

Pengaruh Keruntuhan Bendungan Ngancar terhadap Elevasi Muka Air Waduk Gajah Mungkur

Ashfi Luthfita Cahyani dan Hendra Wahyudi

Departemen Teknik Infrastruktur Sipil, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

e-mail: hendra_w@ce.its.ac.id

Abstrak—Peraturan Menteri PUPR Nomor 27/PRT/M/2015 tentang bendungan, menyebutkan bahwa setiap bendungan harus dilengkapi dengan Dokumen Rencana Tindak Darurat (RTD) dalam rangka antisipasi penyelamatan jiwa dan harta benda, apabila terjadi kegagalan bendungan. Maka atas dasar tersebut, maka analisis keruntuhan diperlukan untuk Bendungan Ngancar. Sebagai bentuk tindakan preventif perlu dilakukan analisis kondisi hidrolis alur dan lembah sungai di hilir (*downstream valley*) bendungan dan pengaruh keruntuhan Bendungan Ngancar terhadap Bendungan Gajah Mungkur yang ada di hilirnya. Dan mengingat bahwa Waduk Ngancar merupakan waduk yang telah dibangun dari tahun 1942 dan telah berdiri selama kurang lebih 79 tahun. Analisis keruntuhan bendungan Bendungan Ngancar dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui kedalaman banjir, kecepatan aliran yang ditimbulkan, dampak yang ditimbulkan dari keruntuhan berupa peta genangan banjir, klasifikasi bahaya pada wilayah terdampak, dan kondisi muka air Waduk Gajah Mungkur sebagai imbas keruntuhan Bendungan Ngancar. Analisis keruntuhan Bendungan Ngancar ini dilakukan dengan menggunakan bantuan program HEC-RAS 6.2. Bendungan Ngancar memiliki volume muka air normal 371.56 ribu m³ dan saat muka air banjir memiliki volume 498.92 ribu m³. Simulasi keruntuhan bendungan dilakukan dengan menggunakan Q 0,5 PMF. Pada hasil simulasi keruntuhan didapatkan kedalaman banjir tertinggi adalah 8,16 m dengan kecepatan aliran 6,84 m/s. jarak genangan terjauh mencapai 13,7 m dari Bendungan Ngancar. Akibat dari keruntuhan ini terdapat 5 pemukiman desa tergenang dan seluas 85,6 hektar sawah dan ladang penduduk tergenang. Adapun kondisi Waduk Gajah Mungkur yang berjarak 8,5 km dari Bendungan Ngancar mengalami peningkatan elevasi muka air waduk hingga mencapai 139 mdpl dari muka air banjir Waduk Gajah Mungkur.

Kata Kunci—Bendungan Ngancar, HEC-RAS, Keruntuhan Bendungan, Rencana Tindak Darurat, Skenario *Piping*.

I. PENDAHULUAN

WADUK Ngancar merupakan salah satu waduk di Kabupaten Wonogiri yang menjadi hulu Sungai Bengawan Solo. Waduk Ngancar yang membendung Sungai Belik atau Sungai Jarak terletak di Desa Selopuro, Batuwarno, Wonogiri. Bendungan di Waduk Ngancar dibangun oleh pemerintah Belanda pada tahun 1942 hingga 1944, yang kemudian pada tahun 1966 oleh pemerintah Indonesia dipulihkan kembali fungsinya [1].

Waduk Ngancar merupakan waduk yang dibangun untuk memenuhi kebutuhan irigasi sebanyak 1.300 ha di daerah irigasi Kecamatan Baturetno seperti pada Gambar 1. Pembangunan suatu bendungan di samping mempunyai manfaat yang sangat besar bagi manusia juga menyimpan potensi bahaya yang sangat besar, di mana bila bendungan tersebut runtuh dapat mengakibatkan bencana yang sangat besar di daerah hilir. Pada hilir Bendungan Ngancar perkembangan masyarakat di daerah hilir menjadi daerah



Gambar 1. Lokasi waduk Ngancar.

pemukiman, pertanian, industri, perdagangan dan banyaknya fasilitas umum, hal ini menyebabkan makin bertambahnya tingkat bahaya akibat keruntuhan bendungan. Ditambah lagi menurut PU SDA Provinsi Jawa Tengah kondisi Waduk Ngancar mengalami rusak sedang.

Apabila keruntuhan bendungan Ngancar terjadi, maka air yang tertampung di bendungan akan mengalir ke lembah sungai di hilir bendungan dengan debit yang sangat besar, kecepatan tinggi dan waktu yang sangat singkat. Apabila kapasitas sungai di hilir bendungan tidak dapat menampung debit banjir tersebut, maka air akan meluap ke luar alur sungai dan menggenangi daerah pemukiman maupun lahan pertanian di sepanjang alur sungai. Disisi lain hilir Waduk Ngancar merupakan hulu dari Waduk Gajah Mungkur. Sehingga hal tersebut dapat memengaruhi kondisi muka air Waduk Gajah Mungkur yang berada di sisi hilir Waduk Ngancar.

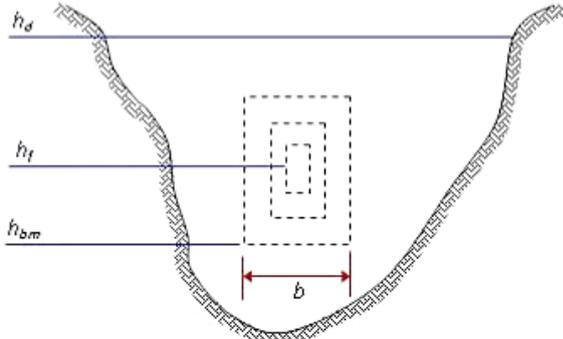
Peraturan Menteri PUPR Nomor 27/PRT/M/2015 tentang bendungan, menyebutkan bahwa setiap bendungan harus dilengkapi dengan Dokumen Rencana Tindak Darurat (RTD) dalam rangka antisipasi penyelamatan jiwa dan harta benda, apabila terjadi kegagalan bendungan. Maka atas dasar tersebut, maka Analisis Keruntuhan diperlukan untuk Bendungan Ngancar [2].

Studi kasus dari penelitian ini adalah Bendungan Ngancar yang merupakan bagian hulu di Wilayah Sungai Bengawan Solo. Keruntuhan Bendungan Ngancar akan berdampak pada kenaikan muka air Waduk Gajah Mungkur yang posisinya di hilir Bendungan Ngancar. Keruntuhan Bendungan Ngancar juga akan berdampak pada daerah hilir di sekitar bendungan.

Maka didapatkan rumusan masalah yang ada sebagai berikut: (1) berapa kedalaman banjir maksimum dan kecepatan banjir maksimum akibat keruntuhan Bendungan Ngancar, (2) bagaimana klasifikasi daerah terkena bahaya akibat keruntuhan Bendungan Ngancar, dan (3) bagaimana elevasi muka air Waduk Gajah Mungkur sebagai akibat dari keruntuhan Bendungan Ngancar.

Tabel 1.
Sifat Khas Parameter Distribusi

No.	Distribusi	Persyaratan
1	Normal	CS = 0
2	Log Normal	CS = 3 CV
3	Gumbel	CS ≈ 1,14 CK ≈ 5,4002
4	Log Pearson III	Selain dari nilai di atas



Gambar 3. Rekahan karena *piping*.

II. URAIAN PENELITIAN

A. Distribusi Hujan

Tinggi hujan rencana adalah besarnya curah hujan yang dipakai sebagai dasar perhitungan debit rencana. Sifat khas parameter dari masing-masing distribusi seperti Tabel 1.

1) Distribusi Normal

Berikut adalah rumus untuk mencari hujan periode ulang dengan metode distribusi normal:

$$Xt = \bar{x} + k.S \tag{1}$$

dengan Xt menunjukkan curah hujan periode ulang (mm/hari), \bar{x} menunjukkan nilai hujan maksimum rata-rata (mm/hari), S menunjukkan simpangan baku, dan Kt menunjukkan faktor frekuensi (nilai variabel reduksi gauss).

2) Distribusi Gumbel

Rumus untuk menghitung distribusi Gumbel adalah sebagai berikut.

$$X(t) = Xrt + Sd.K \tag{2}$$

Dengan Sn adalah *reduced standard deviasi* sebagai fungsi dari banyaknya data n , $X(t)$ adalah curah hujan rencana untuk periode ulang tertentu, Xrt adalah harga rata-rata dari data curah hujan, Sd adalah standar deviasi dari data, dan K merupakan faktor frekuensi yang merupakan fungsi dari periode ulang (*return period*) dan tipe distribusi frekuensi. Nilai K dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$K = \frac{YT - Yn}{Sn} \tag{3}$$

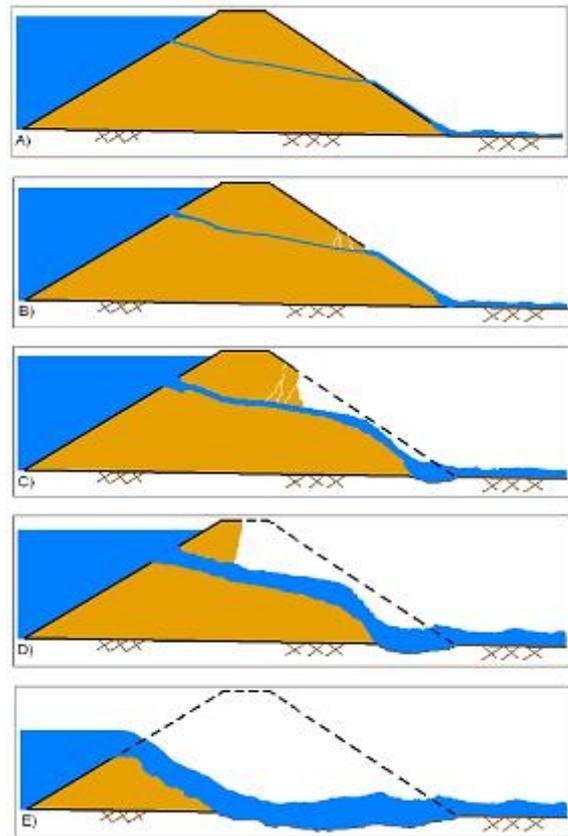
dengan YT adalah *reduced variate* sebagai fungsi dari waktu balik (T) untuk distribusi Gumbel, berharga sebagai berikut:

$$YT = -\ln\left(\frac{T}{T-1}\right)$$

$$YT = -\left(0,834 + 2,303 \log \log\left(\frac{T}{T-1}\right)\right) \tag{4}$$

Maka perumusan dapat dituliskan sebagai berikut.

$$X(t) = Xrt + \frac{Sd}{Sn}(YT - Yn) \tag{5}$$



Gambar 2. Ilustrasi keruntuhan akibat *pipings*.

3) Distribusi Log Pearson Type III

Distribusi Log Pearson *type III* dapat dihitung dengan perumusan sebagai berikut.

$$\log Xtr = \overline{\log x} + k.S \tag{6}$$

dengan k merupakan variabel standar untuk X yang besarnya tergantung koefisien kemencengan (Cv).

B. Uji Kecocokan Distribusi Chi Square dan Smirnov Kolmogorov

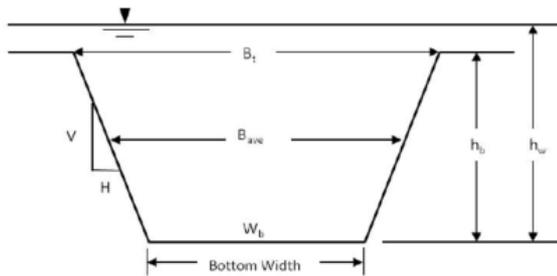
Uji chi kuadrat dimaksudkan untuk menentukan apakah distribusi peluang yang telah dipilih dapat mewakili dari distribusi statistik sampel data yang dianalisis. Pengambilan keputusan uji ini menggunakan parameter χ^2 oleh karena itu disebut dengan uji chi kuadrat. Untuk mengetahui nilai derajat kepercayaan berdasarkan dari derajat kebebasan [3]. Perhitungan distribusi akan dapat diterima apabila $\chi_h^2 < \chi^2$.

$$\chi_h^2 = \sum_1^n \frac{(Oi - Ei)^2}{Ei} \tag{7}$$

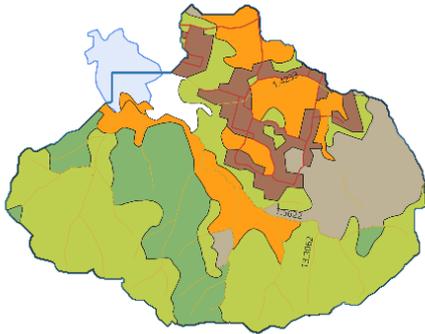
dengan χ_h adalah parameter chi-kuadrat terhitung, dan χ^2 adalah nilai kritis berdasarkan derajat kepercayaan dan derajat kebebasan.

Uji kecocokan Kolmogorov Smirnov, sering juga disebut uji kecocokan non parametrik (*non parametric test*), karena pengujinya tidak menggunakan fungsi distribusi tertentu. Prosedurnya adalah sebagai berikut [3]: (1) urutkan data (dari besar ke kecil atau sebaliknya) dan tentukan besarnya peluang masing-masing data tersebut, (2) tentukan nilai masing-masing peluang teoritis dari hasil penggambaran data (persamaan distribusinya), (3) dari kedua nilai peluang tersebut tentukan selisih terbesarnya antara peluang dan pengamatan dengan peluang teoritis,

$$D = \max[P(X_m) - P'(X_m)] \tag{8}$$



Gambar 4. Deskripsi parameter rekahan.



Gambar 5. Daerah tangkapan air bendungan Ngancar.

dan (4) Berdasarkan tabel nilai kritis (uji Kolgomorov Smirnov) [3], tentukan harga D_0 . Apabila $D < D_0$ maka distribusi teoritis yang digunakan untuk menentukan persamaan distribusi dapat diterima, apabila $D > D_0$ maka distribusi teoritis yang digunakan untuk menentukan persamaan distribusi tidak dapat diterima.

C. Analisis Probable Maximum Presipitation (PMP)

Curah hujan maksimum boleh jadi (*Probable Maximum Precipitation*, PMP) dihitung dengan menggunakan Metode *Hershfield*. Metode *Hershfield* merupakan metode yang digunakan untuk memperkirakan nilai hujan maksimum boleh jadi [4].

D. Penelusuran Banjir

Penelusuran banjir di waduk diperlukan agar mengetahui debit *outflow* tinggi air maksimum yang bersesuaian sebagai dasar perencanaan hidrolika struktur. Prosedur penelusuran banjir pada prinsipnya menggunakan dasar persamaan kontinuitas massa aliran sederhana, yaitu sebagai berikut:

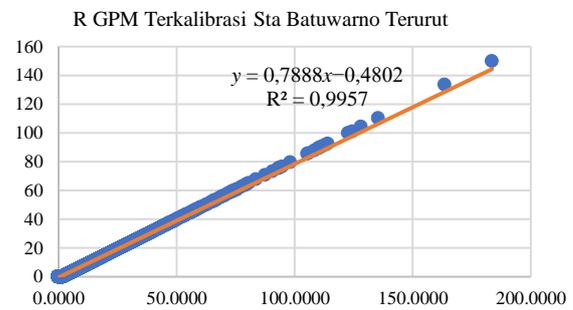
$$I - O = \frac{ds}{dt} \tag{9}$$

dengan I adalah aliran masuk (*inflow*) ke ruas sungai ($m^3/detik$), O adalah aliran keluar (*outflow*) dari ruas sungai ($m^3/detik$), ds adalah perubahan tampungan (*storage*) di ruas sungai (m^3), dan dt adalah interval waktu penelusuran (detik, jam, atau hari).

Ambang pelimpah direncanakan mampu melewati debit banjir dengan periode ulang 1000 tahun (Q_{1000}) yang diregulasi oleh *reservoir* dengan kontrol debit *Probable Maximum Flood* atau PMF (QPMF). Guna mengetahui besarnya debit *outflow* yang melewati *spillway* dilakukan perhitungan *reservoir routing* diperlukan data-data sebagai berikut: (1) hubungan volume tampungan dengan elevasi waduk, (2) hubungan elevasi permukaan air dan *outflow* serta hubungan tampungan dan *outflow*, (3) hidrograf *inflow*, dan (4) Nilai awal untuk variabel S , I , dan Q saat $t = 0$.

Tabel 2. Data Hujan Harian Maksimum

No.	Tahun	R GPM Max	Jumlah R GPM
1	2003	63,63	1.163,91
2	2004	100,99	1.114,82
3	2005	149,64	1.522,19
4	2006	56,81	1.111,86
5	2007	99,61	1.617,63
6	2008	63,99	1.375,43
7	2009	89,43	1.143,25
8	2010	104,06	2.213,35
9	2011	87,66	1.134,33
10	2012	133,27	1.476,05
11	2013	92,39	1.832,92
12	2014	60,77	1.015,68
13	2015	90,57	1.301,36
14	2016	62,27	1.988,64
15	2017	88,99	1.331,27
16	2018	35,62	832,65
17	2019	55,60	631,11
18	2020	45,90	1.113,08
19	2021	59,59	1.321,08
20	2022	56,27	1.650,47



Gambar 6. Grafik regresi linier RGPM dan R sta Batuwarno.

Penelusuran banjir dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan kontinuitas sebagai berikut,

$$\frac{(I_1 + I_2)}{2} - \frac{(Q_1 + Q_2)}{2} = S_2 - S_1 \tag{10}$$

dengan I_1, I_2 adalah *inflow* pada waktu t_1, t_2 ; O_1, O_2 adalah *outflow* pada waktu t_1, t_2 ; dan S_1, S_2 adalah volume tampungan pada waktu t_1, t_2 .

Persamaan dengan periode penelusuran Δt setelah disederhanakan, menjadi:

$$\frac{(I_1 + I_2)}{2} \Delta t + \left(S_1 - \frac{O_1 \Delta t}{2} \right) = \left(S_2 + \frac{O_2 \Delta t}{2} \right) \tag{11}$$

E. Keruntuhan Bendungan

Piping adalah ketika air yang meresap melalui bendungan dan fondasinya bisa membawa partikel tanah yang bebas bermigrasi seperti pada Gambar 2 [5].

Rekahan karena *piping* disimulasikan sebagai lubang (*orifice*) rekahan berbentuk segiempat yang tumbuh dengan waktu keatas dan kebawah dalam tubuh bendungan. Aliran kejut (*instantaneous flow*) lewat rekahan tersebut dihitung dengan rumus *orifice* atau sebagai ambang lebar, tergantung pada posisi muka air di waduk dan puncak dari *orifice*. Debit yang keluar dari kedua macam rekahan tersebut merupakan hidrograf banjir yang terjadi pada penampang melintang (permulaan), yang harus ditelusur ke hilir di sepanjang lembah sungai dengan metode "*unsteady flow*".

Saat ini dalam perangkat lunak seperti HEC-RAS, pengguna hanya diperbolehkan memasukkan satu nilai untuk koefisien *weir* rekahan dan untuk koefisien *piping*. Karena perkiraan arus puncak sangat penting dalam proses ini, kita

Tabel 3.
Analisis Frekuensi dan Uji Kecocokan Distribusi Hujan

No.	Periode Ulang (Tahun)	Curah Hujan Rancangan			
		Normal (mm)	Log Normal (mm)	Gumbel (mm)	Log Pearson <i>type</i> III (mm)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
1	2	79.853	75.094	75.559	75.177
2	5	104.257	101.695	106.542	101.729
3	10	117.040	119.201	127.056	119.194
4	20	127.499	135.744	146.733	
5	25	127.499	135.744	152.975	141.386
6	50	139.411	157.398	172.203	157.073
7	100	147.546	174.140	191.290	173.054
8	200	154.809	190.586	210.306	189.152
9	500	163.525	212.386	235.395	
10	1000	169.626	229.112	254.357	242.280

Uji Kesesuaian Distribusi				
Uji Chi-Kuadrat				
χ^2_{hitung}	0,400	7,200	0,400	14,800
χ^2_{tabel}	3,841	3,841	3,841	3,841
Kesimpulan	Diterima	Tidak Diterima	Diterima	Tidak Diterima
Uji Kolmogorof Smirnov				
D_{maks}	0,184	0,147	0,129	0,160
D_{CR}	0,290	0,290	0,290	0,290
Kesimpulan	Diterima	Diterima	Diterima	Diterima

Pemilihan Distribusi				
C_s	0,8	-0,02	0,80	-0,02
	Tidak Diterima	Tidak Diterima	Tidak Diterima	Diterima
C_k	2,75	2,24	2,75	selain dari nilai pada metode lain
	Tidak Diterima	Diterima	Tidak Diterima	Diterima

Tabel 4.
Hujan PMP berdasarkan Peta Isohiet

No.	A	d_n	d_{n+1}	d_{rerata}	$d_{rerata} \times A$
1	3.718	550	600	575	2.137,85
2	2.233	500	550	525	1.172,325
Jumlah	5.951				3.310,175
Hujan Rerata		556,2384			
Faktor Reduksi Luas		1			
Hujan PMP DPS		556,2384			

Tabel 5.
Distribusi Hujan Jam-Jaman

Jam ke t-	Hujan Netto Jam-jaman (mm/jam)									
	5	10	25	50	100	1000	PMP	PMP PETA	0.5 PMP	
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	
1	2.779	3.256	4.290	4.290	4.727	6.618	13.31	15.19	6.657	
2	7.873	9.767	13.228	13.944	15.756	23.713	53.259	60.773	26.630	
3	48.626	55.347	71.863	69.718	75.629	100.919	186.408	212.704	93.204	
4	4.631	6.511	9.296	10.726	12.605	20.956	53.259	60.773	26.630	
5	2.779	3.256	4.290	4.290	4.727	6.618	13.315	15.193	6.657	
6	2.779	3.256	4.290	4.290	4.727	6.618	13.315	15.193	6.657	

harus mencoba untuk memperkirakan koefisien ini berdasarkan fase proses rekahan yang menurut mereka arus terbesar kemungkinan besar akan terjadi. Misalnya, bendungan tanah dengan volume penyimpanan sedang sampai sangat besar di hulu, kemungkinan besar akan runtuh sampai ke elevasi aliran sungai alami, dan berada dalam fase pelebaran saat arus keluar puncak terjadi.

Selama kegagalan *piping*, laju air yang mengalir melalui bendungan dimodelkan dengan persamaan aliran tekanan *orifice*. Persamaan ini juga membutuhkan koefisien debit, yang merupakan ukuran seberapa efisien arus bisa masuk ke lubang pipa. Karena kegagalan *piping* bukanlah pembukaan yang dirancang secara hidrolis, diasumsikan bahwa pintu masuk tidak terlalu efisien. Nilai yang disarankan untuk koefisien aliran *piping*/tekanan berada pada kisaran 0,5 sampai 0,6 pada Gambar 3.

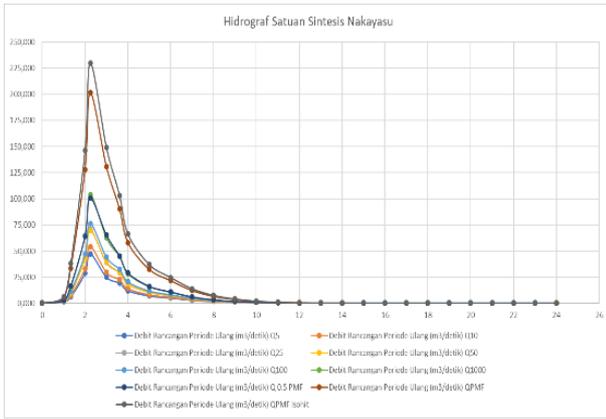
Untuk tujuan panduan ini, deskripsi fisik dari rekahan tersebut akan terdiri dari tinggi rekahan, lebar rekahan, dan lereng samping di H: V (lereng samping dinyatakan dalam satuan jarak horizontal ke setiap unit di vertikal). Nilai ini

mewakili ukuran rekahan maksimum. Diagram yang menggambarkan rekahan ditunjukkan pada Gambar 4.

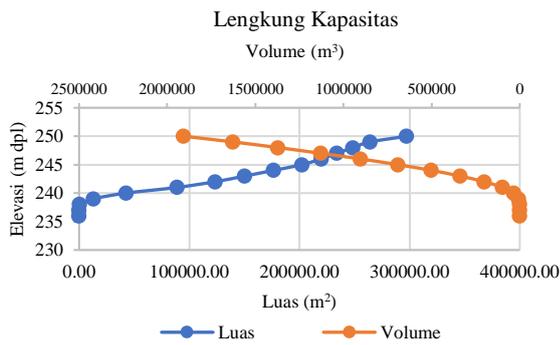
Lebar rekahan digambarkan sebagai lebar rekahan rata-rata (B_{AVE}) dalam banyak persamaan, sementara HEC-RAS memerlukan lebar dasar rekahan (W_b) untuk input. Tinggi rekahan (h_b) adalah batas vertikal dari bagian atas bendungan sampai elevasi terbalik rata-rata rekahan. Banyak publikasi dan persamaan juga menggunakan tinggi air (h_w), yang merupakan permukaan vertikal dari permukaan air maksimum sampai elevasi balik dari rekahan. Lereng samping dinyatakan dalam H:V.

F. Penyusunan Rencana Tindak Darurat

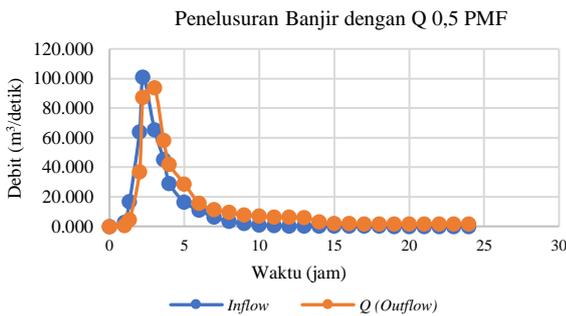
Penyusunan Rencana Tindak Darurat (RTD) menurut pasal 56 Peraturan Menteri PUPR No. 27 Tahun 2015 tentang Bendungan menyebutkan bahwa setiap bendungan diwajibkan memiliki rencana tindak darurat. Di mana pada pasal 54 rancangan rencana tindak darurat paling sedikit harus memuat tindakan pengamanan bendungan dan penyelamatan



Gambar 7. Hidrograf satuan sintesis Nakayasu.



Gambar 8. Lengkung kapasitas waduk.



Gambar 9. Grafik penelusuran banjir di atas pelimpah.

masyarakat serta lingkungan dengan dilengkapi analisis keruntuhan bendungan [2].

III. METODOLOGI

A. Studi Literatur

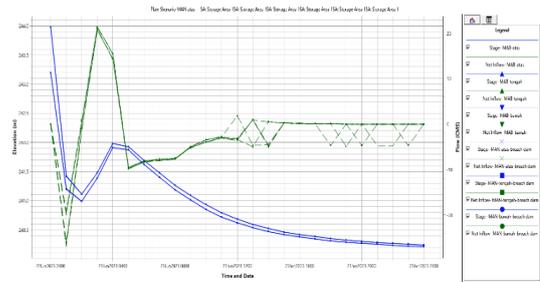
Studi literatur dilakukan untuk mempelajari dasar-dasar teori yang akan digunakan dalam analisa keruntuhan bendungan. Teori-teori tersebut mencakup teori hidrologi dan teori keruntuhan bendungan menggunakan HEC-RAS.

B. Pengumpulan Data

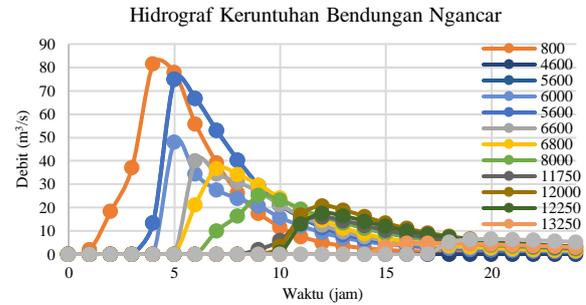
Data-data yang dikumpulkan meliputi data curah hujan, data lengkung tampungan waduk, data topografi, dan data tutupan lahan pada DAS Jarak dan Bengawan Solo. Jarak Bendungan Ngancar dan Waduk Gajah Mungkur berdasarkan pengukuran dengan aplikasi QGIS, yaitu +7,5 km.

C. Melengkapi Data Hujan

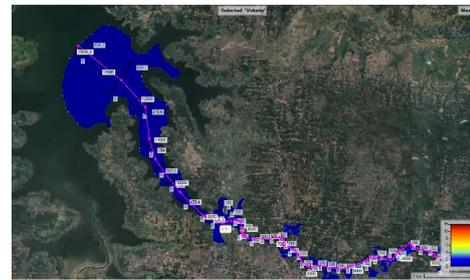
Pada pencatatan hujan yang hilang data hujannya perlu dilakukan perhitungan untuk mendapatkan nilai data hujan yang hilang tersebut. Pada langkah ini dilakukan perhitungan untuk mengetahui data hujan yang kosong.



Gambar 10. Breach outflow hydrograf.



Gambar 11. Hidrograf debit banjir keruntuhan bendungan pada cross section.



Gambar 12. Station inlet waduk gajah mungkur dari sungai Ngancar.

D. Membuat Hidrograf Inflow atau Debit

Metode yang digunakan dalam membuat hidrograf adalah metode Nakayasu. Pada tahap ini akan diperoleh grafik hidrograf untuk menentukan debit banjir rencana.

E. Perhitungan Lengkung Kapasitas Waduk

Perhitungan kapasitas waduk dilakukan menggunakan data topografi. Pada lengkung kapasitas nantinya akan diketahui hubungan antara volume waduk dan luasan dengan elevasi.

F. Penelusuran Banjir (Flood Routing)

Perhitungan flood routing dilakukan untuk mendapatkan hubungan antara debit inflow dan outflow dengan elevasi muka air yang dimulai dari elevasi ambang pelimpah.

G. Pengolahan Data Peta Tutupan Lahan

Pengolahan data tutupan lahan menggunakan input data yang didapatkan dari DEMNAS, dan sebaran tutupan lahan dari peta RBI atau lainnya. Peta tutupan lahan diolah menggunakan software QGIS. Dengan melakukan delineasi DAS dan menentukan sebaran tutupan lahan yang ada.

H. Analisis Keruntuhan Bendungan

Perhitungan keruntuhan bendungan dilakukan dengan menggunakan HEC-RAS. Skenario analisa keruntuhan yaitu pada kondisi overtopping dan piping (pada muka air kering, normal, dan banjir) atau piping atas, tengah, dan bawah. Setiap skenario diperhitungkan dalam kondisi daerah termasuk rainy day dan sunny day.

Tabel 6.
Lengkung Kapasitas Waduk Ngancar Tahun 2020

Elevasi (m dpl)	Luas (m ²)	Volume (m ³)
238,00	573,77	191,26
239,00	13.047,12	5.643,58
240,00	42.720,98	32.102,62
241,00	88.943,23	96.538,04
242,00	123.425,84	202.252,87
243,00	150.325,70	338.907,83
244,00	176.580,41	502.184,89
245,00	202.183,29	691.422,35
246,00	219.786,36	902.345,95
247,00	234.154,53	1.129.278,49
248,00	248.656,87	1.370.647,88
249,00	264.060,01	1.626.967,75
250,00	297.405,66	1.907.335,40

Tabel 7.
Hasil Analisis Keruntuhan dengan HEC-RAS 6.2

Kondisi Muka Air	Skenario Piping	Kedalaman Banjir (Maksimum) (m)	Kecepatan Aliran (Maks) (m/s)
MAB	Atas	8,16	6,84
	Bawah	8,15	6,83
	Tengah	8,15	6,83
MAN	Atas	7,50	5,74
	Bawah	7,50	5,73
	Tengah	7,50	5,73

Tabel 8.
Konsekuensi Daerah Hilir Bendungan dengan Klasifikasi Bahaya

Konsekuensi Daerah Hilir	Tingkat Bahaya
Kecil	Rendah
Besar	Sedang
	Tinggi
	Sangat Tinggi

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Daerah Tangkapan Air

Luas Daerah Tangkapan Air (DTA) dari Bendungan Ngancar adalah 6 km² dengan panjang sungai utama 2,35 m. Di mana tutupan lahan DTA terdiri atas 44% terdiri atas lahan perkebunan dan 32% terdiri atas sawah dan semak belukar. Data tutupan lahan diambil dari *website* Tanah Air Indonesia seperti pada Gambar 5.

B. Data Hujan

Maka dari itu digunakan data hujan satelit dari NASA [6]. Data hujan yang digunakan adalah data hujan satelit GPM (*Global Precipitation Measurement*). Data hujan GPM dari tahun 2003-2022 yang telah didapatkan dilakukan kalibrasi dengan linear regresi analisis menggunakan kalibrasi dari RMSE (*Root Mean Square Error*). Nilai RMSE semakin kecil menunjukkan angka kesalahan atau *error* yang lebih kecil. Maka didapatkan data hujan seperti pada Tabel 2 dan Gambar 6.

Pada grafik hujan hasil regresi linier menunjukkan nilai $R^2 = 0,996$. Di mana nilai tersebut telah mendekati 1 dan nilai hujan rencana harian telah linier dengan *trendline*. Maka data hujan harian dari Satelit GPM yang telah di kalibrasi dengan Stasiun Hujan Batuwarno dapat digunakan dalam perhitungan selanjutnya.

C. Analisis Frekuensi dan Uji Kecocokan Distribusi Hujan

Dari hasil rekapitulasi uji chi kuadrat dan uji Kolmogorov Smirnov maka didapatkan hasil seperti pada lampiran Maka digunakan data distribusi hujan metode *Log Pearson Type III*

Tabel 9.
Matriks Kelas Bahaya

Penduduk Terkena Risiko Jumlah Orang Kumulatif	Kelas Bahaya (Jarak dari Bendungan, km)				
	0-5	0-10	0-20	0-30	0>30
0	1	1	1	1	1
1-100	3	3	2	2	2
101-1.000	4	4	4	3	3
>1.000	4	4	4	4	4

Tabel 10.
Penilaian Kelas Bahaya tiap Desa

No.	Jarak (m)	Nama Desa	Penduduk Terkena Risiko	Penilaian Bahaya
1.	230,664	Belikurip	150	4
2.	2.584,512	Temon	135	4
3.	3.617,247	Saradan	861	4
4.	5.601,183	Baturetno	756	4
5.	6.701,649	Talunombo	15	3

Tabel 11.
Penilaian Bahaya Berdasarkan Kecepatan dan Tinggi Banjir

No	Jarak (m)	Nama Desa	Ketinggian Muka Air Maks. (m)	Kec. Aliran Maks. (m/s)	Zona Bahaya
1	230,664	Belikurip	3,7	6,8	Tinggi
2	2.584,512	Temon	1,2	2,1	Sedang
3	3.617,247	Saradan	2,2	1,2	Tinggi
4	5.601,183	Baturetno	3,3	2,1	Tinggi
5	6.701,649	Talunombo	2,3	1,3	Tinggi

Tabel 12.
Total Kerugian

No.	Jenis Kerugian	Jumlah(unit atau luas)	Jumlah Kerugian
1.	Rumah/Tempat Tinggal	639 unit	Rp24.921.000.000,00
2.	Komoditas Pertanian dan Ladang	85,6 ha	Rp 3.822.553.600,00
3.	Komoditas Peternakan	-	Rp 5.141.164.000,00
4.	Bangunan Fasilitas Umum	9 unit	Rp 893.000.000,00
Total Kerugian			Rp34.777.717.600,00

dengan alasan dikembalikan pada Sifat Khas Parameter Distribusi, hasil analisis terdapat pada Tabel 3 [7].

D. Analisis Hasil dan Pembahasan

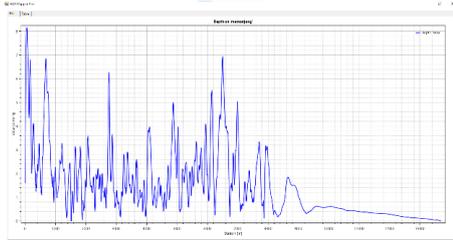
Berdasarkan pengolahan data yang dilakukan, dapat dirumuskan untuk mendapatkan tinggi hujan PMP terhitung pada Tabel 4. Nilai yang didapatkan pada distribusi hujan jam-jaman terdapat pada Tabel 5. Hasil dari Hidrograf satuan Sintesis Nakayasu dibuat dalam bentuk grafik seperti pada Gambar 7.

Berdasarkan hasil kegiatan survei batimetri, selanjutnya hubungan elevasi dan luas genangan dapat dilakukan analisis yang menghasilkan suatu kurva. Kurva ini menunjukkan hubungan antara elevasi, volume waduk, dan luas genangan di sekitar daerah perencanaan pada Gambar 8 dan perhitungan pada Tabel 6. Penelusuran banjir di atas pelimpahan dengan Q 0,5 PMF dibuat dengan grafik dan terdapat pada Gambar 9.

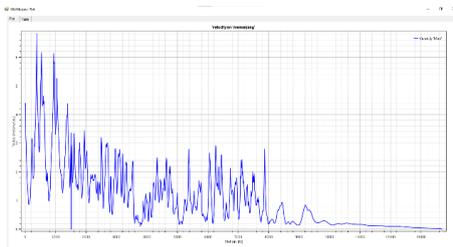
Skenario keruntuhan di bagi dalam kondisi bendungan mengalami *overtopping* dan dalam kondisi *piping* pada muka air banjir (MAB) dan muka air normal (MAN). Di mana dalam setiap kondisi diskenariokan dalam 3 kondisi *piping*, yaitu *piping* atas, tengah, dan bawah. Dalam berbagai kondisi bendungan tersebut disimulasikan dalam 2 kondisi cuaca



Gambar 13. Peta genangan banjir.



Gambar 14. Kedalaman banjir akibat keruntuhan Bendungan Ngancar.



Gambar 15. Kecepatan aliran banjir akibat keruntuhan bendungan Ngancar.

yaitu *sunny day* dan *rainy day*. Hasil analisis keruntuhan dengan HEC-RAS 6.2 disajikan pada Tabel 7.

Pada hidrograf keruntuhan bendungan dapat dilakukan *plot* untuk menunjukkan besaran debit yang terjadi ketika skenario MAB *piping* atas, tengah, bawah dan skenario MAN *piping* atas, tengah, dan bawah. Besaran debit yang paling besar ditunjukkan oleh MAB *piping* atas dengan nilai debit keruntuhan adalah 84,58 m³/detik seperti pada grafik Gambar 10.

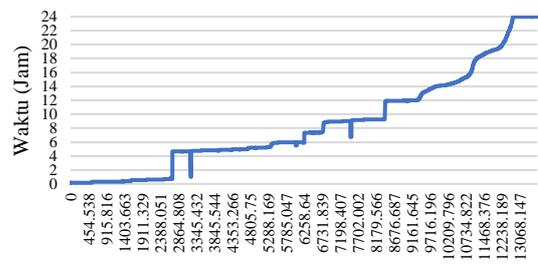
Kondisi hidrograf keruntuhan mencapai suatu jarak disajikan pada Gambar 11. Pada grafik ditunjukkan perbedaan hidrograf yang semakin melandai dengan puncak debit yang semakin menurun. Hal ini menunjukkan bahwa air banjir akan sampai pada waktu (koordinat sumbu-*x*) dengan debit (koordinat sumbu-*y*).

Dari hasil analisis program HEC-RAS 6.2 dapat diketahui bahwa banjir akibat keruntuhan Bendungan Ngancar akan sampai pada mulut waduk atau hilir Sungai Ngancar yang bermuara di Waduk Gajah Mungkur pada *station* atau pada jarak 8,5 km. Air banjir yang mengalir memiliki kedalaman 0,69 m s/d 0,01 m ketika sampai pada *station* tersebut dan berakhir pada jarak 13,7 km.

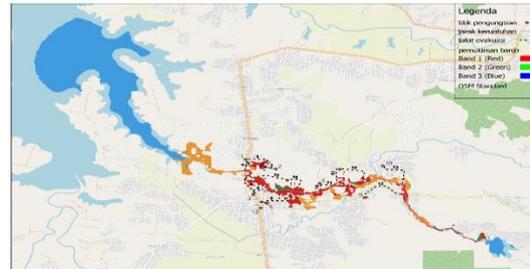
Muka air Waduk Gajah Mungkur diasumsikan berada pada elevasi muka air banjir yaitu pada elevasi 138,3 m. dengan asumsi kenaikan muka air dipilih yang paling tinggi, yaitu 0,69 m, maka elevasi Waduk Gajah Mungkur meningkat menjadi 139 m di atas permukaan laut dari muka air banjir Waduk Gajah Mungkur seperti pada Gambar 12.

E. Rencana Tindak Darurat

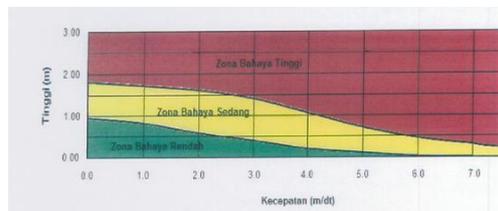
Penyusunan rencana tindak darurat didasarkan pada Peraturan Menteri PUPR No. 27 Tahun 2015 tentang Ben-



Gambar 16. Grafik waktu tiba dan jarak.



Gambar 17. Peta jalur evakuasi.



Gambar 18. Grafik tinggi dan kecepatan aliran banjir yang berbahaya untuk hunian atau tempat tinggal.

dungan. Dalam Upaya untuk melakukan tindakan pengamanan bendungan dan penyelamatan masyarakat serta lingkungan. Tindakan-tindakan yang dilakukan bertujuan untuk meminimalkan dampak yang ditimbulkan dari keruntuhan bendungan secara material mau-pun non material pada hilir bendungan. Pada hasil analisis keruntuhan bendungan didapatkan hasil berupa kedalaman banjir, kecepatan banjir, peta genangan banjir, yang diguna-kan untuk menentukan klasifikasi bahaya dan tindakan yang harus dilakukan [8].

1) Peta Genangan

Peta genangan banjir menunjukkan sejauh apa banjir yang dihasilkan dari keruntuhan Bendungan Ngancar yang disajikan pada Gambar 13. Pada peta genangan tersebut dapat dilihat bahwa banjir menggenangi wilayah di sekitar Sungai Ngancar dan memberikan pengaruh pada elevasi muka air Waduk Gajah Mungkur.

Gambar 13 menunjukkan genangan banjir yang disebabkan oleh keruntuhan Bendungan Ngancar mengakibatkan banjir pada hilir bendungan. Pada peta tersebut terlihat bahwa sungai sudah tidak mampu menampung debit banjir yang disebabkan oleh keruntuhan sehingga meluap pada wilayah sawah, ladang, dan bahkan pemukiman warga sekitar sungai.

Selanjutnya Gambar 14 menunjukkan kedalaman banjir yang bervariasi di hilir Bendungan Ngancar. Di mana kedalaman tersebut diambil dari penggambaran *profile line* di sepanjang area genangan. Tinggi kedalaman banjir mulai melandai ketika memasuki tampungan Waduk Gajah Mungkur. Di mana elevasi ketika mencapai hulu Waduk Gajah Mungkur adalah 1 m hingga 1 cm. Kecepatan aliran yang terbentuk juga bervariasi, hal ini dikarenakan dari kondisi

permukaan tanah di mana aliran air mengalir yang bervariasi pula. Di mana kecepatan yang dihasilkan senilai 0,017 m/detik hingga 6,84 m/detik seperti pada Gambar 15.

Waktu tiba banjir yang akan datang ketika Bendungan Ngancar Runtuh disajikan pada Gambar 16. Pada grafik di Gambar 16 tampak bahwa pada jarak <5 km dari bendungan banjir akan tiba dalam waktu yang singkat yaitu kurang dari 5 jam. Dan untuk jarak < 2 km banjir akan tiba dalam waktu kurang dari 2 jam seperti grafik pada Gambar 16.

2) Jalur Evakuasi

Dari analisis hasil evakuasi di atas maka harus dibuat rincian kebutuhan untuk pengungsi disesuaikan dengan jumlah penduduk yang dievakuasi pada setiap titik pengungsian. Pada penelitian ini tidak membahas mengenai kebutuhan selama di pengungsian seperti Gambar 17.

Perhitungan dari kebutuhan kendaraan untuk melakukan evakuasi dengan asumsi jumlah penumpang per unit adalah sebagai berikut: Bus = 50 orang per unit, Mobil = 8 orang per unit, dan *Pick Up* = 10 orang per unit.

F. Klasifikasi Bahaya

Pertimbangan dalam menentukan periode ulang banjir desain bendungan adalah konsekuensi daerah hilir yang meliputi tingkat konsekuensi, keberadaan cagar budaya, cagar alam, dan kerugian ekonomi [8]. Tingkat konsekuensi pada daerah hilir bendungan berdasarkan penduduk yang terkena risiko banjir akibat keruntuhan bendungan menurut SNI 3432:2020 disajikan pada Tabel 8 [9].

Tingkat konsekuensi kecil terjadi apabila tidak terdapat atau terdapat sedikit rumah penduduk, dan atau daerah usaha dan industri. Sedangkan tingkat konsekuensi besar yang dimaksud adalah apabila pada daerah genangan banjir terdapat pemukiman penduduk atau kegiatan sosial ekonomi, baik yang sudah berkembang maupun yang akan dibangun, tempat sekelompok orang berkumpul, di mana harta dan jiwa berpotensi menjadi korban ketika terjadi keruntuhan bendungan terdapat pada Tabel 9, dengan 1 adalah Kelas Bahaya Rendah, 2 adalah Kelas Bahaya Sedang, 3 adalah Kelas Bahaya Tinggi, dan 4 adalah Kelas Bahaya Sangat Tinggi.

Jarak Bendungan Ngancar dengan Waduk Gajah Mungkur adalah 8,5 km. Jarak terjauh banjir akibat keruntuhan Bendungan Ngancar adalah terjadi pada skenario saat muka air banjir, yaitu dengan jarak adalah 13,7 km. Jarak Bendungan Ngancar dengan desa-desa hilir terdampak banjir disajikan pada Tabel 10 dan Tabel 11. Berdasarkan Tabel 10, Tabel 11, dan Gambar 18 [10], dapat disimpulkan bahwa Desa Belikurip, Desa Temon, Desa Saradan, Desa Baturetno, dan Desa Talunombo memiliki penilaian bahaya tinggi, sehingga ketika kondisi siaga kelima desa harus segera melakukan evakuasi atau mengungsi.

G. Analisis Kerugian Ekonomi

Dari analisis hasil kerugian ekonomi dapat ditarik kesimpulan yang disajikan pada Tabel 12.

V. KESIMPULAN/RINGKASAN

Kesimpulan yang dapat diambil dari hasil analisis penga-

ruh keruntuhan Bendungan Ngancar terhadap elevasi muka air Waduk Gajah Mungkur dapat dituliskan dengan menjabar perumusan masalah sebagai berikut. (1) Kedalaman banjir maksimum dan kecepatan banjir maksimum akibat keruntuhan Bendungan Ngancar terjadi pada skenario keruntuhan pada muka air banjir kondisi *rainy day*, yaitu dengan kedalaman 8,16 m dan dengan kecepatan 6,84 m/s.

Klasifikasi daerah terkena bahaya akibat keruntuhan Bendungan Ngancar adalah sebagai berikut. (1) Desa Belikurip dengan klasifikasi bahaya Berdasarkan Penris adalah pada kelas 4, yaitu bahaya sangat tinggi dan pada klasifikasi zona bahaya berdasarkan tinggi banjir dan kecepatan aliran pada kelas bahaya tinggi, (2) Desa Temon dengan klasifikasi bahaya berdasarkan Penris adalah pada kelas 4, yaitu bahaya sangat tinggi dan pada klasifikasi zona bahaya berdasarkan tinggi banjir dan kecepatan aliran pada kelas bahaya sedang, (3) Desa Saradan dengan klasifikasi bahaya berdasarkan Penris adalah pada kelas 4, yaitu bahaya sangat tinggi dan pada klasifikasi zona bahaya berdasarkan tinggi banjir dan kecepatan aliran pada kelas bahaya tinggi, (4) Desa Baturetno dengan klasifikasi bahaya berdasarkan Penris adalah pada kelas 4, yaitu bahaya sangat tinggi dan pada klasifikasi zona bahaya berdasarkan tinggi banjir dan kecepatan aliran pada kelas bahaya tinggi, (5) Desa Talunombo dengan klasifikasi bahaya berdasarkan Penris adalah pada kelas 3, yaitu bahaya sangat tinggi dan pada klasifikasi zona bahaya berdasarkan tinggi banjir dan kecepatan aliran pada kelas bahaya tinggi.

Elevasi muka air Waduk Gajah Mungkur sebagai akibat dari keruntuhan Bendungan Ngancar meningkat hingga pada elevasi 139 mdpl dari muka air banjir Waduk Gajah Mungkur.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Wibagiyo, Indroyono, Alip, B. P., dan Haryono, "Penentuan Lokasi Rembesan pada Dasar Bendungan dengan Teknik Radioisotop di Bendungan Ngancar Wonogiri," in *Proc. Penelitian dan Pengembangan Aplikasi Isotop dan Radiasi*, 1998.
- [2] Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, "Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Nomor 27/PRT/M/2015 Tahun 2015 tentang Bendungan," Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, Jakarta, 2015.
- [3] Suripin, *Sistem Drainase Perkotaan yang Berkebutuhan*. Yogyakarta: Andi Offset, 2004. ISBN: 9789797311377.
- [4] Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, "SNI 2415:2016 Tata Cara Perhitungan Debit Banjir Rencana," Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, Jakarta, 2016.
- [5] P. I. Purwanto, P. T. Juwono, dan R. Asmaranto, "Analisa keruntuhan bendungan tugu Kabupaten Trenggalek," *J. Tek. Pengair.*, vol. 8, no. 2, hal. 222–230, Nov 2017, doi: 10.21776/ub.pengairan.2017.008.02.8.
- [6] National Aeronautics and Space Administration, "The Bridge Between Data and Science v4.38," *National Aeronautics and Space Administration*, 2023.
- [7] B. Triatmodjo, *Hidrologi Terapan*. Yogyakarta: Beta Offset, 2014. ISBN: 978-979-8541-40-7.
- [8] Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, "Konsep Penyusunan Rencana Tindak Darurat," Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, Jakarta, 2019.
- [9] Badan Standardisasi Nasional, "Tata cara penetapan banjir desain dan kapasitas pelimpah untuk bendungan SNI 3432:2020," Badan Standardisasi Nasional, Jakarta, 2020.
- [10] Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, "Pedoman Teknis Klasifikasi Bahaya Bendungan," Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, Jakarta, 2011.