

Kajian Evaluasi Keamanan Bendungan Rukoh Terhadap *Overtopping* Berdasarkan Penelusuran Banjir di Waduk

Yan Ahmad Christy Pambudi *, Ignatius Sriyana

Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro,
Jl. Prof. Soedarto, SH, Kampus UNDIP Tembalang, Semarang, Indonesia, 50275

Abstrak

Bendungan Rukoh merupakan bendungan urukan tipe zonal inti kedap air yang mempunyai kelemahan rentan terjadi kegagalan bendungan akibat overtopping limpasan debit banjir. Kondisi terkini berdasarkan Dokumen Kajian Risiko Bencana Kabupaten Pidie 2014-2018 menerangkan bahwa tingkat frekuensi kecenderungan risiko banjir mengalami kenaikan dari tahun ke tahun yang disebabkan hujan lebat. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pembaharuan debit banjir menggunakan pemodelan HEC-HMS dan melakukan evaluasi keamanan bendungan terhadap overtopping melalui penelusuran banjir. Penelusuran banjir menggunakan metode level pool routing pada kondisi debit banjir Bendungan Rukoh tanpa suplesi debit dan kondisi dengan suplesi debit Bangunan Pengarah Rukoh. Pemutakhiran debit banjir menunjukkan adanya rerata kenaikan nilai debit banjir tiap kala ulang sebesar 14,87% dibandingkan studi perencanaan. Penelusuran banjir debit banjir 1000 tahun memberikan hasil elevasi muka air maksimum +122,77 (tanpa suplesi) dan +123,27 (suplesi), sedangkan hasil untuk debit banjir PMF (Probable Maximum Flood) pada elevasi +124,08 (tanpa suplesi) dan +124,52 (suplesi). Berdasarkan elevasi puncak bendungan +127,00 dan penelusuran banjir disimpulkan Bendungan Rukoh aman terhadap overtopping.

Kata kunci: debit banjir; HEC-HMS; overtopping; penelusuran banjir

Abstract

[Title: Safety Evaluation Study of Rukoh Dam Against Overtopping Based on Flood Routing in the Reservoir] Rukoh Dam is an impermeable core fill type dam which has the weakness of being vulnerable to dam failure due to overtopping of flood discharge runoff. Current conditions based on the 2014-2018 Pidie District Disaster Risk Assessment Document explain that the frequency level of flood risk trends has increased from year to year due to heavy rains. This study aims to analyze the updating of flood discharge using HEC-HMS modeling and evaluate the safety of the dam against overtopping through flood routing. Flood routing uses the level pool routing method under flood discharge conditions of the Rukoh Dam without additional discharge and the condition with the Rukoh Control Building additional discharge. The flood discharge update showed an average increase in flood discharge value per return period of 14.87% compared to the planning study. Flood routing of the 1000-year flood discharge results in maximum water level elevation of +122.77 (without additional) and +123.27 (additional), while the result for PMF (Probable Maximum Flood) flood discharge at elevation +124.08 (without additional) and +124.52 (additional). Based on the dam crest elevation of +127.00 and flood routing, it is concluded that Rukoh Dam is safe against overtopping.

Keywords: flood discharge; HEC-HMS; overtopping; flood routing

1. Pendahuluan

Pembangunan bendungan mempunyai tujuan untuk memberikan banyak manfaat kepada masyarakat

luas, disisi lain bendungan juga memiliki potensi bahaya yang tinggi jika terjadi bencana keruntuhan bendungan. Bendungan Rukoh merupakan suatu bendungan urukan tipe zonal inti tanah kedap air dan mempunyai kapasitas tampungan total yaitu 128,65 juta m³. Studi perencanaan Bendungan Rukoh memakai data hujan terakhir tahun 2002 dan karakteristik fisik Daerah Tangkapan Air

*) Penulis Korespondensi.

E-mail: yanpambudi@gmail.com

(DTA) berdasarkan kondisi topografi pada tahun 2005. Bendungan urukan mempunyai kelemahan yaitu kurang mampu menahan limpasan air yang meluap diatas puncak bendungan (*overtopping*), menyebabkan longsoran di lereng sisi hilir, selanjutnya mengakibatkan keruntuhan bendungan (Sosrodarsono & Takeda, 1977).

Salah satu potensi bahaya yang menyebabkan keruntuhan suatu bendungan akibat kegagalan hidraulik adalah peristiwa *overtopping*, yang merupakan bagian dari Pilar Kesatu Konsepsi Keamanan Bendungan yaitu keamanan struktur. Potensi bahaya *overtopping* dapat diantisipasi dengan cara mengetahui besarnya kapasitas pelimpah berdasarkan elevasi muka air maksimum banjir melalui penelusuran banjir di waduk. Pelimpah bendungan berfungsi untuk melepaskan debit air yang berlebihan sesuai dengan kapasitas maksimal pelimpah, didesain menggunakan debit banjir rancangan dan dikontrol dengan debit banjir PMF (Masrevaniah, 2012). Tipe dan karakteristik dari pelimpah mempengaruhi perilaku aliran air yang melalui pelimpah tersebut (Saleh et al., 2019).

Peristiwa *overtopping* pada *temporary cofferdam* Bendungan Rukoh terjadi sebanyak dua kali pada 15 Desember 2022 dan 21 Januari 2023 berdasarkan data dari Balai Wilayah Sungai (BWS) Sumatera 1 yang mengakibatkan tergenangnya area pekerjaan bendungan serta terhambatnya progres pekerjaan. Data dari Badan Penanggulangan Bencana Daerah (BPBD) Kabupaten Pidie melaporkan hujan kategori sangat lebat (>100 mm/hari) menyebabkan debit beberapa sungai meluap pada 21 Januari 2023, salah satunya yaitu Sungai Rukoh yang menyebabkan area permukiman dan persawahan terendam dengan variasi ketinggian muka air berkisar antara 30 cm sampai dengan 70 cm. Kejadian banjir ini bertentangan dengan data rerata debit andalan Sungai Rukoh, yaitu berdasarkan laporan sertifikasi desain Bendungan Rukoh debit andalan cenderung kecil, debit terbesar senilai 1,77 m³/det pada keandalan 80%.

Permutakhiran debit banjir pada DTA Bendungan Rukoh dilakukan dengan bantuan program HEC-HMS (*Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modelling System*) yaitu metode *Soil Conservation Service-Curve Number* (SCS-CN). Program HEC-HMS dikembangkan *U.S. Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center* (HEC), bersifat *open source* untuk melakukan analisis alih ragam hujan menjadi debit aliran. Model alih ragam hujan-debit aliran yang sering digunakan di daerah Indonesia serta memberikan hasil pemodelan yang cukup memuaskan yaitu program aplikasi HEC-HMS (Suripin & Kurniani, 2016). Parameter masukan dari pemodelan debit banjir program HEC-HMS berupa data hujan, peta topografi, tutupan lahan, dan jenis tanah (Novrizal et al., 2023).

Kajian studi ini bertujuan untuk memaparkan pembaharuan debit banjir rancangan DTA Bendungan

Rukoh menggunakan pemodelan program HEC-HMS dan melakukan evaluasi keamanan Bendungan Rukoh terhadap *overtopping* melalui penelusuran banjir di waduk metode *level pool routing*. Kajian studi juga menelaah perbandingan hasil debit banjir rancangan dan elevasi muka air maksimum pada studi perencanaan.

2. Bahan dan Metode

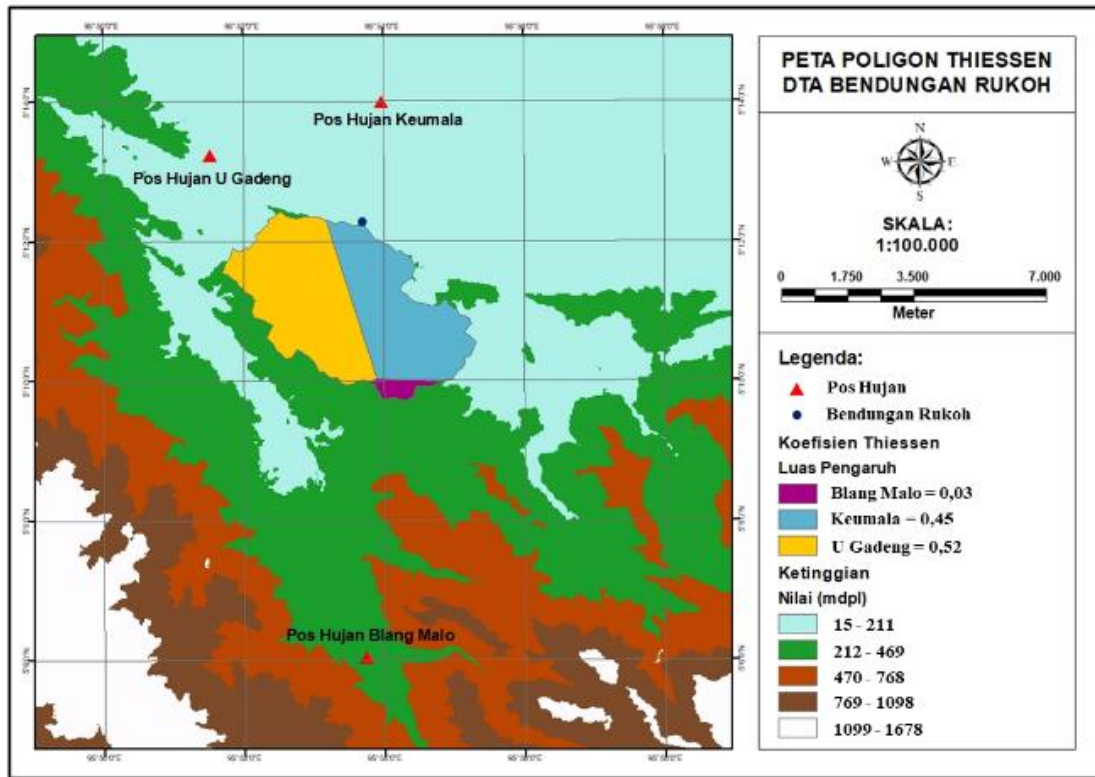
Data curah hujan berasal dari 3 stasiun hujan di sekitar DTA Bendungan Rukoh periode pencatatan tahun 2013-2022 yang diperoleh dari Balai Wilayah Sungai (BWS) Sumatera 1. Peta topografi berbasis DEM (*Digital Elevation Model*), jenis tanah serta peta tutupan lahan diperoleh dari Badan Informasi Geospasial (BIG) dan Badan Perencanaan Pembangunan Daerah (Bappeda) Provinsi Aceh kondisi tahun 2019. Data debit observasi didapatkan dari pengamatan visual dan penelusuran banjir pada terowongan pengelak saat terjadi *overtopping temporary cofferdam*. Data-data teknis seperti dimensi pelimpah, kurva hubungan elevasi-tampungan waduk, serta elevasi puncak bendungan untuk penelusuran banjir dan evaluasi keamanan bendungan diperoleh dari laporan sertifikasi desain Bendungan Rukoh BWS Sumatera 1.

2.1 Uji Statistik Data Hujan

Persyaratan utama yang harus dipenuhi dalam analisis hidrologi yaitu menyangkut ketersediaan dan kualitas data curah hujan. Data curah hujan merupakan sebuah peristiwa siklus hidrologi yang nilainya selalu berubah sesuai waktu, dipengaruhi waktu pengukuran sampel dan hanya dapat diukur sekali (Soewarno, 1995). Kelompok data curah hujan sebelum digunakan dalam analisis hidrologi perlu dilakukan pengujian statistik. Syarat kelompok data curah hujan lolos pengujian serta dapat digunakan untuk analisis hidrologi yaitu minimal memenuhi tiga kriteria pengujian, uji konsistensi data, uji ketiadaan *trend*, dan uji *outlier* sesuai SNI 2415:2016. Pengujian data curah hujan yang digunakan pada kajian studi yaitu uji konsistensi metode *Rescaled Adjusted Partial Sums* (RAPS), uji ketiadaan *trend* metode Spearman, dan uji *outlier* metode Grubbs dan Beck.

2.2 Curah Hujan Rerata Daerah

Stasiun hujan hanya memberikan data kedalaman curah hujan di titik dimana stasiun tersebut berada, sehingga besarnya curah hujan pada suatu DTA harus diperkirakan berdasarkan titik pengukuran tersebut (Triatmodjo, 2008). Apabila pada suatu DTA terdapat lebih dari satu stasiun hujan yang ditempatkan secara tersebar, curah hujan yang tercatat dapat mencatat nilai yang tidak sama. Metode Thiessen digunakan untuk menentukan nilai curah hujan rerata daerah yang didasarkan pada rerata timbang pada setiap stasiun hujan, dengan asumsi dipengaruhi oleh besaran luasan tertentu. Penggambaran metode Thiessen dan luas pengaruh stasiun hujan U Gadeng, Blang Malo dan Keumala pada DTA Bendungan Rukoh ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Peta Poligon Thiessen DTA Bendungan Rukoh

Persamaan 1 digunakan untuk analisis curah hujan merata daerah metode Thiessen yaitu menggunakan Persamaan 1 (Triatmodjo, 2008).

$$R = \frac{A_1 \cdot R_1 + A_2 \cdot R_2 + A_3 \cdot R_3 + \dots + A_n \cdot R_n}{A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_n} \quad (1)$$

dimana A_1, A_2, A_n merupakan luas pengaruh setiap pos hujan (km^2); R_1, R_2, R_n merupakan curah hujan setiap pos hujan (mm); dan R merupakan curah hujan merata daerah (mm).

2.3 Distribusi Curah Hujan Rancangan

Curah hujan rancangan dengan kala ulang tertentu pada suatu wilayah DTA dapat diketahui dengan menggunakan metode analisa frekuensi distribusi hujan. Distribusi hujan yang digunakan pada kajian studi ini yaitu metode Log Pearson Tipe III. Persamaan metode Log Pearson III dapat dilihat pada Persamaan 2 (Triatmodjo, 2008), yaitu:

$$\text{Log } R = \text{Log } R_{\text{rerata}} + K \cdot Sd \quad (2)$$

dimana $\text{Log } R_{\text{rerata}}$ merupakan log curah hujan merata (mm); K merupakan faktor frekuensi Log Pearson III (berdasarkan nilai C_s dan kala ulang); Sd merupakan standar deviasi; dan $\text{Log } R$ merupakan log curah hujan

rancangan, cari anti log untuk mendapatkan nilai hujan rancangan (mm).

Untuk keperluan desain bendungan disarankan dilakukan perhitungan *Probable Maximum Precipitation* (PMP) secara statistik menggunakan metode Hershfield. Nilai PMP digunakan sebagai *input* dalam analisis *Probable Maximum Flood* (PMF). Metode Hershfield digunakan pada kondisi kecukupan data curah hujan kurang atau membutuhkan analisis hujan rancangan secara cepat dan cocok untuk luas DTA < 1.000 km^2 sesuai SNI 7746:2012. Metode Hershfield menghitung nilai PMP stasiun hujan yang digunakan, kemudian dicari merata PMP sesuai metode curah hujan merata daerah, selanjutnya dikalikan dengan koefisien reduksi luas sehingga menjadi nilai PMP wilayah DTA. Persamaan yang dipakai untuk analisis nilai PMP metode Hershfield disajikan pada Persamaan 3.

$$X_m = X_p + K_m \cdot S_p \quad (3)$$

dimana X_p merupakan nilai merata curah hujan maksimum setelah dikali koefisien penyesuaian (mm); K_m merupakan faktor koefisien metode Hershfield; S_p merupakan standar deviasi data curah hujan maksimum setelah dikali nilai koefisien penyesuaian; dan X_m merupakan nilai hujan maksimum boleh jadi (HMBJ/PMP) (mm).

Tabel 1. Distribusi hujan durasi 6 jam bentuk Genta Metode PSA-007 (%)

Durasi hujan (jam)	Kala ulang (tahun)					
	2	10	25	100	1000	PMP
1	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
2	10,9	12,0	13,0	13,3	14,3	16,0
3	71,2	68,0	67,0	64,0	61,0	56,0
4	5,9	8,0	8,0	10,7	12,7	16,0
5	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
6	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0

2.4 Uji Kesesuaian Distribusi Hujan

Uji kesesuaian distribusi hujan memberikan suatu penilaian terhadap distribusi probabilitas hujan yang dipilih dengan kesimpulan berupa pernyataan yang menentukan metode distribusi hujan dapat diterima atau ditolak secara statistik (Soewarno, 1995). Uji Chi Kuadrat merupakan suatu uji simpangan distribusi peluang secara vertikal dari data hujan. Apabila X^2 hitung < X_{cr}^2 tabel Chi Kuadrat, maka distribusi hujan dapat diterima. Uji Smirnov Kolmogorof digunakan untuk mengetahui besarnya nilai simpangan horisontal, apabila $\Delta_{maks} < \Delta_{cr}$ tabel Smirnov Kolmogorof, disimpulkan distribusi hujan yang digunakan dapat diterima.

2.5 Intensitas Hujan

Intensitas hujan berperan dalam menentukan nilai dari debit banjir rancangan yang lebih mendekati kenyataan, maka perlu dilakukan langkah mengubah hujan rancangan menjadi distribusi curah hujan jam-jaman (Sosrodarsono & Takeda, 1976). Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan di beberapa wilayah Indonesia, curah hujan terpusat berkisar antara 5-6 jam, sehingga diambil kesimpulan bahwa hujan dengan durasi waktu 6 jam dianggap mewakili hujan maksimum yang terjadi selama 24 jam. Tabel 1 menunjukkan nilai intensitas hujan jam-jaman metode PSA-007.

Tabel 2. Nilai CN dan *Impervious* berdasarkan tutupan lahan (Ramadan et al., 2018)

Tutupan Lahan	<i>Impervious</i> (%)	<i>Curve Number</i> (CN)			
		A	B	C	D
Air Tawar	100	100	100	100	100
Hutan	0	57	73	82	86
Kebun	5	57	73	82	86
Padang Rumput	5	72	82	87	89
Permukiman	15	61	75	83	87
Rawa	100	100	100	100	100
Sawah	5	62	71	78	81
Sawah Tadah Hujan	5	72	81	88	91
Semak Belukar	5	48	67	77	83



Gambar 2. Tahapan pemodelan debit banjir program HEC-HMS

2.6 Pemodelan Debit Banjir HEC-HMS

Analisis debit banjir rancangan pada kajian studi ini menggunakan bantuan program HEC-HMS. Program *Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modelling System* (HEC-HMS) adalah model program numerik komputer yang didalamnya terdapat berbagai jenis metode untuk mensimulasikan komponen sungai, DTA, perilaku bangunan air, sehingga didapatkan prediksi alih ragam hujan-aliran dengan durasi waktu tertentu serta dapat digunakan untuk analisis penelusuran banjir, desain (US Army Hydrologic Engineering Center, 2000). Model HEC-HMS disajikan dalam bentuk tabel dan grafik sehingga memudahkan pengguna.

Program HEC-HMS ini mudah untuk disesuaikan terhadap kondisi aktual dan terdapat berbagai pilihan simulasi untuk model analisis hidrologi, sehingga dapat membantu dalam proses analisis debit banjir rancangan (Scharffenberg et al., 2010). Pemodelan HEC-HMS memerlukan *input* data sesuai kondisi aktual lapangan antara lain data curah hujan, data teknis bendungan, data karakteristik DTA (*Curve Number*, *impervious* dan *initial abstraction*) sehingga dapat diperoleh model program HEC-HMS yang tepat (Limbong & Wulandari, 2022). Langkah analisis pemodelan debit banjir rancangan dengan program HEC-HMS ditunjukkan pada Gambar 2.

Parameter masukan yang dibutuhkan pemodelan program HEC-HMS sesuai dengan karakteristik fisik DTA yaitu luas DTA, *initial abstraction*, *Curve Number* (CN), *impervious*, *lag time*, *baseflow*, *recession constant* dan *ratio to peak*. Model HEC-HMS untuk *loss method* menggunakan metode SCS *Curve Number*.

Tabel 3. Kriteria kehandalan model berdasarkan parameter statistik (Moriassi et al., 2015)

Tingkat Kehandalan Model	Parameter Statistik		
	Nilai NSE	Nilai PBias	Nilai R ²
Sangat Bagus	> 0,8	< 5%	> 0,85
Bagus	0,7-0,8	5%-10%	0,75-0,85
Cukup Bagus	0,5-0,7	10%-15%	0,6-0,75
Buruk	< 0,5	> 15%	< 0,6

Berdasarkan parameter nilai CN, data kemiringan sungai dan panjang sungai didapatkan besarnya nilai waktu konsentrasi seperti ditunjukkan pada Persamaan 4 serta lag time disajikan pada Persamaan 5 (Triatmodjo, 2008).

$$T_c = \frac{L^{0,8} \left(\left(\frac{100}{CN} \right) + 10 \right)^{0,7}}{1900 \times y^{0,5}} \quad (4)$$

$$T_p = 0,6 \times T_c \quad (5)$$

dimana L merupakan panjang sungai (*feet*); y merupakan rata-rata kemiringan sungai (%); Tc merupakan waktu konsentrasi (jam); dan Tp merupakan lag time (jam).

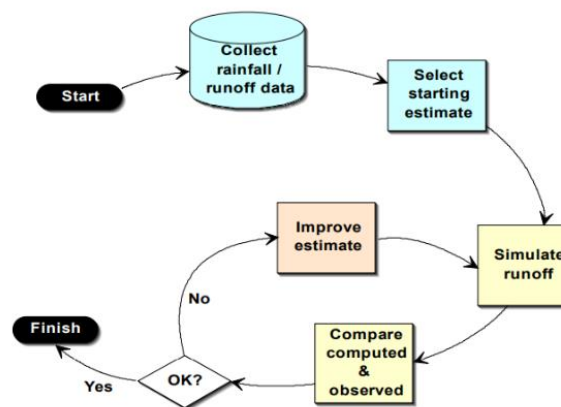
Berdasarkan luas tutupan lahan dan jenis tanah pada DTA Bendungan Rukoh akan didapatkan nilai CN rerata dan nilai *impervious* yang mengacu pada Tabel 2. Sebelum melakukan simulasi pemodelan debit banjir rancangan program HEC-HMS, sebaiknya diperiksa dulu kelengkapan dan keakuratan data sesuai kondisi lapangan maupun studi terdahulu di lokasi yang sama. Tingkat ketelitian hasil pemodelan debit banjir dipengaruhi nilai masukan parameter model HEC-HMS, sehingga akan meminimalisir *trial and error* (Rachmayanti et al., 2022)

Kode jenis tanah pada suatu DTA dapat dibagi menjadi kode A untuk tanah andosol, kode C untuk tanah alluvial dan inceptisol serta kode D untuk tanah ultisol serta entisol termasuk tanah litosol, regosol, organosol, podzolik, grumosol, latosol (Triatmodjo, 2008).

2.7 Kalibrasi Debit Banjir

Pemeriksaan tingkat keakuratan pemodelan debit HEC-HMS menggunakan parameter statistik pada Tabel 3. Nilai *Nash-Sutcliffe Efficiency* (NSE) dan koefisien determinasi (R²) apabila mendekati nilai 1 diartikan pemodelan semakin bagus. Nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) apabila mendekati nilai 0 diartikan bahwa pemodelan memiliki akurasi yang tinggi. Nilai negatif indeks PBias menggambarkan bias model HEC-HMS *overestimate* dan nilai positif menggambarkan bias model HEC-HMS *underestimate* (Moriassi et al., 2015).

Gambar 3 menunjukkan proses kalibrasi model yaitu proses untuk mencari nilai optimal dari parameter masukan awal yang dimasukkan dalam pemodelan. Pemodelan HEC-HMS memerlukan penyesuaian *input* parameter DTA yang karakteristiknya sangat bervariasi



Gambar 3. Bagan alir proses kalibrasi model HEC-HMS (US Army Hydrologic Engineering Center, 2000)

untuk mendapatkan debit banjir dan penelusuran banjir model yang lebih akurat (Budiyanto, 2018). Pemodelan HEC-HMS membutuhkan penyesuaian nilai beberapa parameter masukan seperti *Curve Number*, *impervious* dan nilai *initial abstraction* untuk memperoleh hasil pemodelan program HEC-HMS yang mendekati kondisi observasi/pengamatan di lapangan (Pariartha et al., 2021) Proses mencari nilai optimal parameter masukan suatu pemodelan berguna untuk meningkatkan keterpaduan antara respon hidrologi DTA hasil simulasi dengan hasil pengamatan di lapangan (Mardhotillah et al., 2014).

Pemodelan debit banjir program HEC-HMS hasil optimasi mempunyai tingkat kecocokan yang baik dibandingkan dengan debit observasi di sungai (Wiliya & Lasminto, 2022). Hasil pemodelan debit banjir rancangan program HEC-HMS setelah dilakukan proses kalibrasi memiliki hasil yang nilainya mendekati debit pencatatan AWLR dan analisis debit banjir metode Hidrograf Satuan Sintetis (Rasyid et al., 2023).

2.8 Penelusuran Banjir di Waduk

Penelusuran banjir di waduk bermanfaat untuk mengetahui nilai debit *outflow* maksimum dan elevasi muka air maksimum akibat debit banjir. Penelusuran banjir di waduk menghasilkan data yang lebih akurat karena tampungan waduk merupakan fungsi langsung dari debit yang keluar waduk, dan dapat digunakan untuk mengontrol keamanan bendungan terhadap *overtopping*. Penelusuran banjir menggunakan metode *level pool routing*, yaitu prosedur untuk menghitung nilai debit *outflow* waduk dengan permukaan air secara horisontal, debit *inflow* serta karakteristik tampungan waduk sebagai parameter masukan. Metode ini bermanfaat untuk mengetahui tingkat efektifitas waduk dan kapasitas waduk untuk menampung total debit yang masuk ke waduk (Amalia & Wesli, 2021).

Tabel 4. Curah hujan rerata daerah metode Thiessen DTA Bendungan Rukoh

No.	Tahun	Curah Hujan (mm)
1	2013	130,9
2	2014	92,7
3	2015	111,9
4	2016	89,4
5	2017	86,2
6	2018	99,2
7	2019	105,6
8	2020	146,7
9	2021	152,5
10	2022	94,7

Prosedur proses penelusuran banjir menggunakan persamaan kontinuitas massa aliran sederhana seperti disajikan pada Persamaan 6.

$$I - O = \frac{\Delta S}{\Delta t} \quad (6)$$

dimana I merupakan debit *inflow* (m³/det); O merupakan debit *outflow* (m³/det); ΔS merupakan nilai perubahan tampungan (m³); dan Δt merupakan perubahan interval waktu (det). Persamaan 6 apabila dinyatakan dalam interval waktu maka berubah sesuai ditunjukkan pada Persamaan 7.

$$S_{t+1} - S_t = \frac{(I_t + I_{t+1})\Delta t}{2} - \frac{(O_t + O_{t+1})\Delta t}{2} \quad (7)$$

dimana I_t merupakan *inflow* hidrograf pada permulaan waktu Δt; I_{t+1} merupakan *inflow* pada akhir waktu Δt; O_t merupakan *outflow* hidrograf pada permulaan waktu Δt; S_t merupakan tampungan pada permulaan waktu Δt; dan S_{t+1} merupakan tampungan pada akhir waktu Δt.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Uji Statistik Data Hujan

Berdasarkan hasil pengujian statistik kelompok data curah hujan di 3 stasiun hujan DTA Bendungan Rukoh menyatakan bahwa data curah hujan konsisten, tidak ada *outlier* dan tidak mempunyai *trend*. Data curah hujan dapat digunakan untuk analisis hidrologi selanjutnya.

Tabel 5. Rekapitulasi curah hujan rancangan DTA Bendungan Rukoh

No.	Tr (tahun)	Hujan Rancangan (mm)
1	2	106,8
2	10	143,4
3	25	163,4
4	100	194,9
5	1000	253,6
6	PMP	681,4

Tabel 6. Intensitas hujan jam-jaman durasi 6 jam DTA Bendungan Rukoh

Jam ke t	Kala ulang (tahun)					
	2	10	25	100	1000	PMP
1	3,0	4,0	4,6	5,5	7,1	19,1
2	8,2	12,0	14,9	18,2	25,4	76,3
3	53,2	68,2	76,6	87,3	108,3	267,1
4	4,4	8,0	9,1	14,6	22,5	76,3
5	3,0	4,0	4,6	5,5	7,1	19,1
6	3,0	4,0	4,6	5,5	7,1	19,1
R (mm)	106,8	143,4	163,4	194,9	253,6	681,4
C	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
R netto (mm)	74,7	100,4	114,4	136,4	177,5	477,0

3.2 Curah Hujan Rerata Daerah

Hasil analisis curah hujan rerata daerah metode Thiessen pada DTA Bendungan Rukoh ditunjukkan pada Tabel 4. Koefisien luas pengaruh metode Thiessen yang digunakan analisis curah hujan rerata daerah yaitu stasiun hujan Blang Malo 3%, U Gadeng 52%, Keumala 45%.

3.3 Curah Hujan Rancangan

Analisis frekuensi merupakan metode analitis untuk memperkirakan nilai curah hujan rancangan. Hasil curah hujan rancangan metode distribusi hujan Log Pearson III berbagai kala ulang (Tr) ditunjukkan pada Tabel 5. Berdasarkan peta isohyet nilai PMP Sumatera sumber dari Kementerian Pekerjaan Umum tahun 2012, nilai PMP pada lokasi Bendungan Rukoh sebesar 600 mm/hari. Nilai PMP metode Hershfield lebih besar dari PMP peta (681,4 > 600,0), maka untuk analisis hidrologi selanjutnya digunakan nilai PMP tertinggi yaitu 681,4 mm/hari. Nilai curah hujan rancangan DTA Bendungan Rukoh akan digunakan sebagai *input* analisis debit banjir rancangan menggunakan bantuan pemodelan HEC-HMS.

3.4 Uji Distribusi Hujan

Uji kesesuaian distribusi hujan memeriksa nilai simpangan maksimum dari distribusi hujan metode Log Pearson III dengan kesimpulan sebagai berikut:

1. Uji Chi Kuadrat

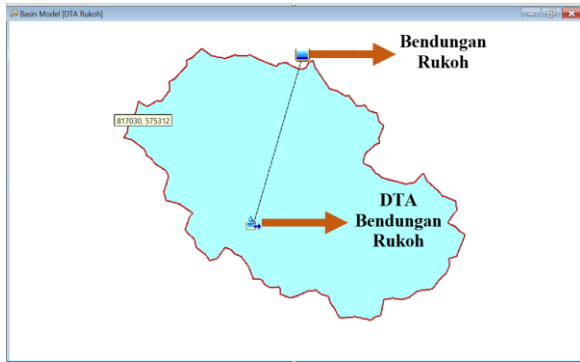
X² hitung (3,00) < X_{cr}² tabel (9,21) maka distribusi hujan diterima.

2. Uji Smirnov Kolmogorof

Δ_{max} (0,103) < Δ_{cr} tabel (0,49), maka distribusi hujan diterima.

3.5 Intensitas Hujan

Intensitas hujan berperan dalam menentukan nilai debit banjir yang mendekati kenyataan, oleh karena itu perlu dilakukan perubahan nilai curah hujan rancangan menjadi distribusi hujan jam-jaman. Koefisien pengaliran (C) ditetapkan berdasarkan topografi DTA Bendungan Rukoh, yaitu pegunungan berupa hutan/semak belukar, diambil nilai C sebesar 0,70 (Sosrodarsono & Takeda, 1976). Intensitas hujan jam-jaman metode PSA 007 sudah disesuaikan dengan durasi hujan yang dibutuhkan. Persentase intensitas hujan jam-jam dengan durasi 6 jam berdasarkan metode PSA-007 ditunjukkan pada Tabel 6.

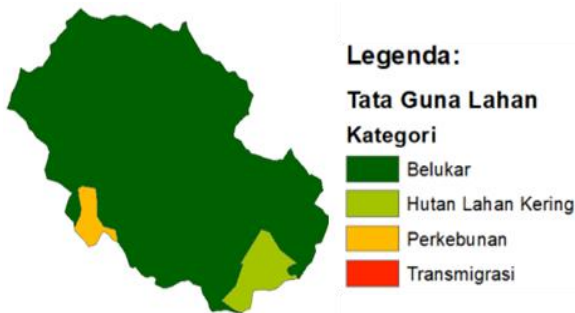


Gambar 4. Skematik pemodelan subbasin pada DTA Bendungan Rukoh program HEC-HMS

3.6 Debit Banjir Rancangan

Basin model DTA Bendungan Rukoh dianggap sebagai satu subbasin karena luas DTA yang tidak terlalu besar (19,63 km²). Bendungan Rukoh sebagai tampungan di hilir subbasin seperti ditunjukkan pada Gambar 4. Jenis tanah DTA Bendungan Rukoh tersusun atas tanah ultisol, tanah entisol-inceptisol dan tanah inceptisol dengan tutupan lahan semak belukar 18,33 km², hutan lahan sekunder 0,94 km², perkebunan 0,42 km², dan wilayah permukiman 0,001 km². Gambar 5 dan Gambar 6 menyajikan peta tutupan lahan serta peta jenis tanah. Berdasarkan kondisi jenis tanah serta peta tutupan lahan didapatkan nilai CN rerata 82,865 dan impervious 4,762%. Transform method menggunakan SCS Unit Hydrograph dengan memasukkan nilai lag time sebesar 113,645 menit. Nilai baseflow sebesar 1,202 m³/det.

Time series data diisi dengan intensitas hujan jam-jaman metode PSA-007 durasi 6 jam sesuai kala ulang. Control specifications berfungsi untuk kontrol waktu, dengan rentang waktu 30 menit dengan tujuan meningkatkan ketelitian pemodelan. Debit banjir pemodelan HEC-HMS berbagai kala ulang ditunjukkan pada Tabel 7. Menu results pada program aplikasi HEC-HMS menyajikan grafik, tabel dan informasi lainnya terkait hasil simulasi debit banjir rancangan.



Gambar 5. Peta tata guna lahan DTA Bendungan Rukoh

Tabel 7. Debit banjir rancangan pemodelan HEC-HMS tanpa kalibrasi

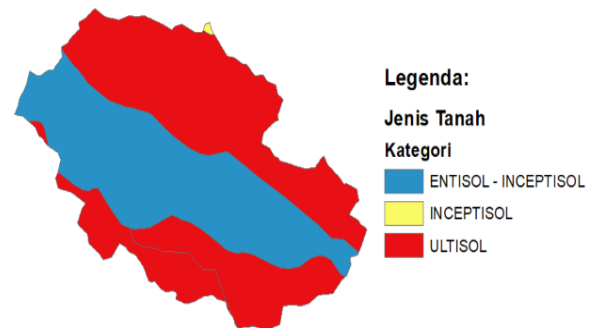
Tr (Tahun)	Debit Banjir (m ³ /det)
2	59,09
10	92,638
25	112,273
100	141,856
1000	199,371
PMF	633,408

3.7 Kalibrasi Debit Banjir

Parameter masukan program HEC-HMS hasil kalibrasi disesuaikan sampai nilai debit banjir pemodelan mendekati nilai debit banjir observasi pada kejadian banjir terowongan pengelak dan overtopping temporary cofferdam tanggal 15 Desember 2022 dan tanggal 21 Januari 2023. Nilai parameter input HEC-HMS setelah kalibrasi dipakai sebagai acuan perhitungan debit banjir rancangan DTA Bendungan Rukoh yang nantinya akan digunakan sebagai dasar analisis penelusuran banjir di waduk.

Tabel 8 menampilkan nilai parameter stastitik pemodelan debit banjir HEC-HMS hasil kalibrasi. Nilai NSE termasuk kategori Sangat Bagus (0,948 dan 0,945), nilai PBias (-7,44% dan -7,94) termasuk kategori Bagus dan nilai R² (0,952 dan 0,951) termasuk kategori Sangat Bagus. Parameter input HEC-HMS disesuaikan agar hasil pemodelan debit banjir mendekati debit observasi yaitu nilai awal initial abstraction sebesar 10,504 mm diubah menjadi 5,252 mm dan nilai awal recession constant sebesar 0,2 diubah menjadi 0,4. Gambar 7 menyajikan kalibrasi pemodelan debit banjir program aplikasi HEC-HMS.

Perbandingan nilai debit banjir DTA Bendungan Rukoh hasil pemodelan program aplikasi HEC-HMS sesudah kalibrasi dibandingkan debit banjir studi perencanaan tahun 2015 dan laporan Rencana Tindak Darurat (RTD) Bendungan Rukoh tahun 2023 disajikan pada Tabel 9 dan Gambar 8.



Gambar 6. Peta jenis tanah DTA Bendungan Rukoh

Tabel 9. Perbandingan debit banjir rancangan

Tr (Tahun)	Debit Banjir (m ³ /det)		
	Perencanaan (2015)	Laporan RTD (2023)	HEC- HMS (2023)
2	50,449	-	66,175
10	87,797	-	99,936
25	109,408	153,893	119,511
100	133,706	171,099	149,021
1000	170,656	195,921	206,284
PMF	622,100	649,525	638,704

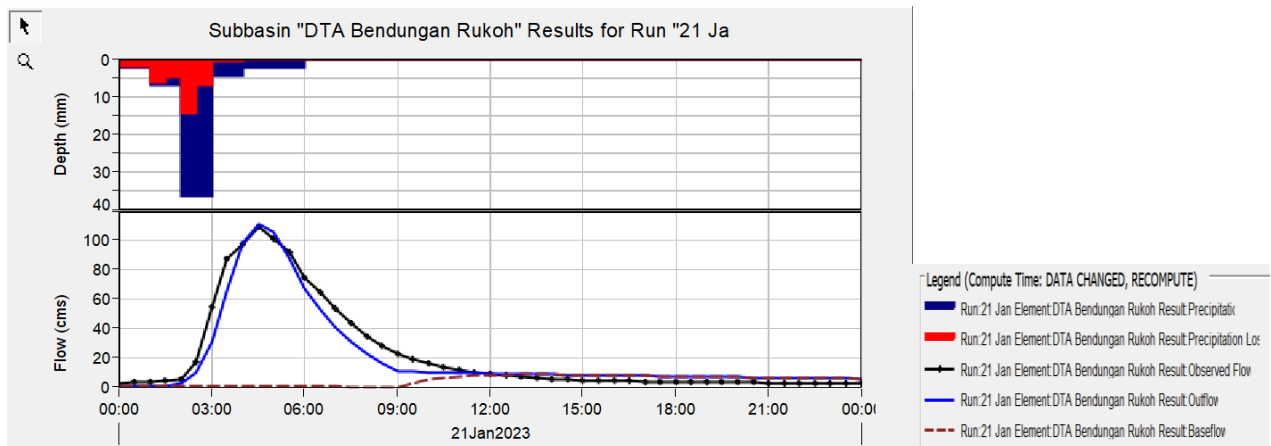
3.8. Penelusuran Banjir di Waduk

Penelusuran banjir di waduk dilakukan untuk debit banjir 1000 tahun dan debit banjir PMF. Kondisi pertama dengan *input* debit banjir DTA Bendungan

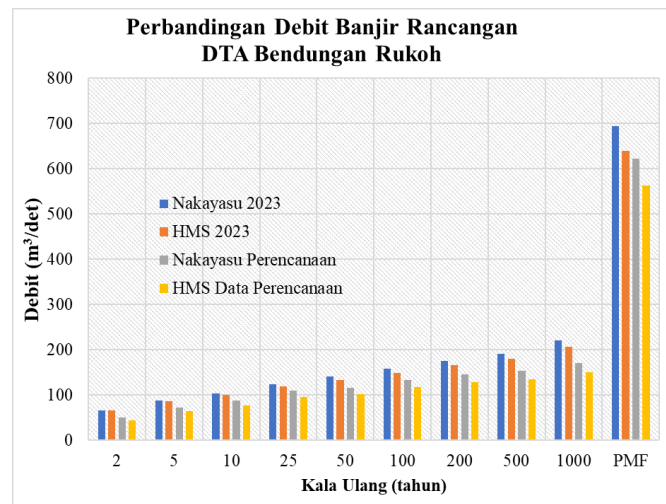
Rukoh, sedangkan kondisi kedua ditambahkan suplesi debit Bangunan Pengarah Rukoh sebesar 12 m³/det. Berdasarkan data teknis pada studi perencanaan Bendungan Rukoh, didapatkan data elevasi pelimpah Bendungan Rukoh berada pada elevasi +122, Muka Air Banjir (MAB) pada elevasi +125,55 dan elevasi puncak bendungan berada pada +127. Hasil penelusuran banjir di waduk yang dilakukan pada studi ini ditunjukkan pada Gambar 9 dan Gambar 10.

3.9 Evaluasi Keamanan Bendungan

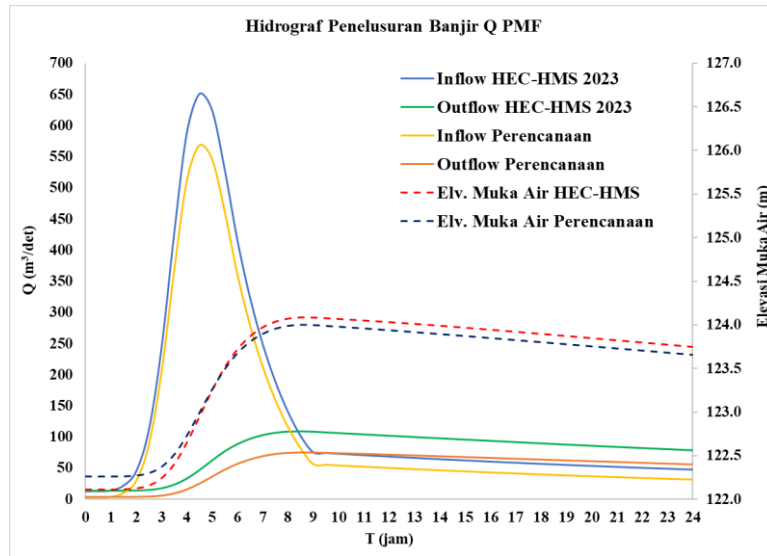
Hasil penelusuran banjir di waduk digunakan sebagai acuan evaluasi keamanan Bendungan Rukoh terhadap bahaya *overtopping*. Hasil analisis penelusuran banjir dengan debit banjir pemodelan *software* HEC-HMS menunjukkan adanya peningkatan elevasi muka air maksimum dan penurunan nilai keamanan tinggi jagaan dibandingkan dengan hasil penelusuran banjir pada studi perencanaan seperti disajikan pada Tabel 10.



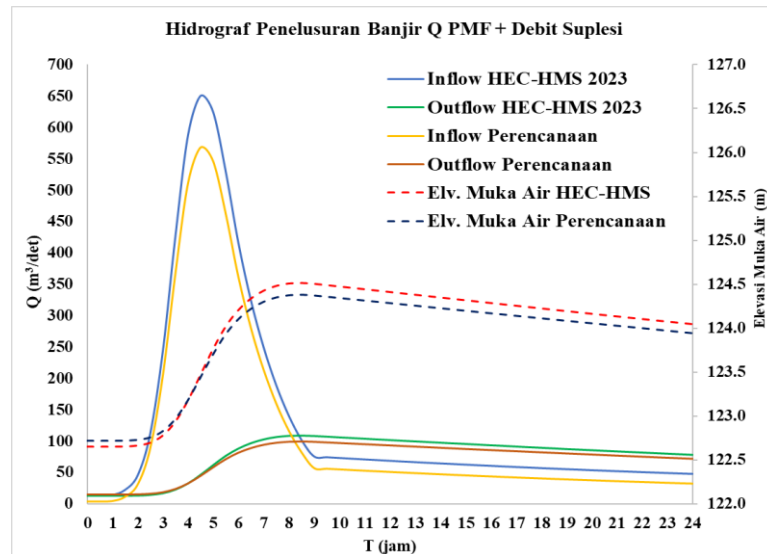
Gambar 7. Kalibrasi debit banjir 21 Januari 2023



Gambar 8. Perbandingan debit banjir rancangan DTA Bendungan Rukoh



Gambar 9. Penelusuran banjir di waduk debit PMF tanpa debit suplesi



Gambar 10. Penelusuran banjir di waduk debit PMF dengan debit suplesi

Tabel 10. Rekapitulasi penelusuran banjir dan kondisi bendungan terhadap *overtopping*

Kondisi		Tanpa Suplesi		Suplesi	
Tr (Tahun)		1000	PMF	1000	PMF
Inflow Maks. (m ³ /det)	Perencanaan	157,32	568,57	169,32	580,57
	HEC-HMS	206,28	638,70	218,28	650,70
Elv. Muka Air Maks. (m)	Perencanaan	122,75	124,00	123,18	124,38
	HEC-HMS	122,77	124,08	123,27	124,52
Sisa Tinggi Jagaan (m)	Perencanaan	4,25	3,00	3,82	2,62
	HEC-HMS	4,23	2,92	3,73	2,48
Kondisi Bendungan		Aman	Aman	Aman	Aman

4. Kesimpulan

Analisis debit banjir rancangan DTA Bendungan Rukoh pemodelan HEC-HMS memiliki nilai yang tidak berbeda jauh (wajar) dengan nilai debit banjir pada studi perencanaan. Namun ada rerata tren peningkatan debit dari berbagai kala ulang sebesar 14,87% diakibatkan dari tren naiknya rerata curah hujan maksimum dan curah hujan tahunan (4 tahun terakhir) dari stasiun hujan yang dipakai pada DTA Bendungan Rukoh. Nilai *Curve Number* (CN) tidak jauh berubah dibandingkan dengan studi perencanaan, disebabkan kondisi tutupan lahan DTA Bendungan Rukoh masih bagus, mayoritas semak belukar dan hutan. Evaluasi keamanan Bendungan Rukoh berdasarkan penelusuran banjir di waduk menunjukkan bendungan aman dari potensi bahaya *overtopping* baik dengan debit banjir 1000 tahun maupun debit banjir PMF kondisi tanpa debit suplesi dan debit suplesi, walaupun ada kenaikan elevasi muka air maksimum dan debit *outflow* maksimum. Untuk penelitian selanjutnya, dapat dilakukan analisis debit banjir dengan data hujan satelit dan pemasangan instrumen AWLR (*Automatic Water Level Recorder*) di DTA Bendungan Rukoh.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Balai Wilayah Sungai (BWS) Sumatera 1 Kementerian PUPR, khususnya SNVT Pembangunan Bendungan dan PPK Perencanaan Bendungan, kepada dosen pembimbing Prof. Dr. Ir. Sriyana, M.S., serta kepada rekan Magister Operasi dan Instrumentasi Hidrometeorologi Bendungan Universitas Diponegoro.

Daftar Pustaka

- Amalia, A., & Wesli, W. (2021). Penelusuran Banjir Menggunakan Metode Level Pool Routing Pada Waduk Kota Lhokseumawe. *Teras Jurnal*, 5(1), 1–11.
- Budiyanto, M. A. (2018). Penelusuran Waktu Perjalanan Banjir Dari Hulu Ke Hilir Sungai Code Sebagai Pertimbangan Early Warning Sistem. *CivETech*, 13(1), 41–52.
- Limbong, B., & Wulandari, D. A. (2022). Reservoir Routing di Waduk Greneng, Blora Dengan Model HEC-HMS. *Siklus: Jurnal Teknik Sipil*, 8(2), 230–247.
- Mardhotillah, M., Sutikno, S., & Fauzi, M. (2014). Pemodelan Hujan-Aliran Daerah Aliran Sungai Rokan Dengan Menggunakan Data Penginderaan Jauh. *Teknik Sipil*, 1–12.
- Masrevaniah, A. (2012). Penelusuran Banjir Waduk Dengan Hydograf Seri. *Jurnal Teknik Pengairan: Journal of Water Resources Engineering*, (4).
- Moriasi, D. N., Gitau, M. W., Pai, N., & Daggupati, P. (2015). Hydrologic and Water Quality Models: Performance Measures and Evaluation Criteria. *Transactions of the ASABE*, 58(6), 1763–1785.
- Novrizal, D., Hermawan, F., Wibowo, M. A., & Nasution, I. A. (2023). Analisis Inflow Lokal Waduk Jatiluhur. *Media Komunikasi Teknik Sipil*, 28(2), 300–309.
- Pariartha, I. P. G. S., Arimbawa, I. K. D., & Yekti, M. I. (2021). Analisis Debit Rencana Tukad Unda Bagian Hilir Menggunakan HEC-HMS. *Jurnal Teknik Pengairan*, 12(2), 116–126.
- Rachmayanti, H., Musa, R., & Mallombasi, A. (2022). Studi Pengaruh Perubahan Tata Guna Lahan Terhadap Debit Banjir Dengan Menggunakan Software HEC HMS (Studi Kasus DAS Saddang). *Jurnal Konstruksi: Teknik, Infrastruktur Dan Sains*, 1(1), 1–9.
- Ramadan, A. N. A., Adidarma, W. K., Riyanto, B. A., & Windianita, K. (2018). Penentuan Hydrologic Soil Group Untuk Perhitungan Debit Banjir Di Daerah Aliran Sungai Brantas Hulu. *Jurnal Sumber Daya Air*, 13(2), 69–82.
- Rasyid, A. Z., Suharyanto, S., Kodoatie, R. J., & Satriyawan, Y. P. (2023). Analisis Debit Banjir Rencana Daerah Tangkapan Air Waduk Tugu Menggunakan HEC-HMS. *Bentang: Jurnal Teoritis Dan Terapan Bidang Rekayasa Sipil*, 11(1), 45–54.
- Saleh, S. S., Musa, R., & As'ad, H. (2019). Kajian Karakteristik Aliran Terhadap Bangunan Pelimpah Pada Saluran Terbuka. *Teknik Hidro*, 12(2), 40–52.
- Scharffenberg, W. A., Fleming, M., & Feldman, A. D. (2010). Hydrologic Modeling System (HEC-HMS): Physically Based Simulation Components. *2nd Joint Federal Interagency Conference*. Las Vegas.
- Soewarno. (1995). *Hidrologi Aplikasi Metode Statistik untuk Analisa Data Jilid 1*. Bandung: Nova.
- Sosrodarsono, S., & Takeda, K. (1976). *Hidrologi Untuk Pengairan*. Jakarta: Pradnya Paramita.
- Sosrodarsono, S., & Takeda, K. (1977). *Bendungan Tipe Urugan*. Jakarta: Pradnya Paramita.
- Suripin, S., & Kurniani, D. (2016). Pengaruh Perubahan Iklim terhadap Hidrograf Banjir di Kanal Banjir Timur Kota Semarang. *Media Komunikasi Teknik Sipil*, 22(2), 119–128.
- Triatmodjo, B. (2008). *Hidrologi Terapan*. Yogyakarta: Beta Offset.
- US Army Hydrologic Engineering Center. (2000). Hydrologic Modeling System Technical Reference Manual. *Hydrologic Modeling System HEC-HMS Technical Reference Manual*, (March), 148.
- Wiliya, & Lasminto, U. (2022). Pemodelan Hujan-Debit Menggunakan Model HEC-HMS Di DAS Bengawan Solo Hulu. *Jurnal Aplikasi Teknik Sipil*, 20(2), 193–198.