

Analisis Keruntuhan Bendungan Akibat *Piping* dan Pemetaan Genangan Banjir (Studi Kasus : Bendungan Saguling)

Dam Break Analysis Due to Piping and Flood Mapping (Case Study of Saguling Dam)

Bahri Suhada^{1*}, Hari Nugroho¹, Suprpto¹, Henny Herawati²

¹ Magister Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

² Fakultas Teknik, Jurusan Sipil, Universitas Tanjungpura Pontianak

* Penulis korespondensi : bahrisuhada@students.undip.ac.id

Tel.: 081296665954

Diterima: 12 November 2021; Direvisi: 13 Mei 2022; Disetujui: 27 Mei 2022.

DOI: 10.25299/saintis.2022.vol22(01).8081

Abstrak

Salah satu upaya penanggulangan kegagalan bendungan adalah penyusunan Rencana Tindak Darurat. Rencana tindak darurat memuat peta genangan banjir akibat keruntuhan. Peta genangan banjir merupakan aspek penting karena menjadi dasar dalam pengambilan keputusan penanggulangan kegagalan bendungan. Peta genangan banjir diperoleh dari analisis keruntuhan bendungan. Penelitian ini melakukan analisis keruntuhan bendungan Bendungan Saguling yang merupakan bendungan kaskade di Wilayah Sungai Citarum. Analisis keruntuhan dalam penelitian ini terdiri analisis hidrograf keruntuhan menggunakan HEC-HMS, penelusuran banjir menggunakan HEC-RAS, dan pengolahan informasi spasial menggunakan QuantumGIS. Skenario keruntuhan bendungan yang dimodelkan adalah keruntuhan akibat *piping* saat sunnyday dengan variasi initial *piping* pada 1/3 ketinggian, 1/2 ketinggian dan 2/3 ketinggian bendungan. Hasil analisis hidrograf keruntuhan dari ketiga skenario tersebut cenderung mirip dengan debit puncak keruntuhan sebesar 61193,6 m³/dt. Keruntuhan Bendungan Saguling mengakibatkan Bendungan Cirata mengalami *overtopping*. Sedangkan Bendungan Jatiluhur tidak mengalami *overtopping* apabila Bendungan Cirata tidak mengalami keruntuhan. Peta genangan banjir akibat keruntuhan Bendungan Saguling pada ketiga skenario cenderung mirip. Jumlah desa terdampak dengan jarak dari Bendungan Saguling kurang dari 10 km sebanyak 6 desa dari 10 desa. Desa Baranangsiang dan Desa Saguling adalah desa pertama yang terdampak banjir akibat keruntuhan Bendungan Saguling dengan estimasi waktu kedatangan banjir ± 0,25 jam semenjak dimulai keruntuhan

Kata Kunci: Kegagalan Bendungan, Rencana Tindak Darurat, Peta Genangan Banjir, Analisis Keruntuhan Bendungan, *Piping*

Abstract

One of the efforts to overcome dam failure is preparing an Emergency Action Plan. The emergency action plan contains a map of the flood inundation due to the collapse. The flood inundation map is essential because it becomes the basis for making dam failure management decisions. The flood inundation map was obtained from the dam break analysis. This study analyzes the Saguling Dam collapse, a cascade dam in the Citarum River Basin. The failure analysis in this study consisted of collapse hydrograph analysis using HEC-HMS, flood routing using HEC-RAS, and processing of spatial information using QuantumGIS. The dam failure scenario modelled is due to *piping* on sunny days with initial *piping* variations at 1/3 height, height and 2/3 height of the dam. The results of the failure hydrograph analysis of the three scenarios tend to be similar to the failure peak discharge of 61193.6 m³/s. The collapse of the Saguling Dam caused the Cirata Dam to be *overtopped*. Meanwhile, Jatiluhur Dam does not experience *overtopping* if the Cirata Dam does not collapse. The flood inundation maps due to the collapse of the Saguling Dam in the three scenarios tend to be similar. The number of affected villages less than 10 km from the Saguling Dam is six out of 10 villages. Baranangsiang Village and Saguling Village are the first villages affected by flooding due to the collapse of the Saguling Dam, with an estimated flood arrival time of ± 0.25 hours since the collapse started.

Keywords: Dam Failure, Emergency Action Plan, Flood Inundation Map, Dam Break Analysis, *Piping*

PENDAHULUAN

Bendungan adalah bangunan yang dibangun untuk menahan dan menampung air/ limbah tambang/ lumpur sehingga terbentuk waduk. Bendungan dapat dibangun dengan urukan tanah, urukan batu dan beton. Pembangunan dan pengelolaan bendungan bertujuan untuk meningkatkan kemanfaatan fungsi sumber daya air, pengawetan air, pengendalian daya rusak air dan

fungsi pengamanan tampungan limbah tambang atau lumpur [1].

Selain manfaatnya yang besar, bendungan juga memiliki risiko kegagalan yang mengancam keselamatan di hilir bendungan. Kegagalan bendungan adalah runtuhnya atau pergerakan sebagian dari bendungan atau pondasi yang mengakibatkan terlepasnya air dalam jumlah besar dan membahayakan penduduk dan properti di hilirnya [2]. Penyebab kegagalan bendungan yang

umumnya terjadi pada bendungan *earthfill* dan *rockfill* adalah *overtopping* dan erosi internal dengan persentase kejadian 48% dan 46,5% [3].

Kementerian PUPR telah menyusun tiga konsepsi keamanan bendungan untuk mengantisipasi terjadinya kegagalan bendungan yang salah satunya adalah kesiapsiagaan tindak darurat. Salah satu aspek yang harus dipersiapkan dalam kesiapsiagaan tindak darurat adalah penyusunan Rencana Tindak Darurat (RTD). Dokumen RTD akan menjadi pedoman pengelola bendungan apabila terjadi kondisi darurat. Penyusunan RTD dilengkapi dengan analisis keruntuhan bendungan [1].

Risiko bahaya yang besar dari bendungan harus diimbangi dengan RTD yang efektif. Hasil analisis keruntuhan akan menjadi input utama dalam penyusunan RTD [4]. Mengingat dampaknya yang besar, analisis keruntuhan bendungan yang akurat dan mendekati kondisi lapangan menjadi sangat penting.

Analisis keruntuhan bendungan dilakukan untuk memperkirakan potensi bencana akibat kegagalan struktur [5]. Hasil dari analisis keruntuhan adalah peta genangan banjir akibat dari keruntuhan bendungan tersebut [6]. Beberapa penelitian keruntuhan bendungan telah dilakukan di Indonesia menggunakan program HEC-RAS, Zhong Xing HY21, dan DAMBRK. [7][8] melakukan analisis keruntuhan bendungan menggunakan program HEC-RAS untuk memetakan area genangan serta menghitung perkiraan biaya kerugian menggunakan program INASafe. [9] membandingkan area genangan hilir bendungan pada saat banjir dengan dan tanpa keruntuhan bendungan menggunakan program HEC-RAS. [4][10][11][12] melakukan analisis keruntuhan bendungan menggunakan program HEC-RAS serta menginventarisir desa-desa terdampak. [6][13][14] melakukan analisis keruntuhan bendungan menggunakan program Zhong Xing HY21 serta menginventarisir desa-desa terdampak. [15] melakukan analisis keruntuhan bendungan menggunakan program DAMBRK serta menginventarisir desa-desa terdampak. Berdasarkan beberapa penelitian tersebut, program HEC-RAS lebih banyak digunakan mengingat program ini bersifat *open source*.

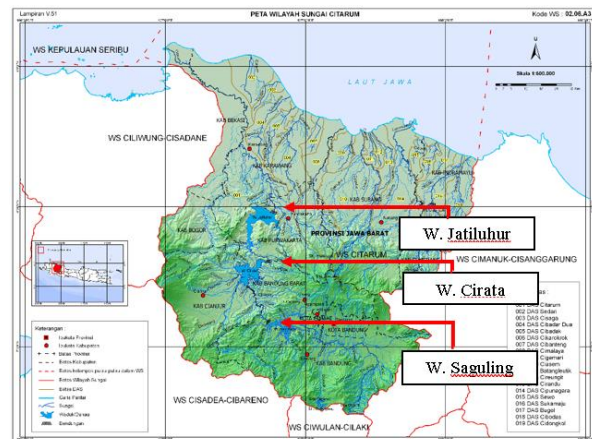
Penelitian ini melakukan analisis keruntuhan bendungan untuk mengetahui pengaruh keruntuhan terhadap daerah hilir bendungan menggunakan HEC-RAS. HEC-HMS digunakan dalam penelitian ini sebagai program tambahan untuk menghitung hidrograf keruntuhan bendungan. Untuk pengolahan informasi spasial, penelitian ini menggunakan program QuantumGIS. Ketiga program yang digunakan dalam penelitian ini bersifat *open source*.

Studi kasus dari penelitian ini adalah Bendungan Saguling yang merupakan salah satu dari tiga bendungan kaskade di Wilayah Sungai Citarum. Keruntuhan Bendungan Saguling akan

berdampak pada kenaikan muka air waduk Bendungan Cirata dan Bendungan Jatiluhur yang posisinya di hilir. Keruntuhan Bendungan Saguling juga akan berdampak pada daerah hilir setiap bendungan. Kapasitas yang besar pada Bendungan Saguling, analisis keruntuhan menjadi penting mengingat potensi risiko yang besar dengan adanya dua bendungan di hilir yang memiliki kapasitas besar dan keberadaan penduduk di setiap hilir bendungan.

METODOLOGI

Penelitian ini dilakukan pada Bendungan Kaskade Wilayah Sungai Citarum khususnya Bendungan Saguling yang terletak paling hulu. Bendungan Saguling terletak di Desa Saguling, Kecamatan Saguling, Kabupaten Bandung Barat, Provinsi Jawa Barat. Lokasi Bendungan Saguling beserta tata letaknya pada sistem kaskade dapat dilihat pada Gambar 1. Bendungan Saguling adalah bendungan yang dikelola oleh PT. Indonesia Power dan sudah beroperasi sejak tahun 1986. Bendungan Saguling digunakan sebagai pembangkit listrik dengan manfaat 2,156 juta MWH/tahun [16].



Gambar 1. Lokasi Bendungan

Sumber : Lampiran 5c PermenPUPR No.4/2015

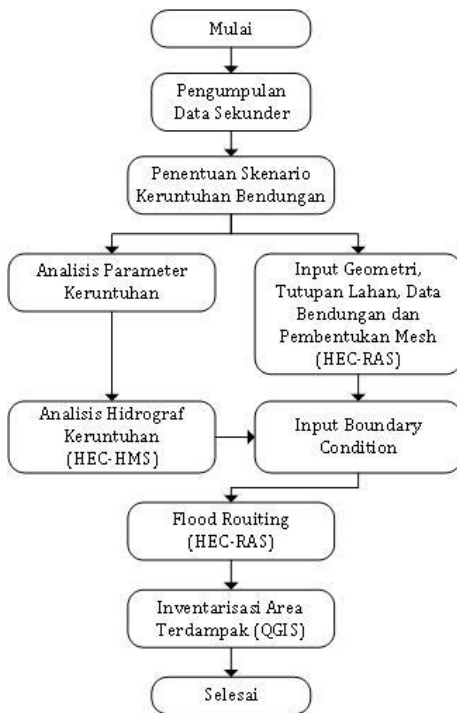
Tahapan penelitian ini secara umum dapat dilihat pada Gambar 2. Penelitian ini dilakukan menggunakan data sekunder dengan rincian sebagai berikut:

1. Data teknis Bendungan Saguling, Bendungan Cirata dan Bendungan Jatiluhur;
2. Data topografi area tinjauan menggunakan *Digital Elevation Model Nasional (DEMNAS)*;
3. Peta tutupan lahan; dan
4. Batas administrasi desa.

Skenario keruntuhan bendungan yang akan dimodelkan adalah keruntuhan bendungan akibat *piping* kondisi *sunnyday*. Keruntuhan akibat *overtopping* tidak dimodelkan dalam penelitian ini karena Bendungan Saguling masih memiliki tinggi jagaan 2,5 m apabila terjadi debit PMF dengan kondisi pintu tidak dioperasikan [16]. Hujan

ekstrem merupakan kejadian yang jarang terjadi sehingga debit PMF juga tidak dimodelkan dalam penelitian ini [17].

Parameter keruntuhan bendungan ditentukan menggunakan persamaan empiris. [18][19] telah menentukan persamaan parameter keruntuhan berdasarkan investigasi 74 bendungan urugan tanah, bendungan zona dengan inti (lempung) dan urugan batu. Persamaan tersebut untuk menentukan lebar rerata dan waktu pembentukan rekahan yang ditunjukkan pada Persamaan (1) dan Persamaan (2) yang berikutnya disebut Persamaan *Froehlich* (2008). Ilustrasi rekahan dapat dilihat pada Gambar 3.

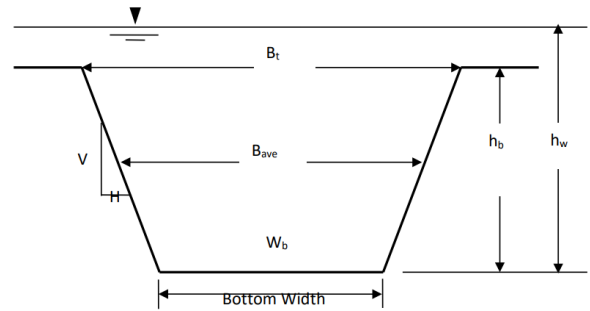


Gambar 2. Tahapan Penelitian

$$B_{ave} = 0.27 K_o V_w^{0.32} h_b^{0.04} \quad (1)$$

$$t_f = 63.2 \sqrt{\frac{V_w}{g h_b^2}} \quad (2)$$

dimana B_{ave} adalah lebar rerata rekahan (m), K_o adalah konstanta (1,3 untuk *overtopping* dan 1 untuk *piping*), V_w adalah volume reservoir saat runtuh (m^3), h_b adalah tinggi keruntuhan (m), t_f adalah waktu pembentukan rekahan (dt), dan g adalah gravitasi (m/dt^2).



Gambar 3. Ilustrasi Rekahan Keruntuhan
Sumber : HEC-RAS Hydraulic Reference Manual

[19] menjelaskan rerata kemiringan rekahan untuk keruntuhan akibat *overtopping* adalah 1H:1V, sedangkan keruntuhan akibat *piping* adalah 0,7H:1V. [9][20][21][22][23] melakukan analisis keruntuhan bendungan menggunakan Persamaan *Froehlich* (2008).

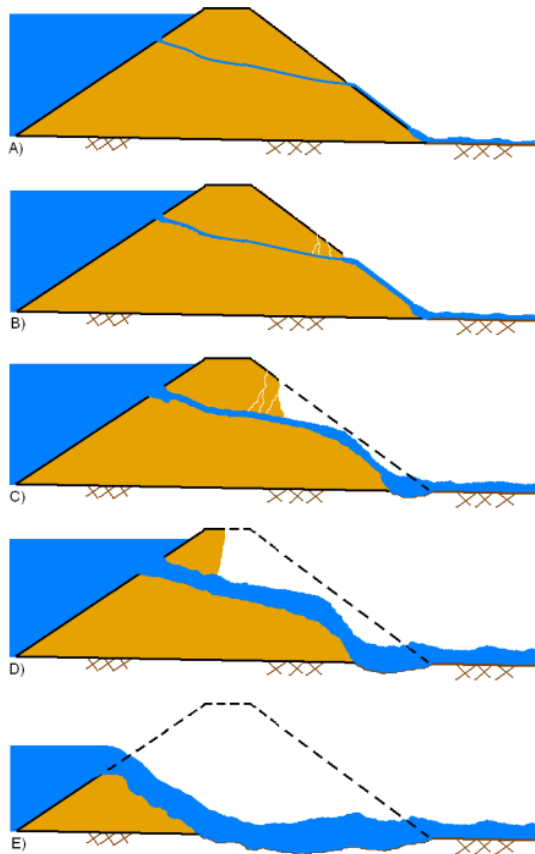
Analisis hidrograf keruntuhan dilakukan menggunakan program HEC-HMS. HEC-HMS adalah program yang dikembangkan oleh USACE untuk mensimulasikan proses hidrologi dalam secara keseluruhan. HEC-HMS juga dilengkapi *reservoirs modeling* yang mampu melakukan analisis hidrograf keruntuhan bendungan akibat *overtopping* dan *piping* [24].

Parameter yang diperlukan HEC-HMS untuk menganalisis hidrograf keruntuhan bendungan adalah data teknis bendungan, *initial conditions* muka air waduk, parameter keruntuhan bendungan dan elevasi *initial piping*. Kegagalan karena *piping* pada HEC-HMS dimulai pada titik *initial piping* bendungan dan melebar membentuk rekahan lingkaran (*circular opening*). Ketika bukaan mencapai puncak bendungan, bukaan terus berkembang hingga membentuk trapesium (*trapezoidal shape*). Ilustrasi keruntuhan akibat *piping* dapat dilihat pada Gambar 4. Aliran melalui rekahan lingkaran dimodelkan sebagai *orifice flow* pada Persamaan (3), sedangkan aliran ketika membentuk trapesium dimodelkan sebagai *weir flow* pada Persamaan (4).

$$Q = K A 2 g H_1 \quad (3)$$

$$Q = C L H_2^{\frac{3}{2}} \quad (4)$$

dimana Q adalah debit (m^3/dt), K adalah koefisien *orifice*, A adalah luas bukaan (m^2), H_1 adalah total tinggi energi (m). C adalah koefisien debit *weir flow*, L adalah lebar rekahan dan H_2 adalah tinggi energi diatar rekahan.



Gambar 4. Ilustrasi Keruntuhan Akibat *Piping*
 Sumber : HEC-RAS *Hydraulic Reference Manual* (2021)

Penelitian ini melakukan tiga kali analisis keruntuhan Bendungan Saguling dengan variasi perbedaan elevasi *initial piping*. Variasi elevasi *initial piping* akan disamakan dengan [25] yang melakukan analisis keruntuhan Bendungan Saguling akibat piping pada 1/3 tinggi bendungan pada elevasi +605, 1/2 tinggi bendungan pada elevasi +615 dan 2/3 tinggi bendungan pada elevasi +633. Sedangkan kondisi muka air Bendungan Saguling direncanakan kondisi *sunny day* (muka air normal elevasi +643 m).

Analisis penelusuran banjir dilakukan menggunakan HEC-RAS versi 6.0.0. HEC-RAS adalah program yang dikembangkan USACE mensimulasikan aliran hidrolis secara 1D *steady*, 1D dan 2D *unsteady*, transpor sedimen, pemodelan temperatur air dan pemodelan kualitas air [18]. Untuk menganalisis penelusuran banjir menggunakan HEC-RAS, data yang harus dimasukkan adalah *geometry area* tinjauan dan *boundary conditions area* tinjauan.

Data *geometry* yang di *input* kedalam HEC-RAS adalah data DEMNAS, data teknis bendungan, nilai manning sesuai tutupan lahan dan nilai persentase kekedapan setiap tutupan lahan. Nilai manning dan persentase kekedapan tutupan lahan yang digunakan disesuaikan dengan [26][27]. Rekapitulasi nilai *manning* dan nilai persentase kekedapan dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Rekapitulasi Nilai Manning dan Kekedapan

Tutupan Lahan	Nilai Manning	ImperVIOUS
Badan Air	0.05	100
Bandara / Pelabuhan	0.2	72
Belukar	0.16	5
Hutan Lahan Kering Primer	0.2	5
Hutan Lahan Kering Sekunder	0.2	5
Hutan Tanaman	0.2	5
Pemukiman	0.16	30
Perkebunan	0.05	5
Pertambangan	0.03	72
Pertanian Lahan Kering	0.05	5
Pertanian Lahan Kering Campur	0.05	5
Sawah	0.05	5
Tambak	0.05	100
Tanah Terbuka	0.05	5

Boundary conditions yang diinput pada HEC RAS terdiri dari:

1. Hidograf keruntuhan hasil analisis HEC-HMS pada *upstream boundary condition*;
2. Elevasi muka air awal untuk Bendungan Cirata dan Bendungan Jatiluhur dengan asumsi muka air kedua bendungan pada elevasi muka air normal (elevasi *spillway*);
3. *Normal depth* pada *downstream boundary condition* mengacu pada [20][28][29].

Analisis penelusuran banjir dilakukan secara 2D karena model 1D tidak mampu menganalisis perambatan banjir dari berbagai arah [22]. HEC-RAS memiliki dua alternatif persamaan untuk menganalisis 2D *unsteady flow routing*, yaitu persamaan 2D *Diffusion Wave* yang merupakan pengaturan *default* dan persamaan 2D *full Saint Venant* (umumnya disebut persamaan *full momentum*). Penelitian ini menggunakan persamaan 2D *full Saint Venant* memiliki hasil yang lebih akurat [18]. Output dari analisis keruntuhan bendungan adalah peta genangan banjir [6].

Validasi penelusuran banjir dilakukan dengan membandingkan ketinggian banjir hasil model terhadap perhitungan sederhana ketinggian banjir pada *cross section* hilir Bendungan Saguling. Persamaan yang digunakan untuk validasi dapat dilihat pada Persamaan 5 dan Persamaan 6.

$$Q = A \cdot v \tag{5}$$

$$v = \frac{1}{n} \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot i^{\frac{1}{2}} \tag{6}$$

dimana Q adalah debit banjir (m^3/dt), A adalah luas penampang basah (m^2), v adalah kecepatan aliran (m/dt), R adalah jari-jari hidrolis

(m) yang diperoleh dari luas penampang (m^2) basah dibagi dengan keliling penampang basah (m), dan i adalah kemiringan energi.

Inventarisasi area terdampak dilakukan pada tiga model keruntuhan yang telah dilakukan. Sedikitnya referensi mengenai analisis keruntuhan bendungan pada sistem kaskade, maka parameter yang akan diinventarisasi untuk Bendungan Cirata dan Bendungan Jatiluhur adalah kenaikan muka air waduk selama pemodelan, status bendungan mengalami *overtopping* atau tidak, dan waktu yang dibutuhkan agar muka air waduk kembali ke muka air normal.

Sedangkan untuk daerah hilir yang terkena dampak, [4][6][7][8][9][11] menginventarisir parameter kedalaman maksimal banjir, waktu tiba banjir, durasi banjir dan kecepatan maksimum banjir. Semua parameter ini akan dibandingkan pada tiga model keruntuhan yang telah dilakukan.

HEC-RAS versi 6.0.0 memiliki fitur RAS Mapper untuk pengolahan data secara spasial. Peta genangan banjir yang memuat informasi ketinggian banjir, durasi banjir, kecepatan aliran banjir dapat dibuat dengan fitur yang tersedia. Namun pengolahan spasial RAS Mapper masih dilakukan pada setiap mesh. RAS Mapper belum mengakomodir analisis statistik pada zona yang ditentukan. Dalam penelitian ini, inventarisasi area terdampak dengan zona berupa batas kecamatan dilakukan dengan menggunakan program QuantumGIS (QGIS). QGIS adalah program pengolahan informasi spasial yang bersifat *opensource*.

HASIL DAN DISKUSI

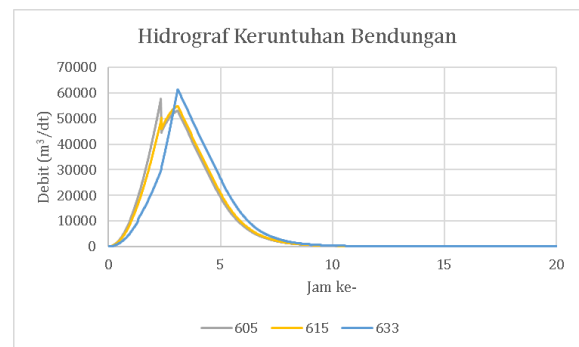
Parameter keruntuhan merupakan salah satu *input* untuk analisis hidrograf keruntuhan menggunakan HEC-HMS. Perhitungan parameter keruntuhan dilakukan menggunakan Persamaan 1 dan Persamaan 2. Perhitungan parameter keruntuhan adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{El. Puncak} &= 650.5 \text{ m} \\ \text{Elevasi dasar } \textit{breaching} &= 605 \text{ m} \\ \text{Konstanta } (K_o) &= 1 \text{ (untuk } \textit{piping}) \\ \text{Volume Reservoir } (V_w) &= 629.6.10^6 \text{ m}^3 \\ \text{Tinggi keruntuhan } (h_b) &= 45 \text{ m} \\ \text{Gravitasi } (g) &= 9.81 \text{ m/dt}^2 \\ \text{Kemiringan keruntuhan} &= 0.7 \\ \text{Lebar rerata } (B_{avg}) &= 0.27 K_o V_w^{0.32} h_b^{0.04} \\ &= 0.27.1. (629.6.10^6)^{0.32} (45)^{0.04} \\ &= 174 \text{ m} \\ \text{Waktu keruntuhan} &= 63.2 \sqrt{\frac{V_w}{gh_b^2}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Waktu keruntuhan} &= 63.2 \sqrt{\frac{629.6.10^6}{9.81.(45)^2}} \\ &= 3.09 \text{ jam} \end{aligned}$$

Analisis hidrograf keruntuhan dilakukan menggunakan HEC-HMS. Elevasi *initial piping* yang digunakan adalah +605 m, +615 m dan +633 m. Ketiga skenario menggunakan parameter keruntuhan yang sama. Hal ini dikarenakan perhitungan parameter keruntuhan menggunakan Persamaan 1 dan Persamaan 2 tidak menggunakan parameter elevasi *initial piping*. Hasil analisis hidrograf keruntuhan dapat dilihat ada Gambar 5.

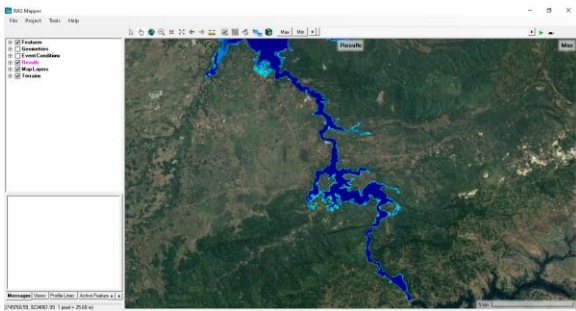
Debit banjir puncak tertinggi dihasilkan keruntuhan akibat *piping* pada elevasi +633 m dengan debit banjir sebesar 61,316 m^3/dt . Debit banjir puncak yang dihasilkan keruntuhan akibat *piping* elevasi +605 m sebesar 57,673 m^3/dt . Dan debit banjir puncak yang dihasilkan keruntuhan akibat *piping* elevasi +615 m sebesar 54,951 m^3/dt .



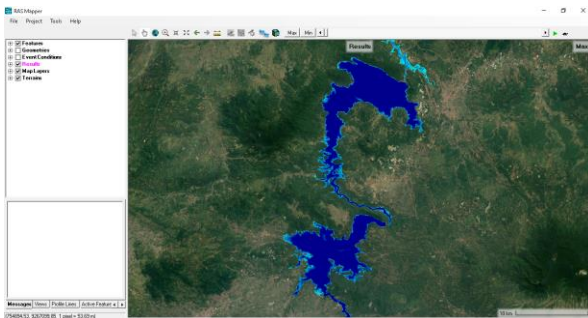
Gambar 5. Hidrograf Keruntuhan Akibat Piping

Debit banjir akibat *piping* elevasi +605 m dan +615 m memiliki dua puncak debit banjir. Hal ini akibat peralihan bentuk rekahan yang semula rekahan lingkaran dengan model perhitungan *orifice flow* yang menggunakan Persamaan 3 menjadi rekahan *trapezoidal shape* dengan model perhitungan *weir flow* yang menggunakan Persamaan 4. Peralihan ini pada *piping* elevasi +633 m tidak begitu terlihat akibat elevasi awal *piping* yang sudah tinggi.

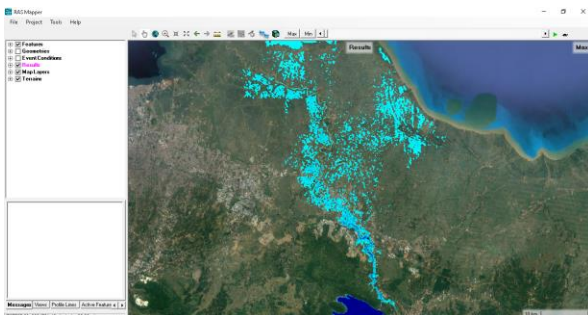
Hasil perhitungan hidrograf keruntuhan digunakan sebagai *boundary condition* sisi hulu untuk penelusuran banjir. Bendungan Cirata dan Bendungan Jatiluhur diasumsikan dalam kondisi muka air normal. Peta genangan banjir hasil penelusuran banjir dapat dilihat pada Gambar 6, Gambar 7, dan Gambar 8. *Ovelay* peta genangan banjir pada ketiga skenario secara visual tidak terlihat perbedaan yang signifikan. Perbedaan hasil analisis penelusuran banjir akan terlihat pada inventarisasi area terdampak.



Gambar 6. Peta Genangan Banjir Hilir Bendungan Saguling dan Hulu Bendungan Cirata



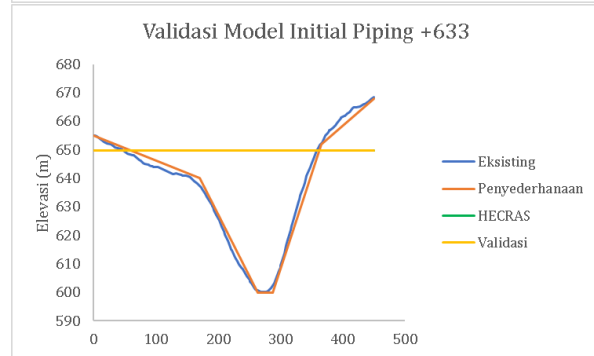
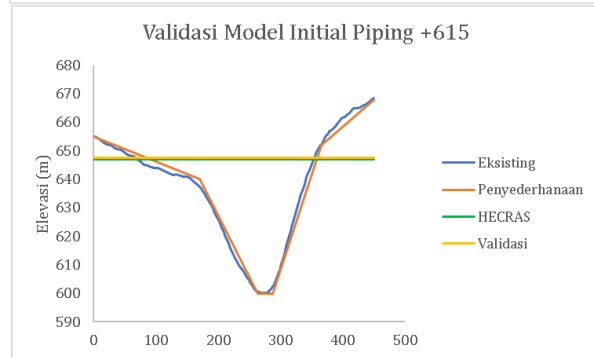
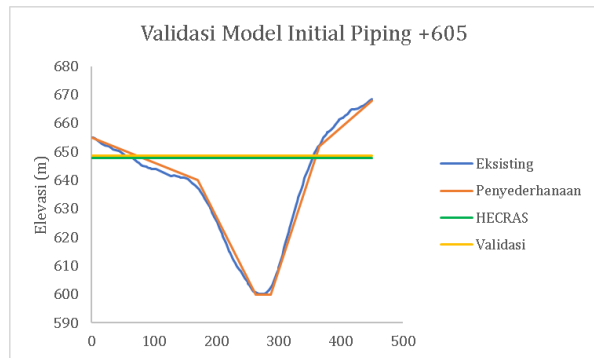
Gambar 7. Peta Genangan Banjir Bendungan Cirata dan Bendungan Jatiluhur



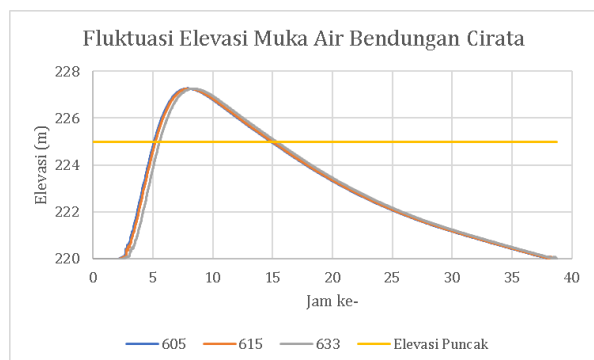
Gambar 8. Peta Genangan Banjir Hilir Bendungan Jatiluhur

Validasi hasil penelusuran banjir dilakukan dengan membandingkan ketinggian banjir hasil model terhadap perhitungan sederhana ketinggian banjir. *Cross section* yang digunakan berada pada hilir Bendungan Saguling. *Cross section* untuk perhitungan sederhana menggunakan Persamaan 5 dan Persamaan 6 akan disederhanakan untuk mempermudah perhitungan. Perbandingan ketinggian banjir hasil penelusuran banjir terhadap ketinggian banjir perhitungan sederhana dapat dilihat pada Gambar 9.

Keruntuhan Bendungan Saguling akan mempengaruhi Bendungan Cirata dan Bendungan Jatiluhur. Hal ini dikarenakan ketiga bendungan tersebut merupakan bendungan kaskade sehingga kondisi bendungan sisi hulu akan mempengaruhi bendungan sisi hilir.



Gambar 9. Validasi Hasil Penelusuran Banjir

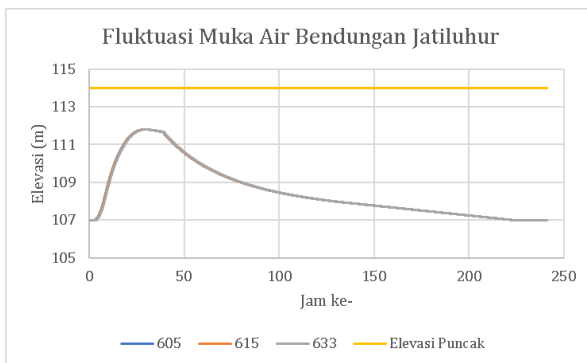


Gambar 10. Fluktuasi Muka Air Bendungan Cirata

Bendungan Cirata mengalami kenaikan muka air waduk akibat keruntuhan Bendungan Saguling seperti pada Gambar 10. Ketiga skenario elevasi *initial piping* menghasilkan fluktuasi muka waduk yang mirip, yaitu: +227.267 m akibat *piping* pada +605 m, elevasi +227.264 akibat *piping* pada +615 m dan elevasi +227.258 akibat *piping* pada +633 m.

Ketiga skenario menghasilkan elevasi muka air banjir tertinggi diatas puncak Bendungan Cirata (elevasi +225 m) sehingga Bendungan Cirata mengalami *overtopping* akibat keruntuhan Bendungan Saguling kondisi *sunnyday*. Bendungan Cirata memiliki volume tampungan banjir sebesar 192.10^6 m^3 [30] sehingga tidak mampu menampung banjir akibat keruntuhan Bendungan Saguling yang memiliki volume air sebesar $629.6.10^6 \text{ m}^3$ [16] pada saat runtuh. Waktu yang dibutuhkan Bendungan Cirata kembali ke elevasi muka air normal (+220) adalah ± 38.75 jam setelah keruntuhan Bendungan Saguling apabila tidak ada hujan susulan. Dalam penelitian ini, pintu *radial spillway* dalam keadaan terbuka penuh.

Penelitian ini telah dibatasi keruntuhan hanya dilakukan pada Bendungan Saguling. Bendungan Cirata merupakan *concrete face rockfill dam* dimana lereng hilirnya merupakan batuan dengan diameter berkisar 90 cm. Salah satu metode proteksi lereng akibat *overtopping* adalah penggunaan urukan batu atau riprap [31] sehingga dalam penelitian ini Bendungan Cirata dianggap tidak runtuh. Namun hal ini perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk memastikan kemampuan lereng hilir Bendungan Cirata dalam menahan *surfaceflow* akibat *overtopping*. Disarankan untuk penelitian selanjutnya untuk mengakomodir keruntuhan bendungan di hilir (Bendungan Cirata dan Bendungan Jatiluhur) apabila telah melewati elevasi puncak bendungan mengingat 48% kegagalan disebabkan *overtopping*.



Gambar 11. Fluktuasi Muka Air Bendungan Jatiluhur

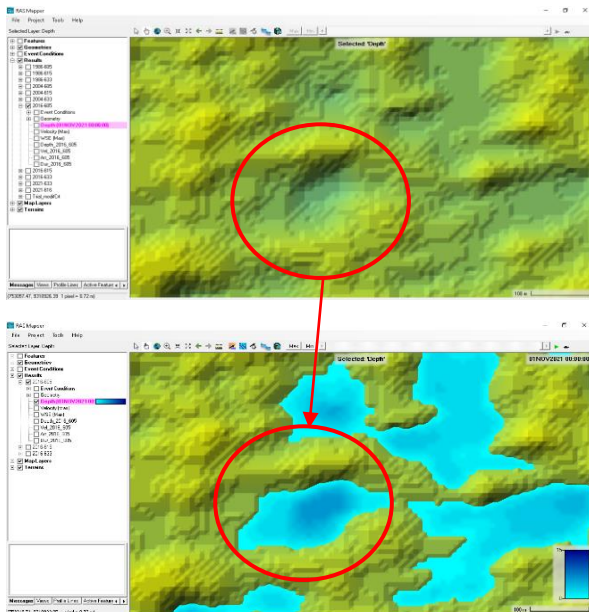
Bendungan Jatiluhur juga mengalami kenaikan muka air apabila Bendungan Saguling runtuh dan Bendungan Cirata tidak runtuh. Kenaikan muka air Bendungan Jatiluhur dapat dilihat pada Gambar 11. Ketiga skenario elevasi *initial piping* menghasilkan fluktuasi muka air Bendungan Jatiluhur yang sangat mirip.

Muka air waduk tertinggi yang terjadi adalah elevasi +111.803 m akibat *piping* +605 m, elevasi +111.802 m akibat *piping* +615 m dan elevasi +111.801 m akibat *piping* +633 m. Waktu yang dibutuhkan Bendungan Jatiluhur kembali ke elevasi muka air normal adalah ± 240 jam setelah keruntuhan Bendungan Saguling tanpa adanya hujan susulan. *Emergency spillway* tidak digunakan dalam penelitian ini. Ketiga skenario menghasilkan elevasi muka air banjir dibawah puncak Bendungan Jatiluhur (+114.5) sehingga Bendungan Jatiluhur tidak mengalami *overtopping* akibat keruntuhan Bendungan Saguling kondisi *sunny day* dengan catatan Bendungan Cirata tidak runtuh. Apabila Bendungan Cirata runtuh, maka air sejumlah kapasitas tampungan saat Bendungan Saguling dan Bendungan Cirata runtuh ($\pm 629.6.10^6 \text{ m}^3 + \pm 1177.10^6 \text{ m}^3$) akan masuk ke Bendungan Jatiluhur yang memiliki kapasitas tampungan banjir sebesar $\pm 350.10^6 \text{ m}^3$ [32]. Hal ini mengakibatkan Bendungan Jatiluhur memiliki potensi mengalami keruntuhan apabila Bendungan Saguling dan Bendungan Cirata mengalami keruntuhan.

Inventarisasi area terdampak dilakukan berdasarkan peta genangan banjir hasil penelusuran banjir menggunakan tiga skenario. Karena keterbatasan halaman penulisan, inventarisasi area terdampak hanya dilakukan pada desa yang berjarak kurang dari 10 km terhadap Bendungan Saguling. Berdasarkan hasil inventarisasi, terdapat 6 desa terdampak dari 9 desa yang berjarak kurang dari 10 km. Hasil inventarisasi dapat dilihat pada Lampiran I.

Desa terdampak pertama yang terkena banjir adalah Desa Saguling dan Desa Baranangsiang. Banjir tiba pada kedua desa ini dengan waktu perkiraan kedatangan banjir berkisar 0,23 jam hingga 0,27 jam semenjak kebocoran terjadi. Kedalaman banjir 6 desa tinjauan bervariasi berkisar 0,1 m hingga lebih dari 5 m. Kecepatan banjir pada keenam desa bervariasi pada 0,01 m/dt hingga lebih dari 5 m/dt. Durasi banjir setiap desa berkisar lebih dari 5 jam.

Hasil penelusuran banjir memiliki kekurangan yaitu durasi banjir yang lama. Peneliti telah melakukan simulasi banjir dengan durasi 7 hari tanpa adanya hujan susulan. Hasil model menunjukkan genangan belum surut hingga 7 hari. Hal ini dikarenakan adanya cekungan-cekungan pada topografi menggunakan DEMNAS. Sehingga air yang terperangkap pada cekungan tidak dapat surut seperti pada Gambar 12. Hal ini mengakibatkan durasi banjir menjadi sangat lama. Sehingga disarankan inventarisasi area terdampak hanya dilakukan pada parameter kedalaman banjir, kecepatan aliran dan waktu kedatangan banjir.



Gambar 12. Cekungan Pada DEMNAS

KESIMPULAN

Keruntuhan Bendungan Saguling mengakibatkan Bendungan Cirata mengalami *overtopping*. Apabila Bendungan Cirata tidak mengalami keruntuhan juga, maka Bendungan Jatiluhur tidak mengalami *overtopping*. Jumlah desa terdampak yang berjarak kurang dari 10 km terhadap Bendungan Saguling sebanyak 6 desa dari 10 desa. Keenam desa tersebut terkena dampak banjir dengan ketinggian maksimal lebih dari 5 m, kecepatan banjir maksimal lebih dari 5 m/dt, dan waktu kedatangan banjir berkisar 0,23 hingga 1,95 jam semenjak kebocoran terjadi.

Penelitian ini berfokus pada dampak keruntuhan Bendungan Saguling terhadap permukiman, Bendungan Cirata dan Bendungan Jatiluhur yang berada di hilir. Keruntuhan Bendungan Saguling mengakibatkan Bendungan Cirata mengalami *overtopping*. Namun dalam penelitian ini, Bendungan Cirata tidak dimodelkan runtuh. Disarankan untuk penelitian selanjutnya untuk memodelkan keruntuhan Bendungan Cirata akibat *overtopping* sehingga kondisi permukiman dan Bendungan Jatiluhur yang berada di hilir Bendungan Cirata dapat diketahui.

REFERENSI

- [1] KemenPUPR, *PermenPUPR No 27 2015 tentang Bendungan*. Jakarta: Kementerian PUPR, 2015. [Online]. Available: <https://jdih.pu.go.id/internal/assets/assets/produk/PermenPUPR/2015/05/PermenPUPR27-2015.pdf>
- [2] B. G. Look, *Handbook of Geotechnical Investigation and Design Tables*. The Netherlands: Taylor & Francis, 2007. doi: 10.1201/9780203946602.
- [3] R. Fell, P. MacGregor, D. Stapledon, and G. Bell, *Geotechnical Engineering of Dams*. 2015. doi: 10.1201/noe0415364409.
- [4] K. M. Murdiani, S. Sangkawati, and K. W. Sadono, "Pemodelan Keruntuhan Bendungan Menggunakan HEC-RAS 2D Studi Kasus Bendungan Gondang, Kabupaten Karanganyar," *Rekayasa*, vol. 13, no. 2, 2020, doi: 10.21107/rekayasa.v13i2.6872.
- [5] FERC, *FERC Engineering Guidelines Risk-Informed Decision Making Chapter R21 Dam Breach Analysis*. Washington, D,C, 2014. [Online]. Available: <https://www.ferc.gov/sites/default/files/2020-04/chapter-R21.pdf>
- [6] M. Arifin and M. A. Budiyanto, "Analisis Keruntuhan Bendungan (Dam Break Analysis) dalam Upaya Mitigasi Bencana (Studi Kasus di Waduk/ Bendungan Tempuran)," *CivETech*, vol. 14, no. 2, 2019, doi: 10.47200/civitech.v14i2.707.
- [7] M. A. F. Khairi, H. Suprijanto, and A. P. Hendrawan, "Analisis Keruntuhan Bendungan Rukoh Kabupaten Pidie Menggunakan Aplikasi HEC-RAS dan Berbasis InaSAFE," *JTRESDA*, vol. 2, no. 1, pp. 055–066, 2022, doi: <https://doi.org/10.21776/ub.jtresda>.
- [8] F. R. Pramana, P. T. Juwono, and R. Asmaranto, "Analisa Keruntuhan Bendungan Kering Ciawi Menggunakan Program HEC-RAS dan InaSAFE," *J. Teknol. dan Rekayasa Sumber Daya Air*, vol. 1, no. 2, pp. 524–534, Jul. 2021, doi: 10.21776/ub.jtresda.2021.001.02.16.
- [9] M. B. Ansori, A. A. N. S. Damarnegara, N. F. Margini, and D. A. D. Nusantara, "Flood Inundation And Dam Break Analysis For Disaster Risk Mitigation (A Case Study Of Way Apu Dam)," *Int. J. GEOMATE*, vol. 21, no. 84, 2021, doi: 10.21660/2021.84.j2130.
- [10] P. I. Purwanto, P. T. Juwono, and R. Asmaranto, "Analisa Keruntuhan Bendungan Tugu Kabupaten Trenggalek," *J. Tek. Pengair.*, vol. 8, no. 2, pp. 222–230, Nov. 2017, doi: 10.21776/ub.pengairan.2017.008.02.8.
- [11] S. Siswanto, S. Suprpto, and A. L. Huda, "Pendekatan GIS dalam Pemodelan Keruntuhan Bendungan Menggunakan HEC-RAS 2D (Studi Kasus Bendungan Logung, Kabupaten Kudus)," *Rekayasa*, vol. 12, no. 2, pp. 112–119, Oct. 2019, doi: 10.21107/rekayasa.v12i2.5807.
- [12] P. Wijayanti, M. Suprpto, and A. P. Saido, "Analisis Keruntuhan Bendungan Pacal," *Matriks Tek. Sipil*, vol. 1 No.4 / D, no. 4, 2013, doi: <https://doi.org/10.20961/mateksi.v1i4.37505>.
- [13] D. Wirustyastuko and J. Nugroho, "Analisis Wilayah Tergenang dan Perilaku Banjir pada Simulasi Kegagalan Bendungan Ciawi,"

- J. Tek. Sipil*, vol. 20, no. 2, p. 121, Aug. 2013, doi: 10.5614/jts.2013.20.2.5.
- [14] K. E. Milleanisa, R. Asmaranto, and P. T. Juwono, "Analisa Keruntuhan Bendungan Gembong di Kabupaten Pati Dengan Menggunakan Program Zhong Xing HY21," *J. Teknol. dan Rekayasa Sumber Daya Air*, vol. 1, no. 2, pp. 864–875, Jul. 2021, doi: 10.21776/ub.jtresda.2021.001.02.43.
- [15] A. Murdhianti, P. T. Juwono, and R. Asmaranto, "Mitigasi Bencana Banjir Akibat Keruntuhan Bendungan Berdasarkan Dambreak Analysis Pada Bendungan Benel di Kabupaten Jembrana," *J. Tek. Pengair.*, vol. 7, no. 2, 2016, [Online]. Available: <https://www.jurnalpengairan.ub.ac.id/index.php/jtp/article/view/295>
- [16] PT. Kwarsa Hexagon, "Kajian Inspeksi Besar Bendungan Saguling - Laporan Utama," Bandung, 2017.
- [17] N. Iriawan and J. S. I. Hanugraheni, "Pemodelan Bayesian Hirarki Data Curah Hujan Ekstrem di Jakarta," *J. Sains dan Seni ITS*, vol. 5, no. 1, 2016, doi: 10.12962/j23373520.v5i1.14378.
- [18] USACE, "HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual," 2021. [Online]. Available: [https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS 5.0 Reference Manual.pdf](https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS%205.0%20Reference%20Manual.pdf)
- [19] D. C. Froehlich, "Embankment Dam Breach Parameters and Their Uncertainties," *J. Hydraul. Eng.*, vol. 134, no. 12, pp. 1708–1721, Dec. 2008, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:12(1708).
- [20] M. F. Shahrin and F. C. Ros, "Dam Break Analysis of Temenggong Dam Using HEC-RAS," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 479, p. 012041, Jul. 2020, doi: 10.1088/1755-1315/479/1/012041.
- [21] E. Psomiadis, L. Tomanis, A. Kavvadias, K. X. Soulis, N. Charizopoulos, and S. Michas, "Potential Dam Breach Analysis and Flood Wave Risk Assessment Using HEC-RAS and Remote Sensing Data: A Multicriteria Approach," *Water*, vol. 13, no. 3, p. 364, Jan. 2021, doi: 10.3390/w13030364.
- [22] A. Urzică *et al.*, "Using 2D HEC-RAS modeling and embankment dam break scenario for assessing the flood control capacity of a multireservoir system (Ne Romania)," *Water (Switzerland)*, vol. 13, no. 1, Jan. 2021, doi: 10.3390/w13010057.
- [23] M. G. Tedla, Y. Cho, and K. Jun, "Flood Mapping from Dam Break Due to Peak Inflow: A Coupled Rainfall–Runoff and Hydraulic Models Approach," *Hydrology*, vol. 8, no. 2, p. 89, Jun. 2021, doi: 10.3390/hydrology8020089.
- [24] USACE, "HEC-HMS Technical Reference Manual," 2021. <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/hmsdocs/hmstrm/modeling-reservoirs/dam-break> (accessed Jul. 11, 2021).
- [25] PT. Kwarsa Hexagon, "Kajian Inspeksi Besar Bendungan Saguling - Laporan Akhir Rencana Tindak Darurat," Bandung, 2017.
- [26] USACE, "River Analysis System HEC-RAS Mapper User ' s Manual," 2021. [Online]. Available: <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs/rmum/6.1>
- [27] I. D. Tisnasuci, A. Sukmono, and F. Hadi, "Analisis Pengaruh Perubahan Tutupan Lahan Daerah Aliran Sungai Bodri Terhadap Debit Puncak Menggunakan Metode Soil Conservation Service (Scs)," *J. Geod. Undip*, vol. 10, no. 1, 2020.
- [28] A. Leoul and N. Kassahun, "Dam Breach Analysis Using HEC-RAS and HEC-GeoRAS: The Case of Kesem Kebena Dam," *Open J. Mod. Hydrol.*, vol. 09, no. 04, pp. 113–142, 2019, doi: 10.4236/ojmh.2019.94007.
- [29] A. Mihai-Pintilie, C. I. Cîmpianu, C. C. Stoleriu, M. N. Pérez, and L. E. Paveluc, "Using High-Density LiDAR Data and 2D Streamflow Hydraulic Modeling to Improve Urban Flood Hazard Maps: A HEC-RAS Multi-Scenario Approach," *Water*, vol. 11, no. 9, p. 1832, Sep. 2019, doi: 10.3390/w11091832.
- [30] PT. Indra Karya (Persero) Divisi Engineering I, "Inspeksi Besar Bendungan Cirata - Laporan Utama," Malang, 2020.
- [31] FEMA, "Technical Manual: Overtopping Protection for Dams," 2014. [Online]. Available: https://damfailures.org/wp-content/uploads/2015/06/Technical-Manual_Overtopping-Protection-for-Dams.pdf
- [32] BBWS Citarum, "Special Study on Jatiluhur Dam Safety Improvement and Rehabilitation The Dam Operational Improvement and Safety Project (DOISP) - Technical Report On Downstream Flood Assessment Volume I - Estimation of Floods," Bandung, 2015.

Lampiran I

Jarak	Desa	Provinsi	Kedalaman Banjir (m)			Kecepatan Banjir			Durasi Banjir (jam)			Waktu Banjir Tiba (Jam)		
			+605	+615	+633	+605	+615	+633	+605	+615	+633	+605	+615	+633
2.41	Baranangsiang	Jawa Barat	0.12->5	0.11->5	0.1->5	0.02->5	0.02->5	0.08->5	0.1->5	0.1->5	0.12->5	0.27-2.38	0.28-3.2	0.33-3.2
2.54	Saguling	Jawa Barat	0.12->5	0.12->5	0.16->5	0.05->5	0.04->5	0.05->5	0.17->5	0.1->5	0.12->5	0.23-3.78	0.25-3.13	0.28-3.22
3.78	Jati	Jawa Barat												
5.73	Ciptaharja	Jawa Barat												
6.77	Rajamanda lakulon	Jawa Barat	0.1->5	0.1->5	0.1->5	0.01->5	0->5	0.01->5	0.13->5	0.12->5	0.12->5	0.87-3.75	0.9-4.12	1.05-4.28
6.78	Cihea	Jawa Barat	0.1->5	0.1->5	0.1->5	0.02->5	0.01->5	0.01->5	0.1->5	0.1->5	0.1->5	0.93-3.83	0.97-3.85	1.13-4.25
9.01	Cipatat	Jawa Barat												
9.20	Mandalawangi	Jawa Barat	0.12->5	0.1->5	0.1->5	0.04->5	0.03->5	0.02->5	0.37->5	0.25->5	0.12->5	1.45-3.88	1.52-3.93	1.7-4.32
9.79	Mekarwangi/ Sukatani	Jawa Barat	0.33->5	0.47->5	0.7->5	0.34-2.04	0.32-1.97	0.28-1.77	0.52->5	0.62->5	0.75->5	1.67-3.72	1.73-3.77	1.95-4.03

*Keterangan : +605, +615, +633 adalah elevasi *initial piping*