Jurnal Aplikasi Teknik Sipil
Volume 23, Nomor 2, Mei 2025

Journal homepage: http://iptek.its.ac.id/index.php/jats

Perbandingan Parameter Hidraulik Perencanaan Bendung Gerak Kantelstuw Dengan Bendung Tetap Di Bendung Doorbraak, Almelo, Belanda

Chairevita Novia Mediana[1,*], S. Kamilia A.[1], Rizki Robbi R. Alam[1], Dwi Indriyani[1], Bagas Yoga P[1], Made Indrayana S[1], M Fadhlan Rosyidi[1]
Departemen Teknik Infrastruktur Sipil, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya[1]
Email: *chairevita@gmail.com*

Info Artikel
Diajukan 13 Desember 2024
Diperbaiki 08 Januari 2025
Disetujui 20 Mei 2025

Keywords— hydraulic analysis, movable weir, kantelstuw, pivot gate, tilting gate,

Kata Kunci— analisis hidraulik, bendung gerak, kantelstuw, pintu pivot, pintu rebah,

Abstract

The Doorbraak Weir is located in the De Doorbraak Diversion, flowing water from the Loolee River to the Eksosche Aa River. This weir is a fixed cascade type with a height of 2.1 m, serving flood control as well as livestock and agricultural needs. The required water level is +10.5 NAP, but this is often not met during the summer because the weir crest elevation is only +10.3 NAP. To address this, a plan is proposed to convert the weir into a movable kantelstuw or tilting gate. The proposed gate has a crest elevation of +10.5 NAP, with dimensions of 0.5 m x 1.5 m and a gate base height of 0.8 m. Analysis shows that the movable weir is safer, with a Froude number of 2.5 and a jump length of 1.92 m, compared to the fixed weir. The gate operation scenario meets the minimum freeboard requirement of 0.90 m, and the levee is proven to be safe from backflow. Based on hydraulic parameter comparisons, the movable kantelstuw type weir is recommended for the Doorbraak Weir construction.

Abstrak

Bendung Doorbraak berada di Sudetan De Doorbraak mengalirkan air dari Sungai Loolee ke Sungai Eksosche Aa. Bendung ini adalah bendung tetap tipe kaskade setinggi 2,1 m yang berfungsi untuk pengendalian banjir serta kebutuhan peternakan dan pertanian. Elevasi kebutuhan air adalah +10,5 NAP, namun sering tidak tercapai saat musim panas karena elevasi mercu bendung hanya +10,3 NAP. Untuk mengatasi ini, direncanakan perubahan menjadi bendung gerak tipe kantelstuw atau pintu rebah. Pintu ini direncanakan memiliki elevasi puncak +10,5 NAP dengan dimensi 0,5 m x 1,5 m dan alas pintu setinggi 0,8 m. Analisis menunjukkan bahwa bendung gerak lebih aman dengan bilangan Froude 2,5 dan panjang loncatan 1,92 m dibandingkan bendung tetap. Skenario pengoperasian pintu terbukti memenuhi syarat tinggi jagaan minimum 0,90 m, dan tanggul terbukti aman dari aliran balik. Berdasarkan perbandingan parameter hidraulik, bendung gerak tipe kantelstuw lebih direkomendasikan untuk jenis konstruksi Bendung Doorbraak.

1. Pendahuluan

Bendung adalah bangunan utama yang berfungsi sebagai peninggi elevasi muka air, sehingga air di dalam sungai dapat disadap dan dimanfaatkan untuk kebutuhan sekitar [1]. Berdasarkan jenisnya, bendung dibagi menjadi dua yaitu bendung tetap dan bendung gerak. Bendung tetap tidak dapat mengatur tinggi muka air dan debit yang melintasinya, sedangkan bendung gerak dapat mengatur kedua hal tersebut dengan bukaan pintu-pintu yang terdapat pada bendung tersebut [2].

Bendung Doorbraak terletak di Sudetan Doorbraak, Desa Bornerbroek, Kota Almelo, Belanda. Sudetan ini mengalirkan air dari Sungai Loolee menuju Sungai Eksosche Aa. Bendung Doorbraak terletak sekitar 5,8 km dari percabangan Sungai Loolee dimana hulu sudetan berada dengan debit desain 16 m^3/s. Berjarak sekitar 2,4 km sebelah hulu bendung terdapat jalur ikan Azelerbeek. Bendung Doorbraak berfungsi sebagai pengendali banjir dan untuk memenuhi kebutuhan air irigasi.

Bendung Doorbraak pada kondisi eksisting merupakan bendung tetap berbentuk kaskade dengan lebar sekitar 3,26 m dan mercu setinggi 2,1 m. Pada sebelah kanan bendung terdapat jalur ikan dengan lebar 0,49 m. Elevasi mercu berada pada +10,3 NAP, dan elevasi *intake* berada pada elevasi +10,5 NAP. Pada saat musim panas, kebutuhan elevasi intake kerap tidak terpenuhi karena kurang maksimalnya bendung dalam menampung air. Oleh karena itu, dilakukan perubahan bentuk konstruksi bendung tetap menjadi bendung gerak dan direncanakan pola operasi pintunya. Hal ini bertujuan agar air yang melewati bendung dapat diregulasi dengan baik berdasarkan bukaan pintu.

Penelitian sebelumnya menunjukan bahwa pola operasi pintu direncanakan dengan pertimbangan kebutuhan debit irigasi yang harus tetap terpenuhi [3]. Skenario bukaan pintu terbukti tidak mempengaruhi karakteristik aliran air yang

dihasilkan dari bukaan pintu tersebut [4]. Dilakukan pemodelan numerik melalui HEC-RAS selain perhitungan manual karena dapat mempresentasikan kondisi sesungguhnya di lapangan [5].

Tujuan penelitian ini adalah mencari rekomendasi bentuk Bendung Gerak tipe pintu *kantelstuw* dengan memperhitungkan parameter hidraulik di Bendung Doorbraak pada dua kondisi yaitu Bendung Tetap dan Bendung Gerak.

2. Metode

Penelitian ini berlokasi di Bendung Doorbraak, Sudetan Doorbraak, Kota Almelo, Belanda, dengan koordinat Latitude 52.316070° dan Longitude 6.70009. Data yang digunakan dalam penelitian ini meliputi data curah hujan dari Stasiun Almelo dan Twente, data DEM dan data tata guna lahan, data geometri penampang sudetan, data debit dan muka air, serta data teknis bendung. Peralatan yang digunakan adalah laptop dan perangkat lunak seperti QGIS 3.63, HEC-RAS 6.3.1, ArcGIS 10.8, dan AutoCAD 2018. Secara garis besar, tahapan penelitian ini adalah perhitungan hidrologi, kalibrasi data, perhitungan hidraulik bendung tetap, perencanaan bendung gerak, pola operasi pintu, serta perhitungan hidraulik bendung gerak.

Tahap pengolahan data dimulai dengan perhitungan hidrologi menggunakan data curah hujan dari stasiun terdekat, yaitu Stasiun Almelo dan Stasiun Twente. Tahap ini diawali dengan perhitungan Uji Massa Ganda untuk mengetahui konsistensi data. Selanjutnya, Metode Aritmatika digunakan dalam perhitungan distribusi curah hujan karena Belanda memiliki kontur yang cenderung datar [6]. Kemudian, Uji Outlier dilakukan untuk mengidentifikasi dan membuang data curah hujan yang nilainya jauh di atas rata-rata, memastikan seluruh data memenuhi batas atas dan batas bawah [7]. Terdapat tiga metode perhitungan analisis distribusi curah hujan, yaitu Normal, Gumbel, dan Log Pearson Tipe III. Dilakukan, uji kecocokan distribusi yaitu Uji Smirnov Kolmogorov dan Uji Chi Square untuk memastikan distribusi yang dipilih dapat mewakili sampel data yang dianalisis [8]. Digunakan Hidrograf Satuan Sintesis Soil Conservation Service (SCS) untuk wilayah Belanda.

Kalibrasi data debit dan muka air dilakukan menggunakan software HEC-RAS untuk membuktikan apakah data debit eksisting sesuai dengan data muka air eksisting. Kalibrasi dilakukan dengan memasukkan geometri penampang sudetan dan data debit, lalu program dijalankan dengan Steady Flow.

Perhitungan parameter hidraulik bendung eksisting diawali dengan perhitungan koefisien debit (Cd) untuk mengetahui debit aliran yang mengalir pada bendung. Dilakukan *trial* and *error* untuk mendapatkan besaran Cd yang nilai asumsinya sesuai dengan hasil perhitungan rumus. Perhitungan koefisien debit menggunakan Persamaan (1) s.d (4). Selanjutnya, dilakukan perhitungan profil muka air yang meliputi dua profil yaitu aliran transisi dan aliran terjunan. Analisis loncatan hidraulik juga dilakukan untuk mengetahui panjang, jenis, dan pola loncatan hidraulik berdasarkan bilangan Froude yang dihitung. Setelah loncatan, kedalaman lanjutan (y2) dan kedalaman air bawah (y2') juga diperhitungkan. Tahap ini menggunakan Persamaan (5) s.d (7).

$$B = B' - 2(N.Kp + Ka)Hd \quad (1)$$

$$H = \left(\frac{Q}{Cd\ B}\right)^{2/3} \quad (2)$$

$$a = \frac{0.6 - 0.0416\left(\frac{H}{P}\right)^{0.99}}{1 + 0.0416\left(\frac{H}{P}\right)^{0.99}} \quad (3)$$

$$C = 1.6\ \frac{1 + 2 \times a \times \left(\frac{H}{Hd}\right)}{1 + a \times \left(\frac{H}{Hd}\right)} \quad (4)$$

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{2gh}} \quad (5)$$

$$y_2 = \frac{y1}{2}\left[\sqrt{1 + 8.\ Fr^2} - 1\right] \quad (6)$$

$$y'_2 = \left(1.1 - \frac{Fr^2}{120}\right) y_2 \quad (7)$$

Selanjutnya dilakukan perencanaan dimensi pintu *kantelstuw,* dimana saluran akan dinormalisasi dari bentuk awal yaitu *bottleneck* menjadi bentuk persegi. Dilakukan juga pelebaran bendung dengan menggabungkan bagian bendung dengan bagian jalur ikan. Pola pengoperasian pintu dirancang dengan bukaan setiap 5° per satuan waktu. Pintu akan dioperasikan secara bertahap sesuai dengan jumlahnya, dimana pintu bagian tengah akan dibuka terlebih dahulu lalu disusul pintu pada sisi samping. Bukaan masing-masing pintu diatur sedemikian rupa untuk mempertahankan elevasi kebutuhan air.

Perhitungan parameter hidraulik bendung gerak terdiri dari dua bagian yaitu hulu dan hilir pintu. Perhitungan ini menggunakan rumusan peluap sempurna ambang tipis tidak vertikal pada Persamaan 8. Perhitungan ini meliputi volume tampungan (Vn), elevasi muka air, skenario bukaan pintu, beda tinggi air diatas pintu (ΔH), serta debit masuk (Q_{in}) dan debit keluar (Q_{out}). Perhitungan karakteristik aliran air pada bagian hilir pintu meliputi kedalaman setelah loncatan (y1), kedalaman lanjutan (y2), dan kedalaman air bawah (y2'). Persamaan yang digunakan adalah Persamaan (8) s.d. (12).

$$Q = m.b.H\sqrt{2\ g\ H} \quad (8)$$

$$m = \left[0.414 + 0.2\left(\frac{H}{H+p}\right)^2\right]\left[1 \pm 0.39\left(\frac{a}{180^0}\right)^2\right] \quad (9)$$

$$y_1 = 0.54\ D^{0,27}.\underline{\Delta H} \quad (10)$$

$$y_2 = 1.66\ D^{0,27}.\underline{\Delta H} \quad (11)$$

$$\frac{y2}{y1} = \frac{1}{2}\left(\sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1\right) \quad (12)$$

Selanjutnya dilakukan analisis aliran balik atau *backwater*. Aliran balik terjadi apabila terdapat hambatan akibat adanya bangunan pada suatu saluran, misalnya bendung, bendungan, jembatan Efek aliran balik ini dipengaruhi oleh kemiringan saluran (buat backwater).
Perhitungan backwater menggunakan Persamaan (13) s.d (15).

$$h_n = \left(\frac{q.n}{S^{1/2}}\right)^{3/5} \quad (13)$$

$$s_e = \frac{n^2 v^2}{R^{4/3}} \quad (14)$$

$$s_{e\,rt} = \frac{Se\ 1+Se}{2} \quad (15)$$

Dilakukan perencanaan tinggi jagaan (Fb) dan tinggi tanggul (Th) agar tidak terjadi limpahan air dari saluran dengan menggunakan Persamaan (16) dan (17), dimana parameter V adalah kecepatan aliran (m/dt), d = kedalaman air dalam saluran (m), dan y2 = kedalaman air di hilir. Selanjutnya dilakukan kontrol tanggul terhadap skenario bukaan pintu dan terhadap backwater.

$$Fb = 0.6 + 0.037\ V\ d^{1/3} \quad (16)$$

$$Th = Fb + y_{2,\,max} + (0.6\ \Delta h_{max}) \quad (17)$$

Perhitungan tinggi pintu dilakukan dengan Persamaan (18), dimana n adalah.

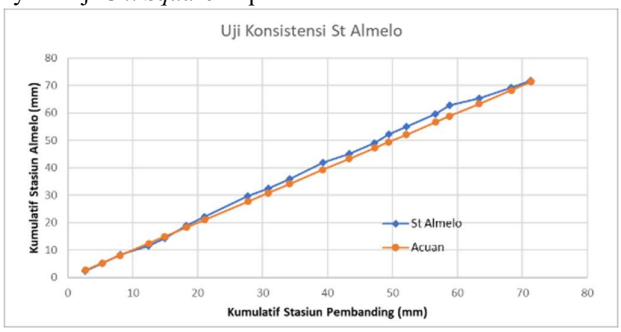
$$\text{Tinggi pintu minimum} = \Delta H - 0{,}1 + n \quad (18)$$

Selain perhitungan manual, dilakukan simulasi bendung gerak pintu kantelstuw menggunakan software HEC-RAS mempresentasikan kondisi sesungguhnya di lapangan. sebagai pembanding antara perhitungan manual dan kondisi yang sebenarnya. Hasil akhir dari simulasi HEC-RAS adalah *rating curve* dan *time series.*

3. Hasil dan Pembahasan

Hasil Perhitungan Hidrologi

Perhitungan Uji Massa Ganda pada Stasiun Almelo dan Stasiun Twente menghasilkan grafik pada **Gambar 1**. Kedua grafik menunjukan bahwa tidak terjadi patahan dalam data sehingga data dapat digunakan. Hasil distribusi hujan dilakukan dengan Metode Aritmatika karena kondisi penelitian cenderung datar**.** Selanjutnya dilakukan Uji Outlier dan diperoleh nilai batas atas 64,73 dan batas bawah 13,921. Setelah beberapa iterasi, didapatkan data hujan yang telah memenuhi syarat batas atas dan batas bawah pada **Tabel 2.** Data hujan ini digunakan untuk perhitungan analisis distribusi hujan dengan metode Log Pearson Tipe III, menghasilkan Sd = 0,1243, Cv = 0,0834, Cs =0.8827, Ck = 3,163. Selanjutnya, dilakukan Uji Probabilitas Smirnov Kolmogorov dan Chi Square. Dengan syarat Δ cr > Dmax = 0.294 > 0.163, maka syarat uji Smirnov Kolmogorov terpenuhi. Uji Chi Square memiliki nilai derajat kebebasan (dk) = 3 a 5% adalah 9,210. Diperoleh $X_h^2 = 2$. Syarat Uji *Chi Square* adalah Dk > X_h^2 , dan 9.210 > 3.5. Dengan ini maka syarat uji *Chi Square* terpenuhi.



Gambar 1. Grafik Uji Massa Ganda

Tabel 1. Data Hasil Uji Outlier

No	Tahun	X	Keterangan
1	2010	61	Aman
2	2013	51	Aman
3	2021	44	Aman
4	2015	40	Aman
5	2008	39	Aman
6	2014	36	Aman
7	2020	33	Aman
8	2012	30	Aman
9	2018	29	Aman
10	2005	29	Aman
11	2006	29	Aman
12	2017	28	Aman
13	2019	27	Aman
14	2022	26	Aman
15	2009	26	Aman
16	2011	26	Aman
17	2007	25	Aman
18	2003	23	Aman
19	2004	21	Aman
20	2016	20	Aman

Bendung Doorbraak merupakan bagian dari Daerah Aliran Sungai (DAS) Sungai Loolee. Dengan luas DAS sebesar 8,2692 km^2 dan sebesar 97% wilayahnya merupakan daerah pertanian, didapat nilai *Curve Number* (CN) 70,8 dan nilai koefisien aliran (C) 0,25, dimana perhitungan Curve Number dapat dilihat pada **Tabel 2.**

Digunakan Metode Mononobe dengan durasi rata-rata hujan Belanda yaitu selama 4 jam**.** Curah hujan ini digunakan untuk perhitungan Hidrograf Satuan Sintesis metode *Soil Conservation Service.* Perhitungan HSS SCS menghasilkan waktu konsentrasi (Tc) sebesar 5,16 jam, waktu puncak (tp) 3,09 jam, waktu naik (Tp) 5,09 jam, dan Qp (Debit Puncak) 3,38 m3/dt. Dihasilkan grafik HSS SCS pada **Gambar 2.** Nilai curah hujan yang digunakan untuk perhitungan

selanjutnya adalah pada periode ulang Q50.

Tabel 2. Perhitungan Curve Number

Perhitungan Curve Number					
No	**Jenis Tutupan Lahan**	**Bobot**	**CN**	**(A km2)**	**A x CN**
1	Jalan	0,013%	98	0,0011	0,11
2	Pertanian	97,452%	72	8,0585	580,21
3	Hutan	2,535%	25	0,2096	5,24
	Jumlah	1		8,27	585,45
	Luas total DAS	8,26922	km^2		
	Nilain CN	**70,8**			

Hasil Kalibrasi Data

Kalibrasi data debit dengan tinggi muka air melalui HEC-RAS dilakukan dengan memasukan penampang saluran dengan menggunakan debit desain. Selanjutnya data hasil simulasi dengan data eksisting dibandingkan, dan didapatkan tinggi muka air yang kurang sesuai yaitu sebesar +11,03 dan +11,2. Hal ini terjadi karena adanya pengaruh penambahan debit dari saluran ikan Azelerbeek pada titik tersebut, yang diasumsikan tidak diperhitungkan pada data eksisting. Kalibrasi dianggap berhasil dilakukan dengan hasil akhir pada **Gambar 2, Gambar 3,** dan **Gambar 4. Gambar 3** memuat informasi hubungan jarak, TMA, dan debit pada kondisi eksistingnya. Gambar 4 memuat informasi hasil kalibrasi yang dilakukan melalui HEC-RAS.

Hasil Perhitungan Hidraulik Bendung Tetap

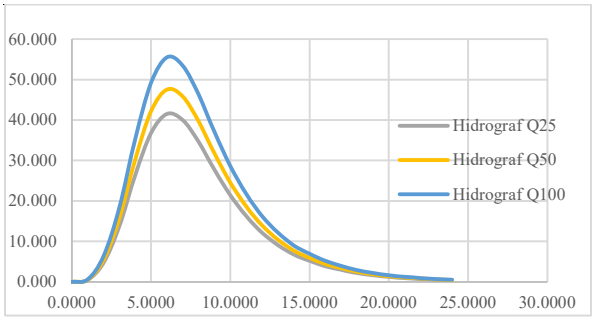
Perhitungan hidraulik bendung tetap diawali dengan perhitungan Koefisien Debit (*Cd)* dengan metode *trial and error.* Dilakukan tiga percobaan Cd yang dapat dilihat pada **Tabel 3.** Kondisi saat Cd asumsi sama dengan Cd hitung diperoleh saat nilainya 2,185. Berdasarkan data, bendung eksisting memiliki Q = 4,2 m^3/s. Dilakukan pembuktian nilai Cd dengan cara memasukkan angka tersebut kedalam rumus Q dan diperoleh Q = 4,2 m^3/s. Maka, terbukti nilai Cd benar.

Selanjutnya, dilakukan perhitungan tinggi muka air kritis (Hc) yang akan digunakan sebagai titik awal tinggi muka air untuk profil muka air. Didapatkan Hc sebesar 0,553 m. Perhitungan profil muka air bagian transisi diawali dari titik sejauh 3,2 m dari mercu dan berakhir tepat di mercu, sementara profil muka air bagian terjunan diawali dari titik mercu dan berakhir pada titik akhir kemiringan bendung. Grafik profil aliran dapat dilihat pada **Gambar 5**.

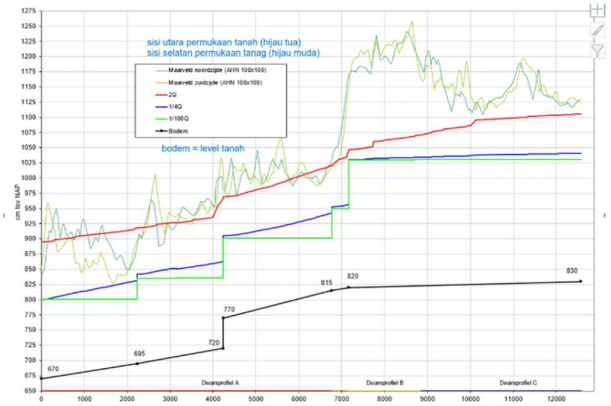
Berdasarkan perhitungan profil aliran, dihasilkan Fr sebesar 5,165. Nilai Fr diplot kedalam grafik hubungan Fr dengan panjang loncatan dan diperoleh L = 8,11 m. Kedalaman setelah loncatan (y_2) didapat 1,352 m dan kedalaman air bawah y'_2 = 1,352 m. Loncatan hidraulik bersifat loncatan tunak dengan pola loncatan bahaya karena nilai $y_2 > y'_2$. Rekapitulasi hasil perhitungan parameter hidraulik bendung eksisting dapat dilihat pada **Tabel 4**.

Tabel 3. Rekapitulasi Perhitungan Cd

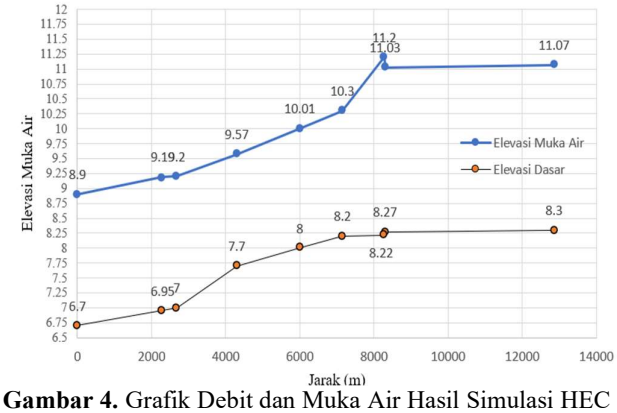
Cd asumsi	Hd	a	Cd hitung
2,100	0,745	0,576	2,185
2,185	0,725	0,577	2,185
2,185	0,725	0,577	2,185



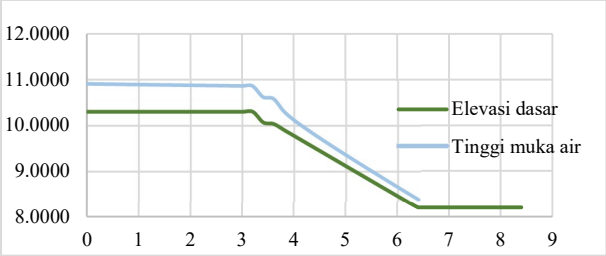
Gambar 2. Debit Banjir HSS SCS DAS Loolee



Gambar 3. Grafik Muka Air Data Eksisting



Gambar 4. Grafik Debit dan Muka Air Hasil Simulasi HEC RAS.



Gambar 5. Grafik Profil Aliran Bendung Eksisting

Tabel 4. Rekapitulasi Parameter Hidraulik Bendung Tetap

Parameter Hidraulik Bendung Tetap					
Q	4,200	m^3/detik	fr_2	0,262	
B	3,260	m	Tipe Loncatan	Loncatan tunak	
y_1	0,185	m	L	8,113	m
v_1	6,960	m/s	E1	5,123	m
fr_1	5,165		E2	1,445	m
y_2	1,352	m	ΔE	3,679	m
v_2	0,953	m/s	Reduksi Energi	71,80	%

Perencanaan Dimensi Bendung Gerak Kantelstuw

Pada perencanaan bendung gerak, dilakukan normalisasi saluran dan pelebaran bendung dengan menggabungkan bagian bendung dengan bagian jalur ikan. Saluran diubah dari bentuk *bottleneck* menjadi persegi dengan kedalaman 3m dan lebar 4m. Lebar dan jumlah pintu diperhitungkan dengan *trial and error* yang dapat dilihat pada Tabel 5, dan dipilih dimensi lebar 0.5m dengan jumlah pintu 4 buah. Perhitungan tinggi pintu menggunakan Persamaan (18).

Tinggi pintu minimum = ΔH – 0,1 + n

ΔH = T.M.A Hulu – T.M.A Hilir = 11,2-10,3 = 0,9m

H minimum = 0,9 m – 0,1 m + 0,5 m= 1,3 m

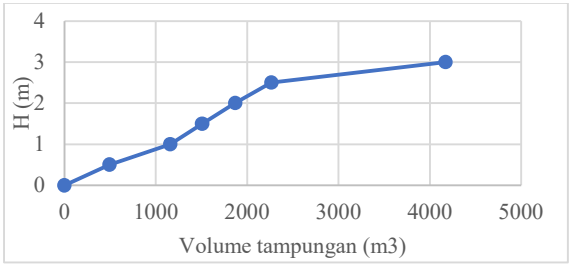
Direncanakan tinggi pintu 1,5m. Karena elevasi pintu direncanakan pada +10,5 NAP, maka alas pintu yang akan digunakan adalah setebal 0,8m.

Perhitungan Hidraulik Hulu Bendung Gerak

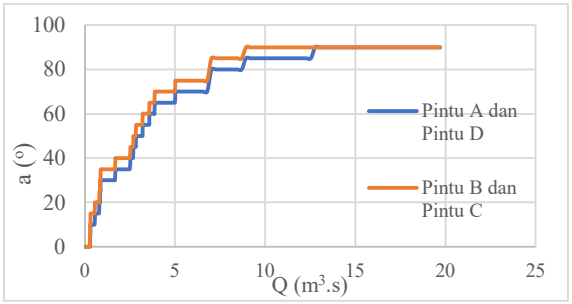
Perhitungan hidraulik pintu *kantelstuw* bagian hulu diawali dengan memperhitungkan volume tampungan hulu. Volume diperoleh dari *plotting* kontur geometri saluran ke Auto-CAD, dihasilkan *rating curve* pada **Gambar 6** yang menunjukkan hubungan antara tinggi pintu dan volume tampungan.

Selanjutnya, dilakukan perhitungan debit input yang melewati pintu. Karena sudetan menerima debit dari dua sumber yaitu dari Sungai Loolee dan Saluran Ikan Azelerbeek, maka debit pada sudetan merupakan hasil akumulasi kedua sumber tersebut. Jumlah debit yang masuk ke sudetan dari Sungai Loolee diperoleh dari simulasi HEC-RAS dengan *running unsteady flow* Q50, dan debit yang masuk dari Saluran Ikan Azelerbeek menggunakan data debit yang sudah ada. Karena data debit saluran ikan memiliki kondisi yaitu ¼ Q, 1Q, dan 2Q, maka nilai terhadap kondisi tersebut diinterpolasi dengan debit hasil simulasi HEC-RAS. Dihasilkan debit input sudetan selama 24 jam dengan Q minimum = 0,279 m^3/s dan Q maksimum = 19,7 m^3/s.

Perhitungan parameter hidraulik bagian hulu pintu meliputi durasi per satuan menit (t), Q_{input}, $volume_{input}$, $vol_{tampungan}$, a (bukaan per pintu) yang direncanakan dibuka 5° dan bukaannya diatur sedemikian rupa untuk mempertahankan elevasi pintu yaitu +10,5 NAP, dan menghasilkan ΔH, M (koefisien tiap pintu), Q_{output}, $volume_{output}$, $vol_{tampungan+1}$. Keempat pintu yaitu pintu a,b,c,d dioperasikan dengan bertahap dengan interval 5°, dimana pintu bagian tengah yaitu b dan c dibuka terlebih dahulu kemudian disusul pintu a dan d. Perhitungan dilakukan per satu menit selama 24 jam, yang berarti selama 1.440 menit. Dengan Qinmax sebesar 19,7 m^3/s, didapatkan hasil hmax setinggi 3,245 m dengan elevasi 11,445, Δhmax sebesar 2,445 dan Qoutmax per satu pintu adalah 4,9 m^3/s dan Qoutmax untuk keseluruhan pintu adalah 19,605 m^3/s. Grafik hubungan debit dengan derajat bukaan pintu dapat dilihat pada **Gambar** 7.



Gambar 6. Kurva Tampungan Hulu



Gambar 7. Grafik Hubungan Q dan *a.*

Pada pengoperasiannya, pintu akan diatur terbuka secara otomatis ketika kondisi air (h) tingginya melebihi 2,3 m atau lebih tinggi dari elevasi pintu yaitu +10,5 NAP. Dengan demikian, bukaan pintu juga diatur agar h tidak lebih rendah

dari 2,3 m. Skenario pintu terbuka sempurna yaitu bukaan 90° pada keempat pintu didapatkan pada saat debit mulai bernilai 13 m^3/s. Dimana bukaan penuh terus dilakukan sampai debit mencapai kondisi maksimum yaitu 19,7 m^3/s, hingga debit perlahan turun lagi. Hubungan tinggi muka air dengan debit dari kondisi awal menuju kondisi debit maksimum (*rating curve)* disajikan pada **Gambar 8**.

Fluktuasi tinggi muka air disebabkan oleh bertambahnya Vol_{in} dan Vol_{out}. Didapatkan tinggi air pada saar debit maksimum sebesar 19,7 m^3/s yaitu 3,24 m, yang artinya air berada pada elevasi 11,44 NAP. Tinggi air maksimum terjadi pada menit ke 609 atau sekitar jam ke-10, lalu berangsur turun hingga mencapai ketinggian semula pada menit ke 1.440 atau jam ke-24. Grafik hubungan tinggi muka air terhadap waktu disajikan pada **Gambar 9**.

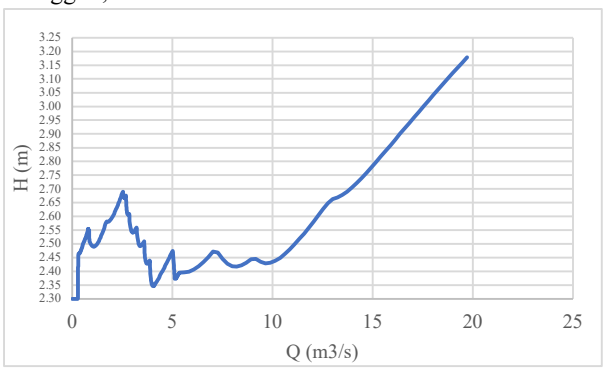
Perhitungan Hidraulik Hilir Bendung Gerak

Perhitungan karakteristik bagian hulu hilir memiliki input T, $\underline{\Delta H}$, dan Q_{out} dari hasil perhitungan hulu. Hasil perhitungan memperoleh angka Froude yang konstan senilai 2,502. Kondisi ini menentukan jenis kolam olak yang digunakan adalah USBR Tipe I. Reduksi energi yang dihasilkan adalah konstan senilai 53,8 %. Debit maksimum yang dihasilkan pintu adalah sebesar 19,605 m3/s dengan tinggi air setelah loncatan (y_2) maksimum adalah 2,026 dan ($y_{2'}$) maksimum sebesar 2,123 m. Panjang loncatan yang terjadi adalah sepanjang 1,92 m. Pola loncatan yang terjadi bersifat aman, yang artinya loncatan hidraulik akan terdorong ke arah hulu dan akhirnya lenyap dan menjadi loncatan yang terendam. Hal ini dibuktikan dengan nilai $y_{2'}$ yang lebih besar dari y_2. Hubungan debit dengan tinggi muka air pada bagian hilir pintu dapat dilihat pada **Gambar 10.**

Selanjutnya, diperoleh tinggi jagaan (Fb) senilai 0,90 m dengan tinggi tanggul (Th) setinggi 4,49m dari dasar saluran. Maka dengan elevasi dasar +8,2 NAP diperoleh elevasi tanggul pada +12,69 NAP. Pada kondisi lapangan, elevasi tanggul berada di +11,75 NAP, maka dilakukan peninggian tanggul setinggi 0,86 m.

Perhitungan Backwater

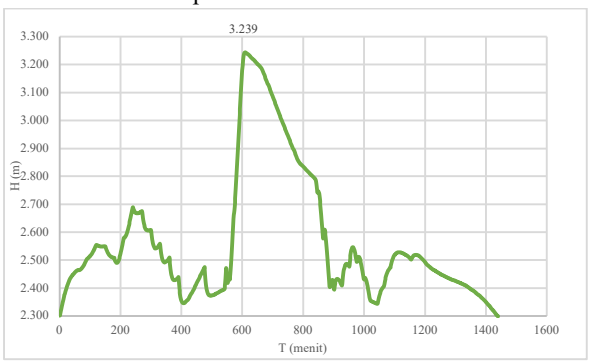
Perhitungan backwater dilakukan dengan metode langsung, dimana tinggi muka air diatas ambang pada titik paling hilir yaitu bendung ditarik menuju kedalaman normal bagian paling hulu. Pada perhitungan ini, digunakan asumsi keempat pintu tertutup sempurna. Tahap ini diawali dengan perhitungan tinggi muka air diatas ambang yang akan dijadikan acuan untuk ditarik garis dan diperoleh nilai Y sebesar 4,12 m. Selanjutnya dihitung tinggi muka air normal (h_n) dengan hasil 2,99 m. Kedua nilai ini akan diperhitungkan dengan selisih interval 0,1m dimana dimulai dari Y sampai menuju h_n. Perhitungan menghasilkan grafik *backwater* yang disajikan pada **Gambar 11**. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa aliran balik terjadi pada jarak 2.172,8m, yaitu ketika elevasi dasar setinggi 8,24 NAP dan tinggi air normal setinggi 2,99 m.



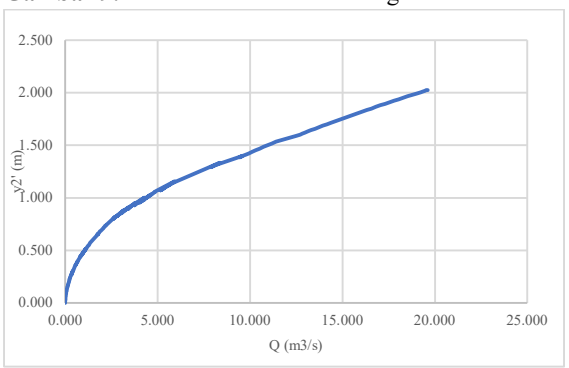
Gambar 8. Rating Curve Hulu Bendung Gerak

Perhitungan Kontrol Tanggul

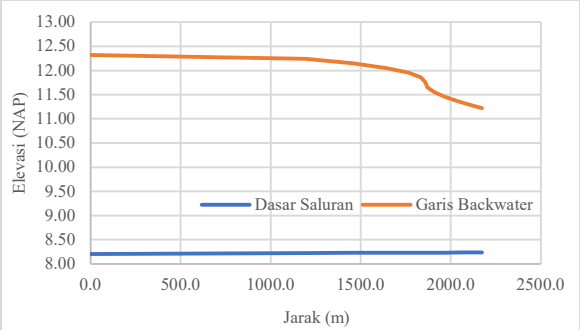
Berdasarkan perhitungan sebelumnya, tinggi tanggul rencana bernilai 4,49 m dari dasar saluran. Maka, dilakukan kontrol tinggi air akibat skenario pintu dan akibat *backwater* terhadap tinggi tanggul rencana. Kontrol tanggul terhadap tinggi muka air akibat skenario bukaan pintu dapat dilihat pada **Gambar 12**, dimana jagaan minimum masih terpenuhi bahkan saat mencapai debit maksimum.



Gambar 9. Time Series Hulu Bendung Gerak



Gambar 10. Rating Curve Hilir Bendung Gerak



Gambar 11. Grafik Backwater

Kontrol tanggul terhadap *backwater* dapat dilihat pada **Gambar 13**, dimana tanggul masih aman namun tinggi jagaan tidak terpenuhi dan termasuk kondisi bahaya. Namun, karena perhitungan *backwater* dilakukan dengan asumsi keempat pintu tertutup sempurna maka kejadian ini dapat dihindari pada kondisi aktual. Berdasarkan perhitungan, terbukti bahwa tanggul aman terhadap pola operasi pintu dan aman terhadap *backwater*.

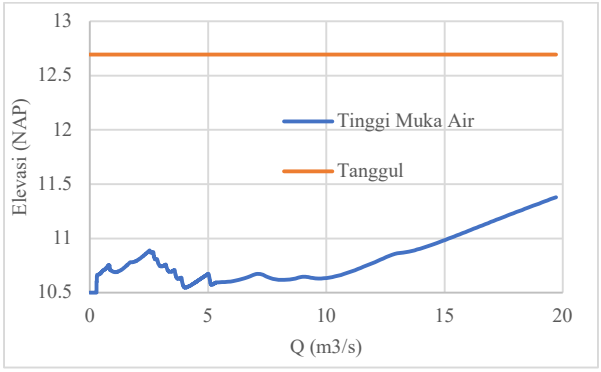
Simulasi Bendung Gerak Dengan HEC-RAS

Simulasi bendung gerak pintu *kantelstuw* dilakukan dengan *software HEC-RAS* dengan menggunakan struktur geometri yang ada lalu menambahkan *inline structure* berupa struktur bendung dan menambahkan *inline gate* dengan 2 *Gate Group* yaitu pintu B-C dan A-D. Hal ini diilustrasikan pada **Gambar 14**. Diatur *Elevation Controlled Gates* dimana pintu mulai terbuka saat elevasi 10,5 dan mulai tertutup saat elevasi 10,4. Hasil dari *run Unsteady Flow* adalah *rating curve* berupa *rating curve* dan *time series* yang dapat dilihat pada **Gambar 15** dan **Gambar 16.**

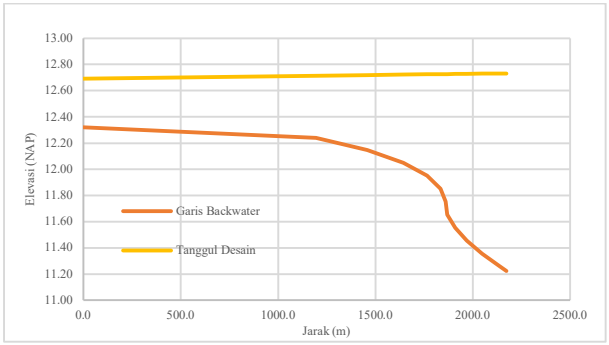
Simulasi menghasilkan elevasi air maksimum pada + 12,23 NAP dan debit maksimum yang dihasilkan adalah 16,64 m^3/s. Rating curve hasil simulasi HEC-RAS dengan hasil perhitungan manual terdapat beberapa perbedaan, hal ini disebabkan oleh skenario bukaan pintu yang berbeda dengan perhitungan manual. Berbeda dengan perhitungan manual, bukaan pintu pada aplikasi HEC-RAS ditentukan secara otomatis berdasarkan tinggi muka air dan tidak berlangsung secara bertahap per 5º. Hal ini membuat rating curve hasil simulasi memiliki fluktuasi yang lebih sedikit dari perhitungan manual. Garis lurus vertikal yang terjadi pada grafik *rating curve* merupakan visualisasi pintu yang bekerja dalam menampung air hingga elevasi +10,5 NAP. Selanjutnya, tinggi air berangsur naik hingga mencapai ketinggian maksimumnya yaitu 12,23 NAP, lebih tinggi dari perhitungan manual. Namun hal ini masing dianggap aman karena tanggul direncanakan pada elevasi +12,7 NAP.

Pada grafik *time series*, garis putus-putus berwarna hijau merupakan total debit sementara garis berwarna biru merupakan tinggi muka air. Debit puncak terjadi pada sekitar jam ke-11 dan 12, dan elevasi maksimum terjadi diantara jam ke-13 dan 14.

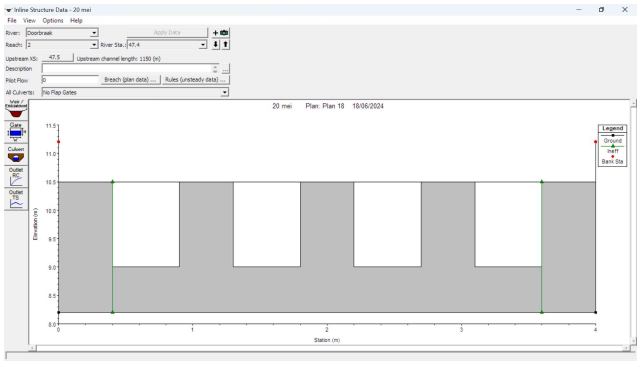
Berdasarkan hasil simulasi, debit, tinggi muka air, dan operasi bukaan pintu menunjukkan kesesuaian antara perhitungan manual dan pemodelan numerik. Perbedaan operasi bukaan pintu dianggap menjadi skenario alternatif. Profil muka air tidak melebihi tinggi tanggul yang didesain, sehingga parameter hidraulik dari bendung gerak kantelstuw dapat diterima.



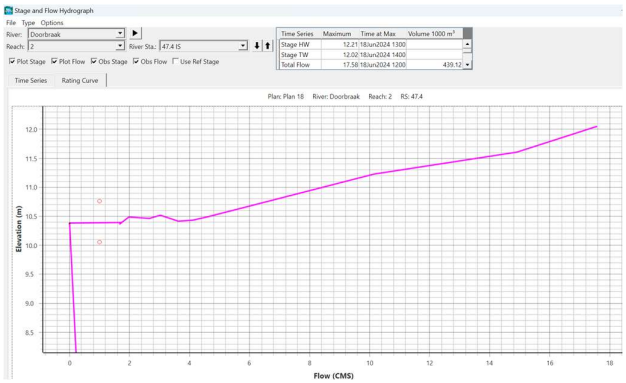
Gambar 12. Kontrol Tanggul Terhadap Skenario Pintu



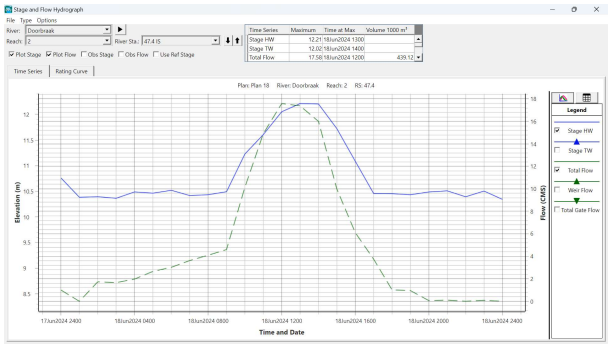
Gambar 13. Kontrol Tanggul Terhadap Backwater



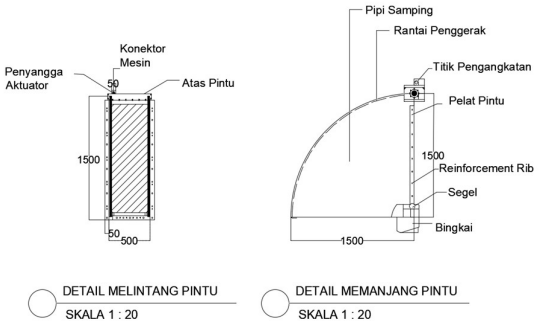
Gambar 14. Tampilan Pintu Kantelstuw Pada HEC-RAS



Gambar 15. Rating Curve Simulasi HEC-RAS



Gambar 16. Time Series Simulasi HEC-RAS

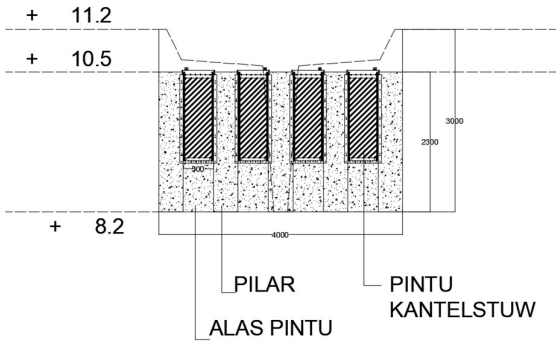


Desain Pintu Kantelstuw

Hasil perhitungan manual dan pemodelan numerik telah memenuhi keseluruhan syarat sehingga desain bendung gerak pintu *kantelstuw* dapat diterima. Dengan demikian, gambar desain final Bendung Gerak Kantelstuw dapat dilihat pada **Gambar 17 dan Gambar 18.**

Perbandingan Parameter Hidraulik Bendung Tetap dan Bendung Gerak

Berdasarkan perhitungan hidraulik, didapatkan perbandingan parameter hidraulik pada bendung tetap dan bendung berpintu sebagai **Tabel 5**.



Gambar 18. Potongan Melintang Bendung Pintu *Kantelstuw*

Tabel 5. Perbandingan Parameter Hidraulik

Parameter hidraulik	Bendung Tetap	Bendung Gerak
Cd	2.19	Variatif (Pintu)
Fr	5.165	2.50
Panjang loncatan (m)	8.11	1.92
Tipe kolam olak	USBR Tipe III	USBR Tipe I
Jenis loncatan hidraulik	Loncatan tunak	Loncatan lemah
Kondisi loncatan	Kondisi bahaya (y2' < y2)	Kondisi aman (y2' >y2)
Reduksi energi	71.80%	53.8%

4. Simpulan

Penelitian ini membandingkan kinerja Bendung Tetap dan Bendung Gerak tipe pintu kantelstuw berdasarkan parameter hidraulik di Bendung Doorbraak. Hasil analisis menunjukkan bahwa Bendung Tetap memiliki bilangan Froude tinggi (5,165), dengan loncatan tunak sepanjang 8,11 m, yang berisiko menyebabkan erosi. Kolam olak yang sesuai adalah USBR Tipe III, bukan Tipe I. Sebaliknya, Bendung Gerak dengan bilangan Froude lebih rendah (2,502) memiliki loncatan lemah yang lebih aman. Kolam olak USBR Tipe I yang digunakan sudah sesuai, serta sistem tanggul dengan tinggi jagaan 0,90 m terbukti efektif terhadap aliran balik. Berdasarkan hasil ini, Bendung Gerak tipe pintu kantelstuw lebih direkomendasikan karena lebih stabil dan aman dibandingkan Bendung Tetap.

Daftar Pustaka

[1] S. Aprilia and S. Permana, “Analisis Operasional Bendung Copong di Kabupaten Garut,” *J. Konstr.*, vol. 19, no. 2, pp. 439–448, 2022, doi: 10.33364/konstruksi/v.19-2.918.

[2] H. Suherlan, "Kajian Kerusakan Dan Keruntuhan Tubuh Bendung Akibat Pengaruh Banjir (Studi Kasus: Bendung Cipamingkis Kab. Bogor)," *Techno-Socio Ekon.*, vol. 14, no. 2, pp. 113–125, 2021, doi: 10.32897/techno.2021.14.2.760.

[3] F. G. Ramadian, R. W. Sayekti, and D. Sisinggih, "Studi Simulasi Pola Operasi Bukaan Pintu Bendung Gerak Mrican (Waru Turi) Kecamatan Gampangrejo Kabupaten Kediri Jawa Timur," *J. Teknol. dan Rekayasa Sumber Daya Air*, vol. 1, no. 1, pp. 219–228, 2021, doi: 10.21776/ub.jtresda.2021.001.01.19.

[4] R. I. S. D. Ratna Musa, Hanafi Ashad, "Pengaruh Tinggi Bukaan Pintu Air Terhadap Karakteristik Aliran Studi Kasus Pada Bangunan Saluran D.I Kampili Kabupaten Gowa," vol. 4, no. 1, pp. 129–138, 2020.

[5] N. H. Fildzah Tasya and U. Lasminto, "Kalibrasi Model Numerik Sungai Bengawan Solo untuk Pembangunan Bendung Gerak Karangnongko dengan Parameter Nilai Kekasaran Manning Menggunakan Program Bantu HEC-RAS," *J. Apl. Tek. Sipil*, vol. 19, no. 4, pp. 379–386, 2021, [Online]. Available: http://iptek.its.ac.id/index.php/jats.

[6] T. Irawan, Z. F. Haza, and L. H. Widaryanto, "Analisis Genangan Banjir Menggunakan Sistem Aplikasi Hec-Ras 5.0.7 (Studi Kasus Sub-DAS Sungai Dengkeng)," *Tek. Sipil*, vol. 6, no. 1, pp. 24–33, 2021, [Online]. Available: https://jurnal.ustjogja.ac.id/index.php/renovasi/article/view/10131.

[7] D. Ruhiat, "Implementasi Distribusi Peluang Gumbel Untuk Analisis Data Curah Hujan Rencana," *Teorema Teor. dan Ris. Mat.*, vol. 7, no. 1, p. 213, 2022, doi: 10.25157/teorema.v7i1.7137.

[8] W. Widyawati, D. Yuniarti, and R. Goejantoro, "Analisis Distribusi Frekuensi dan Periode Ulang Hujan," *Eksponensial*, vol. 11, no. 1, p. 65, 2021, doi: 10.30872/eksponensial.v11i1.646.

Halaman ini sengaja dikosongkan