

Evaluasi Data Hujan Berbasis Satelit untuk Menentukan Debit Aliran Masuk Waduk Selorejo Menggunakan Model HBV-96

Evaluation of Satellite-Based Rainfall to Determine Inflow Discharge of Selorejo Reservoir Using the Hbv-96 Model

Ivana Nathalia Hidayat¹⁾ Doddi Yudianto^{2)*} S. Sanjaya³⁾

^{1,2,3)}Jurusan Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Katolik Parahyangan
Jalan Ciumbuleuit No.94, Bandung, Indonesia

*Corresponding author: doddi_yd@unpar.ac.id

Diterima: 06 Juni 2024; Direvisi: 09 Agustus 2024; Disetujui: 04 April 2025

Abstract

Effective reservoir management can be supported by applying rainfall-runoff hydrological models. However, one of the main challenges of such models lies in the availability of reliable rainfall data. Satellite-based rainfall data offer a viable alternative to address this issue. This study aims to evaluate the reliability of satellite-based rainfall data for hydrological applications, specifically for simulating reservoir inflow using the HBV-96 model in the Selorejo Reservoir. The rainfall data used in this study include satellite-based datasets from TRMM, GPM, and RCM, tested in both raw and corrected forms. The HBV-96 model parameters were calibrated using observed rainfall data from 1998 to 2008, achieving a correlation coefficient and Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) of 0.86 and 0.72, respectively, for simulated streamflow. The model's performance was subsequently verified using observed rainfall data from 2009 to 2016, yielding consistent results with a correlation coefficient and NSE of 0.832 and 0.71, respectively. These calibrated parameters were then applied to the satellite rainfall datasets. The findings reveal that, in general, corrected TRMM satellite rainfall data using regression equations were not suitable for hydrological modelling. However, TRMM data corrected using duration curves significantly reduced deviations by up to 50% compared to raw data and provided better-simulated streamflow results, aligning more closely with observed streamflow. Conversely, RCM rainfall data, whether raw or corrected, performed poorly in the HBV model, with negative NSE values. Meanwhile, the bias-corrected GPM satellite rainfall data demonstrated the best performance in the HBV model, with a maximum deviation of only 5.81%.

Keywords: HBV-96 model, satellite-based rainfall, TRMM, GPM, RCM, Selorejo Reservoir

Abstrak

Pengelolaan waduk yang efektif dapat didukung dengan pendekatan model hidrologi hujan limpasan. Akan tetapi, salah satu tantangan terbesar dari model tersebut adalah ketersediaan data hujan yang andal, sehingga data hujan berbasis satelit dapat digunakan sebagai alternatif. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi keandalan data curah hujan berbasis satelit dalam aplikasi hidrologi, yaitu simulasi debit aliran masuk yang berfokus pada model HBV-96 di Waduk Selorejo. Adapun data hujan yang digunakan dalam penelitian ini adalah data hujan berbasis grid TRMM, GPM dan RCM. Seluruh data ini akan diuji, baik yang mentah maupun terkoreksi. Data ini, kemudian diaplikasikan ke dalam model HBV-96, dimana parameter model HBV diperoleh dengan proses kalibrasi menggunakan data hujan pengamatan tahun 1998-2008. Hasil model kalibrasi ini memperoleh nilai korelasi dan koefisien NS debit sebesar 0,86 dan 0,72. Performa model ini kemudian diverifikasi dengan data hujan pengamatan tahun 2009-2016, dan telah menunjukkan hasil konsisten dengan nilai korelasi dan koefisien NS, yaitu 0,832 dan 0,71; kemudian nilai parameter tersebut diaplikasikan untuk data hujan lainnya. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa, secara umum, data hujan satelit TRMM, yang dikoreksi menggunakan persamaan regresi, kurang tepat untuk diaplikasikan ke dalam pemodelan hidrologi. Data hujan satelit yang dikoreksi kurva durasinya berhasil menurunkan penyimpangannya hingga 50% dari data aslinya, dan memberikan debit hasil simulasi model yang lebih baik juga, dibandingkan dengan debit pengamatan. Namun performa data hujan RCM, baik data asli maupun data koreksi, dalam simulasi model HBV, memberikan hasil yang buruk dengan nilai koefisien NS negatif. Sementara itu, performa data hujan satelit GPM terkoreksi dalam simulasi model HBV memiliki hasil terbaik dengan penyimpangan maksimum 5,81%.

Kata Kunci: data hujan satelit, model HBV96, TRMM, GPM, RCM, Waduk Selorejo.

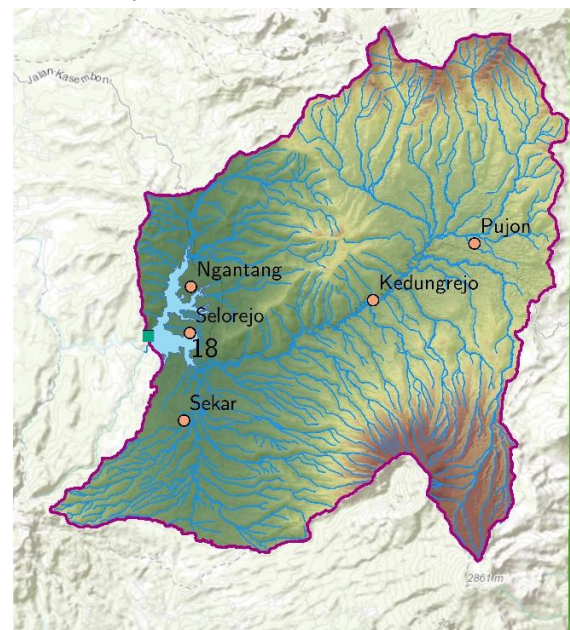
PENDAHULUAN

Pengelolaan sumber daya air memegang peranan penting dalam mendukung berbagai kebutuhan, seperti irigasi, air minum, dan pembangkit listrik. Di Indonesia, keberadaan waduk atau bendungan menjadi elemen kunci untuk memastikan ketersediaan air yang berkelanjutan, terutama di tengah tantangan perubahan iklim dan pertumbuhan kebutuhan masyarakat. Untuk mendukung pengelolaan waduk yang efektif, salah satu pendekatan yang digunakan adalah pemodelan hujan-aliran. Model ini membantu memahami proses hidrologi yang kompleks dan memberikan informasi penting untuk pengambilan keputusan.

Namun, tantangan utama dalam pemodelan hidrologi adalah ketersediaan data curah hujan yang andal. Data pengamatan lapangan seringkali terbatas, baik dari segi distribusi spasial maupun kualitas pemeliharaan alat pengukuran. Dalam beberapa dekade terakhir, data curah hujan berbasis satelit seperti TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*) dan GPM (*Global Precipitation Measurement*) serta data dari model iklim global, seperti GCM (*Global Climate Model*) atau RCM (*Regional Climate Model*) semakin banyak digunakan sebagai alternatif. Meskipun menawarkan cakupan spasial yang luas, data-data ini memiliki keterbatasan, terutama dalam hal akurasi dan bias (Mamenun dkk., 2014; Vernimmen dkk., 2012), yang memerlukan evaluasi lebih lanjut sebelum digunakan dalam model hujan-aliran. Mengingat pentingnya akurasi data hujan dalam perencanaan dan pengelolaan waduk, diperlukan penelitian mendalam untuk mengevaluasi keandalan data hujan yang tersedia

Penelitian ini berfokus pada model hidrologi hujan limpasan, yang telah digunakan untuk memprediksi debit aliran di berbagai wilayah, yaitu Model HBV-96 (*Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning*). Dikembangkan oleh *Swedish Meteorological and Hydrological Institute* (SMHI) pada tahun 1972, model ini dikenal karena fleksibilitasnya dalam menangani berbagai skenario hidrologi serta akurasinya dalam memodelkan debit aliran masuk (Lindström dkk., 1997). Studi sebelumnya telah menunjukkan bahwa model HBV-96 memiliki performa yang baik dalam berbagai aplikasi, termasuk pengelolaan waduk dan analisis banjir (Rusli, dkk., 2015; Rusli, dkk., 2015; Yudianto & Sari, 2015). Model hujan limpasan ini juga pernah digunakan untuk mengevaluasi data satelit (Jahanshahi dkk., 2024; Poméon dkk., 2017; Usman, dkk., 2022; Usman, Ndehedehe, Farah, dkk., 2022). Selain itu, model HBV juga pernah digunakan untuk mengevaluasi efek perubahan iklim dengan data RCM atau serupa (Ali dkk., 2018; Booij, 2005; Ningrum dkk., 2024).

Model hujan limpasan dengan berbagai produk hujan berbasis satelit akan diterapkan di salah satu waduk multifungsi di Indonesia, yaitu Waduk Selorejo. Waduk ini terletak di Desa Pandansari, Kecamatan Ngantang, Malang, Jawa Timur, dengan lokasi geografis $7,86^{\circ}$ LS dan $112,36^{\circ}$ BT. Waduk ini terletak di dalam wilayah aliran sungai Kali Konto dengan luas daerah tangkapan air (DTA) sebesar $236,25 \text{ km}^2$, dengan aliran masuk (*inlet*) dari tiga kali, yaitu Kali Konto, Kali Kwayangan, dan Kali Pinjal. DTA tersebut memiliki karakteristik tutupan lahan dengan kawasan hijau terbuka, dengan daerah dekat dengan pegunungan, lihat **Gambar 1**. Waduk yang telah beroperasi sejak tahun 1972 ini memiliki peran penting dalam penyediaan air untuk berbagai kebutuhan di daerah sekitarnya (Yudiarso dkk., 2014).



Gambar 1 Peta Daerah Tangkapan Air Waduk Selorejo

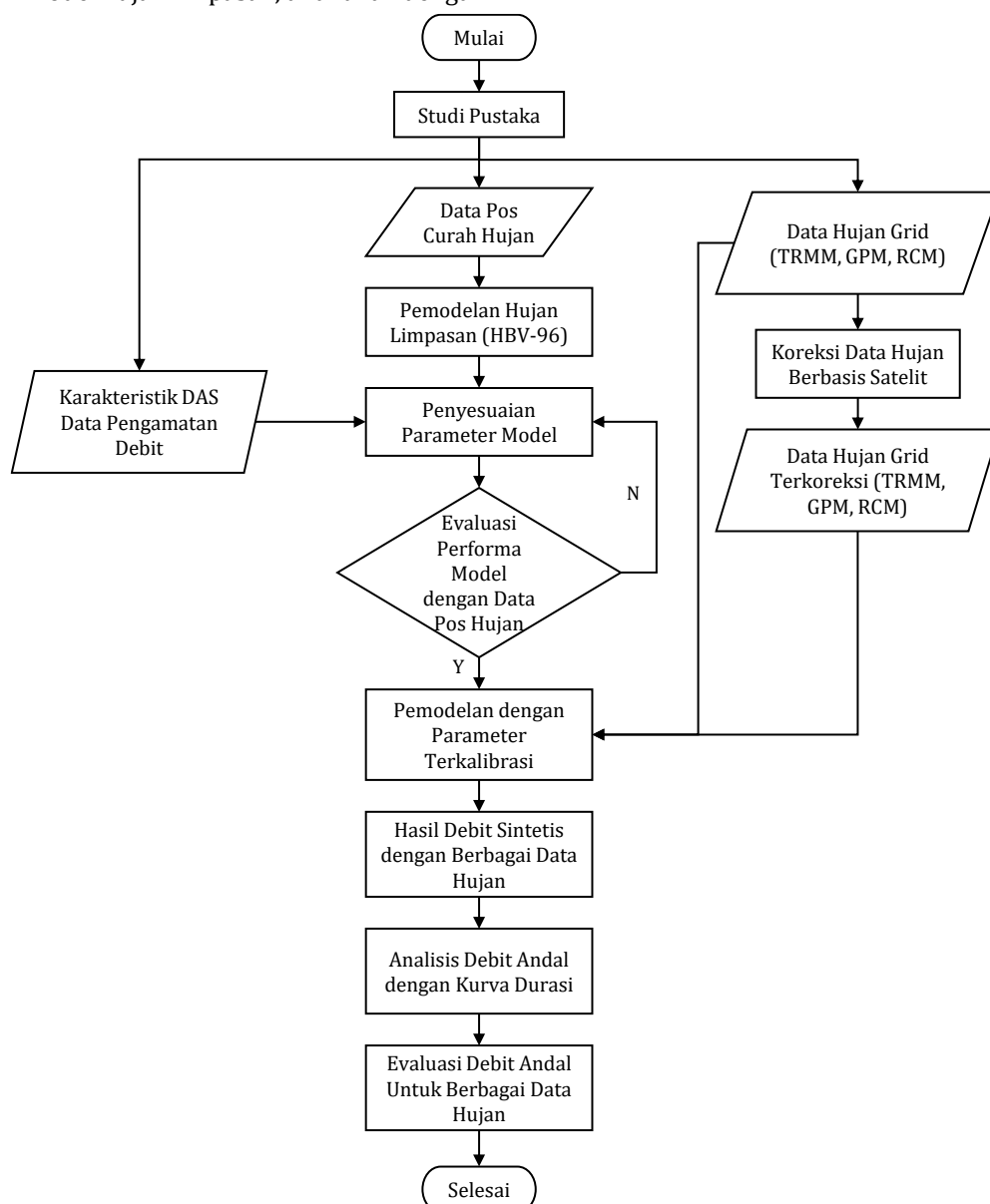
Oleh karena itu, penelitian ini bermaksud untuk mengevaluasi keandalan data curah hujan berbasis satelit dalam simulasi debit aliran masuk menggunakan model HBV-96 di Waduk Selorejo. Studi ini memanfaatkan data pengamatan dari lima stasiun hujan lokal, data TRMM, GPM, dan RCM, dengan periode data yang mencakup tahun 1998 hingga 2016. Data satelit dikoreksi menggunakan metode regresi dan koreksi kurva durasi untuk mengurangi bias. Selanjutnya, simulasi debit aliran dilakukan untuk membandingkan kinerja data pengamatan dengan data satelit yang telah terkoreksi. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan wawasan lebih dalam tentang aplikasi data curah hujan berbasis satelit dalam pemodelan hidrologi di wilayah tropis, terutama dalam konteks pengelolaan sumber daya air.

METODOLOGI

Penelitian diinisiasi dengan studi pustaka terkait dengan penerapan data hujan dalam model hujan-limpasan, dan perkembangan model tersebut, serta pengumpulan data yang relevan untuk pemodelan hujan limpasan, antara lain karakteristik DAS lokasi studi, data pengamatan curah hujan dan pengamatan debit yang tersebut, dan data hujan berbasis satelit. Setelah itu, secara terpisah, proses dilanjutkan dengan penyiapan data hujan berbasis satelit, yaitu TRMM GPM dan RCM, dan penyiapan model hujan-limpasan (HBV-96). Penyiapan data hujan berbasis satelit yang dimaksud adalah menyiapkan data hujan grid ke dalam curah hujan rencana wilayah untuk tiap-tiap produk hujan satelit, kemudian dikoreksi sesuai dengan kebutuhan. Di samping itu, proses penyiapan model hujan limpasan, dilakukan dengan

menyesuaikan parameter input model HBV-96 dengan data hujan pengamatan, karakteristik DAS dan data pengamatan debit, sebagai bagian dari proses kalibrasi model, hingga performa model dinilai dapat merepresentasikan kondisi DTA Waduk Selorejo.

Model HBV-96 yang telah terkalibrasi dengan baik, kemudian, dapat digunakan untuk menghasilkan berbagai debit sintesis model untuk seluruh data curah hujan yang akan dievaluasi. Penerapan debit hasil model ini, diolah menjadi kurva durasi, untuk dievaluasi lebih lanjut performanya. Evaluasi performa berbagai data hujan dibantu dengan beberapa fungsi objektif, sebelum formulasi kesimpulan dan saran dilakukan. Seluruh proses ini diilustrasikan ke dalam diagram alir penelitian yang disajikan pada **Gambar 2**.



Gambar 2 Diagram Alir Penelitian

Data Masukkan Model

Data hujan pengamatan yang digunakan berasal dari lima stasiun hujan, yaitu Stasiun Kedungrejo, Stasiun Pujon, Stasiun Selorejo, Stasiun Sekar, dan Stasiun Ngantang (lihat **Gambar 1**). Data curah hujan yang tersedia berupa data curah hujan harian sepanjang 18 tahun, dari tahun 1998 hingga tahun 2016.

Data hujan satelit seperti TRMM atau GPM, merupakan produk data hujan yang dicatat dengan menggunakan instrumen satelit *infrared*, yang menghubungkan potensi curah hujan dengan temperatur tertinggi pada awan (Vernimmen dkk., 2012). Sedangkan, data RCM, adalah produk data hujan hasil olahan representasi numerik dari Gambaran perilaku sistem iklim dan interaksi antar komponen-komponen di dalamnya dengan masukkan berbentuk grid (P. dkk., 2021). Pentingnya pengguna memahami kedua tipe data ini, akan sangat mempengaruhi pengolahan datanya lebih lanjut, terutama pada penerapannya dalam hidrologi.

TRMM atau *Tropical Rainfall Mission* (G. J. Huffman dkk., 2018) adalah sebuah misi gabungan peluncuran satelit, yang salah satunya digunakan untuk mengukur nilai hujan, yang diluncurkan oleh NASA dan JAXA pada tahun 1997. Resolusi spasial dari produk ini adalah $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ atau sekitar ~ 28 km. Produk curah hujan satelit TRMM yang digunakan untuk Waduk Selorejo adalah TRMM 3B42 V07 dengan cakupan 1 *grid*. Data tersebut tersedia dalam bentuk curah hujan harian sepanjang 22 tahun, dari tahun 1998 hingga tahun 2019.

GPM atau Global Precipitation (G. Huffman, 2023) adalah misi lanjutan dari TRMM dengan resolusi spasial dan temporal yang lebih baik, yaitu $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ (~ 11 km pada daerah ekuatorial) dan perekaman data setiap 30 menit sekali. Dengan resolusi data yang lebih baik, curah hujan wilayah untuk Waduk Selorejo dihasilkan dari 5 grid dengan data curah hujan harian sepanjang 20 tahun, dari tahun 2001 hingga tahun 2020.

RCM adalah bentuk *systematical downscaling* dari GCM, yang berfokus pada kawasan tertentu. Luaran model iklim yang digunakan adalah produk dari RCM CORDEX SEA (*Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment Southeast Asia*), yaitu REMO2015 dengan model utama, MPI-M-MPI-ESM-LR. Ensemble yang dipilih adalah r11p1 dengan skenario yang digunakan adalah histori dan rcp2.6. rcp 2.6 menggambarkan kondisi emisi karbon rendah, dengan strategi mitigasi yang agresif. Data curah hujan RCM untuk Lokasi Waduk Selorejo memiliki sebaran 4 *grid*, di mana data yang

tersedia terbagi menjadi dua, yaitu data model histori dengan rentang waktu 7 tahun, dari tahun 1998 hingga tahun 2005, dan data seknario rcp2.6 dengan rentang waktu 14 tahun, dari tahun 2006 hingga tahun 2020.

Selain data hujan, simulasi model HBV-96 juga memerlukan data evapotranspirasi potensial dan data debit aliran masuk. Data evapotranspirasi potensial menggunakan data hasil perhitungan bulanan yang tersedia, dengan data sepanjang 21 tahun dari tahun 1998 hingga tahun 2019. Sementara data debit aliran masuk, yang digunakan sebagai debit pengamatan, juga menggunakan data hasil perhitungan bulanan yang tersedia. Data debit aliran masuk tersebut, tersedia sepanjang 22 tahun, yaitu dari tahun 1998 hingga tahun 2020. Seluruh data dengan skala harian diubah menjadi data bulanan.

Koreksi Data Curah Hujan

Pendekatan koreksi data curah hujan berbasis satelit yang dilakukan pada penelitian ini menggunakan dua metode, yaitu koreksi langsung terhadap kurva probabilitas dengan menggunakan faktor multiplikasi dan metode persamaan regresi yang turunkan dari penelitian terdahulu (Mamenun dkk., 2014). Metode koreksi langsung terhadap kurva probabilitasnya diterapkan untuk seluruh produk hujan berbasis satelit, sedangkan metode yang menggunakan persamaan regresi hanya akan digunakan untuk produk TRMM.

Koreksi kurva probabilitas menggunakan faktor multiplikasi merupakan metode langsung dan sederhana yang sering digunakan dalam berbagai penelitian terdahulu dan menunjukkan hasil koreksi yang baik (Sanjaya & Yudianto, 2021; Sanjaya dkk., 2020). Metode ini mengelompokkan rentang probabilitas curah hujannya, lalu memberikan faktor multiplikasi koreksi untuk tiap-tiap rentangnya. Faktor multiplikasi koreksinya harus meningkat besarnya selaras dengan besaran kelas kelompok hujan bulanannya.

Sementara itu, koreksi data curah hujan menggunakan persamaan regresi yang memerlukan informasi berupa tipe pola hujan pada daerah yang dikaji. Waduk Selorejo berada di provinsi Jawa Timur, daerah tersebut memiliki tipe pola hujan monsun (Hermawan, 2010). Oleh karena itu, persamaan pola hujan monsun pada metode persamaan regresi (Mamenun dkk., 2014), yaitu:

$$Y = 7,094 X^{0,625} \dots\dots\dots (1)$$

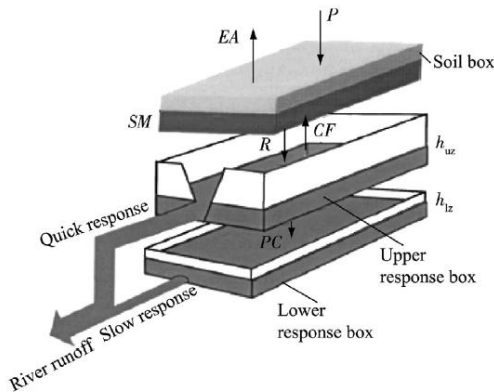
dimana,

Y : curah hujan bulanan terkoreksi [mm]

X : curah hujan bulanan [mm]

Model HBV

Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning (HBV) merupakan suatu model dengan konsep neraca air yang dikembangkan oleh *Swedish Meteorological and Hydrological Institute* (SMHI) pada tahun 1972. Data yang dibutuhkan untuk model HBV, terkhususnya pada daerah tropis, adalah data hujan, data evapotranspirasi, dan data debit. Seluruh data masukkan ini digunakan untuk kebutuhan kalibrasi model.



Gambar 3 Struktur Model HBV (sumber: Rusli, dkk., 2015)

Gambar 3 menunjukkan struktur sederhana dari model HBV. Pemodelan HBV dilakukan dengan membagi tanah menjadi beberapa lapisan, yaitu *soil moisture storage*, *upper response box* dan *lower response box*. *Soil moisture storage* merepresentasikan permukaan tanah di mana presipitasi dan evapotranspirasi terjadi, *upper response box* merepresentasikan lapisan tanah yang berada di bawah permukaan tanah di mana *recharge*, *capillarity flux* dan perkolasi terjadi, dan *lower response box* di mana aliran air tanah dapat ditemukan. *Soil moisture storage* (SM), *upper response box storage* (H_{uz}) dan *lower response box* (H_{Lz}) akan menghasilkan *general storage* (S).

Model HBV merepresentasikan kondisi aktual di lapangan melalui penggunaan parameter. Parameter-parameter tersebut terdiri atas kapasitas kelembaban tanah maksimum (FC), batasan evapotranspirasi (LP), kecepatan aliran melalui tanah akibat gaya kapilaritas (CFLUX), kecepatan aliran akibat proses perkolasi natural (PERC), koefisien debit bawah permukaan (K_f), koefisien debit air tanah (K_4), koefisien daya untuk debit bawah permukaan (α) dan koefisien daya untuk perkolasi dan pengisian kembali air tanah (β).

Fungsi Objektif

Evaluasi performa data berbasis satelit dalam penerapan model hujan limpasan (HBV) dibantu dengan alat bantu beberapa fungsi objektif dengan persamaan statistik. Beberapa fungsi yang

digunakan dalam penelitian ini, antara lain, koefisien korelasi, koefisien efisiensi *Nash-Sutcliffe* (Nash & Sutcliffe, 1970), dan *Relative Volume Error* (RVE).

Analisis korelasi merupakan analisis yang mempelajari hubungan antara dua variabel atau lebih (Roflin & Zulvia, 2021). Kuatnya hubungan antar variabel ini dinyatakan dalam koefisien korelasi yang dinyatakan dalam persamaan matematik berikut ini:

$$\rho_{(K,L)} = \frac{\sum(k-\bar{k})(l-\bar{l})}{\sqrt{\sum(k-\bar{k})^2 \sum(l-\bar{l})^2}} \dots\dots\dots (2)$$

keterangan:

- ρ : koefisien korelasi
- $\bar{k}$: rata-rata sampel K
- $\bar{l}$: rata-rata sampel L

Koefisien korelasi memiliki rentang antara -1 sampai dengan 1. Hubungan antara dua variabel dengan nilai minus satu (-1) memiliki hubungan berbanding terbalik, sedangkan nilai maksimum satu menyatakan hubungan kuat sebanding antara dua variabel. Sedangkan nilai nol (0), artinya kedua variabel tersebut tidak menunjukkan hubungan apapun. Koefisien korelasi tidak menunjukkan kausalitas antara dua variabel.

Sedangkan fungsi objektif lainnya dinyatakan dalam formula di bawah ini:

$$NS^2 = 1 - \frac{\sum_{j=1}^N [Q_m(j) - Q_o(j)]^2}{\sum_{j=1}^N [Q_o(j) - \bar{Q}_o]^2} \dots\dots\dots (3)$$

$$RVE = 100 \frac{\sum_{j=1}^N [Q_m(j) - Q_o(j)]}{\sum_{j=1}^N Q_o(j)} \dots\dots\dots (4)$$

keterangan:

- NS : koefisien efisien *Nash-Sutcliffe*
- RVE : *Relative Volume Error*
- j : data ke- j , $j=1, 2, 3, \dots, N$
- N : jumlah total variabel
- Q_o : debit pengamatan [m^3/s]
- Q_m : debit model [m^3/s]

NS dan RVE diasumsikan sebagai bilangan tak berdimensi, dimana kondisi ideal dari hasil evaluasi memiliki nilai NS sebesar 1,0 dan RVE sebesar nol.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Simulasi Model HBV

Simulasi model HBV dilakukan dengan membagi seluruh data hujan, baik data hujan pengamatan maupun data hujan satelit, menjadi 2 kelompok data, yaitu kelompok data dari tahun 1998 hingga tahun 2008 dan kelompok data dari tahun 2009 hingga tahun 2019. Data hujan pengamatan dari tahun 1998-2008 digunakan untuk memperoleh nilai parameter model HBV, sementara data hujan pengamatan dari tahun 2009

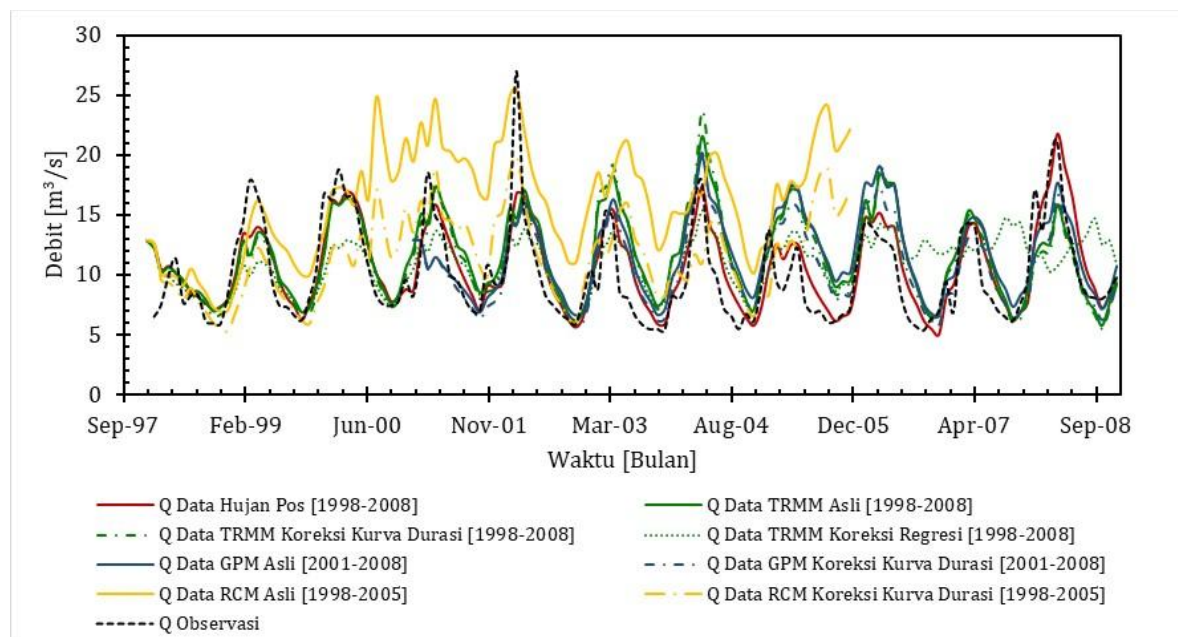
hingga tahun 2016 akan digunakan untuk mengklarifikasi nilai parameter yang diperoleh. **Tabel 1** menunjukkan nilai parameter yang diperoleh dari simulasi model HBV menggunakan data hujan pengamatan tahun 1998 hingga tahun 2008.

Hasil akhir dari simulasi model HBV berupa debit model [Q_m]. Hasil simulasi model HBV dengan menggunakan data hujan pengamatan dan data hujan satelit (TRMM, GPM dan RCM) dari tahun 1998 hingga tahun 2008 dapat dilihat pada **Gambar 4**.

Setelah debit model HBV diperoleh, dilakukan pencarian nilai korelasi dan objektivitas untuk seluruh data hujan, baik data hujan pengamatan maupun data hujan satelit, dari tahun 1998 hingga 2008, yang ditunjukkan pada **Tabel 2**. Hasil simulasi model HBV menggunakan data hujan pengamatan tahun 1998-2008 memberikan hasil yang baik dengan beberapa puncak pada grafik yang berbeda pada Q model dengan Q observasi, sementara bagian lembah grafik untuk Q model dan Q observasi hampir serupa

Tabel 1 Parameter model HBV yang diperoleh dari hasil simulasi menggunakan data hujan pengamatan tahun 1998-2008

FC	7500	K_f	0,25	SM	500
LP	4000	K_4	0,003	HUZ	400
PERC	0,9	Alfa [α]	0,002	HLZ	15000
CFLUX	0,2	Beta [β]	0,85		



Gambar 4 Hasil simulasi model HBV data hujan pengamatan dan data hujan satelit untuk tahun 1998-2008

Tabel 2 Nilai fungsi objektif hasil simulasi model untuk berbagai data hujan tahun 1998-2008

Q_{model}	ρ	NS	RVE
Data Pengamatan [1998-2008]	0,860	0,720	0,055
Data Satelit TRMM Asli [1998-2008]	0,654	0,228	0,152
Data Satelit TRMM Koreksi Kurva Durasi [1998-2008]	0,640	0,224	0,125
Data Satelit TRMM Koreksi Regresi [1998-2008]	0,627	0,389	-0,007
Data Satelit GPM Asli [2001-2008]	0,612	0,113	0,179
Data Satelit GPM Koreksi Kurva Durasi [2001-2008]	0,683	0,411	0,070
Data RCM Asli [1998-2005]	0,280	-3,128	0,625
Data RCM Koreksi Kurva Durasi [1998-2005]	0,305	-0,370	0,152

Hasil simulasi data hujan satelit TRMM asli tahun 1998-2008 menunjukkan hasil yang kurang baik, melalui grafik bagian puncak dan lembah pada **Gambar 4** memiliki deviasi besar dan nilai korelasi serta koefisien *Nash-Sutcliffe* di bawah 0,7. Kedua parameter ini menunjukkan bahwa model tidak mampu menangkap dengan baik pola debitnya. Koreksi hujan TRMM dengan kedua metode ini pun memberikan performa hasil yang menurun, apabila dibandingkan dengan data TRMM aslinya. Hal ini dapat terjadi oleh karena beberapa hal, seperti pengaruh akurasi data TRMM pada lokasi pegunungan (Fang dkk., 2013), yang mengakibatkan kedua metode koreksinya juga menjadi kurang cocok.

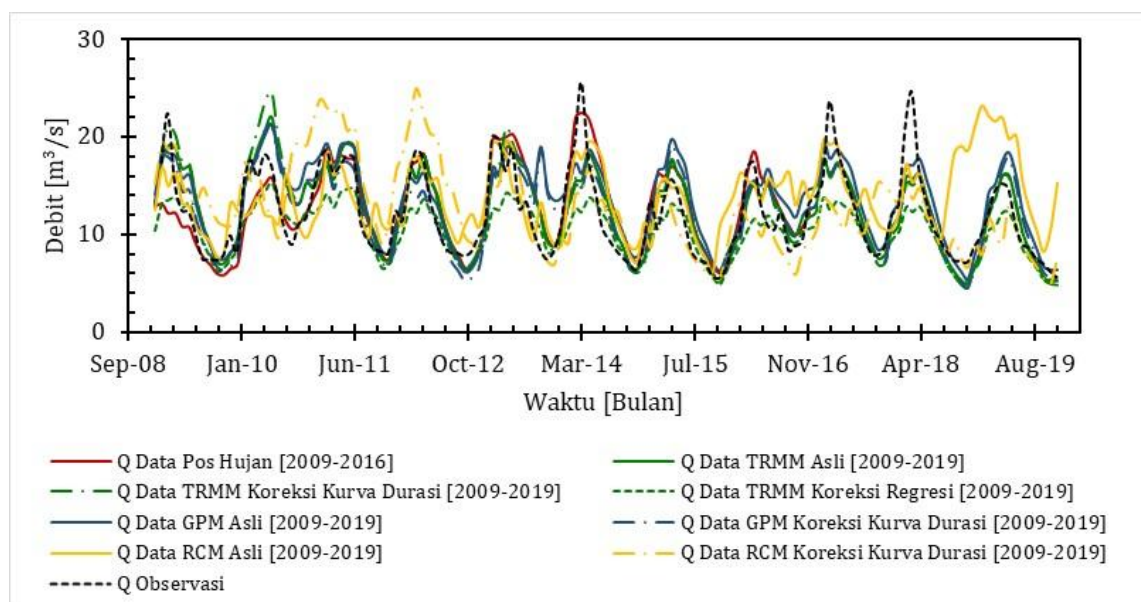
Hasil simulasi untuk data hujan satelit GPM asli tahun 2001-2008 menunjukkan hasil kurang baik, yang dilihat pada perbedaan besar pada bagian puncak untuk Q observasi dan Q model dalam grafik dan nilai korelasi dan koefisien NS yang lebih kecil dari 0,7. Hasil simulasi model HBV data hujan satelit GPM koreksi kurva durasi tahun 2001-2008 tidak baik, hal tersebut ditunjukkan melalui perbedaan besar pada grafik antara Q observasi dan Q model yang diperoleh dari hasil simulasi, serta nilai korelasi dan koefisien NS yang lebih kecil dari 0,7.

Hasil simulasi data satelit RCM asli (RCM_hist) tahun 1998-2005 merupakan hasil yang paling buruk diantara seluruh data berbasis satelit yang digunakan. Hasil simulasi model HBV untuk data hujan RCM koreksi kurva durasi (RCM_hist) [1998-2005] tidak baik. Grafik Q model dan Q observasi pada Gambar 2 menunjukkan perbedaan yang besar pada bagian puncak dan bagian lembah dalam grafik, serta nilai korelasi dan koefisien NS lebih kecil dari 0,7.

Nilai parameter yang telah diperoleh diklarifikasi dengan menggunakan data hujan pengamatan dari tahun 2009 hingga tahun 2016. Simulasi model HBV juga dilakukan kepada kelompok data hujan dari tahun 2009 hingga tahun 2019 untuk data hujan satelit TRMM, GPM dan RCM. Hasil simulasi kelompok data tahun 2009-2019 untuk data hujan pengamatan dan data hujan satelit yang ditampilkan pada **Gambar 5**.

Setelah hasil simulasi model HBV diperoleh, dilakukan pencarian terhadap nilai korelasi dan nilai objektivitas untuk setiap data hujan, baik data hujan pengamatan maupun data hujan satelit asli dan data hujan satelit yang dikoreksi, yang ditunjukkan pada **Tabel 3**. Hasil simulasi data hujan pengamatan tahun 2009-2016 baik dengan grafik bagian puncak dan lembah untuk Q observasi dan Q model hampir serupa dengan nilai korelasi dan koefisien *Nash-Sutcliffe* di atas 0,7.

Hasil simulasi model HBV untuk data hujan satelit TRMM asli tahun 2009-2019 memberikan hasil yang baik. Hal tersebut ditunjukkan melalui grafik bagian puncak dan lembah memiliki perbedaan yang tidak terlalu besar dan nilai korelasi di atas 0,7. Hasil simulasi untuk data satelit TRMM koreksi Kurva Durasi untuk tahun 2009-2019 baik. Terdapat perbedaan kecil pada bagian puncak dan bagian lembah pada grafik, serta nilai korelasi lebih besar dari 0,7. Hasil simulasi model untuk data satelit TRMM koreksi regresi untuk tahun 2009-2019 tidak baik, hal tersebut dapat dilihat pada gambar di atas di mana grafik bagian puncak dan lembah untuk Q model dan Q observasi memiliki perbedaan yang besar.



Gambar 5 Hasil simulasi model HBV data hujan pengamatan dan data hujan satelit untuk tahun 2009-2019

Hasil simulasi model data hujan satelit GPM asli tahun 2009-2019 tidak baik, yang nampak melalui grafik bagian puncak dan bagian lembah dari hasil simulasi memiliki perbedaan besar dan nilai korelasi serta koefisien NS yang lebih kecil dari 0,7. Hasil simulasi model HBV data hujan satelit GPM koreksi kurva durasi tahun 2009-2019 tidak baik. Terdapat perbedaan besar pada grafik bagian puncak dari hasil simulasi model, dan nilai korelasi yang diperoleh lebih besar dari 0,7.

Hasil simulasi model HBV untuk data satelit RCM asli (RCM_rcp26) tahun 2009-2019 tidak baik, yang ditunjukkan pada grafik bagian puncak dan bagian lembah dalam grafik pada **Gambar 5** memiliki perbedaan yang besar dan nilai korelasi dan koefisien NS lebih kecil dari 0,7. Hasil simulasi data hujan RCM koreksi kurva durasi (RCM_rcp26) [2009-2019] tidak baik. Berdasarkan **Gambar 5**, grafik Q observasi dan Q model memiliki perbedaan besar pada bagian puncak dan bagian lembahnya, serta nilai korelasi dan koefisien NS yang diperoleh lebih kecil dari 0,7.

Keandalan Data Curah Hujan Satelit

Data curah hujan pengamatan tidak selalu tersedia pada wilayah tertentu sehingga dapat digunakan alternatif berupa data hujan satelit.

Ketersediaan data hujan satelit lebih detail dan cakupan wilayah yang terukur cukup luas karena pengukuran dilakukan dengan menggunakan sensor dan radar. Namun, data yang diperoleh dari hasil pembacaan satelit berbeda-beda karena metode pembacaan untuk masing-masing satelit berbeda. Keandalan data hujan satelit apabila digunakan dalam penelitian belum diketahui sehingga perlu dilakukan koreksi terhadap data hujan satelit tersebut.

Data hujan pengamatan dan data hujan satelit dari tahun 2001 hingga tahun 2016 dibuat ke dalam bentuk kurva durasi. Langkah selanjutnya adalah mencari nilai R_{50} , R_{75} , R_{80} , dan R_{90} dari setiap data, yang ditunjukkan pada **Tabel 4** berikut, serta nilai persentase perbedaan untuk setiap data hujan satelit, baik data asli maupun data terkoreksi, terhadap data hujan pengamatan yang ditampilkan pada **Tabel 5**.

Berdasarkan **Tabel 5**, data curah hujan satelit TRMM koreksi kurva durasi memiliki tingkat keandalan terbaik dengan persentase perbedaan rata-rata terkecil, sementara data curah hujan satelit RCM tidak terkoreksi memiliki tingkat keandalan terburuk dengan persentase perbedaan rata-rata yang cukup besar.

Tabel 3 Nilai objektivitas hasil simulasi model HBV menggunakan data debit hasil hujan pengamatan dan hasil data hujan satelit tahun 2009-2019

Q_{model}	CORREL	NS	RVE
Data Pengamatan [2009-2016]	0,832	0,710	0,050
Data Satelit TRMM Asli [2009-2019]	0,824	0,659	0,034
Data Satelit TRMM Koreksi Kurva Durasi [2009-2019]	0,806	0,669	0,022
Data Satelit TRMM Koreksi Regresi [2009-2019]	0,621	0,225	-0,147
Data Satelit GPM Asli [2009-2019]	0,646	0,274	0,152
Data Satelit GPM Koreksi Kurva Durasi [2009-2019]	0,784	0,672	0,010
Data Satelit RCM Asli [2009-2019]	0,520	0,230	0,107
Data Satelit RCM Koreksi Kurva Durasi [2009-2019]	0,578	0,291	0,044

Tabel 4 Curah Hujan Data Hujan Pengamatan dan Data Hujan Satelit pada R_{50} , R_{75} , R_{80} dan R_{90}

	R_{50}	R_{75}	R_{80}	R_{90}
Data Hujan Pengamatan	170,69	21,71	12,26	0,33
TRMM Tidak Terkoreksi	204,11	37,52	22,14	2,83
TRMM Koreksi Regresi	191,44	107,19	79,44	46,36
TRMM Koreksi Kurva Durasi	179,62	26,26	15,50	1,98
GPM Tidak Terkoreksi	220,96	62,04	39,49	12,85
GPM Koreksi Kurva Durasi	172,35	34,12	19,74	6,42
RCM Tidak Terkoreksi	254,50	168,28	144,40	72,47
RCM Koreksi Kurva Durasi	180,70	54,88	41,86	12,41

Tabel 5 Persen Beda untuk Tiap Probabilitas Data Hujan Berbasis Satelit terhadap Data Hujan Pengamatan

Persen Beda	R ₅₀ [%]	R ₇₅ [%]	R ₈₀ [%]	R ₉₀ [%]
TRMM Tidak Terkoreksi	19,58	72,79	80,54	744,26
TRMM Koreksi Regresi	12,16	393,62	547,80	13749,67
TRMM Koreksi Kurva Durasi	5,23	20,95	26,38	490,98
GPM Tidak Terkoreksi	29,45	185,73	221,99	3737,67
GPM Koreksi Kurva Durasi	0,97	57,15	60,99	1818,84
RCM Tidak Terkoreksi	49,10	674,97	1077,49	21549,06
RCM Koreksi Kurva Durasi	5,86	152,75	241,34	3606,13

Keandalan Data Hujan Satelit dalam Menentukan Debit Aliran Masuk

Debit aliran masuk yang diperoleh dari pemodelan menggunakan model HBV kemudian dibandingkan dengan debit aliran masuk untuk data hujan pengamatan untuk tahun 2001 hingga tahun 2016. Debit aliran masuk data hujan pengamatan dengan data hujan satelit dari tahun 2001 hingga tahun 2016 dibuat menjadi kurva durasi untuk mencari nilai Q₅₀, Q₇₅, Q₈₀, Q₉₀ dan Q₉₅ dari setiap data. Nilai tersebut dicari karena analisa dilakukan untuk menentukan ketersediaan air pada waduk dalam bentuk debit aliran masuk. Hasil perhitungan nilai tersebut ditampilkan pada **Tabel 6**.

Kemudian, nilai persentasi perbedaan debit aliran masuk untuk setiap data hujan pengamatan dan data hujan satelit dihitung, baik data tidak

dikoreksi maupun data terkoreksi, terhadap debit aliran masuk observasi yang ditampilkan pada **Tabel 7**.

Berdasarkan nilai pada **Tabel 7**, debit model data hujan satelit GPM koreksi Kurva Durasi memiliki persentase perbedaan rata-rata paling kecil terhadap debit observasi dibandingkan dengan persentase perbedaan debit model data hujan lainnya, sehingga dapat disimpulkan bahwa debit model data hujan satelit GPM koreksi Kurva Durasi memiliki tingkat keandalan terbaik. Debit model data satelit RCM tidak terkoreksi memiliki persentase perbedaan rata-rata paling besar apabila dibandingkan dengan debit model data hujan lainnya, dengan kata lain debit model data satelit RCM tidak terkoreksi memiliki tingkat keandalan terburuk.

Tabel 6 Debit Aliran Masuk pada Q₅₀, Q₇₅, Q₈₀, Q₉₀ dan Q₉₅

Persen Durasi	Q ₅₀	Q ₇₅	Q ₈₀	Q ₉₀	Q ₉₅
Debit Observasi [m ³ /s]	10,05	8,03	7,45	6,57	6,04
Data Pengamatan Hujan	11,39	8,58	7,92	6,68	6,18
TRMM Tidak Terkoreksi	12,59	9,33	8,83	7,34	6,77
TRMM Koreksi Regresi	12,33	7,46	6,08	4,17	3,58
TRMM Koreksi Kurva Durasi	11,94	8,88	8,43	7,14	6,42
GPM Tidak Terkoreksi	12,94	9,33	8,68	7,69	6,90
GPM Koreksi Kurva Durasi	11,86	8,24	7,76	6,61	6,26
RCM Tidak Terkoreksi	13,49	10,94	10,49	9,38	7,86
RCM Koreksi Kurva Durasi	12,40	10,28	9,75	8,27	7,44

Tabel 7 Persen Beda Hasil Debit Model dengan Berbagai Jenis Data Hujan terhadap Debit Pengamatan

Persen Beda	Q ₅₀ [%]	Q ₇₅ [%]	Q ₈₀ [%]	Q ₉₀ [%]	Q ₉₅ [%]
Data Pengamatan Hujan	13,29	6,87	6,33	1,60	2,32
TRMM Tidak Terkoreksi	25,24	16,19	18,59	11,62	11,98
TRMM Koreksi Regresi	22,66	7,07	18,40	36,55	40,78
TRMM Koreksi Kurva Durasi	18,81	10,60	13,15	8,65	6,32
GPM Tidak Terkoreksi	28,71	16,15	16,53	17,03	14,23
GPM Koreksi Kurva Durasi	18,01	2,66	4,19	0,53	3,68
RCM Tidak Terkoreksi	34,15	36,19	40,83	42,74	30,10
RCM Koreksi Kurva Durasi	23,37	28,06	30,91	25,78	23,16

Secara umum, data hujan satelit TRMM memiliki performa yang lebih unggul untuk kurva durasi debit model sintesis, dibandingkan GPM dan RCM. Hal ini konsisten dengan hasil evaluasi data hujan pada **Tabel 2**, dengan nilai korelasi yang lebih baik dibandingkan dengan hujan berbasis satelit lainnya. Selain itu, data hujan satelit TRMM koreksi kurva durasi memiliki tingkat keandalan tertinggi ketika dibandingkan dengan data hujan pengamatan. Sementara data hujan satelit GPM koreksi kurva durasi memiliki tingkat keandalan tertinggi ketika digunakan dalam simulasi model HBV dan dibandingkan dengan debit aliran masuk observasi, nilai perbedaannya juga semakin kecil untuk debit andal makin besar. Hal tersebut terjadi karena GPM memiliki kemampuan yang lebih baik dalam pengukuran hujan pada intensitas rendah dibandingkan dengan TRMM (Sanjaya dkk., 2022; Tong dkk., 2018).

KESIMPULAN

Secara metode koreksi hujan, metode koreksi dengan persamaan regresi tidak cocok diaplikasikan pada pemodelan hidrologi. Hal ini ditunjukkan pada hasil koreksi hujan satelit TRMM yang buruk. Sedangkan, koreksi dengan metode kurva durasi dianggap lebih baik, karena hasil penyimpangannya berkurang sampai dengan setengah kali dari data hujan satelit aslinya, terkhususnya untuk data GPM.

Secara umum, data hujan GPM dan TRMM jauh lebih unggul daripada RCM, baik dari hasil model sintesis, maupun aplikasinya dalam debit andal. Data hujan GPM dan TRMM asli dan koreksi kurva durasi juga lebih baik dibandingkan data lainnya. Dari seluruh aplikasi yang ada, data hujan TRMM kurva durasi menunjukkan konsistensi hasil terbaik.

Secara umum, data hujan RCM asli, baik data RCM_hist maupun data RCM_rcp26, memiliki penyimpangan terbesar, dengan nilai korelasi 0,38. Hal ini menunjukkan bahwa data hujan RCM belum mampu menangkap pola hujan yang pada lokasi Selorejo. Performa data hujan RCM, baik data asli maupun data terkoreksi, memiliki hasil yang buruk. Data hujan satelit RCM menghasilkan nilai NS negatif ketika diaplikasikan ke dalam model HBV, yang artinya data RCM ini tidak direkomendasikan digunakan pada pemodelan hidrologi secara langsung dengan data yang minimal.

Saran untuk memperbaiki penelitian ini adalah dengan menggunakan metode koreksi yang lebih cocok untuk RCM, seperti *statistical bias*, karena hujan yang dihasilkan berupa hujan regional kawasan. Sedangkan untuk data hasil pengukuran satelit, faktor elevasi atau lokal harus dipertimbangkan pada saat proses koreksi.

Tentunya, hasil koreksi hujan akan menjadi lebih baik apabila pengukuran data hujan pengamatan yang dimiliki lebih banyak lagi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis berterima kasih kepada Pusat Studi Teknik Sumber Daya Air Universitas Katolik Parahyangan yang telah menyediakan data-data yang diperlukan dalam studi ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Ali, A. F., Xiao, C., Zhang, X., Adnan, M., Iqbal, M., & Khan, G. (2018). Projection of future streamflow of the Hunza River Basin, Karakoram Range (Pakistan) using HBV hydrological model. *Journal of Mountain Science*, 15(10), 2218–2235. <https://doi.org/10.1007/s11629-018-4907-4>
- Booij, M. J. (2005). Impact of climate change on river flooding assessed with different spatial model resolutions. *Journal of Hydrology*, 303(1–4), 176–198. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.07.013>
- Fang, J., Du, J., Xu, W., Shi, P., Li, M., & Ming, X. (2013). Spatial downscaling of TRMM precipitation data based on the orographical effect and meteorological conditions in a mountainous area. *Advances in Water Resources*, 61, 42–50. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2013.08.011>
- Hermawan, E. (2010). Pengelompokan Pola Curah Hujan yang Terjadi di Beberapa Kawasan Pulau Sumatera Berbasis Hasil Analisis Teknik Spektal. *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*, 11(2). <https://doi.org/10.31172/jmg.v11i2.67>
- Huffman, G. (2023). *GPM IMERG Final Precipitation L3 1 day 0.1 degree x 0.1 degree V06* [Dataset]. NASA Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center. <https://doi.org/10.5067/GPM/IMERGDF/DAY/06>
- Huffman, G. J., Bolvin, D. T., Nelkin, D. J., & Adler, R. F. (2018). *TRMM (TMPA) Precipitation L3 1 day 0.25 degree x 0.25 degree V7* (Versi 07) [Dataset]. NASA Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center. <https://doi.org/10.5067/TRMM/TMPA/DAY/7>
- Jahanshahi, A., Roshun, S. H., & Booij, M. J. (2024). Comparison of satellite-based and reanalysis precipitation products for hydrological modeling over a data-scarce region. *Climate Dynamics*, 62(5), 3505–3537. <https://doi.org/10.1007/s00382-023-07078-x>
- Lindström, G., Johansson, B., Persson, M., Gardelin, M., & Bergström, S. (1997). Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model. *Journal of Hydrology*, 201(1–4), 272–288.

- [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(97\)00041-3](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(97)00041-3)
- Mamenun, M., Pawitan, H., & Sopaheluwakan, A. (2014). Validasi dan Koreksi Data Satelit TRMM pada Tiga Pola Hujan di Indonesia. *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*, 15(1). <https://doi.org/10.31172/jmg.v15i1.169>
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282–290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- Ningrum, W., Apip, & Narulita, I. (2024). Comparison of the application of HBV and HEC-HMS hydrology models for accessing climate change in the upper Citarum Watershed, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1314(1), 012072. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1314/1/012072>
- P., D. S. U., Sahriman, S., & Thamrin, S. A. (2021). Pemodelan Statistical Downscaling dengan Regresi Modifikasi Jackknife Ridge Dummy Berbasis K-means untuk Pendugaan Curah Hujan. *ESTIMASI: Journal of Statistics and Its Application*, 19–28. <https://doi.org/10.20956/ejsa.v2i1.11189>
- Poméon, T., Jackisch, D., & Diekkrüger, B. (2017). Evaluating the performance of remotely sensed and reanalysed precipitation data over West Africa using HBV light. *Journal of Hydrology*, 547, 222–235. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.01.055>
- Roflin, E., & Zulvia, F. E. (2021). *Kupas Tuntas Analisis Korelasi* (1 ed.). PT. Nasya Expanding Management.
- Rusli, S. R., Yudianto, D., & Liu, J. (2015). Effects of temporal variability on HBV model calibration. *Water Science and Engineering*, 8(4), 291–300. <https://doi.org/10.1016/j.wse.2015.12.002>
- Rusli, S. R., Yudianto, D., & Tao, L. J. (2015, Oktober 7). *Significance of Conceptual Rainfall – Runoff Model Over Synthetic Unit Hydrograph Method in Simulating High Flow; Case Study in Jiangwan Catchment, China*. The First International Conference on Civil Engineering and Infrastructure (ICCEI 2015), Makassar.
- Sanjaya, S., & Yudianto, D. (2021). Application of TRMM in Deriving Intensity-Duration-Frequency Curve in Bandung Area. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 832(1), 012046. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/832/1/012046>
- Sanjaya, S., Yudianto, D., Adidarma, W., & Fitriana, F. (2022). Studi Pemanfaatan Curah Hujan Bulanan Satelit GPM di Kawasan Bandung Raya dengan Validasi Silang Monte-Carlo. *Jurnal Rekayasa Konstruksi Mekanika Sipil (JRKMS)*, 31–40. <https://doi.org/10.54367/jrkms.v5i1.1804>
- Senjaya, T., Yudianto, D., Yuebo, X., & Adidarma, W. K. (2020). Application of TRMM in the Hydrological Analysis of Upper Bengawan Solo River Basin. *Journal of the Civil Engineering Forum*, 6(3), 309. <https://doi.org/10.22146/jcef.57125>
- Tong, K., Zhao, Y., Wei, Y., Hu, B., & Lu, Y. (2018). Evaluation and Hydrological Validation of GPM Precipitation Products over the Nanliu River Basin, Beibu Gulf. *Water*, 10(12), 1777. <https://doi.org/10.3390/w10121777>
- Usman, M., Ndehedehe, C. E., Ahmad, B., Manzanar, R., & Adeyeri, O. E. (2022). Modeling streamflow using multiple precipitation products in a topographically complex catchment. *Modeling Earth Systems and Environment*, 8(2), 1875–1885. <https://doi.org/10.1007/s40808-021-01198-1>
- Usman, M., Ndehedehe, C. E., Farah, H., Ahmad, B., Wong, Y., & Adeyeri, O. E. (2022). Application of a Conceptual Hydrological Model for Streamflow Prediction Using Multi-Source Precipitation Products in a Semi-Arid River Basin. *Water*, 14(8), 1260. <https://doi.org/10.3390/w14081260>
- Vernimmen, R. R. E., Hooijer, A., Mamenun, Aldrian, E., & Van Dijk, A. I. J. M. (2012). Evaluation and bias correction of satellite rainfall data for drought monitoring in Indonesia. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(1), 133–146. <https://doi.org/10.5194/hess-16-133-2012>
- Yudianto, D., & Sari, A. (2015, Oktober 7). *Study on Hydrological Characteristics of the Upper Catchment of Selorejo Reservoir*. The First International Conference on Civil Engineering and Infrastructure (ICCEI 2015), Makassar.
- Yudiarso, R. A., Suhartanto, E., & Soetopo, W. (2014). Upaya Konservasi Waduk Selorejo Berdasarkan Perkembangan peta Penggunaan Lahan dalam Kurun Waktu Tahun 2000-2011. *Jurnal Teknik Pengairan: Journal of Water Resources Engineering*, 5(1).