: (a) Hasil simulasi potongan A-A' (tekanan air pori) dengan hujan kala ulang 10 tahun jam ke 1.1-3.3-5.5 (atas-bawah); (b) hujan kala ulang 15 tahun; (c) Legenda

4.3 Potongan B-B'

Kondisi awal potongan B-B' dan C-C' ditampilkan pada Gambar 8 (a) dan (b). Hasil simulasi hujan kala ulang 10 dan 15 tahun pada potongan B-B' menunjukkan hasil yang tidak begitu berbeda dengan potongan sebelumnya. Untuk dapat mengamati lebih jelas, gambar yang ditampilkan pada penelitian ini merupakan gambar salah satu bagian drainase yang diperbesar. Hasil simulasi potongan B-B' ditampilkan pada Gambar 9 (a) dan (b).



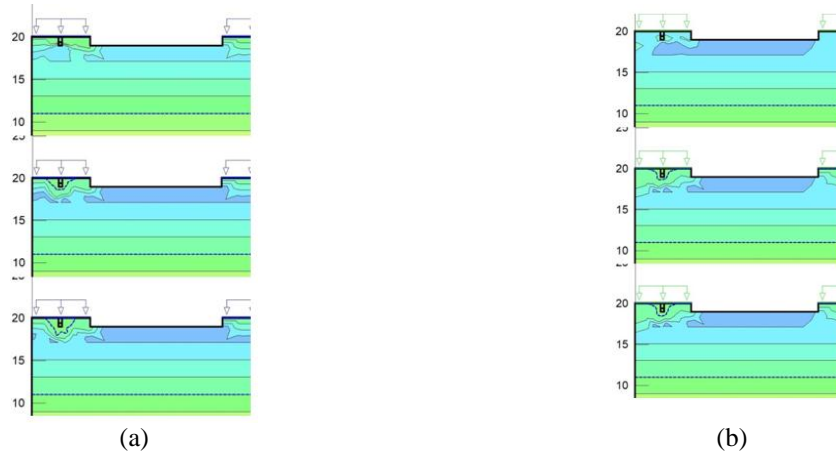
Gambar 2: Kondisi awal potongan (a) B-B', (b) C-C'



Gambar 9: (a) Hasil simulasi potongan B-B' (tekanan air pori) dengan hujan kala ulang 10 tahun jam ke 1.1-3.3-5.5 (atas-bawah); (b) hujan kala ulang 15 tahun

4.4 Potongan C-C'

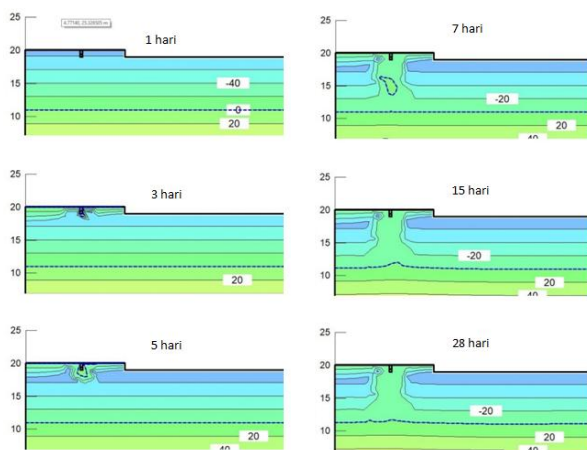
Hasil simulasi *Seep/W* pada potongan C-C' diperlihatkan pada Gambar 10 (a) dan (b). Seperti halnya dengan potongan A-A' dan B-B', pada potongan C-C' dapat dilihat bahwa saluran drainase mempercepat infiltrasi air hujan dan mencegah terbentuknya genangan air pada permukaan *paving*.



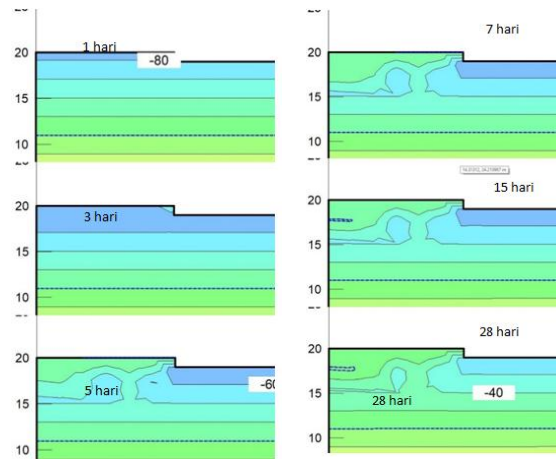
Gambar 10: (a) Hasil simulasi potongan C-C' (tekanan air pori) dengan hujan kala ulang 10 tahun jam ke 1.1-3.3-5.5 (atas-bawah) (b) hujan kala ulang 15 tahun

4.5 Hujan Bulanan

Pada simulasi hujan bulanan, nilai hujan tiap jamnya dalam satu bulan terbasah di *input* menjadi *boundary condition* hujan bulanan, dengan data hujan seperti yang telah ditampilkan pada Gambar 3. Sebagai perbandingan disimulasikan pula pengaruh hujan bulanan terhadap kondisi awal tanah tanpa drainase. Hasil simulasi diperlihatkan pada Gambar 11 dan Gambar 12. Pada simulasi hujan bulanan, pemodelan hanya dilakukan pada satu potongan yaitu potongan A-A' karena perbedaan hasil simulasi pada ketiga potongan memiliki hasil yang tidak jauh berbeda. Dari simulasi ini dapat dilihat bahwa tanah dengan sistem drainase dapat mengalirkan air pada tanah lebih cepat dibandingkan dengan tanah tanpa saluran drainase.



Gambar 11: Hasil simulasi potongan A-A' (tekanan air pori) hujan bulanan



Gambar 12: Hasil simulasi potongan A-A' (tekanan air pori) hujan bulanan tanpa drainase

4.6 Diskusi

Dari hasil telah didapatkan, dapat dilihat dari simulasi hujan bulanan pada bulan terbasah bahwa dengan adanya saluran drainase dan *paving* berpori, infiltrasi air hujan dari tanah dapat berlangsung jauh lebih cepat dibandingkan dengan kondisi tanpa drainase dan *paving* berpori. Karena dengan adanya drainase dan *paving* berpori yang memiliki nilai koefisien permeabilitas (*k*) jauh lebih besar, air dapat mengalir secara vertikal dengan lebih cepat. Dapat dilihat perbandingannya dengan hasil simulasi pada halaman candi tanpa saluran drainase, air lebih cenderung untuk mengalir secara horizontal. Hal ini dikarenakan tanah memiliki nilai koefisien permeabilitas horizontal yang lebih besar dari koefisien permeabilitas vertikalnya. Dengan adanya *paving* dengan material beton berpori, air di permukaan dapat dengan cepat mengalir ke saluran drainase sehingga mencegah terjadinya genangan air setelah hujan.

Hasil simulasi hujan jam-jaman dengan kala ulang hujan 10 tahun dan 15 tahun menunjukkan kondisi hujan ekstrim yang mungkin terjadi. Sehingga apabila pada simulasi ini saluran drainase mampu memfasilitasi penyerapan air dan mencegah terjadinya genangan, maka sistem drainase berpori dinilai tepat untuk digunakan pada halaman Candi Prambanan. Dari hasil simulasi dapat dilihat bahwa dengan kondisi hujan ekstrim, permukaan *paving* di halaman candi menjadi jenuh air (tekanan air pori = 0) diperlihatkan dengan warna diagram tekanan air pori yang berwarna hijau dan berada di dalam garis putus-putus, namun tidak sampai menyebabkan adanya genangan.

5. KESIMPULAN

Dari simulasi numerik yang dilakukan pada penelitian ini dapat disimpulkan bahwa aplikasi drainase berpori yang dirancang dinilai mampu untuk mempercepat infiltrasi air hujan di permukaan tanah. Pada kondisi hujan ekstrim baik kala ulang 10 tahun sebesar 146.894 mm, maupun 15 tahun sebesar 146.894 mm dan untuk kala ulang 15 tahun diperoleh 155.409 mm, permukaan *paving* mengalami jenuh air dimana tekanan air porinya 0, namun tidak menunjukkan terjadinya genangan air. Dan dari simulasi hujan bulanan yang dilakukan, dapat dilihat bahwa *paving* dan drainase berpori dapat dengan segera mengalirkan air hujan ke saluran drainase di bawah tanah sehingga tidak terbentuk genangan air setelah hujan.

DAFTAR PUSTAKA

- Batu, V. (1998). *Aquifer Hydraulics: A Comprehensive Guide to Hydrogeologic Data Analysis*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Bell, F.G. (1992). *Engineering Properties of Soils And Rocks. Third ed.* Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Chow, V.T., Maidment, D.R. & Mays, L.W. (1987). *Applied Hydrology*. Singapore: McGraw-Hill.
- Das, B.M. (2010). *Principles of Geotechnical Engineering. Seventh ed.* Stamford: Cengage Learning.
- Fredlund, D.G. & Rahardjo, H. (1994). *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. Canada: John Willey & Sons, Inc.
- Hardiyatmo, H.C. (2010). *Mekanika Tanah 1. Fourth ed.* Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Lestari, N.P. (2015). Pemanfaatan Bantak dan Abu Vulkanik Merapi untuk Drainase Porous di Kompleks Halaman Candi Pramaban. *Tesis*. Yogyakarta: Universitas Gadjah Mada.
- Putri, F.A. (2015). Penentuan Soil Water Characteristic Curve Tanah Berpasir Berdasarkan Alat Tensiometer dan Software Soilvision 4.23. *Tugas Akhir*. Yogyakarta: Universitas Gadjah Mada
- Reddi, L.N. (2003). *Seepage in Soil: Principles and Applications*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Rifa'i, A., Lestari, N.P. & Yasufuku, N. (2016). Drainage System of Prambanan Temple Yard Using No-Fine Concrete of Volcanic Ash And Bantak Merapi. *International Journal of Geomate*, Vol 11 (25), pp. 2499-2505.
- Terzaghi, K. and Peck, R.B. (1987). *Mekanika Tanah Dalam Praktek Rekayasa Jilid 1. Second ed.* Jakarta: Erlangga.
- Van Genuchten, M. Th. (1980). A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Science Society of America Journal*. Vol.44. pp. 892-898.