

PENGARUH UPGRADING BANGUNAN PELIMPAH TERHADAP TINGGI JAGAAN EKSISTING TUBUH BENDUNGAN KEDUNG OMBO

Gerald Guntur P. Siregar^{1*}

^{1*}Balai Besar Wilayah Sungai Citanduy, Kementerian PUPR, Banjar 46300
E-mail : gerald.siregar@pu.go.id

ABSTRAK

Limpasan adalah salah satu mode kegagalan yang paling serius terutama pada bendungan yang dapat menyebabkan banyak korban jiwa dan kerusakan material. Rencana peningkatan tampungan pada Waduk Kedung Ombo dengan meninggikan mercu pelimpah menggunakan *flap gates* setinggi 2 meter tanpa meninggikan tubuh bendungan perlu di evaluasi mengingat tinggi jagaan eksisting hanya 1 meter. Tinjauan hidrologi dan hidraulik dilakukan dengan menggunakan data – data hidrologi terbaru dan menggunakan bantuan Program HEC-HMS dan HEC-RAS. Untuk bangunan pelimpah berpintu harus mempertimbangkan kondisi dimana terjadi operasi yang tidak normal. Hasil analisis menunjukkan bahwa puncak banjir tertinggi pada kala ulang PMF berada pada elevasi +94.50 meter dimana elevasi puncak ini masih di bawah elevasi muka air banjir desain (+95.00). Tinggi jagaan dihitung dari elevasi mercu tubuh bendungan (+96.00 meter) ke elevasi puncak banjir (+94.50 meter) adalah sebesar 1.50 meter. Apabila tinggi jagaan dikurangi dengan nilai reduksi akibat operasi pintu yang tidak normal sebesar 0,50 meter maka tinggi jagaan menjadi 1.00 meter. Tinggi jagaan akibat rencana peningkatan tampungan dengan tinggi jagaan eksisting menunjukkan elevasi yang sama sehingga dapat disimpulkan bahwa tubuh bendungan tidak akan mengalami limpasan.

Kata Kunci: limpasan, tinggi jagaan, waduk, kedung ombo, HEC-HMS, HEC-RAS

ABSTRACT

Overtopping is one of the most serious failure modes especially in dams which can cause a lot of loss of life and material damage. The plan to increase the reservoir in Kedung Ombo Reservoir by upgrading the overflow crest using flap gates as high as 2 meters without upgrading the dam body needs to be evaluated considering the existing freeboard is only 1 meter. The hydrological and hydraulic review was carried out using the latest hydrological data and using the assistance of the HEC-HMS and HEC-RAS Programs. For gated spillway, the conditions under which abnormal operations occur must be considered. The results of the analysis show that the highest flood peak during the PMF return period is at an elevation of +94.50 meters where this peak elevation is still below the design flood water level (+95.00). The freeboard calculated from the elevation of the crest of the dam body (+96.00 meters) to the flood peak elevation (+94.50 meters) is 1.50 meters. If the freeboard is reduced by the reduction value due to abnormal gated operation of 0.50 meters, the freeboard will be 1.00 meters. The freeboard due to the planned increase in the reservoir with the existing freeboard shows the same elevation, so it can be concluded that the dam body will not experience overtopping.

Keywords: *overtopping, freeboard, reservoir, kedung ombo, HEC-HMS, HEC-RAS*

1. PENDAHULUAN

Konsep *upgrading* bendungan eksisting akan menjadi lebih menarik di masa yang akan datang mengingat kelebihannya dibanding dengan membangun bendungan baru [1]. *Upgrading* pada bendungan eksisting dapat mewujudkan pengendalian banjir dan efek pasokan air jauh lebih awal, meminimalkan dampak pada lingkungan alam dan sosial, dan dapat mencapai tujuan ekonomi. Pemerintah Jepang, melalui *Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism* (MLIT), telah banyak menerapkan konsep ini, bahkan konsep ini dilaksanakan pada saat bendungan sedang beroperasi, dengan tujuan untuk memanfaatkan bendungan eksisting secara efektif, termasuk memperpanjang umur layanan dan meningkatkan operasinya [2].

Saat ini, Pemerintah Jepang melalui MLIT bekerja sama dengan Pemerintah Indonesia melalui Kementerian PUPR, mencoba menerapkan konsep *upgrading* bendungan eksisting, dimana salah satu objek yang dijadikan studi adalah Bendungan Kedung Ombo. Tujuan dilakukannya *upgrading* pada Bendungan Kedung Ombo adalah untuk meningkatkan tampungan dalam rangka pemenuhan kebutuhan air baku di Kabupaten Semarang dan Kabupaten Demak. Rencana peningkatan tampungan dilakukan dengan mensuplesi debit dari Kali Bancak melalui kanal buatan [3] dan peninggian mercu pelimpah (*upgrading*) setinggi 2 meter (elevasi semula +90,00 m menjadi +92,00 m) menggunakan *flap gates* [4,5,6] namun tetap mempertahankan tinggi bendungan

eksisting (elevasi mercu tubuh bendungan +96.00). Suplesi debit dari Kali Bancak tentunya akan mempengaruhi kapasitas tampungan dimana desain awal Waduk Kedung Ombo hanya untuk melayani tampungan dari Daerah Aliran Sungai (DAS) di sekitar Waduk (Sungai Serang dan Sungai Uter) [7]. Apabila kondisi-kondisi ini tidak diperhitungkan maka dikhawatirkan bendungan akan mengalami limpasan (*overtopping*) dan berujung pada kegagalan bendungan [8].

Limpasan adalah salah satu mode kegagalan yang paling serius pada semua bendungan yang menyebabkan banyak korban jiwa dan kerusakan material. Statistik menunjukkan bahwa kegagalan bendungan karena limpasan adalah yang tertinggi terutama pada bendungan urugan. Hal ini terjadi karena prediksi yang salah dari banjir desain yang masuk yang diakibatkan oleh kurangnya data debit yang realistis dan prosedur hidrologi yang tidak sempurna [9]. Salah satu cara untuk mencegah terjadinya limpasan pada bendungan urugan adalah dengan memperhatikan desain tinggi jagaan (*freeboard*). Tinggi jagaan sering dianggap sebagai jarak dari elevasi tampungan ke puncak (elevasi puncak desain) tubuh bendungan [10]. Tinggi jagaan diperlukan untuk melindungi struktur dari luapan gelombang besar termasuk alokasi untuk penyiapan tampungan, *run-up* gelombang, banjir, penurunan, perlindungan inti kedap air dari struktur timbunan dan faktor-faktor lain yang dapat mempengaruhi ketinggian waduk [11].

Untuk memastikan tidak akan terjadi limpasan pada tubuh bendungan, maka dalam penelitian ini akan dilakukan evaluasi tinggi jagaan eksisting, mengingat tinggi jagaan yang tersedia hanya 1 m.

2. METODE

Metode evaluasi tinggi jagaan eksisting pada penelitian ini dibagi dalam dua tinjauan yaitu tinjauan hidrologi dan hidraulik. Tinjauan hidrologi dimaksudkan untuk mengevaluasi kapasitas tampungan Bendungan Kedung Ombo terhadap perubahan banjir rencana akibat suplesi debit dari Kali Bancak ke Waduk Kedung Ombo (Gambar 1). Data yang diperlukan mencakup data hujan dan karakteristik DAS [12]. Pengolahan data hujan mulai dari pemilihan DAS/Sub DAS sampai mendapatkan hujan wilayah rencana [13]. Variabel yang berpengaruh dalam hasil akhir hujan rencana adalah Area Reduction Factor (ARF). Nilai ARF berkisara antara 0 hingga 1 yang bervariasi sesuai dengan karakteristik badai dimana semakin luas area maka semakin jarang terjadinya hujan merata, tetapi semakin kecil area akan semakin merata hujan yang terjadi sehingga luas area yang kecil akan mempunyai faktor reduksi mendekati 1 (satu) [14].

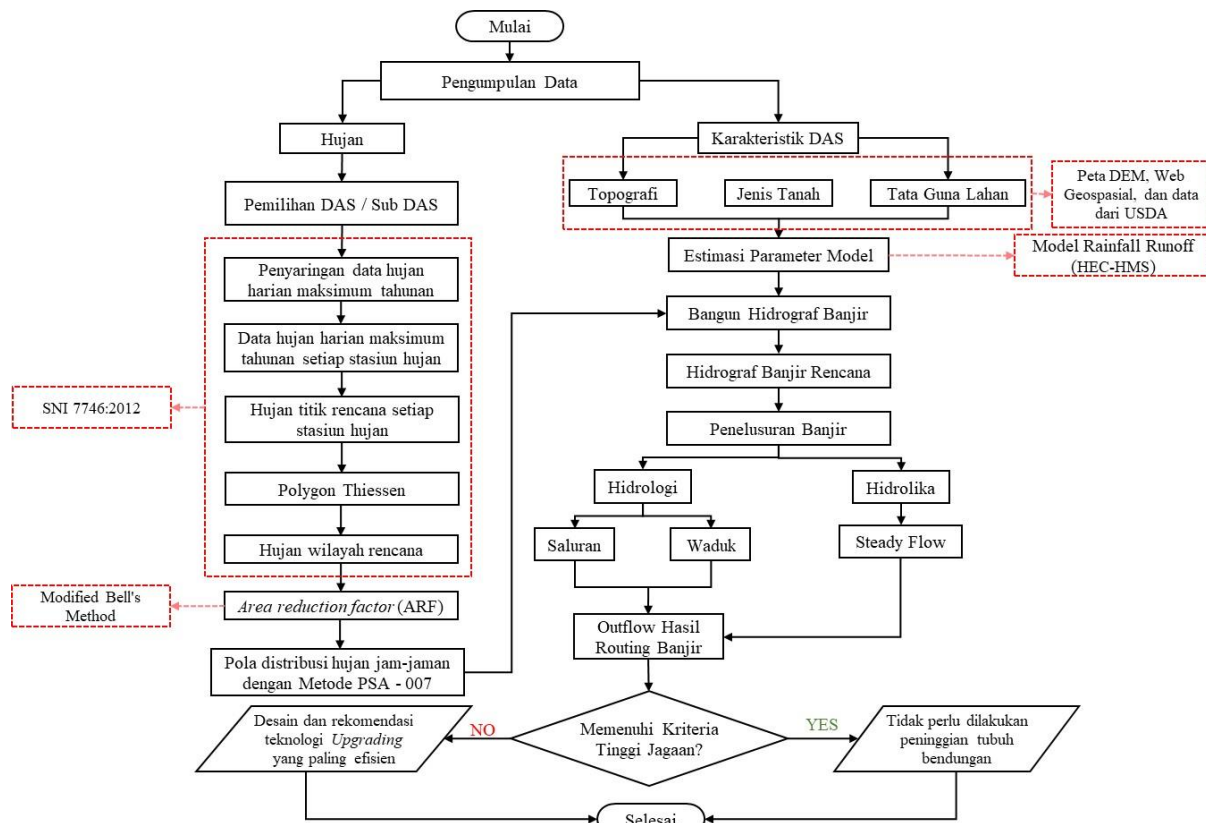


Gambar 1. Rencana suplesi debit dari Kali Bancak Ke Waduk Kedung Ombo

Pendekatan ARF saat ini sebagian besar didasarkan pada metode empiris, baik menggunakan pendekatan berpusat badai atau berpusat geografis. Ada banyak cara empiris yang digunakan untuk memperkirakan ARF salah satunya adalah *Modified Bell's Method* [15] yang formulasikan pada Persamaan (1) berikut:

$$ARF_m = 1 - 0.4(A^{0.14} - 0.7 \log Td)Td^{-0.48} + 0.002A^{0.4}Td^{0.41}[0.3 + \log(1/T)] \quad (1)$$

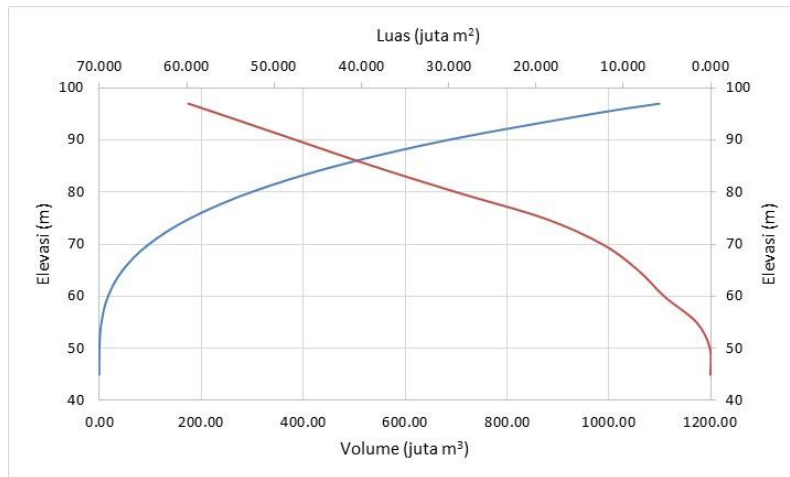
Distribusi hujan yang menimbulkan terjadinya puncak banjir tertinggi diambil sebagai distribusi hujan badai rencana. Pemilihan durasi hujan dengan pola distribusinya sangat berpengaruh pada hasil banjir desain yang diperhitungkan. Curah hujan yang sama yang terdistribusi dengan durasi yang panjang akan menghasilkan puncak banjir yang lebih rendah dibanding dengan yang terdistribusi dengan durasi yang pendek. Oleh karena itu penetapan durasi hujan kritis perlu dilakukan dengan optimasi beberapa besaran durasi hujan sehingga diperoleh durasi hujan kritis. Sebagai perkiraan awal, durasi hujan dapat diambil sama dengan atau sedikit lebih besar dari waktu konsentrasi banjir (*time of concentration*). Idealnya untuk mengetahui pola distribusi yang digunakan pada wilayah studi, diperlukan hasil pengamatan hujan jam-jaman atau pengamatan debit jam-jaman. Namun karena di lokasi studi tidak tersedia data hujan jam-jaman maupun debit jam-jaman, maka pada penelitian ini pola distribusi hujan mengacu pada PSA-007 [16].



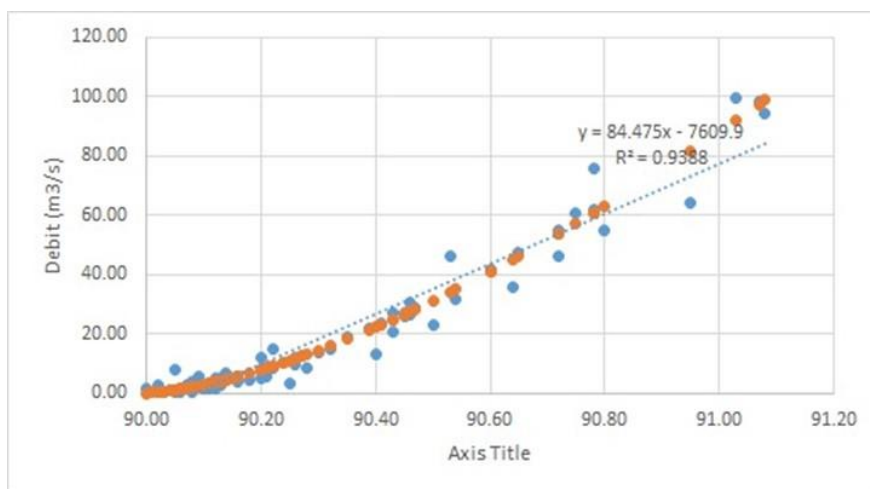
Gambar 2. Bagan Alir Penelitian

Selain pola distribusi hujan, model karakteristik DAS diperlukan dalam rangka membangun hidrograf banjir. Parameter yang diperlukan untuk mencerminkan karakteristik DAS meliputi peta topografi [17,18], jenis tanah [19,20] dan tata guna lahan [21]. Salah satu aspek analisis yang diharapkan dapat menunjang perencanaan dimensi bendungan adalah penetapan besaran banjir rencana, baik curah hujan rencana maupun banjir rencana dengan periode ulang tertentu. Khusus untuk banjir rencana bendungan dituntut untuk menghasilkan hidrograf banjir rencana yang akan mengalami proses penelusuran banjir tampungan (*reservoir routing*) waduk dan memperkirakan kapasitas pelimpah (*spillway*) dari waduk tersebut. Perhitungan banjir rencana menggunakan Program HEC-HMS (*Hydrological Modeling System*) yang merupakan program komputer untuk menghitung pengalirragaman hujan dan proses *routing* pada suatu sistem DAS [22]. *Software* ini dikembangkan oleh *Hydrologic Engineering Centre* (HEC) dari *US Army Corps Of Engineers*. Dalam *software* HEC-HMS terdapat fasilitas kalibrasi maupun simulasi model distribusi, model menerus dan kemampuan membaca data GIS. Di dalam HEC-HMS terdapat beberapa model yang terpisah dimana masing-masing model yang dipilih mempunyai *input* yang berbeda-beda. Beberapa model yang digunakan untuk menghitung *volume runoff*, *direct runoff*, *baseflow* dan *channel flow*. Berdasarkan Manual Perhitungan Debit Banjir Bendungan Menggunakan HEC-HMS 4.0 yang ditetapkan oleh Satker Balai Bendungan, pendekatan yang digunakan dalam pemodelan adalah membagi DAS menjadi beberapa Sub DAS dimana karakteristik fisik dimodelkan pada masing-masing Sub DAS [23].

Tinjauan hidraulik pada penelitian ini dimaksudkan untuk mengetahui kapasitas tampungan waduk dan pelimpah untuk mengalirkan limpasan. Program HEC-RAS digunakan untuk membuat simulasi pemodelan hidraulik pelimpah 1 dimensi. *Layout* dan dimensi atau kapasitas waduk digambarkan dalam Kurva Hubungan Elevasi -Volume - Luas Bendungan Kedungombo (Gambar 3) sedangkan *rating curve* pelimpah didapatkan melalui pencatatan tinggi muka air (TMA) dan debit pada pelimpah sehingga didapatkan hubungan antara elevasi TMA dan debit seperti ditunjukkan pada Gambar 4. Pemodelan pelimpah sesuai dengan rencana yang diusulkan oleh MLIT yaitu dengan peninggian mercu pelimpah setinggi 2 meter menggunakan *flap gates*. Untuk bangunan pelimpah berpintu harus mempertimbangkan kondisi dimana terjadi *missoperation*. Keterlambatan pembukaan, kemacetan atau bahkan kerusakan-kerusakan mekanisme pintu tersebut dapat mengakibatkan terjadinya kenaikan permukaan air waduk melampaui batas maksimum rencana. Pada hakikatnya, tinggi kenaikan yang disebabkan oleh hal-hal tersebut sangat sulit untuk diperkirakan sebelumnya dan penentuan tinggi jagaan tidak selalu dapat didasarkan pada hal-hal tersebut, karena pertimbangan ekonomis. Biasanya sebagai standar diambil $h_a = 0,5$ meter [24]. Bagan alir penelitian dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 3. Grafik Hubungan Elevasi – Luas - Volume Bendungan Kedungombo

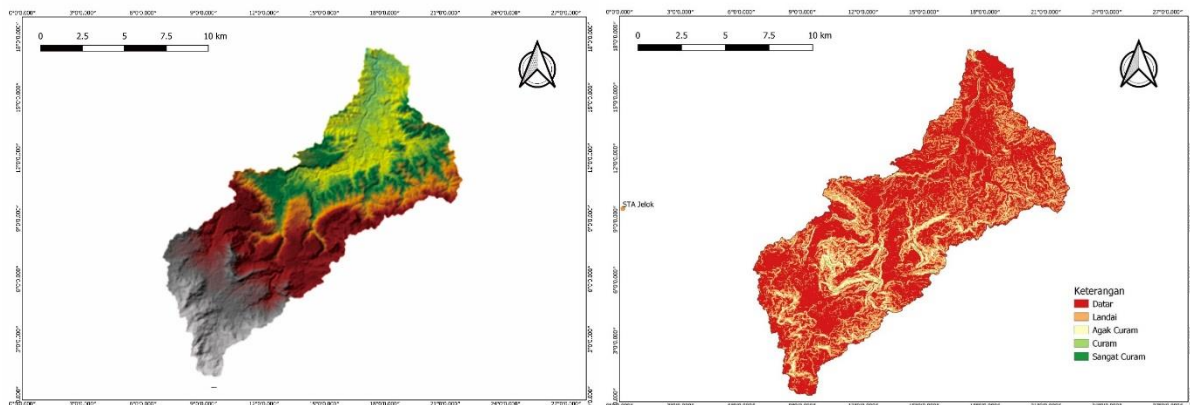


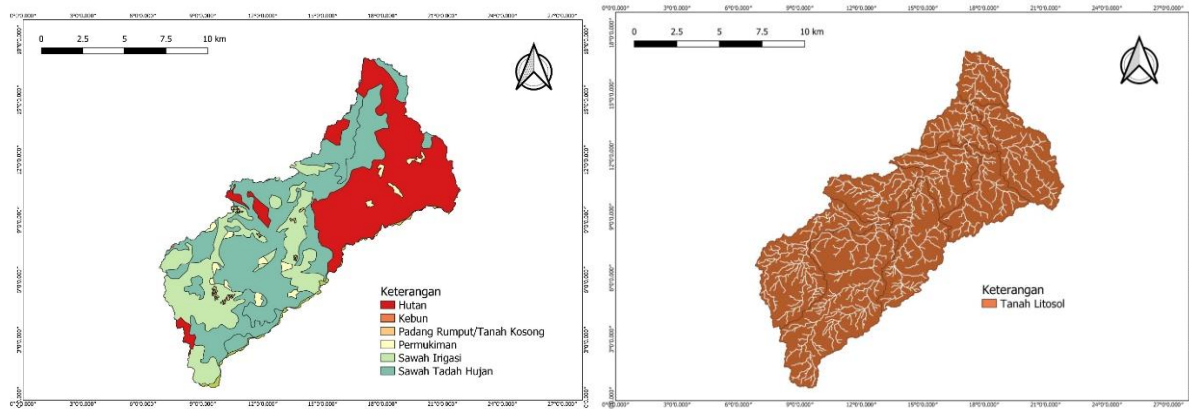
Gambar 4. Rating Curve Pelimpah Bendungan Kedungombo

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Tinjauan Hidrologi

Tinjauan hidrologi diawali dengan pengolahan data spasial per tahun 2020 dengan kerapatan 8,290 x 8,290 [20] [24][25] berdasarkan analisis GIS menggunakan *Software* QGIS (Gambar 5). Setelah didapatkan data spasial maka dilakukan pengolahan data hidrologi dan meteorologi. Data hujan yang digunakan adalah data hujan harian yang ada di sekitar kawasan Kali Bancak.





Gambar 5. Hasil Pengolah Data Spasial Menggunakan Analisis GIS

Data hujan harian maksimum tahunan (HHMT) yang berhasil dikumpulkan dapat dilihat pada Tabel 2. Dari data yang didapatkan sudah tidak terdapat data yang meragukan apabila melihat besaran hujan yang ada, data dengan besaran kurang dari 20 mm tidak akan disertakan dalam analisa selanjutnya dan data hujan dengan besaran yang melebihi 400 mm harus diseleksi kembali dan dapat dihilangkan apabila data tidak logis [14]. Perlu dilakukan pemeriksaan pada data curah hujan harian maksimum agar data yang diperoleh cukup layak untuk digunakan dalam analisis lanjutan. Pengujian yang dilakukan pada penelitian ini adalah pengujian secara statistik. Uji statistik yang dilakukan meliputi pengujian terhadap *outlier*, *independence* dan *trend* [23]. Dari ketiga pengujian tersebut diperoleh hasil bahwa semua data hujan harian maksimum tahunan yang digunakan lolos dari pengujian.

Tabel 1. Data Hujan Harian Maksimum Tahunan (HHMT)

Tahun	Sta. Glapan (mm)	Sta. Jragung (mm)	Sta. Jelok (mm)	Sta. Sukorejo (mm)	Sta. Kemusu (mm)
2010	-	102	121	136	95
2011	80	63	105	-	80
2012	-	-	61	140	83
2013	81	73	102	148	125
2014	83	105	105	-	81
2015	105	75	109	99	73
2016	90	95	151	180	82
2017	-	76	67	100	73
2018	112	115	128	116	57
2019	67	-	69	145	130

Analisis hujan berpeluang maksimum (PMP) dilakukan di setiap pos pengamatan hujan (Tabel 2). Metode ini berpedoman pada SNI 7746-2012 mengenai perhitungan hujan maksimum boleh jadi dengan Metode Hersfield.

Tabel 2. Resume Hasil Perhitungan PMP di Daerah Aliran Kali Bancak

No.	Nama Stasiun	Nilai PMP (mm)
1.	Sta. Glapan	406
2.	Sta. Jragung	491
3.	Sta. Jelok	772
4.	Sta. Sukorejo	602
5.	Sta. Kemusu	538

Perhitungan *Area Reduction Factor* (ARF) menggunakan *Modified Bell's Method*. Dengan menggunakan Persamaan 1, maka perhitungan ARF dapat dirumuskan sebagai berikut:

Periode ulang (tahun) = PMF
 Durasi badai (Td) = 24 jam
 Luas DAS (A) = 137.64 km²

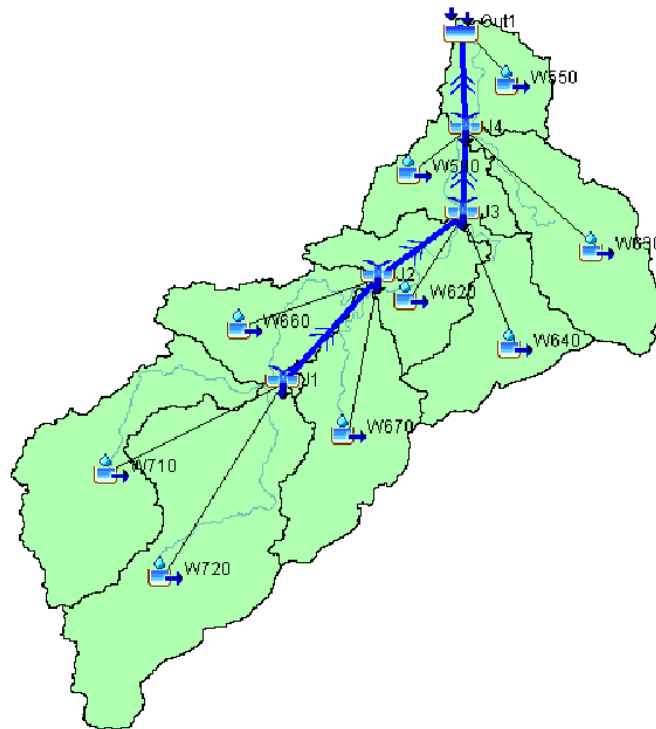
Masukkan data – data tersebut ke dalam Persamaan 3:

$$\begin{aligned} \text{ARF}_m &= 1 - 0.4(137.64^{0.14} - 0.7 \log 24) 24^{-0.48} + 0.002(137.64)^{0.4} 24^{0.41} [0.3 + \log (1/24)] \\ &= 0.82 \end{aligned}$$

Distribusi hujan jam-jaman yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan Model PSA-007. Hasil perhitungan distribusi hujan jam – jaman dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Pola hujan jam-jaman (PSA-007)

Jam ke -	Intensitas Durasi 24 Jam (%)	Distribusi Hujan (mm)	Jam ke -	Intensitas Durasi 24 Jam (%)	Distribusi Hujan (mm)
1.	0.75%	1.35	13.	22.5%	40.50
2.	0.75%	1.35	14.	7.50%	13.50
3.	1.25%	2.25	15.	4.50%	8.10
4.	1.25%	2.25	16.	3.50%	6.30
5.	1.50%	2.70	17.	2.50%	4.50
6.	1.50%	2.70	18.	2.50%	4.50
7.	2.50%	4.50	19.	1.50%	2.70
8.	2.50%	4.50	20.	1.50%	2.70
9.	3.50%	6.30	21.	1.25%	2.25
10.	4.50%	8.10	22.	1.25%	2.25
11.	7.50%	13.50	23.	0.75%	1.35
12.	22.5%	40.50	24.	0.75%	1.35



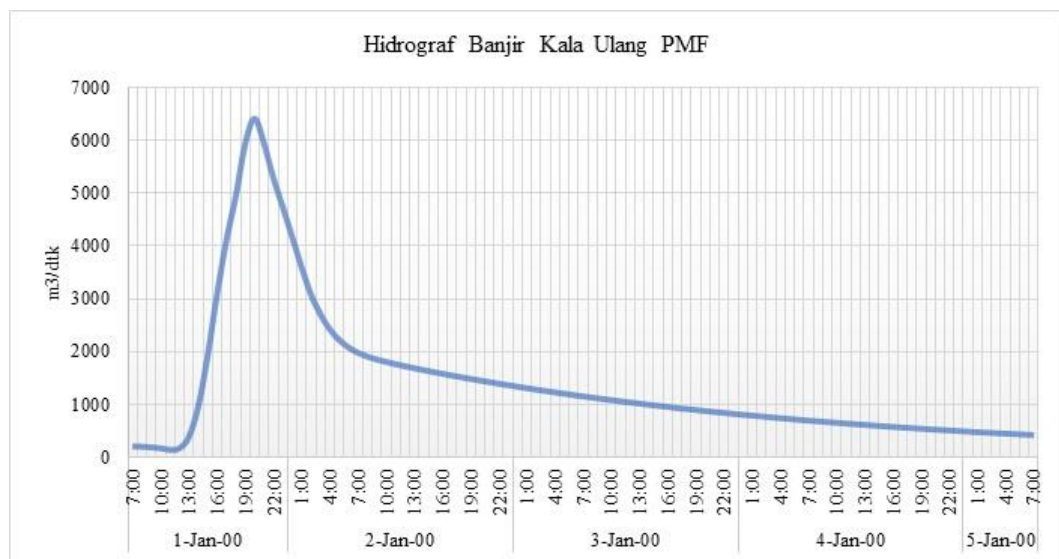
Gambar 6. Skema Pemodelan Hujan Aliran HEC-HMS Pada Daerah Aliran Kali Bancak

Langkah selanjutnya adalah perhitungan hidrograf banjir menggunakan pemodelan HEC-HMS yang dilakukan secara sederhana dengan menghubungkan komponen - komponen pada DAS sehingga terbentuk rangkaian aliran air hujan yang berakhir di titik tinjauan *outflow* debit (Gambar 6). Peta *background* yang di *import* ke dalam basin model berasal dari hasil pemodelan QGIS. Konfigurasi model hidrologi DAS kajian terdiri dari 9 sub DAS. Karakteristik basin dari setiap sub DAS diukur dari peta digital topografi dan DEM menghasilkan dimensi luas, panjang dan kemiringan DAS. Bangunan suplesi untuk mengalirkan air dari Kali Bancak ke Waduk Kedung Omba berupa terowongan dengan diameter 2 meter, panjang saluran 20 km dan kemiringan 0.05%. Elemen-elemen yang digunakan untuk mensimulasikan limpasan adalah subdas, *reach* dan *junction*. Untuk menganalisis kehilangan air karena proses intersepsi dan pengurangan tampungan, digunakan pemodelan *SCS curve number*. Nilai CN bergantung dari tata guna lahan, jenis tanah dan pengelompokan jenis tanah. Nilai CN yang didapatkan dari pemodelan QGIS langsung dimasukkan ke dalam program HEC-HMS. Parameter tersebut dibutuhkan untuk menghitung puncak dan waktu hidrograf dan secara otomatis pada model HEC-HMS akan membentuk ordinat-ordinat untuk puncak hidrograf dan fungsi waktu. Rangkaian pendekatan metode banjir HEC-HMS dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Pendekatan Metode Untuk Model Banjir HEC-HMS

Metode	Sub Metode	Parameter	Approaches	Notes
Rainfall		Design Rainfall	PSA, Huff	PSA - 007
Loss	SCS Curve Number	Initial Abstraction (mm)	From GIS (Physical Approaches)	$S=((1000/CN)-10)*25.4*0.2$
		Curve Number		
		Impervious (%)		
Transform	SCS Unit Hydrograph	Lag Time (Min)	From GIS (Physical Approaches)	Watershed Time of travel (hr)*60*0.6 (TR 55)
Baseflow	Recession	Initial Discharge (m ³ /s)	trial and error	
		Recession Constant		
		Ratio to Peak		
Routing	Muskingum - Cunge	Length (m)	From GIS (Physical Approaches)	
		Slope (m/m)		
		Manning's		
		Invert (m)		
		Shape		
		Width (m)		
		Side Slope		

Ringkasan kajian banjir dinyatakan dalam bentuk puncak atau maksimum banjir seperti terlihat pada Gambar 7. Inflow debit PMF Kali Bancak yang disuplesi ke Waduk Kedung Ombo sebesar 1.134,9 m³/s. Total inflow debit PMF jika dijumlahkan dengan inflow debit PMF DAS Serang sebesar 5.284,7 m³/s [27] menjadi 6.422,1 m³/s.

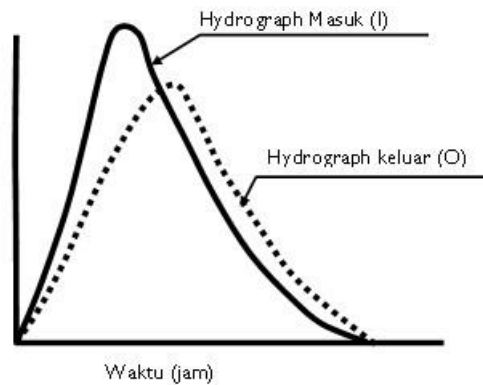


Gambar 7. Hidrograf Banjir Pada Kala Ulang PMF

3.2 Tinjauan Hidraulik

Penelusuran banjir adalah perhitungan gerakan air banjir yang lewat di kolam penampungan dengan menggunakan model matematika untuk menghitung air yang keluar (*outflow*) dari kolam penampungan (*storage*) sebagai akibat dari air yang masuk (*inflow*). Pendekatan klasik dalam perhitungan penelusuran banjir di waduk adalah dengan pendekatan konsep penampungan air (*storage concept*). Metode ini mengacu kepada *hydrologic reservoir routing methods* atau disebut juga *storage routing methods*.

Perhitungan penelusuran banjir (*reservoir routing*) di waduk sangat tergantung dari (a) volume waduk per level atau karakteristik kolam penampungan, (b) dimensi pelimpah waduk (limpasan, pengeluaran air bisa tidak terkontrol), (c) operasional air di waduk bagi pemakai air dari waduk tersebut (keluaran airnya terkontrol). Banjir yang datang dari sungai apabila masuk (I) dalam waduk maka akan mengalami terlebih dahulu penampungan (*storage*) lalu akan keluar sebagai *outflow* (O) melewati bangunan pelimpah atau bangunan pengatur air dan akan mencapai puncak debit banjir atau menjadi sirkulasi air di waduk selama kurun waktu tertentu (Gambar 8).



Gambar 8. Pendekatan Perhitungan Penelusuran Banjir

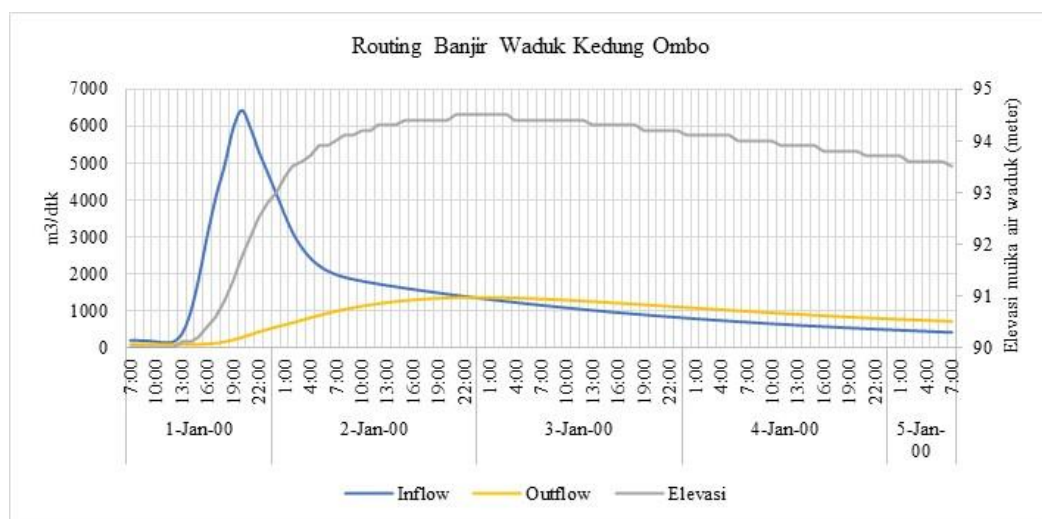
Pada penelusuran banjir berlaku persamaan kontinuitas berikut:

$$I - O = \Delta S \quad (2)$$

Dimana (ΔS) adalah perubahan tampungan di waduk. Persamaan kontinuitas pada periode $\Delta t = t_1 - t_2$ adalah:

$$\left[\frac{I_1 + I_2}{2} \right] \times \Delta t - \left[\frac{O_1 + O_2}{2} \right] \times \Delta t = S_2 - S_1 \quad (3)$$

Bentuk hidrograf banjir dari *inflow*, *outflow* dan elevasi muka air waduk untuk kala ulang debit maksimum boleh jadi atau PMF dapat dilihat pada Gambar 9.

Gambar 9. Hidrograf *Inflow*, *Outflow* dan Elevasi Muka Air Waduk periode ulang PMF

Berdasarkan hidrograf *inflow*, *outflow* dan elevasi muka air waduk (Gambar 9) didapatkan bahwa elevasi debit limpasan tertinggi yang melewati pelimpah utama berada pada elevasi +94.50 m. Skenario operasi pintu (*flap gate*) pada puncak pelimpah adalah pintu akan terbuka penuh hanya pada saat terjadi debit banjir PMF. Kondisi ini menunjukkan bahwa kondisi eksisting pelimpah baik tanpa pintu (*free flow*) maupun dengan pintu (*control flow*) tidak mengalami perubahan *rating curve* pelimpah. Elevasi muka air banjir di El. +94.50 ini juga masih di bawah elevasi muka air banjir desain (El. +95.00). Hasil simulasi limpasan di atas pelimpah menggunakan *software* HEC-RAS yang dapat dilihat pada Gambar 10. Dari hasil pemodelan dapat dilihat bahwa kapasitas pelimpah eksisting masih mampu menampung *inflow* debit PMF dari DAS Serang dan Kali Bancak.

Suatu kemungkinan terjadinya *missoperation* pintu pelimpah adalah skenario yang tidak dapat dihindari. Keterlambatan pembukaan, kemacetan atau bahkan kerusakan-kerusakan mekanisme pintu tersebut dapat mengakibatkan terjadinya kenaikan permukaan air waduk (*ha*) melampaui batas maksimum rencana. Oleh karena pertimbangan ekonomis, maka digunakan standar $ha = 0,50$ meter. Berdasarkan standar tersebut, maka tinggi jagaan pada tubuh bendungan Kedung Ombo harus direduksi akibat ketidaknormalan operasi pintu, sehingga tinggi jagaan saat ini menjadi:

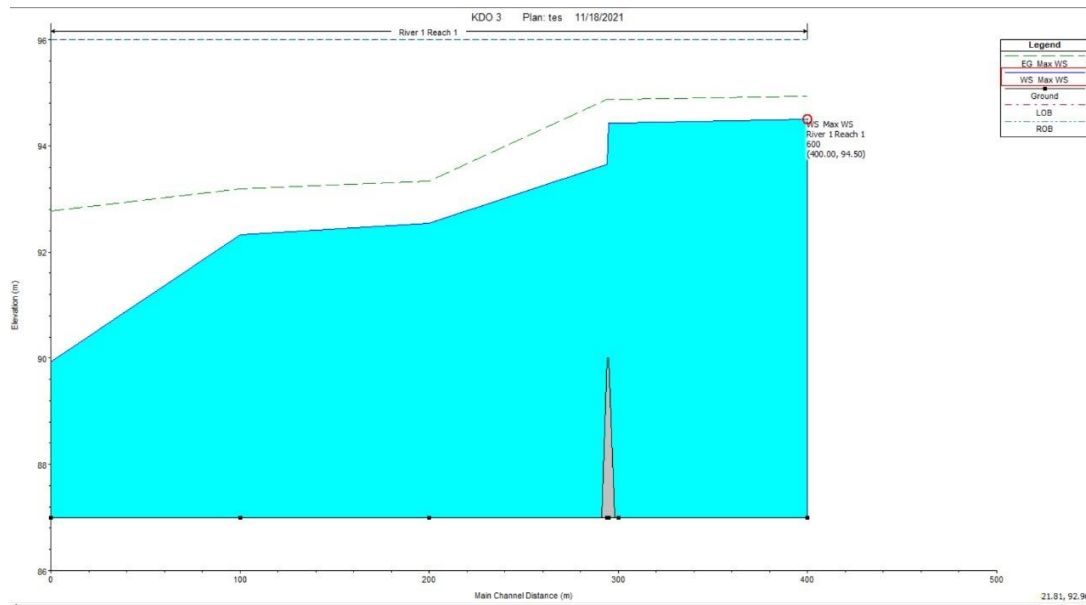
$$\begin{aligned} \text{Tinggi jagaan akibat peninggian puncak pelimpah dengan } flap \text{ gates} \\ = (\text{El. } +96.00 - \text{El. } +94.20) - 0,5 = 1,30 \text{ meter} \end{aligned}$$

Dimana:

El. +96.00 m = elevasi puncak tubuh bendungan

El. +94.20 m = elevasi muka air banjir
0,50 m = nilai reduksi akibat *missoperation* operasi pintu

Desain tinggi jagaan Bendungan Kedung Ombo berdasarkan laporan akhir pelaksanaan konstruksi adalah 1,00 meter. Nilai ini masih lebih kecil dibandingkan dengan tinggi jagaan akibat peninggian puncak pelimpah dengan *flap gates*. Hal ini menunjukkan bahwa rencana peningkatan tampungan dengan peninggian mercu pelimpah tanpa meninggikan tubuh bendungan dapat dilakukan karena tubuh bendungan tidak mengalami limpasan (*overtopping*)



Gambar 10. Simulasi Limpasan Pada Pelimpah Bendungan Kedung Ombo Menggunakan HEC-RAS 1D

4. KESIMPULAN

Beberapa hal penting yang dapat disimpulkan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

- Total debit PMF dari Kali Bancak dan DAS Serang yang ditampung di Waduk Kedung Ombo sebesar 6422,1 m³/s.
- Peninggian mercu pelimpah menggunakan *flap gates* (jenis obermeyer) tidak mempengaruhi aliran hidraulik pada pelimpah karena pada saat terjadi limpasan dalam kondisi debit PMF, semua pintu akan terbuka secara otomatis sesuai dengan beban hidrostatik.
- Apabila diperhitungkan kondisi dimana adanya kemungkinan terjadi ketidaknormalan pintu, maka *inflow* debit pada kala ulang PMF akan terjadi pada elevasi +95,00 m. Elevasi ini sama dengan elevasi dari desain pelimpah yang direncanakan pada tahun 1989.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] K. Sakamoto, Y. Takayama and S. Yamamura, "Technical Features of Tsuruta Dam Redevelopment Project," *Journal of Disaster Research*, vol. 13, no. 4, pp. 605-615, August 2018. <https://doi.org/10.20965/jdr.2018.p0605>
- [2] T. Sasaki and M. Kondo, "Trends in Dam Upgrading in Japan," *Journal of Disaster Research*, vol. 13, no. 4, pp. 585-594, August 2018. <https://doi.org/10.20965/jdr.2018.p0585>
- [3] MLIT, *Proposal on Upgrading Kedung Ombo Dam (KDO Dam)*, Japan: MLIT. 2020.
- [4] S. Poligot-Pitsch and S. Moreira, "The French Experiment of an Inflatable Weir with Steel Gates," *Einsatz von Schlauchwehren an Bundeswasserstraßen*, vol. 91, pp. 93-98, July 2007. Available: https://izw.baw.de/publikationen/mitteilungsblaetter/0/poligot_pitsch.pdf
- [5] USBR, "Spillway," in *Appurtenant Structures for Dams (Spillways and Outlet Works) Design Standard*, DS-14, Washington DC: Bureau of Reclamation, 2014, pp. 1(4)–1(5). Available: <https://www.usbr.gov/tsc/techreferences/designstandards-datacollectionguides/finalds-pdfs/DS14-1.pdf>
- [6] ICOLD, "Spillways" in *Dams, Piano Keys Weirs, Tidal Energy & Energy Storage Spillways*, pp. 1–13, 2013. Available: <http://www.hydrocoop.org>
- [7] BBWS Pemali Juana, *Kedung Ombo Dam Project Construction Supervision - Completion Report*, Semarang: Departemen Pekerjaan Umum. 2012.

- [8] N. Adamo, N. Al-Ansari, V. Sissakian, J. Laue and S. Knutsson, "Dam Safety and Overtopping," in *Earth Sciences and Geotechnical Engineering*, vol. 10, no. 6, pp. 41–78, July 2020. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1443995/FULLTEXT01.pdf>
- [9] N. Adamo, N. Al-Ansari, V. Sissakian, J. Laue and S. Knutsson, "Dam Safety Problems Related to Seepage," in *Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering*, vol. 10, no. 6, pp. 191–239, July 2020. https://www.researchgate.net/publication/342329857_Dam_Safety_Problems_Related_to_Seepage
- [10] USBR, "Freeboard," in *Embankment Dams*, DS-13. Washington DC: Bureau of Reclamation, 2012, pp. 1(4) – 1(5). Available: <https://www.usbr.gov/tsc/techreferences/designstandards-datacollectionguides/finalds-pdfs/DS13-2.pdf>
- [11] Ontario Ministry of Natural Resources, *Technical Bulletin for Spillways and Flood Control Structures*, Ontario: Ministry of Natural Resources. August 2011. Available: <https://www.ceaa.gc.ca/050/documents/p54755/143548E.pdf>
- [12] Dinas Pusdataru Jawa Tengah, *Peta Pos Hidrologi di Daerah Aliran Kali Bancak*, Semarang: Dinas Pusdataru Jawa Tengah. 2021.
- [13] Badan Standardisasi Nasional, *Tata Cara Penghitungan Hujan Maksimum Boleh Jadi dengan Metode Hersfield (SNI 7746:2012)*, Jakarta: Badan Standardisasi Nasional. 2012. Available: <https://www.bsn.go.id/>
- [14] C. Svensson and D.A. Jones, "Review of Methods for Deriving Areal Reduction Factors," in *Journal of Flood Risk Management*, vol. 3, pp. 232–245, July 2010. <https://doi.org/10.1111/j.1753-318X.2010.01075.x/abstract>
- [15] J. P. J. Pietersen, O. J. Gericke, J. Smithers and Y. Woyessa, "Review of Current Methods for Estimating Areal Reduction Factors Applied to South African Design Point Rainfall and Preliminary Identification of New Methods," in *Journal of the South African Institution of Civil Engineers*, vol. 57, pp. 16–30, March 2015. <https://doi.org/10.17159/2309-8775/2015/v57n1a2>
- [16] Departemen Pekerjaan Umum, *Panduan Perencanaan Bendungan Urugan Vol II (Analisis Hidrologi)*, Jakarta: Direktorat Bina Teknik, Direktorat Jenderal Pengairan. 1999.
- [17] L.M. Prayogo, *Basic Tutorials Quantum GIS 3.14*, vol. 1, Laura Publishing. 2020.
- [18] Badan Informasi Geospasial, "Peta DEM Daerah Aliran Kali Bancak - Seamless Digital Elevation Model (DEM) Dan Batimetri Nasional", [online]. Tersedia: <https://tanahair.indonesia.go.id/portal-web/>. [Diakses: 10 April 2021]
- [19] M. I. S. Gaghana A. Binilang dan L.A. Hendratta, "Analisis Kapasitas Penampang Sungai Di Kelurahan Tona 1 Kabupaten Sangihe," dalam *Jurnal Sipil Statik*, vol. 7, no.4, pp. 449–462, April 2019. Tersedia: <file:///F:/JURNAL%20POLBAN/23394-47735-1-SM.pdf>
- [20] USDA, "Hydrologic Soil Groups," in *Hydrologic National Engineering Handbook*, Washington DC: The U.S. Department of Agriculture, 2007, pp. 7(1)–7(5). Available: <https://directives.sc.egov.usda.gov/OpenNonWebContent.aspx?content=17757.wba>
- [21] Lapak GIS, "Data SHP (Shapefile) Peta Daerah Aliran Kali Bancak", [online]. Tersedia: <https://www.lapakgis.com/2019/11/data-shapefile-hidrografi-rbi-seluruh-indonesia.html>. [Diakses 10 April 2021]
- [22] V. Merwade, *Hydrologic Modeling using HEC-HMS (3.1.0)*. Purdue University: School of Civil Engineering. 2007. <https://www.ce.utexas.edu/prof/Maidment/GradHydro2008/HEC-HMS/hms.pdf>
- [23] Satuan Kerja Balai Bendungan, *Manual Perhitungan Debit Banjir Bendungan Menggunakan HEC-HMS 4.0*, Jakarta: Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. 2017.
- [24] S. Sosrodarsono & K. Takeda, *Bendungan Tipe Urugan*, edisi ke- 6, Jakarta: PT Balai Pustaka (Persero). 2016.
- [25] Badan Informasi Geospasial. (2020, Nov. 20). Peta Kemiringan Lereng DAS Kali Bancak [Online]. Available FTP: <https://tanahair.indonesia.go.id/demnas/#/demnas>
- [26] LAPAK GIS. (2020, Ags. 15). Shape File Penggunaan Tanah Indonesia [Online]. Available FTP: www.lapakgis.com/2020/08/shapefile-penggunaan-tanah-indonesia.html.
- [27] BBWS Pemali Juana, *Laporan Inspeksi Besar Waduk Kedung Ombo Tahun Anggaran 2021*, Semarang: Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. 2021.