



Model hujan-limpasan (*rainfall-runoff model*) untuk prediksi *inflow* pada Bendungan Bili-Bili

Ika Fatmawati Jamal^{1✉}, Ratna Musa¹, Ali Malombasi¹

Fakultas Teknik Sipil, Universitas Muslim Indonesia, Makassar⁽¹⁾

DOI: 10.31004/jutin.v8i1.41503

✉ Corresponding author:

[ika.fatmawatijamal@gmail.com]

Article Info	Abstrak
<p><i>Kata kunci:</i> <i>Pemodelan Curah Hujan-Limpasan;</i> <i>Prediksi Inflow;</i> <i>Bendungan Bili-Bili;</i> <i>Akurasi Model;</i> <i>HEC-HMS;</i></p>	<p>Penelitian ini mengembangkan model curah hujan-limpasan untuk memprediksi inflow di Bendungan Bili-Bili dan mengevaluasi keakuratan model. Metode Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN), yang diimplementasikan menggunakan perangkat lunak HEC-HMS, digunakan untuk membangun model curah hujan-limpasan. Keakuratan model dinilai menggunakan tiga indeks statistik: Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE), Percent Bias (PBIAS), dan Koefisien Determinasi (R^2), dengan membandingkan prediksi aliran masuk dengan data aliran masuk yang diukur. Data klimatologi (curah hujan) dan data topografi berfungsi sebagai masukan model, sedangkan data aliran masuk yang diukur menjadi tolok ukur validasi. Simulasi model periode banjir 14-17 Januari 2024 menghasilkan puncak inflow sebesar $673,6 \text{ m}^3/\text{s}$ di Bendungan Bili-Bili pada 15 Januari 2024. Prediksi temporal model selaras dengan data terukur, meskipun prediksi inflow sedikit lebih rendah dari nilai yang diamati. Evaluasi statistik menunjukkan kinerja model yang baik, ditunjukkan dengan NSE sebesar 0,793, PBIAS sebesar -1,86%, dan R^2 sebesar 0,81. Nilai NSE yang tinggi menunjukkan kesesuaian yang baik antara data prediksi dan data pengukuran, sedangkan PBIAS negatif yang kecil menunjukkan kecenderungan model untuk sedikit meremehkan arus masuk. Nilai R^2 yang tinggi (0,81) menunjukkan bahwa 81% variabilitas inflow dijelaskan oleh model.</p>
<p>Keywords: <i>Rainfall-Runoff Modeling;</i> <i>Inflow Prediction;</i> <i>Bili-Bili Dam;</i> <i>Model Accuracy;</i> <i>HEC-HMS;</i></p>	<p>This research developed a rainfall-runoff model to predict inflow at the Bili-Bili Dam and to evaluate the model's accuracy. The Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) method, implemented using HEC-HMS software, was employed to construct the rainfall-runoff model. Model accuracy was assessed using three statistical indices: Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE), Percent Bias (PBIAS), and Coefficient of Determination (R^2), by comparing the predicted inflow with measured inflow data. Climatological data (rainfall) and topographic data served as model inputs, while measured inflow data provided the benchmark for validation. Model simulations for the January 14-17, 2024, flood period yielded a</p>

peak inflow of $673.6 \text{ m}^3/\text{s}$ at the Bili-Bili Dam on January 15, 2024. The model's temporal prediction aligned with the measured data, although the predicted inflow was slightly lower than the observed values. Statistical evaluation revealed good model performance, indicated by an NSE of 0.793, a PBIAS of -1.86%, and an R^2 of 0.81. The high NSE value signifies good agreement between predicted and measured data, while the small negative PBIAS suggests a tendency for the model to slightly underestimate inflow. The high R^2 value (0.81) indicates that 81% of the inflow variability is explained by the model.

1. INTRODUCTION

Banjir dapat dikatakan sebagai salah satu bencana dengan tingkat kejadian yang sangat tinggi dibandingkan dengan bencana lainnya (Quiroga et al., 2016). Banjir memberikan dampak yang sangat signifikan terhadap kehidupan manusia di seluruh dunia (Younis & Ammar, 2018). Banjir juga dapat menimbulkan konflik sosial dan konflik kepentingan (Ghimire et al., 2015), permasalahan lingkungan (Li & Shi, 2015) dan dampak ekonomi (Aerts & Botzen, 2011). Oleh karena itu kajian dinamika banjir secara spasial dan temporal merupakan unsur penting dalam manajemen sumber daya air dan pengurangan risiko bencana (Nharo et al., 2019). Banjir dikategorikan sebagai bencana apabila mempengaruhi aktivitas kehidupan manusia atau menimbulkan kerugian bagi masyarakat. Banjir dapat disebabkan oleh debit aliran yang besar serta kapasitas tumpang sungai yang tidak mencukupi. Peningkatan debit aliran dapat disebabkan oleh curah hujan yang tinggi atau kurangnya kemampuan Daerah Aliran Sungai (DAS) dalam menyimpan atau meresapkan air. Kurangnya kemampuan tersebut dapat disebabkan oleh alih fungsi lahan hutan dan tingginya aktivitas masyarakat di kawasan hulu DAS. Salah satu sungai besar yang berada di Sulawesi Selatan yaitu Sungai Jeneberang dengan panjang 75 km dan luas Daerah Aliran Sungai (DAS) 784,01 Km². DAS Jeneberang merupakan salah satu daerah rawan banjir. Berdasarkan data historis banjir terbesar pernah terjadi bulan Desember sampai dengan Januari Tahun 1976 yang menggenangi wilayah Kota Makassar dan Kabupaten Gowa. Penyebab utama banjir adalah meluapnya Sungai Jeneberang di daerah hilir Jembatan Sungguminasa. Pada bulan januari 2019 banjir kembali terjadi yang merupakan bencana banjir terbesar yang dialami Kabupaten Gowa dan Kota Makassar selama satu dekade terakhir yang menelan banyak korban dan kerusakan bangunan. Penyebab utama banjir tersebut yaitu besarnya debit outflow Bendungan Bili-bili dan Sungai Jenelata, serta hujan deras yang terjadi selama berhari-hari. Bendungan Bili-Bili yang berada di Desa Bili-Bili Kecamatan Bontomarannu, Kabupaten Gowa merupakan salah satu bendungan yang menjadi pengendali banjir Sungai Jeneberang. Pengendalian banjir akan memberikan hasil yang maksimal jika didukung dengan keakuratan data yang digunakan, khususnya terkait dengan data hidrologi. Rainfall-Rainoff Model merupakan salah satu pendekatan berupa model spasial yang dapat digunakan untuk memprediksi inflow pada sistem DAS. Secara khusus model spasial hidrologi dapat memberikan gambaran mengenai respon Daerah Aliran Sungai (DAS) terhadap curah hujan dalam bentuk besarnya debit aliran permukaan (runoff). Proses konversi hujan menjadi debit aliran atau limpasan merupakan proses ilmiah yang membutuhkan banyak data dan informasi yang bersifat kompleks. Kompleksitas data dan informasi tersebut disebabkan oleh banyaknya variabel dalam sistem DAS sebagai karakteristik inputan dengan variasi ruang dan waktu. Pemodelan spasial merupakan salah satu pendekatan yang dapat dilakukan untuk mengatasi proses yang sangat kompleks tersebut dan diharapkan mampu menirukan sifat dan karakteristik DAS yang dikaji.

Penelitian mengenai pemodelan hidrologi telah banyak dilakukan menggunakan data spasial untuk memprediksi besarnya aliran permukaan pada daerah aliran sungai. Simulasi hidrologi menggunakan sistem komputer telah banyak berkembang dan menjadi salah satu unsur esensial untuk memahami karakteristik aliran pada daerah aliran sungai sebagai dampak dari perkembangan pembangunan pada suatu wilayah (Halwatura & Najim, 2013). Hec-HMS adalah salah satu model hidrologi yang dikembangkan oleh US Army Corps Engineers yang dapat digunakan dalam banyak variasi simulasi hidrologi dan saat ini telah dikembangkan hingga pada versi 4.10 (USACE, 2022). Pada tahun 2017 (Gumindoga et al., 2017) melakukan penelitian menggunakan model Hec-HMS untuk mensimulasikan aliran permukaan pada daerah aliran sungai yang dikalibrasi dengan data terukur. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa model Hec-HMS reliabel untuk digunakan dalam memprediksi inflow pada daerah aliran sungai. Berdasarkan hasil penelitian terdahulu, model spasial dalam bentuk Rainfall-Runoff Model (RRM) merupakan salah satu unsur penting untuk mengetahui karakteristik hidrologi pada suatu sistem daerah aliran sungai. RRM yang baik akan memberikan informasi dan data yang akurat yang dapat digunakan dalam manajemen pola operasi bendungan, sistem peringatan dini dan langkah pengurangan risiko banjir lainnya.

Berdasarkan uraian latar belakang, maka tujuan penelitian ini adalah untuk menyusun Rainfall-Runoff Model untuk memprediksi debit inflow pada DAS Jeneberang dan menguji akurasi prediksi debit yang dihasilkan oleh model. tujuan penelitian ini adalah untuk menyusun model hujan limpasan Rainfall-Runoff Model pada DAS Jeneberang dan untuk menganalisis akurasi model hujan limpasan Rainfall-Runoff Model pada DAS Jeneberang dalam memprediksi debit inflow.

2. METHODS

Parameter Loss

Analisis hidrologi dalam penelitian ini menggunakan metode Soil Conservation Service (SCS) Curve Number (CN) untuk pemodelan hidrologi parameter loss dengan bantuan perangkat lunak Hec-HMS versi 4.10 tahun 2022. Komponen dalam pemodelan hidrologi untuk perhitungan parameter loss adalah Initial Abstraction (Ia), Curve Number (CN), Impervious dan Lag Time (tlag) (Verma et al., 2020). Data curah hujan yang digunakan adalah data curah hujan harian dari dua stasiun Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) di Kota Makassar dan data Curah Hujan di hulu Sungai Jeneberang yaitu Curah Hujan Bili-Bili Dam Site, Malino, Limbunga, Mangempang, Post 1, Lengkese, Panaikang dan Jonggoa. Berikut adalah titik koordinat pos curah hujan yang ada dihulu Sungai jeneberang dan bendungan Bili-Bili serta didukung dengan data curah hujan dari satelit Tropical Rainfall Measurement Mission (TRMM). Kelompok hidrologi tanah dalam SCS Curve Number ditentukan oleh karakteristik jenis dan tekstur tanah yang diperoleh dari peta tanah. Dari karakteristik tanah tersebut kemudian ditentukan nilai CN untuk masing masing jenis tata guna lahan. Klasifikasi nilai CN berdasarkan SCS dapat dilihat pada tabel 2 berikut.

Tabel 2. Nilai CN berdasarkan Soil Conservation Service (SCS)

Tata Guna Lahan	Keadaan Hidrologi	Kelompok Tanah			
		A	B	C	D
Padang rumput untuk tempat pengembalaan ternak	Buruk	68	79	86	89
	Cukup	49	69	79	84
	Baik	39	61	74	80
Padang rumput	-	30	58	71	78
	Buruk	48	67	77	83
Kombinasi Semak belukar dan rumput	Cukup	35	56	70	79
	Baik	30	48	65	77
	Buruk	57	73	82	86
Kombinasi Vegetasi/ Pohon, rerumputan dan perkebunan	Cukup	43	65	76	82
	Baik	32	58	72	79
	Buruk	45	66	77	83
Hutan (Kerapatan Vegetasi Rendah)	Cukup	36	60	73	79
	Baik	30	55	70	77

Sumber: (Neitsch et al., 2011)

Model perhitungan hidrograf SCS-CN dapat dilihat pada persamaan berikut.

$$Pe = \frac{(P - Ia)^2}{P - Ia + S} \quad (1)$$

Dimana Pe merupakan akumulasi hujan efektif pada waktu t, P adalah akumulasi hujan pada waktu t, Ia adalah *initial abstraction* dan S adalah nilai potensi penyimpanan maksimum tanah. Persamaan yang menunjukkan hubungan antara Ia dan S adalah sebagai berikut.

$$Ia = 0,2 \times S \quad (2)$$

Perhitungan Akumulasi hujan efektif ditunjukkan pada persamaan berikut.

$$Pe = \frac{(P - 0,2S)^2}{P + 0,8S} \quad (3)$$

Persamaan yang menunjukkan hubungan antara nilai penyimpanan maksimum dengan nilai CN adalah sebagai berikut.

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \text{ (mm)} \quad (4)$$

Persamaan untuk menghitung debit puncak dan waktu puncak adalah sebagai berikut.

$$Qp = C \frac{A}{Tp} \quad (5)$$

Dimana A adalah luas DAS dan C adalah faktor konversi serta Tp adalah waktu puncak. Persamaan yang digunakan untuk menghitung waktu puncak adalah sebagai berikut.

$$Tp = \frac{\Delta t}{2} + Tlag \quad (6)$$

Dimana Δt adalah lama kejadian hujan dan $Tlag$ time lag atau waktu yang dibutuhkan dari curah hujan menjadi limpasan permukaan (jam). Persamaan yang digunakan untuk menentukan Tlag adalah sebagai berikut.

$$Tlag = \frac{L^{0.8} \times (S+1)^{0.7}}{1900 \times Y^{0.5}} \quad (7)$$

Dimana L adalah panjang sungai utama (feet), Y adalah kemiringan DAS (%), dan S adalah potential maximum retention (inch).

Parameter Transform

Parameter ini merupakan metode analisa limpasan yang menggambarkan aliran permukaan, penyimpanan dan kehilangan energi saat air mengalir dari DAS menuju ke saluran sungai. Metode ini disebut *transform* karena mentransformasi atau mengubah hujan yang tidak terinfiltasi menjadi outflow pada suatu DAS. Metode *Transform* yang digunakan pada penelitian ini adalah metode ModClark. Metode ModClark merepresentasikan dua proses penting pada transformasi hujan menjadi aliran permukaan yang meliputi translasi atau perpindahan air dari asalnya melalui saluran ke outlet DAS dan redaman atau pengurangan besaran debit karena kelebihannya tersimpan di wilayah DAS (Scharffenberg, 2022). Persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut.

$$\frac{dS}{dt} = I_t - O_t \quad (8)$$

Dimana dS/dt adalah besarnya penyimpanan air *storage* pada waktu t, I_t adalah rata rata *inflow* pada waktu t dan O_t adalah besarnya *outflow* pada waktu t. Waktu konsentrasi *time concentration* (t_c) dan *storage* (R) dapat dihitung menggunakan persamaan 13 dan 14 sebagai berikut.

$$T_c = 2.2 * \left(\frac{L * L_c}{\sqrt{Slope_{10-85}}} \right)^{0.3} \quad (9)$$

$$\frac{R}{R+T_c} = 0.65 \quad (10)$$

Dimana T_c adalah waktu konsentrasi dalam satuan jam, L adalah jalur aliran terpanjang dalam satuan mil, L_c adalah centroid jalur aliran dalam satuan mil, $Slope_{10-85}$ adalah rata-rata kemiringan 10 – 85% dari jalur aliran terpanjang dalam satuan ft/mil, dan R koefisien storage (USACE, 2022a).

Parameter Baseflow

Parameter *baseflow* merupakan besaran aliran yang tidak terbentuk secara langsung oleh curah hujan atau dapat didefinisikan sebagai aliran yang terbentuk pada sungai tanpa kontribusi curah hujan secara langsung. Estimasi *baseflow* dan aliran permukaan sangat diperlukan untuk menganalisis kondisi hidrologi pada suatu DAS yang mencakup interaksi antara air permukaan dan air bawah permukaan (*sub-surface water*), pengaruh urbanisasi terhadap aliran permukaan serta kesehatan habitat air pada sungai. Salah satu metode yang dapat digunakan dalam perhitungan baseflow adalah model resesi (*recession model*) menggunakan persamaan 11 sebagai berikut.

$$Q_t = Q_0 e^{-kt} \quad (11)$$

Dimana Q_t adalah aliran dasar pada waktu t, Q_0 adalah *initial baseflow* pada waktu awal perhitungan t_0 , dan k adalah konstanta eksponensial. Konstanta eksponensial dapat dihitung menggunakan berbagai metode. Pada penelitian ini konstanta eksponensial dihitung berdasarkan rasio antara debit aliran pada kondisi t_0 dengan debit pada hari sebelumnya (USACE, 2022b).

Kalibrasi Model

Kalibrasi model merupakan proses penentuan nilai optimum parameter yang digunakan yang mewakili kondisi atau karakteristik DAS sesungguhnya di lapangan. Proses kalibrasi dilakukan untuk memperoleh hidrograf hasil hitungan yang mendekati atau menyerupai data terukur (Mtibaa & Asano, 2022). Proses kalibrasi dilakukan dengan menentukan nilai parameter karakteristik DAS sebagai input model. Parameter model yang dikalibrasi dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Parameter model yang dikalibrasi

No	Parameter	Nilai Minimum	Nilai Maksimum	Unit
1	Curve Number	30	100	-
2	Konstanta Resesi	0	1	-
3	Ratio to Peak	0	1	-
4	Routing (Lag Time)	0.1	30	Jam

Hasil simulasi pemodelan hidrologi memiliki penyimpangan terhadap data terukur dilapangan. Penyimpangan tersebut disebabkan oleh adanya perbedaan parameter model dengan karakteristik yang ada di lapangan. Untuk mengetahui seberapa baik kinerja model hidrologi yang dihasilkan maka perlu dilakukan penilaian pada hasil model hidrologi yang disimulasikan. Penilaian kinerja dilakukan berdasarkan kriteria statistik yang meliputi Coefficient of Determination (R^2), Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) dan Percent Bias (PBIAS). Perhitungan kriteria statistik tersebut dilakukan menggunakan peramaan 12 sampai dengan 14.

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - \bar{Q}_o)(Q_{mi} - \bar{Q}_m)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - \bar{Q}_o)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{mi} - \bar{Q}_m)^2}} \right)^2 \quad (12)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_m - Q_o)^2}{n \sum_{t=1}^T (Q_o - \bar{Q}_o)^2} \quad (13)$$

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_o - Q_m)^2}{\sum_{i=1}^n Q_o} \quad (14)$$

Dimana Q_o adalah debit observasi, $(Q_o - \bar{Q}_o)^2$ adalah rerata debit observasi, Q_m adalah debit model dan $(Q_m - \bar{Q}_m)^2$ adalah debit model rerata. Hasil perhitungan menggunakan parameter statistik di atas selanjutnya disesuaikan dengan kriteria evaluasi model yang digunakan. Kriteria yang digunakan dalam evaluasi model hidrologi dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Kriteria evaluasi model hidrologi

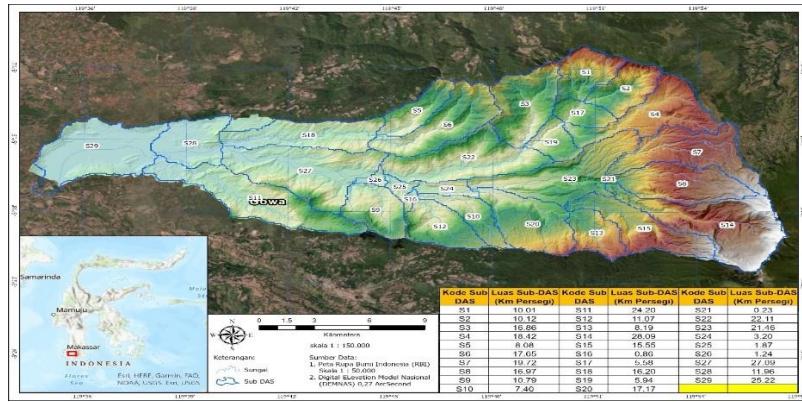
Kriteria	R ²	NSE	PBIAS
Sangat Baik	$R^2 > 0,85$	$NSE > 0,80$	$PBIAS < \pm 5$
Baik	$0,75 < R^2 < 0,85$	$0,70 < NSE < 0,80$	$\pm 5 < PBIAS < \pm 10$
Memuaskan	$0,6 < R^2 < 0,75$	$0,50 < NSE < 0,70$	$\pm 10 < PBIAS < \pm 15$
Tidak Memuaskan	$R^2 < 0,6$	$NSE < 0,5$	$PBIAS > \pm 15$

Mtibaa & Asano, (2022)

3. RESULT AND DISCUSSION

Karakteristik DAS Bili-Bili

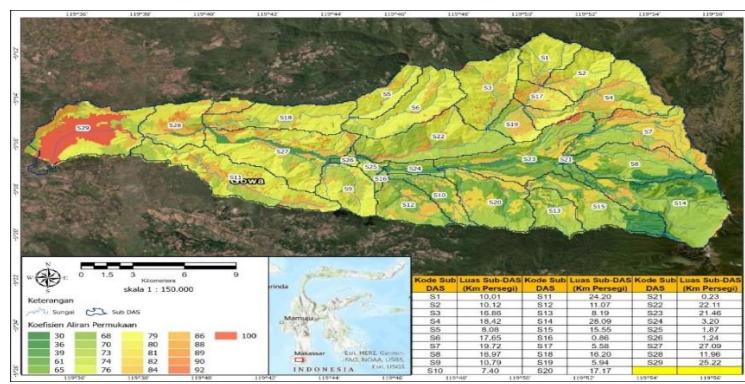
Morfometri Daerah Aliran Sungai (DAS) Bili-Bili merupakan aspek penting dalam memahami dinamika hidrologi dan proses transformasi hujan menjadi limpasan. Karakteristik seperti panjang alur sungai dan kemiringan alur sungai memberikan pemahaman yang mendalam mengenai pola aliran dan distribusi limpasan. Panjang alur sungai yang bervariasi dapat mempengaruhi waktu perjalanan air dari titik hujan menuju titik pengaliran. Semakin panjang alur sungai, semakin besar kemungkinan terjadi kehilangan air akibat evaporasi dan infiltrasi, yang berpengaruh pada jumlah limpasan yang terbentuk. Kemiringan alur sungai juga berperan krusial dalam transformasi hujan menjadi limpasan. Kemiringan yang lebih curam cenderung menghasilkan aliran yang lebih cepat, sehingga mengurangi waktu tunda antara jatuhnya hujan dan limpasan yang terjadi. Hal ini dapat meningkatkan risiko banjir, terutama pada daerah dengan intensitas hujan yang tinggi. Sebaliknya, kemiringan yang lebih landai dapat mendukung infiltrasi air ke dalam tanah dan memperlambat limpasan, yang berpotensi mengurangi risiko banjir tetapi dapat menyebabkan kekurangan air di area hulu. Selain itu, variabel lain seperti kemiringan sub-DAS dan kerapatan sungai juga memiliki pengaruh signifikan terhadap bagaimana hujan dikonversi menjadi limpasan. Kerapatan sungai yang tinggi dapat menjadi indikator adanya potensi limpasan yang lebih besar, karena aliran air yang lebih terfokus. Dalam konteks manajemen sumber daya air dan mitigasi bencana, pemahaman tentang hubungan antara karakteristik morfometri ini dengan perilaku limpasan sangat penting. Ini memungkinkan perumusan strategi pengelolaan yang efektif yang mampu merespons terhadap variabilitas iklim dan perubahan penggunaan lahan. Pada penelitian ini data dan informasi morfometri DAS diperoleh dari hasil pengolahan data Digital Elevation Model Nasional (DEMNAS) menggunakan software Hec-HMS. Morfometri DAS diperoleh dengan membagi DAS Bili-Bili kedalam beberapa Sub-Sub DAS. Peta dan data karakteristik DAS Bili-Bili dapat dilihat pada gambar.

**Gambar 1. Peta Karakteristik Morfometri DAS Bili-Bili**

Data morfometri DAS Bili-Bili menunjukkan variasi yang signifikan dalam karakteristik sub-DAS, yang berimplikasi pada perbedaan respons terhadap peristiwa hujan dan pola limpasan. Sub-DAS dengan panjang alur sungai yang lebih pendek (misalnya, S16, S25, S26) cenderung memiliki kerapatan sungai yang lebih tinggi dan kemiringan yang lebih curam. Kondisi ini mengindikasikan potensi limpasan cepat dan respon hidrograf yang lebih cepat terhadap hujan, sehingga meningkatkan risiko banjir lokal. Sebaliknya, sub-DAS dengan panjang alur sungai yang lebih panjang (misalnya, S4, S7, S11) memiliki kerapatan sungai yang lebih rendah dan kemiringan yang cenderung lebih landai. Sub-DAS ini berpotensi untuk memiliki waktu respon yang lebih lambat terhadap hujan, dengan lebih banyak waktu untuk infiltrasi dan evapotranspirasi, sehingga menghasilkan limpasan yang lebih sedikit dan lebih terdistribusi. Persentase panjang dan kemiringan alur sungai (10-85%) juga menunjukkan tren serupa, yang menggarisbawahi pentingnya topografi dan geometri saluran dalam menentukan dinamika limpasan. Perbedaan kemiringan sub-DAS juga mempengaruhi perilaku limpasan. Sub-DAS dengan kemiringan yang lebih curam (misalnya, S14) cenderung memiliki limpasan permukaan yang lebih tinggi, sementara sub-DAS dengan kemiringan landai (misalnya, S28) mempunyai potensi infiltrasi yang lebih besar. Interaksi antara panjang alur sungai, kemiringan, dan kerapatan sungai menentukan waktu konsentrasi dan volume limpasan. Analisis lebih lanjut yang menggabungkan data curah hujan dan data debit sungai diperlukan untuk mengkalibrasi model hidrologi dan memvalidasi hubungan antara karakteristik morfometri ini dengan kuantitas dan kualitas limpasan. Data ini dapat digunakan untuk membangun model prediksi limpasan yang lebih akurat dan mendukung perencanaan manajemen sumber daya air yang efektif di DAS Bili-Bili, termasuk mitigasi banjir dan konservasi air.

Koefisien Aliran Permukaan

Memahami koefisien aliran permukaan menggunakan Metode Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) sangat penting dalam menganalisis transformasi hujan menjadi limpasan permukaan khususnya di DAS Bili-Bili. Metode SCS-CN memberikan pendekatan empiris yang praktis untuk memperkirakan limpasan langsung dari suatu DAS berdasarkan karakteristik hidrologi tanah dan tutupan lahan yang direpresentasikan oleh nilai CN. Nilai CN yang lebih tinggi menunjukkan kapasitas infiltrasi yang lebih rendah dan potensi limpasan yang lebih tinggi, sehingga membantu dalam memprediksi volume dan kecepatan limpasan permukaan. Pemahaman ini krusial dalam perencanaan dan manajemen sumber daya air, khususnya dalam mitigasi banjir. Dengan mempertimbangkan variasi spasial nilai CN di suatu DAS, model hidrologi dapat dikalibrasi dan divalidasi untuk memberikan prediksi yang lebih akurat tentang respon DAS terhadap curah hujan, yang mendukung pengambilan keputusan yang lebih efektif dalam pengelolaan sumber daya air. Sebaran nilai CN DAS Bili-Bili dapat dilihat pada gambar berikut.



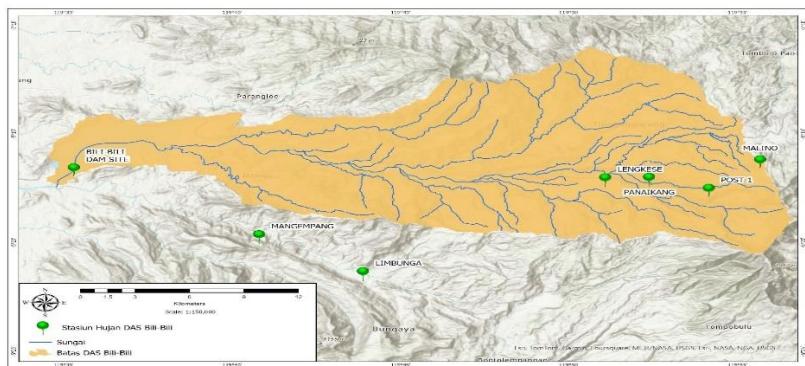
Gambar 2. Peta Sebaran Nilai SCS Curve Number DAS Bili-Bili

Peta sebaran nilai Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) pada Daerah Aliran Sungai (DAS) Bili-Bili menunjukkan variasi spasial yang signifikan dalam kapasitas infiltrasi tanah dan potensi limpasan permukaan. Warna-warna pada peta merepresentasikan nilai SCS-CN, yang berkisar dari 30 (infiltrasi tinggi, limpasan rendah) hingga 100 (infiltrasi rendah, limpasan tinggi). Area berwarna hijau menunjukkan kapasitas infiltrasi yang tinggi, sementara area berwarna kuning hingga oranye menunjukkan kapasitas infiltrasi yang rendah dan berpotensi menghasilkan limpasan yang tinggi. Variasi ini dipengaruhi oleh beberapa faktor, termasuk jenis tanah, tutupan lahan dan penggunaan lahan.

Area dengan infiltrasi rendah (diindikasikan oleh warna kuning hingga oranye) terkonsentrasi terutama di bagian tengah hingga hilir DAS, menunjukkan area yang rentan terhadap limpasan permukaan yang tinggi selama hujan. Area ini mungkin memiliki karakteristik tanah yang kurang permeabel, tutupan lahan yang minim, atau kondisi tanah yang terpadatkan, yang mengurangi kapasitas infiltrasi. Kemungkinan besar daerah ini merupakan area dengan risiko banjir yang lebih tinggi dibandingkan area lain dalam DAS. Area dengan infiltrasi sedang (diindikasikan oleh warna hijau kekuningan) tersebar relatif merata di beberapa bagian DAS, menunjukkan area dengan kapasitas infiltrasi yang sedang. Area ini mungkin memiliki campuran jenis tanah dan tutupan lahan yang menghasilkan kapasitas infiltrasi yang moderat. Area dengan infiltrasi tinggi (diindikasikan oleh warna hijau) terkonsentrasi di bagian hulu DAS dan tersebar secara lebih tersebar di beberapa area lainnya. Area ini kemungkinan memiliki karakteristik tanah yang permeabel, tutupan lahan vegetasi yang baik, dan kondisi tanah yang memungkinkan infiltrasi yang tinggi. Area ini cenderung memiliki risiko banjir yang lebih rendah. Berdasarkan data tersebut diperoleh nilai rata rata CN untuk DAS Bili-Bili adalah 78,9. Informasi yang tertera pada peta, khususnya nilai SCS-CN untuk setiap Sub-DAS, sangat penting dalam perencanaan dan pengelolaan sumber daya air di DAS Bili-Bili. Nilai SCS-CN yang tinggi pada beberapa Sub-DAS mengindikasikan bahwa area tersebut rentan terhadap limpasan permukaan yang besar pada saat hujan lebat, yang dapat menyebabkan banjir. Sebaliknya, Sub-DAS dengan nilai SCS-CN yang rendah menunjukkan potensi infiltrasi yang baik, yang dapat mengisi ulang air tanah dan mengurangi risiko banjir. Peta ini, bersamaan dengan data morfometri yang telah diberikan sebelumnya, memberikan gambaran yang komprehensif tentang karakteristik hidrologi DAS Bili-Bili.

Transformasi Hujan Limpasan Sebaran Data dan Stasiun Hujan

Sebaran stasiun hujan dalam Daerah Aliran Sungai (DAS) Bili-Bili memainkan peranan penting dalam memahami pola curah hujan dan dampaknya terhadap limpasan air permukaan. Stasiun hujan yang terdistribusi secara optimal dapat memberikan data yang akurat mengenai intensitas dan durasi hujan, yang menjadi kunci dalam analisis hidrologi. Variabilitas penempatan stasiun hujan dapat mempengaruhi estimasi limpasan, di mana lokasi stasiun yang dekat dengan aliran sungai cenderung menunjukkan hubungan yang lebih kuat antara curah hujan dan limpasan. Peta sebaran stasiun hujan DAS Bili-Bili dapat dilihat pada gambar berikut.

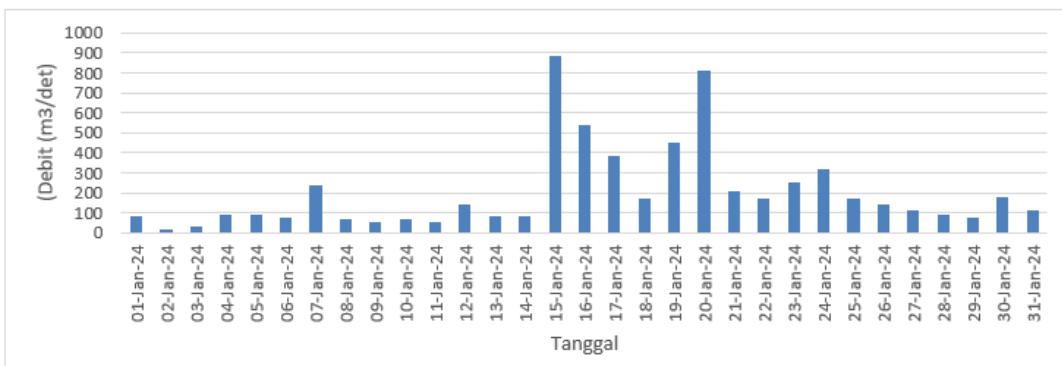


Gambar 3. Sebaran Stasiun Hujan DAS Bili-Bili

Data hujan yang digunakan pada penelitian ini, diperoleh dari Balai Besar Wilayah Sungai Pompengan Jeneberang pada 7 Stasiun seperti yang tampak pada gambar. Data yang digunakan adalah data Curah hujan Bulan Januari Tahun 2024, sebagai data sampling untuk memodelkan transformasi hujan limpasan, khususnya pada periode kejadian banjir yaitu pada tanggal 15 Januari 2024. Untuk mendapatkan hasil pemodelan yang maksimal, maka dipilih range data hujan tanggal 14 sampai dengan 17 Januari tahun 2024. Data hujan tiap stasiun dapat dilihat pada lampiran penelitian ini.

Debit Inflow Bendungan Bili-Bili

Debit inflow Bendungan Bili-Bili merupakan parameter kritis yang dipengaruhi oleh curah hujan di daerah sekitarnya. Curah hujan yang tinggi secara langsung berkontribusi terhadap peningkatan debit inflow, yang dapat memicu pengelolaan dinamis untuk menjaga keseimbangan antara kapasitas tampung bendungan dan potensi limpasan yang terjadi. Dalam konteks analisis hidrologi, data debit inflow ini juga berfungsi sebagai data kalibrasi yang penting dalam model transformasi hujan limpasan. Model tersebut digunakan untuk memprediksi respons limpasan permukaan akibat curah hujan, sehingga pemanfaatan air dan manajemen risiko banjir dapat dilakukan dengan lebih tepat. Dengan kalibrasi yang akurat, model ini mampu memberikan informasi yang berguna dalam perencanaan penggunaan sumber daya air dan mitigasi dampak lingkungan di sekitar DAS Bili-Bili. Selain itu, pemantauan secara berkala terhadap debit inflow dan curah hujan dapat membantu dalam mengidentifikasi pola perubahan iklim yang berpotensi mempengaruhi ketersediaan air. Hasil dari model yang telah dikalibrasi juga dapat digunakan untuk merancang sistem drainase yang lebih efisien dan berkelanjutan. Dengan mengintegrasikan data curah hujan, debit inflow, dan model hidrologi, pengelolaan sumber daya air di DAS Bili-Bili dapat dilakukan secara lebih holistik dan responsif terhadap perubahan kondisi meteorologis. Grafik inflow bendungan bili-bili dapat dilihat pada gambar berikut.



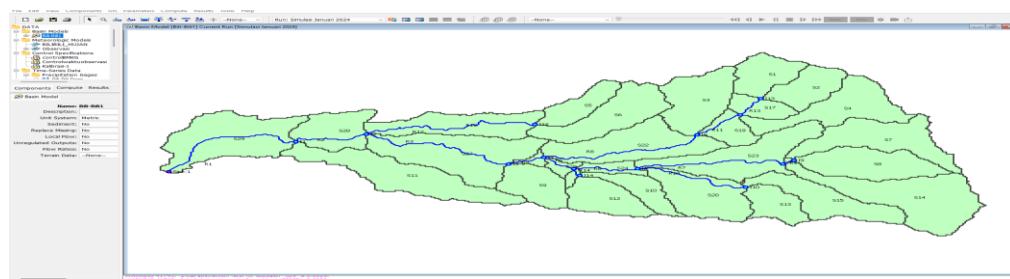
Gambar 4. Debit inflow Bendungan Bili-Bili Januari 2024

Grafik yang ditampilkan menunjukkan fluktuasi debit air masuk di Bendungan Bili-Bili sepanjang bulan Januari 2024, dengan satuan debit dalam meter kubik per detik (m^3/det). Dari data ini, terlihat adanya variasi signifikan dalam debit inflow, di mana beberapa hari mencatatkan peningkatan yang tajam. Peningkatan ini menunjukkan respons cepat terhadap curah hujan yang terjadi di daerah aliran sungai, yang merupakan faktor kunci dalam pengelolaan limpasan air. Khususnya, terdapat lonjakan debit yang cukup mencolok pada tanggal 15

Januari dan 21 Januari. Kenaikan debit tersebut berhubungan langsung dengan konfigurasi curah hujan tinggi pada periode tersebut, yang mendorong aliran air lebih banyak memasuki bendungan. Dengan memantau pola curah hujan dan debit, manajemen bendungan dapat mengantisipasi kebutuhan pengendalian banjir dan pengelolaan volume air secara lebih efektif. Data debit inflow ini berfungsi sebagai input penting dalam kalibrasi model transformasi hujan limpasan. Melalui analisis data debit dan curah hujan, model ini dapat memberikan prediksi yang lebih akurat mengenai respons limpasan permukaan di masa yang akan datang. Hasil dari model yang telah dikalibrasi juga dapat digunakan untuk merencanakan sistem drainase yang lebih efisien dan responsif terhadap perubahan iklim, serta untuk memastikan keberlanjutan pengelolaan sumber daya air di wilayah DAS Bili-Bili.

Hujan Limpasan dan Hasil Kalibrasi Basin Model dan Reach DAS Bili-Bili

Basin model adalah representasi digital dari karakteristik fisik dan hidrologi dari sebuah daerah aliran sungai (DAS) atau basin. Basin model mencakup berbagai elemen yang diperlukan untuk menganalisis aliran air dan proses hidrologis dalam basin tersebut. Reach adalah Segmen saluran yang menghubungkan subbasin dan digunakan untuk menganalisis aliran air di sepanjang saluran tersebut. Pada model hujan limpasan basin model diberi simbol S dan reach diberi simbol R. Basin model dan Reach Hasil pengolahan menggunakan software Hec-HMS dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 5. Basin Model dan Reach DAS Bili-Bili

Basin model berisi informasi karakteristik morfometri DAS. Karakteristik morfometri DAS Bili-Bili dapat dilihat pada tabel 1. Informasi karakteristik reach digunakan untuk menghitung Time Lag dan Time Concentration (Tc) yang digunakan dalam transformasi hujan limpasan seperti yang dituliskan pada persamaan 7 penelitian ini.

Time lag atau lag periode merupakan waktu yang dibutuhkan oleh air hujan untuk mengalir dari titik jatuhnya (misalnya, atap bangunan atau permukaan tanah) hingga mencapai titik pengukuran debit di sungai atau saluran air. Lag time penting dalam studi hidrologi karena membantu memahami respons sistem aliran terhadap curah hujan. Waktu Konsentrasi (Tc) adalah waktu yang diperlukan bagi air hujan untuk mengalir dari titik paling terpencil di suatu daerah aliran sungai (DAS) ke titik pengukuran, seperti saluran atau bendungan. Waktu konsentrasi merupakan parameter penting dalam analisis hidrologi karena membantu menentukan respons aliran dan limpasan terhadap curah hujan. Hasil perhitungan time lag dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 2. Hasil Perhitungan Time Lag

Segmen Sungai (Reach)	Length (km)	Slope	Length (m)	Length (ft)	Tc (Menit)	Lag Time (Menit)
R9	0.71	0.16	710.21	2330.09	5.56	3.34
R7	8.30	0.04	8304.03	27244.19	65.64	39.38
R10	6.50	0.05	6503.28	21336.22	49.69	29.81
R6	3.61	0.02	3614.70	11859.25	42.45	25.47
R14	0.90	0.01	895.72	2938.71	22.52	13.51
R5	2.11	0.02	2108.12	6916.40	29.44	17.66
R13	2.11	0.04	2108.12	6916.40	21.43	12.86
R11	3.21	0.03	3211.85	10537.57	33.58	20.15
R8	9.53	0.01	9529.62	31265.16	126.33	75.80
R4	2.11	0.02	2108.12	6916.40	31.40	18.84
R3	9.24	0.01	9244.76	30330.58	118.15	70.89
R12	10.21	0.01	10210.73	33499.77	110.44	66.26
R2	4.25	0.01	4248.07	13937.24	74.11	44.46

R1	9.11	0.01	9113.59	29900.23	142.91	85.75
----	------	------	---------	----------	--------	-------

Running Model Hujan Limpasan

Running Model Hujan Limpasan dilakukan menggunakan Hec-HMS dengan inputan beberapa parameter data. Secara rinci input datar dalam transformasi hujan limpasan di Hec-HMS dapat dilihat pada Tabel berikut.

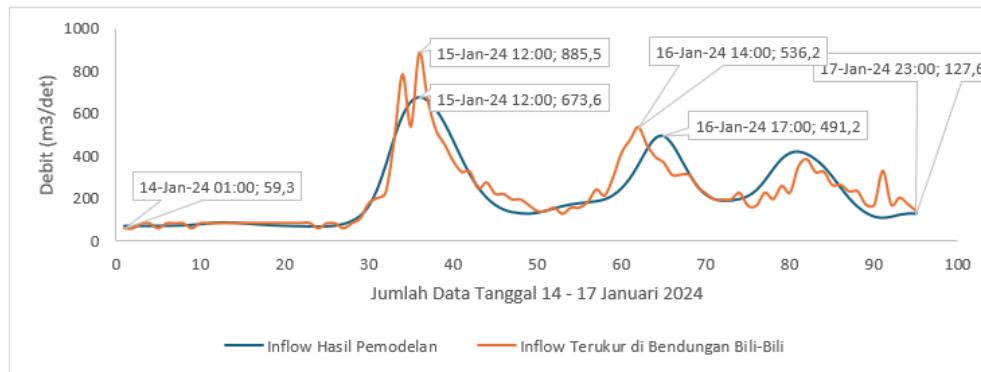
Tabel 3. Input data Model Hujan Limpasan DAS Bili-Bili

No	Komponen Model	Input Data/ Model	Keterangan/ Sumber Data
1	<i>Basin Model</i>	Karakteristik DAS	Tabel 1
2	<i>Meteorologic Models</i>	Interpolated Precipitation (<i>Inverse Distance Weighted</i>)	Lokasi Pos Hujan DAS Bili Bili (Gambar 3)
3	Parameter loss	SCS Curve Number Grid	Gambar 2
4	Parameter Transform (<i>Time Concentration dan Lag Time</i>)	ModClark	Tabel 2 dihitung menggunakan persamaan 7
5	<i>Baseflow</i>	Recession	Recession Constant (0 – 1) Ratio to Peak (0 -1) (Panduan Hec-HMS)
6	Kalibrasi	Debit Inflow Bendungan	BBWS Pompengan

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, data yang digunakan adalah data kejadian banjir Januari 2024 dengan menggunakan data tanggal 14 – 17 Januari, dengan puncak debit terjadi pada 15 Januari 2024. Hasil pemodelan hujan limpasan DAS Bili-Bili pada dapat dilihat pada Tabel dan gambar berikut.

Tabel 4. Hasil Pemodelan Hujan Limpasan DAS Bili-Bili

Jam	14 Januari 2024		15 Januari 2024		16 Januari 2024		17 Januari 2024	
	Inflow Model	Inflow Terukur	Inflow Model	Inflow Terukur	Inflow Model	Inflow Terukur	Inflow Model	Inflow Terukur
00	69.6	59.3	66.9	59.6	128.9	195.9	188.1	195.5
01	69.6	59.3	67.4	83	126.9	168.6	188.9	195.8
02	69.6	59.4	70.5	83.1	130.9	141.1	195.8	226.4
03	69.6	82.3	78.6	59.8	140.6	141.3	209.9	166.2
04	69.7	83.1	93.1	83.3	152.3	156	237.5	166.4
05	69.9	59.8	117.8	106.9	162.5	128	282.7	227.5
06	70.3	83.3	162.8	177.8	170.6	156.9	337	197.4
07	71	83.3	241.1	202.1	176.4	157	384.1	259
08	72.1	83.3	353.6	226.8	180.7	184	412	228.9
09	74.2	60.2	479.6	467.8	185.4	242.2	418.2	352.6
10	77.6	84	585.8	783.9	194.4	214.5	406.6	384.9
11	82	84	652.3	541	213.9	300.2	382.6	324.3
12	85.4	84	673.6	885.5	246.7	415.5	347.5	325.4
13	86.2	84.5	658	664.2	293.7	475.2	301.6	263.8
14	84.7	84.7	615	520.4	357.4	536.2	249.5	264.4
15	82	84.9	550.8	455.1	428.1	452.4	200.1	233.6
16	79	84.9	471.7	377.9	481.4	396.2	160.2	234
17	76.1	85.2	388.1	326.1	491.2	368.6	131.2	171.3
18	73.7	85.2	311.5	326.1	453.4	311	113.2	171.3
19	71.7	85.2	249.1	247.4	387.1	312	107.6	330
20	70.3	85.2	202	275.6	316.6	312	112.8	172
21	69.1	85.2	168.4	221.7	256.8	254.1	122.2	204.1
22	68.2	85.2	146.6	221.7	216.2	224.7	127.6	172.5
23	67.4	85.2	134.5	195.4	195.1	195.1	127.6	140.8



Gambar 6. Grafik Perbandingan Inflow Hasil Pemodelan Hujan Limpasan dengan Inflow Terukur Bendungan Bili-Bili

Berdasarkan tabel dan grafik terlihat bahwa terdapat perbedaan antara hasil pemodelan hujan limpasan dengan debit terukur. Perbedaan terletak pada nilai debit puncak dan selisih waktu puncak antara debit inflow hasil pemodelan dengan debit inflow hasil pengukuran. Berdasarkan data, debit inflow puncak hasil pemodelan adalah 673,6 m³/det sedangkan debit puncak inflow terukur adalah 885,5 m³/detik. Untuk mengetahui seberapa signifikan perbedaan antara data hasil pemodelan dengan data terukur, maka dilakukan kalibrasi model dengan pendekatan nilai koefisien determinansi (R^2), Nash Sutcliffe (NSE) dan Percent Bias (PBIAS). Kriteria dan hasil kalibrasi dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 5. Kriteria evaluasi model hujan limpasan

Kriteria	R^2	NSE	PBIAS
Sangat Baik	$R^2 > 0,85$	$NSE > 0,80$	$PBIAS < \pm 5$
Baik	$0,75 < R^2 < 0,85$	$0,70 < NSE < 0,80$	$\pm 5 < PBIAS < \pm 10$
Memuaskan	$0,6 < R^2 < 0,75$	$0,50 < NSE < 0,70$	$\pm 10 < PBIAS < \pm 15$
Tidak Memuaskan	$R^2 < 0,6$	$NSE < 0,5$	$PBIAS > \pm 15$

(Mtibaa & Asano, 2022)

Tabel 6. Hasil Kalibrasi Model Hujan Limpasan DAS Bili-Bili

Parameter	Nilai Hasil Kalibrasi Model	Kriteria
NSE	0.793	Baik
PBIAS (%)	-1.86	Sangat Baik
R^2	0.81	Baik

Nilai Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) adalah indikator statistik yang digunakan untuk mengevaluasi kecocokan antara data yang diprediksi dan data yang terukur dalam pemodelan hidrologi. Nilai NSE berkisar antara $-\infty$ hingga 1, dimana nilai 1 menunjukkan kecocokan yang sempurna antara model dan data terukur. Dalam konteks nilai NSE sebesar 0,793, ini menunjukkan bahwa model memberikan prediksi inflow yang cukup baik dan dapat diandalkan, dengan ketepatan yang cukup tinggi dalam meramalkan aliran air berdasarkan curah hujan. Nilai NSE 0,793 juga menyiratkan bahwa model memiliki kemampuan yang memadai untuk menangkap fluktuasi dalam inflow, meskipun masih ada ruang untuk perbaikan. Sebagai acuan, nilai NSE di atas 0,7 umumnya dianggap baik dalam banyak kajian hidrologi, dan ini menunjukkan bahwa model dapat digunakan untuk analisis lebih lanjut dan pengambilan keputusan terkait pengelolaan sumber daya air. Namun, penting untuk terus memantau dan melakukan kalibrasi pada model untuk memastikan akurasi yang optimal dalam kondisi yang beragam, terutama dalam situasi yang melibatkan perubahan iklim atau penggunaan lahan yang berubah. Percent (PBIAS) adalah metrik yang digunakan untuk mengevaluasi kesesuaian antara data yang diprediksi oleh model dan data yang terukur. PBIAS dihitung sebagai persentase deviasi rata-rata dari nilai terukur, dimana nilai positif menunjukkan bahwa model cenderung overestimasi (memperkirakan lebih tinggi) dan nilai negatif menunjukkan

underestimasi (memperkirakan lebih rendah) inflow. Dalam kasus PBIAS sebesar -1,86% seperti pada tabel diatas, ini menunjukkan bahwa model cenderung sedikit lebih rendah dibandingkan dengan nilai terukur, yang berarti bahwa prediksi inflow yang dihasilkan model lebih rendah sekitar 1,86% dari nilai yang sebenarnya tercatat.

Nilai PBIAS ini menunjukkan bahwa meskipun terdapat sedikit bias, model tetap mampu memberikan estimasi yang cukup baik dalam konteks pemodelan hujan limpasan. Bias negatif yang kecil seperti ini bisa menjadi indikator bahwa model cukup akurat, namun juga menandakan bahwa ada potensi untuk penyesuaian. Dalam pengelolaan sumber daya air, penting untuk memperhatikan nilai PBIAS ini, karena pengertian yang lebih baik terhadap penyimpangan dapat membantu dalam kalibrasi model, meningkatkan akurasi prediksi, dan memfasilitasi perencanaan yang lebih baik dalam menghadapi berbagai kondisi hidrologi. Koefisien Determinasi (R^2) adalah statistik yang menunjukkan proporsi variabilitas dalam data terukur yang dapat dijelaskan oleh model yang digunakan. Nilai R^2 berkisar antara 0 dan 1, dimana nilai 1 menunjukkan bahwa model dapat menjelaskan 100% dari variabilitas data, sedangkan nilai 0 berarti model tidak memiliki kemampuan prediktif sama sekali. Dengan nilai R^2 sebesar 0,81, ini menunjukkan bahwa 81% dari variabilitas inflow terukur dapat dijelaskan oleh model pemodelan hujan limpasan. Hal ini menandakan bahwa model memiliki kemampuan yang sangat baik dalam menangkap pola dan tren aliran air berdasarkan input curah hujan. Nilai R^2 yang tinggi ini menunjukkan bahwa model tidak hanya relevan, tetapi juga cukup kuat dalam mendeskripsikan hubungan antara curah hujan dan inflow. Namun, meskipun 81% adalah angka yang sangat baik, ada 19% variabilitas yang tidak dapat dijelaskan oleh model, yang mungkin disebabkan oleh faktor eksternal atau proses hidrologis yang kompleks yang belum dimasukkan dalam model. Oleh karena itu, peneliti dan pengelola sumber daya air perlu mempertimbangkan faktor-faktor ini dan terus meningkatkan model untuk mencapai akurasi yang lebih tinggi dalam prediksi inflow di masa mendatang.

4. CONCLUSION

Berdasarkan hasil pemodelan hujan limpasan pada periode banjir 14-17 januari 2024 diperoleh nilai debit inflow pada DAS Biuli Bili adalah 673,6 m³/det yang terjadi pada tanggal 15 Januari Tahun 2024. Hasil pemodelan bersesuaian dengan debit terukur secara temporal namun memiliki nilai yang lebih rendah dari debit inflow terukur. Basarkan analisis nilai Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) sebesar 0,793, Percent Bias (PBIAS) sebesar -1,86%, dan Koefisien Determinasi (R^2) sebesar 0,81, dapat disimpulkan bahwa model pemodelan hujan limpasan terhadap inflow terukur menunjukkan kinerja yang baik dalam prediksi aliran air. NSE yang tinggi menunjukkan kecocokan yang memadai antara data yang diprediksi dan yang terukur, sementara PBIAS negatif yang kecil menandakan bahwa model cenderung undervalue inflow dengan sedikit bias. Dengan nilai R^2 yang menunjukkan bahwa 81% variabilitas inflow dapat dijelaskan oleh model, hal ini menunjukkan bahwa model dapat diandalkan untuk analisis lebih lanjut. Namun, terdapat ruang untuk perbaikan, dan penting bagi peneliti serta pengelola sumber daya air untuk terus melakukan kalibrasi dan pengembangan model, agar dapat lebih akurat dalam menghadapi tantangan hidrologis yang kompleks di masa mendatang.

5. ACKNOWLEDGMENTS

Penulis menyampaikan apresiasi yang mendalam kepada semua pihak yang telah memberikan kontribusi dan dukungan dalam penelitian ini. Bantuan dan dorongan mereka sangat berharga untuk mewujudkan penelitian ini. Terima kasih atas waktu, saran, dan bimbingan yang diberikan. Semoga hasil penelitian ini bermanfaat kepada semua pihak.

6. REFERENCES

- Aerts, J. C. J. H., & Botzen, W. J. W. (2011). Climate change impacts on pricing long-term flood insurance: A comprehensive study for the Netherlands. *Global Environmental Change*, 21(3), 1045–1060.
- Belladona, M., Ningrum, W., Wisnuwardhani, F., & Surapati, A. (2023, October). Pemodelan Sistem Drainase Menggunakan EPA SWMM 5.1 Untuk Mengatasi Genangan di Kelurahan Kebun Tebeng Bengkulu. In Prosiding Seminar Nasional Penelitian LPPM UMJ (Vol. 1, No. 1).
- Enung, E., Kasyanto, H., & Sari, R. R. (2023). Penerapan Algoritma Multilayer Perceptron (MLP) untuk Memprediksi Debit di Sungai Citarum Bagian Hulu (Pos Pengukuran Majalaya), Kab. Bandung, Jawa Barat. Potensi: Jurnal Sipil Politeknik, 25(1), 1-8.
- Fati, R., & Latubessy, A. (2015). Identifikasi Daerah Potensi Banjir Berbasis Expert System. Prosiding SNATIF, 181-

190.

- Gessang, O. M. (2020). Model Optimalisasi Pengelolaan Banjir Pada Bendungan Bili-Bili Menggunakan Artificial Neural Networks (ANN) (Doctoral dissertation, Institut Teknologi Sepuluh Nopember).Ghimire, R., Ferreira, S., & Dorfman, J. H. (2015). Flood-induced displacement and civil conflict. *World Development*, 66, 614–628.
- Gumindoga, W., Rwasoka, D. T., Nhapi, I., & Dube, T. (2017). Ungauged runoff simulation in Upper Manyame Catchment, Zimbabwe: Application of the HEC-HMS model. *Physics and Chemistry of the Earth*, 100, 371–382.
- Hadihardaja, I. K., & Sutikno, S. (2005). Pemodelan Curah Hujan-Limpasan Menggunakan Artificial Neural Network (ANN) dengan Metode Backpropagation. *Jurnal Teknik Sipil ITB*, 12(4), 250-258.
- Halwatura, D., & Najim, M. M. M. (2013). Application of the HEC-HMS model for runoff simulation in a tropical catchment. *Environmental Modelling and Software*, 46, 155–162.
- Li, J., & Shi, W. (2015). Effects of alpine swamp wetland change on rainfall season runoff and flood characteristics in the headwater area of the Yangtze River. *Catena*, 127, 116–123.
- Nharo, T., Makurira, H., & Gumindoga, W. (2019). Mapping floods in the middle Zambezi Basin using earth observation and hydrological modeling techniques. *Physics and Chemistry of the Earth*, 114(June), 1–9.
- Quiroga, V. M., Kure, S., Udo, K., & Mano, A. (2016). Application of 2D numerical simulation for the analysis of the February 2014 Bolivian Amazonia flood: Application of the new HEC-RAS version 5. *RIBAGUA - Revista Iberoamericana Del Agu*, February 2014, 1–9.
- Sandi, C., Adityawan, M. B., Harlan, D., Farid, M., & Nadeak, N. (2022). Artificial Neural Network dan Pemodelan Numerik untuk Prediksi Parameter Aliran akibat Dam Break. *Jurnal Teknik Sumber Daya Air*, 129-140.
- USACE. (2022). HEC-HMS Tutorials and Guides. US Army Corps of Engineers, 1–1054.
- Suharsono, T. N. (2025). Prediksi Banjir Di Kabupaten Karawang Berdasarkan Curah Hujan Dengan Metode Artifical Neural Network. *Journal of Data Analytics, Information, and Computer Science*, 2(1), 10-19.
- Younis, S. M. Z., & Ammar, A. (2018). Quantification of impact of changes in land use-land cover on hydrology in the upper Indus Basin, Pakistan. *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 21(3), 255–263.
- Widyastuti, S., Suhartanto, E., & Dermawan, V. (2016). Analisa Hujan Limpasan Menggunakan Model Artifical Neural Network (ANN) di Sub DAS Lesti. *Jurnal Teknik Pengairan Universitas Brawijaya*.