

EVALUASI KINERJA MODEL HUJAN ALIRAN LUMPED DALAM PENENTUAN ALIRAN DASAR DI DAERAH ALIRAN SUNGAI CITARUM

EVALUATION OF LUMPED RAINFALL-RUNOFF MODELS FOR DETERMINING BASEFLOW IN THE CITARUM WATERSHED

Brigita Diaz Primadita^{1,2)*} M. Syahril Badri Kusuma¹⁾ Waluyo Hatmoko²⁾

¹⁾Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung
Jl. Ganesa no. 10, Coblong, Bandung 40135, Indonesia

²⁾ Balai Hidrologi dan Lingkungan Keairan, Direktorat Bina Teknik SDA, Kementerian PUPR
Jl. Ir. H. Juanda no. 193, Coblong, Bandung 40135, Indonesia

*Correspondent email: brigita.diaz@gmail.com

Diterima: 11 Maret 2023; Direvisi: 14 Juni 2023; Disetujui: 05 September 2023

ABSTRACT

Studies related to baseflow modeling are still rarely carried out compared to flood modeling. The commonly used rainfall-runoff models oversimplify the baseflow process, which leads to poor low-flow simulations. Baseflow plays an important role in regulating the seasonal distribution of river flow, maintaining aquatic habitats, and transporting chemical nutrients in the river system. If the baseflow decreases in the Citarum Watershed, there will be consequential impacts on the Java-Bali electricity supply, rice field irrigation water, raw water, and industrial water in West Java and DKI Jakarta. This study evaluates six lumped-rainfall-runoff models that are popularly used in the Ministry of Public Works and Housing of Indonesia, namely Mock, NRECA, HBV96, NAM, Sacramento, and Empirical to simulate baseflow on the Nanjung Subwatershed and Cisokan Subwatershed. The baseflow simulations from each model are compared with the observational baseflow. The observational baseflow is obtained using the Recursive Digital Filter Lyne and Hollick one filter methods. To quantify model comparison, a multi-criteria matrix is used consisting of the model convenience, baseflow parameters, and model performance. This study shows that the Mock Model gives the best results with a "Satisfactory" score for simulating baseflow in NSE and RMSE values, the Q_{50} - Q_{80} differences, and the difference in flow heights compared to the other five models. In addition, the Mock Model is also relatively easy, accessible, and familiar to use.

Keywords: Baseflow, Rainfall-Runoff, Lumped, Citarum, Recursive Digital Filter

ABSTRAK

Kajian terkait pemodelan aliran dasar masih jarang dilakukan dibandingkan pemodelan banjir. Model hujan-aliran yang umumnya digunakan mengasumsikan perhitungan aliran dasar secara sederhana sehingga menghasilkan simulasi aliran rendah yang buruk. Padahal penentuan aliran dasar sangat diperlukan mengingat pentingnya fungsi aliran dasar dalam mengatur distribusi musiman aliran sungai, mempertahankan habitat air, dan mengangkut nutrisi-bahan kimia dalam sistem sungai. Apabila terjadi penurunan aliran dasar di Daerah Aliran Sungai (DAS) Citarum maka dampaknya akan signifikan pada pasokan listrik Jawa-Bali, air irigasi sawah, air baku, dan air industri di Jawa Barat dan DKI Jakarta. Penelitian ini mengevaluasi enam model hujan-aliran lumped yang populer digunakan di Kementerian PUPR, yaitu Mock, NRECA, HBV96, NAM, Sacramento, dan Empiris untuk menentukan besarnya aliran dasar pada Sub-DAS Nanjung dan Sub-DAS Cisokan. Hasil pemodelan kemudian dibandingkan dengan hasil pemisahan aliran dasar dari debit observasi yang diperoleh melalui Metode Recursive Digital Filter Lyne dan Hollick satu filter. Untuk memudahkan perbandingan model, digunakan matriks multi-kriteria dengan parameter pembandingan kemudahan pemodelan, ada tidaknya parameter aliran dasar, dan kinerja model. Penelitian menunjukkan Model Mock memberikan hasil paling baik dengan skor "Memuaskan" untuk mensimulasikan aliran dasar di lokasi kajian berdasarkan nilai NSE dan RMSE, selisih Q_{50} - Q_{80} , dan selisih tinggi aliran dibandingkan kelima model lain. Selain itu, Model Mock juga relatif mudah, aksesibel, dan familiar untuk menentukan aliran dasar di lokasi kajian.

Kata Kunci: Aliran dasar, Hujan-Aliran, Lumped, Citarum, Recursive Digital Filter

PENDAHULUAN

DOI: <https://doi.org/10.32679/jth.v14i2.735>

© Bintek SDA, Dirjen SDA, Kementerian PUPR Naskah ini di bawah kebijakan akses terbuka dengan lisensi CC-BY-SA
(<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>)

Aliran dasar didefinisikan sebagai parameter hidrologi yang mewakili respons daerah tangkapan terhadap faktor meteorologi dan faktor lingkungan lainnya yang dipengaruhi oleh alam dan manusia, termasuk geomorfologis yang terkait dengan topografi permukaan dan proses tanah serta geologis (Bloomfield *et al.*, 2021). Aliran dasar memiliki peran vital dalam ekosistem air, terutama dalam mengatur distribusi musiman aliran sungai; mempertahankan habitat air, menstabilkan pasokan air, dan mengangkut nutrisi-bahan kimia dalam sistem sungai (Singh *et al.*, 2018). Meskipun peran aliran dasar sangat penting, kebanyakan model hujan-aliran hanya berfokus untuk mensimulasikan debit tinggi dan debit banjir. Selain itu, di dalam pemodelannya proses aliran dasar sering kali disederhanakan sehingga menghasilkan debit aliran rendah yang buruk (Matonse and Kroll, 2013).

Di Indonesia, pelaku utama dari perumusan serta pelaksanaan kebijakan di bidang konservasi sumber daya air, pendayagunaan sumber daya air dan pengendalian daya rusak air pada sumber air permukaan, dan pendayagunaan air adalah Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR) melalui Direktorat Jenderal Sumber Daya Air (SDA) (Peraturan Presiden Nomor 27 Tahun 2020). Sejumlah model hujan-aliran yang umum dan populer digunakan di lingkup Kementerian PUPR adalah Mock, NRECA, HBV96, NAM, Sacramento, dan Empiris.

Kajian ini mengambil lokasi di Daerah Aliran Sungai (DAS) Citarum yang merupakan salah satu DAS paling strategis di Indonesia. Apabila terjadi penurunan aliran dasar di DAS Citarum, maka 20% pasokan listrik Jawa-Bali, irigasi sawah lebih dari 240.000 ha, serta ketersediaan air baku dan air industri di Jawa Barat dan DKI Jakarta akan terdampak (Hidayat *et al.*, 2013). Dalam kajian ini, dipilih dua sub-DAS di DAS Citarum yakni Sub-DAS Nanjung dan Sub-DAS Cisokan. Kedua sub-DAS dipilih karena memiliki data debit tercatat dengan panjang lebih dari sepuluh tahun, tidak memiliki tren, dan tidak terpengaruh operasi Waduk Kaskade Citarum.

DAS Citarum mengalami perubahan perilaku sungai tersebut, yang sangat terlihat dari berubahnya pola debit aliran sepanjang tahun, dengan semakin besarnya debit yang datang pada musim penghujan dan semakin kecilnya debit sungai pada musim kemarau (Rosliani *et al.*, 2013). Penelitian yang dilakukan oleh Kusuma *et al.* pada tahun 2011 dan 2018 juga menunjukkan karakteristik aliran Sungai Citarum telah mengalami perubahan yang disebabkan oleh faktor antropogenik, seperti tutupan lahan dan perubahan

iklim, yang menyebabkan korelasi antara curah hujan dan limpasan Sungai Citarum lebih kompleks sehingga metode analisis curah hujan-limpasan saat ini harus diperbaiki. Dalam kajian tersebut juga disimpulkan kurangnya keandalan data hidrologi, hidrometeorologi, dan perubahan penggunaan lahan menjadi penghalang yang signifikan untuk memperkirakan tren karakteristik di Sungai Citarum dengan benar. Perubahan tata guna lahan memainkan peran penting dalam mengurangi debit minimum dan meningkatkan debit maksimum (Kuntoro *et al.*, 2017).

Tujuan kajian ini adalah untuk mengevaluasi hasil perhitungan aliran dasar melalui pemodelan hujan limpasan memanfaatkan sejumlah model matematik yang umum dan populer digunakan di Kementerian PUPR. Lokasi studi yang ditinjau di dalam kajian ini adalah Sub-DAS Nanjung dan Sub-DAS Cisokan, WS Citarum.

METODOLOGI

Kajian ini dilakukan dalam beberapa tahap yakni pengumpulan data, pemodelan hujan limpasan, pemisahan aliran dasar dari debit aliran total observasi, dan evaluasi kinerja model.

Data

Dalam analisis ini digunakan data hujan observasi bulanan, data debit observasi bulanan, dan data fisik sungai. Data hujan observasi yang digunakan berasal dari Pos Curah Hujan (PCH) Cibeureum, Cibiru, Cicalengka, Cileunca, Cipaku – Paseh, Cisondari Pasir Jambu, Dago Pakar – Bengkok, Jatiroke, Kayu Ambon, Kertamanah, Lembang, Margahayu I, Rancaekek, Cipanas Pangalengan, Cisondari, Cisokan, dan Cibukamanah 119.a tahun 2005-2020. Data hujan observasi bersumber dari Direktorat Bina Teknik SDA Kementerian PUPR. Data debit observasi bersumber dari Direktorat Bina Teknik SDA Kementerian PUPR dan Pembangkit Jawa-Bali (PJB) Cirata yaitu PDA Nanjung dan PDA Cisokan tahun 2005-2020. Data fisik sungai terdiri dari data topografi (didapat dari DEMNAS yang diakses melalui <https://tanahair.indonesia.go.id/> tahun 2019), data tata guna lahan (Rupabumi Indonesia/ RBI tahun 2016), dan data jenis tanah (U.S. Department of Agriculture tahun 2010).

Metode Hujan Aliran

Di dalam kajian ini terdapat enam model yang dievaluasi hasilnya dalam mensimulasikan aliran dasar yang dipilih berdasarkan akses tak terbatas (*open accessed*), kemudahan pemodelan, kompleksitas data, dan kepopulerannya dalam lingkup Kementerian PUPR (kepopuleran

diindikasikan dengan adanya sudah terdapat Standar Nasional Indonesia (SNI), Pedoman Perhitungan, Modul Training, atau Naskah Akademik PUPR). Struktur model hujan-aliran yang mudah digunakan, fleksibel untuk dimodifikasi, dan memberikan akses tak terbatas (*open accessed*) juga merupakan hal yang penting. Burek *et al.*, (2020) menyebutkan pemodelan yang memfasilitasi pertukaran data dan hasil dalam format yang mudah dikomunikasikan akan memberikan pemahaman yang lebih baik sehingga menghasilkan simulasi model yang lebih baik. Enam model terpilih yaitu Model FJ Mock, National Rural Electric Cooperative Association (NRECA), Nedbør-Afstrømnings Model (NAM), (Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning 96) HBV-96, Sacramento, dan empiris.

1) Model FJ Mock

Model F.J. Mock mengacu pada *water balance*, dimana terdapat lima parameter yang menggambarkan karakteristik DAS yang berpengaruh yaitu singkapan lahan, koefisien infiltrasi, kapasitas kelembaban tanah, simpanan awal, dan faktor resesi air tanah (Zaim *et al.*, 2016). Dalam Model Mock, parameter model yang perlu diperhatikan untuk simulasi aliran dasar adalah presentase lahan terbuka, koefisien infiltrasi, koefisien bulanan resesi aliran, dan kapasitas penyimpanan air tanah.

2) Model NRECA

Model NRECA memiliki lima parameter untuk menghitung debit yaitu indeks kapasitas penyimpanan lengas tanah, indeks laju debit dari penyimpanan air tanah ke sungai, fraksi limpasan yang keluar dari DAS sebagai aliran dasar atau aliran air tanah, penyimpanan kelembapan awal, dan penyimpanan air tanah awal (Komariah and Matsumoto, 2019). Pada model NRECA parameter model yang perlu diperhatikan untuk mensimulasikan aliran dasar adalah permeabilitas tanah, kapasitas tampungan air tanah, dan limpasan air tanah.

3) Model NAM

Model NAM terdiri atas tiga elemen penyimpanan utama yakni zona penyimpanan atas yang mewakili vegetasi, cekungan dan tanah dekat permukaan (budidaya), penyimpanan zona bawah yang mewakili zona akar dan horizon tanah utama, dan penyimpanan air tanah yang merupakan batuan pembawa air (Ngoc *et al.*, 2013). Pada Model NAM, hampir seluruh parameter model sensitif terhadap aliran dasar. Parameter yang berpengaruh dominan adalah kapasitas lengas tanah, koefisien aliran air tanah, koefisien

interflow, koefisien *overlandflow*, dan konstanta waktu *routing* aliran air tanah.

4) Model HBV-96

Model HBV-96 membagi lapisan tanah menjadi tiga dan satu *channel routing* berdasarkan respon tanah terhadap hujan. Empat lapisan tersebut diantaranya yaitu: X1 (*Soil Moisture Storage*), X2 (*Upper Storage*), X3 (*Lower Storage/Ground Water*) dan X4 (aliran air sungai) (Senjaya *et al.*, 2020). Pada Model HBV96, parameter model yang mempengaruhi aliran dasar adalah kecepatan air mengalir ke bawah karena proses perkolasi alami, koefisien daya untuk *recharge* dan perkolasi, tinggi kelembaban tanah aktual, koefisien untuk aliran air tanah, dan kapasitas penyimpanan kelembaban tanah maksimum.

5) Model Sacramento

Model Sacramento mendefinisikan kolom tanah menjadi dua zona tanah atas dan bawah, dengan total 17 parameter (Wei *et al.*, 2016). Pada Model Sacramento, hampir seluruh parameter mempengaruhi perhitungan aliran dasar kecuali kapasitas zona air tegangan atas, laju drainase lateral zona atas, eksponen dalam persamaan perkolasi. Parameter yang sangat berpengaruh adalah kapasitas zona air bebas atas, fraksi kedap air permanen, tingkat drainase dari penyimpanan air primer bebas zona bawah, tingkat drainase zona bawah penyimpanan air tambahan bebas, fraksi air resapan yang mengalir langsung ke penyimpanan air bebas zona bawah, dan fraksi penyimpanan air bebas zona bawah yang tidak tersedia untuk keperluan transpirasi.

6) Model Empiris

Model hujan aliran empiris menghitung pengaruh perubahan faktor iklim terhadap perubahan debit (Fu *et al.*, 2007). Metode ini menganggap perubahan debit hanya disebabkan oleh variabel tertentu, seperti hujan dan evaporasi yang memudahkan pengguna yang tidak memiliki data karakteristik DAS. Dalam metode empiris, perhitungan aliran dasar diperhitungkan dengan metode yang sama dengan pemisahan aliran dasar dari debit total pada debit observasi.

Metode Evaluasi Model Hujan-Aliran

Dalam kajian ini, akan digunakan perbandingan hasil simulasi model hujan aliran secara visual dan secara statistik. Selain itu juga akan diperbandingkan rerata dari jumlah Tinggi Aliran (TA) dalam satu tahun. Perbandingan secara visual menggunakan visualisasi deret waktu hasil simulasi dengan observasi, sedangkan secara statistik akan

digunakan dua parameter yakni Nash–Sutcliffe efficiency (NSE) dan RMSE. Selain selisih statistik antara aliran dasar observasi dan hasil simulasi, dibandingkan juga selisih rerata Tinggi Aliran (TA) tahunan, selisih Q_{50} , serta selisih Q_{80} antara observasi dan debit simulasi, dengan selisih semakin mendekati nol maka menunjukkan hasil lebih baik. Selisih nilai Q_{50} dan Q_{80} digunakan sebagai salah satu parameter evaluasi dikarenakan nilai aliran dasar pada data observasi berada diantara rentang nilai Q_{50} dan Q_{80} .

Untuk mempermudah penilaian kinerja masing-masing model, digunakan matriks multi kriteria yang terdiri atas tiga aspek yakni kemudahan pemodelan dan kompleksitas data; ada tidaknya parameter aliran dasar; serta hasil kinerja model. Skor diberikan dengan skala 0 sampai dengan 10, dimana angka 10 menunjukkan objek penilaian dengan pemenuh kriteria tertinggi, dan sebaliknya angka 0 diberikan untuk penilaian terendah (Sulistiyorini and Herianto, 2010). Skor lain dihitung dengan menggunakan perhitungan sebagai berikut: Untuk variabel terbaik adalah angka tertinggi:

$$\text{Skor kriteria} = \frac{x_i}{X} \times 10 \quad (1)$$

Untuk variabel terbaik adalah angka terendah:

$$\text{Skor kriteria} = \frac{X}{x_i} \times 10 \quad (2)$$

Dimana:

X = nilai variabel terbaik

x_i = nilai variabel pada model ke- i

Tabel 1 Penilaian skor evaluasi model

Skor	Skala Kualitatif
0	Sangat Kurang
1-3	Kurang
4-6	Cukup
7-8	Memuaskan
9-10	Sangat Memuaskan

Sumber: Sulistiyorini and Herianto (2010)

Rerata parameter kriteria kemudahan pemodelan dan kompleksitas data; kepopuleran model; aksesibilitas; dan parameter aliran dasar akan dirata-ratakan dengan parameter hasil kinerja model sehingga didapatkan skor total (Tabel 1).

Metode Pemisahan Aliran Dasar

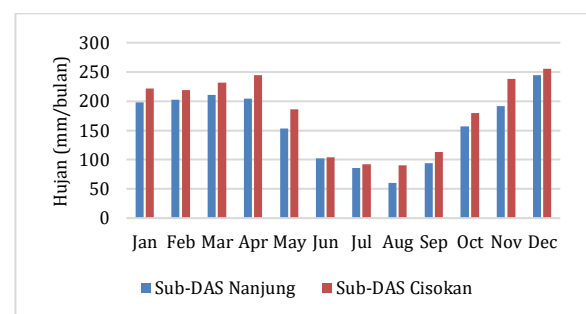
Pemisahan aliran dasar dari aliran permukaan dilakukan dengan menggunakan metode *Recursive Digital Filters* (RDF) Lyne dan Holick. Dalam penelitian oleh Indarto *et al.* (2019) algoritma Lyne dan Holick menunjukkan hasil yang paling baik dalam memisahkan aliran dasar dibandingkan lima

metode RDF lain (*one parameter algorithm, two parameter algorithm, IHHACRES three parameter algorithm, Lyne dan Holick algorithm, Chapman algorithm, dan EWMA*). Filter metode Lyne dan Holick dapat dilakukan sebanyak tiga kali (maju, mundur, maju-mundur) bergantung dari estimasi karakteristik sungai yang dikaji. Dalam setiap kali filter, nilai aliran dasar akan semakin kecil (Arnold and Allen, 1999). Untuk menentukan jumlah fase filtering yang paling sesuai dengan Sub-DAS Nanjung dan Sub-DAS Cisokan, dilakukan beberapa tahap. Tahap pertama adalah menentukan puncak musim kemarau di masing-masing sub-DAS. Pada puncak musim kemarau, diasumsikan nilai aliran total sungai sama dengan nilai aliran dasar sungai. Hujan bernilai kecil hanya cukup untuk membasahi permukaan tanah, namun tidak menyebabkan kenaikan hidrograf aliran di sungai (Indarto *et al.*, 2019). Tahap kedua, dilakukan pemilihan jumlah filtering, satu kali dengan maju, dua kali maju dan mundur, atau tiga kali dengan maju, mundur, dan maju berdasarkan nilai NSE tertinggi dan RMSE terkecil antara debit observasi di puncak musim kemarau dengan hasil filtering.

HASIL DAN PEMBAHASAN

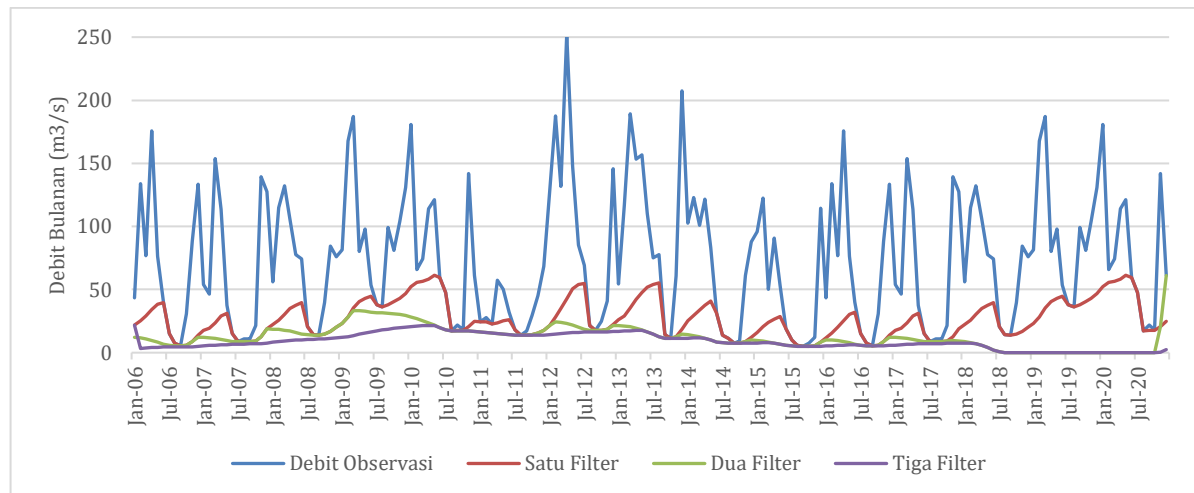
Pemisahan Aliran Dasar dari Aliran Total Observasi

Pada Gambar 1 ditunjukkan puncak musim kemarau pada dua sub-DAS berbeda. Sub-DAS Cisokan dan Sub-DAS Nanjung mengalami puncak musim kemarau pada bulan Juni, Juli, Agustus.

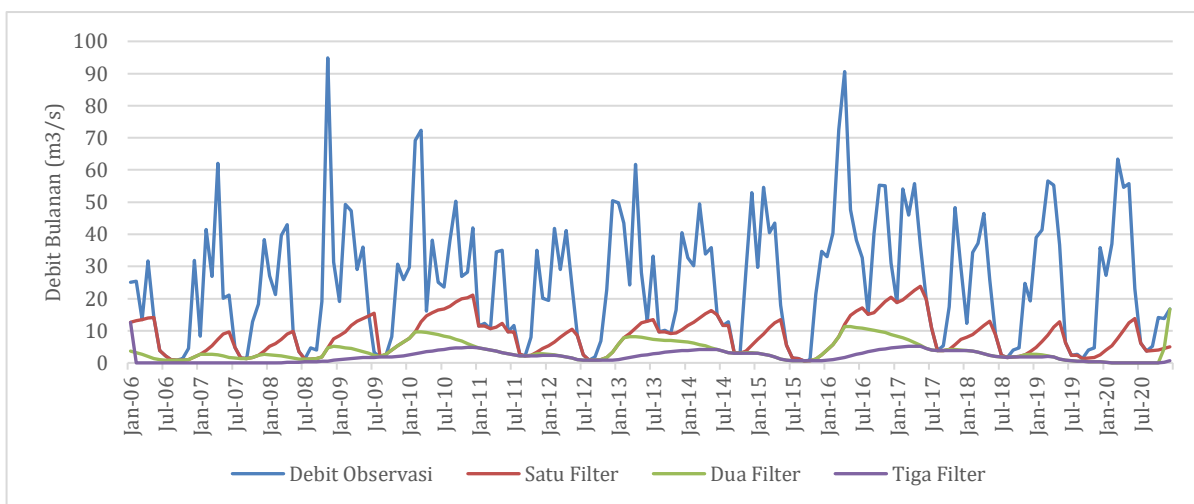


Gambar 1 Rerata hujan bulanan tahun 1981-2020 Sub-DAS Nanjung dan Sub-DAS Cisokan

Hasil pemisahan aliran dasar dari aliran total dengan metode RDF Lyne dan Holick dilakukan pada kedua sub-DAS sebanyak tiga kali, yakni dengan satu kali filter, dua kali filter, dan tiga kali filter (Gambar 2). Analisis kemudian dilakukan dengan hanya menggunakan data dan simulasi bulan Juni, Juli, Agustus untuk Sub-DAS Cisokan dan Sub-DAS Nanjung, mengingat pada puncak musim kemarau nilai aliran total diasumsikan sama dengan nilai aliran dasar.



(a) Sub-DAS Nanjung



(b) Sub-DAS Cisokan

Gambar 2 Hasil pemisahan aliran dasar dengan RDF Lyne dan Holick Sub-DAS Nanjung (a) dan Sub-DAS Cisokan (b) Tahun 2006-2020

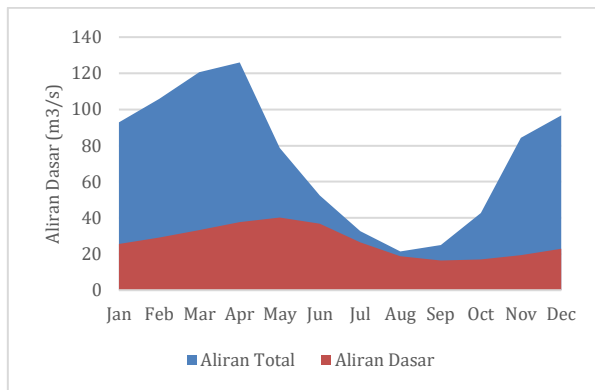
Pada Sub-DAS Nanjung, filter pertama mengeliminasi debit tinggi hingga 45% dari debit observasi aliran sungai total, dua kali filter sebanyak 69%, dan tiga kali filter sebanyak 74%. Sedangkan untuk Sub-DAS Cisokan, satu kali filter mengurangi 46%, dua kali filter mengurangi 73%, dan tiga kali filter mengurangi 83% dari debit observasi total aliran (Tabel 2).

Hasil paling baik ditunjukkan metode RDF Lyne dan Holick satu filter pada kedua sub-DAS. Oleh karena itu pada analisis selanjutnya, digunakan hasil simulasi pemisahan aliran dasar dengan RDF Lyne dan Holick satu filter untuk menghitung nilai aliran dasar debit observasi.

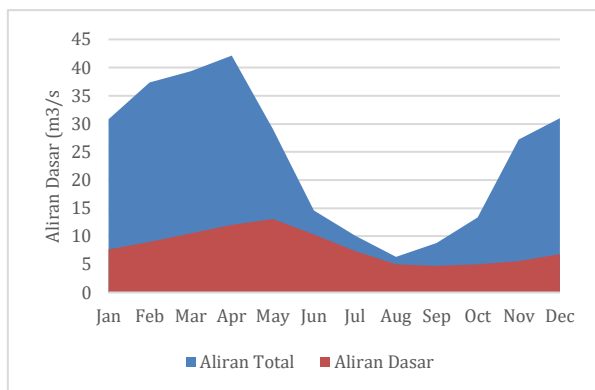
Tabel 2. Perbandingan hasil simulasi aliran dasar dengan debit observasi puncak musim kemarau tahun 2006-2020

Sub-DAS	Nanjung			Cisokan		
Jumlah Filter	Satu	Dua	Tiga	Satu	Dua	Tiga
<i>R-square</i>	87%	31%	25%	84%	78%	57%
RMSE	14,0	27,1	28,3	6,7	10,9	12,8

Sepanjang tahun 1981-2005, aliran dasar menyumbang presentase yang berbeda-beda pada total aliran di Sub-DAS Nanjung dan Sub-DAS Cisokan (Gambar 3).



(a) Sub-DAS Nanjung



(b) Sub-DAS Cisokan

Gambar 3 Rerata aliran total dan dasar pada Sub-DAS Nanjung (a) dan Sub-DAS Cisokan (b) tahun 1981-2005

Aliran dasar berkontribusi paling besar pada bulan Juni, Juli, Agustus (JJA) dengan presentase 74% dan 79%. Sedangkan pada triwulan lain, paling besar kedua adalah bulan September, Oktober, November (SON) sebesar 37% dan 43%, paling besar ketiga pada bulan Maret, April, Mei (MAM) 33%-36%, dan paling kecil pada bulan Desember,

Januari, Februari (DJF) 24%-26% pada dua sub-DAS. Nilai debit aliran total paling besar berada di bulan April, sedangkan pada aliran dasar pada bulan Mei. Meskipun demikian, nilai aliran dasar justru paling banyak bervariasi pada kuartier JJA dengan nilai standar deviasi 14,97 pada Sub-DAS Nanjung dan 5,08 pada Sub-DAS Cisokan.

Bila dilihat dari frekuensi kejadian aliran rendah berada dibawah dan diatas normal, sepanjang tahun 1981 hingga 2015, nilai aliran dasar pada kedua sub-DAS cenderung mengalami penurunan. Bila dibandingkan dengan tahun 1986-1995, pada periode 1996-2005, aliran dasar berkurang -18% di Sub-DAS Nanjung dan -26% di Sub-DAS Cisokan pada bulan JJA, penurunan juga terjadi di bulan SON di Sub-DAS Nanjung -5% dan bahkan -53% di Sub-DAS Cisokan. Pada bulan DJF, Sub-DAS Cisokan juga mengalami penurunan aliran dasar sebesar -27%. Pada periode tahun 2006-2015 penurunan nilai aliran dasar terlihat di bulan DJF dan MAM (-9%) serta SON (-14%) pada Sub-DAS Nanjung. Sedangkan pada periode yang sama, di Sub-DAS Cisokan, penurunan aliran dasar terlihat pada bulan DJF (-25%), JJA (-28%), dan SON (-56%).

Evaluasi Model Hujan-Aliran dalam Mensimulasikan Debit Rendah

Perbandingan hasil simulasi hujan aliran ditunjukkan pada Tabel 3. Pada nilai rerata TA tahunan, dengan nilai rerata TA tahunan debit observasi sebesar 1.199 mm di Sub-DAS Cisokan dan 1.311 mm di Sub-DAS Nanjung, Model memberikan hasil yang paling baik dengan selisih -1% dengan observasi di Sub-DAS Cisokan, sedangkan di Sub-DAS Nanjung, Model Mock memberikan hasil kedua paling dekat dengan selisih -17% setelah Model HBV96.

Tabel 3 Perbandingan hasil simulasi hujan-aliran hujan observasi tahun 2006-2020

Observasi/ Model	Sub-DAS Nanjung			Sub-DAS Cisokan		
	Rerata TA Tahunan (mm)	Q ₅₀ (m ³ /s)	Q ₈₀ (m ³ /s)	Rerata TA Tahunan (mm)	Q ₅₀ (m ³ /s)	Q ₈₀ (m ³ /s)
Observasi	1.311	61,3	17,9	1.199	22,8	4,7
Mock	1.181	54,2	11,5	1.089	28,1	4,9
NRECA	1.138	43,5	7,8	1.032	25,9	6,5
NAM	1.031	47,9	5,6	1.026	23,2	4,0
HBV96	1.263	71,6	10,3	1.332	23,1	14,4
Sacramento	1.582	81,7	12,3	1.535	34,6	18,3
Empiris	1.155	36,4	6,6	978	21,3	6,0

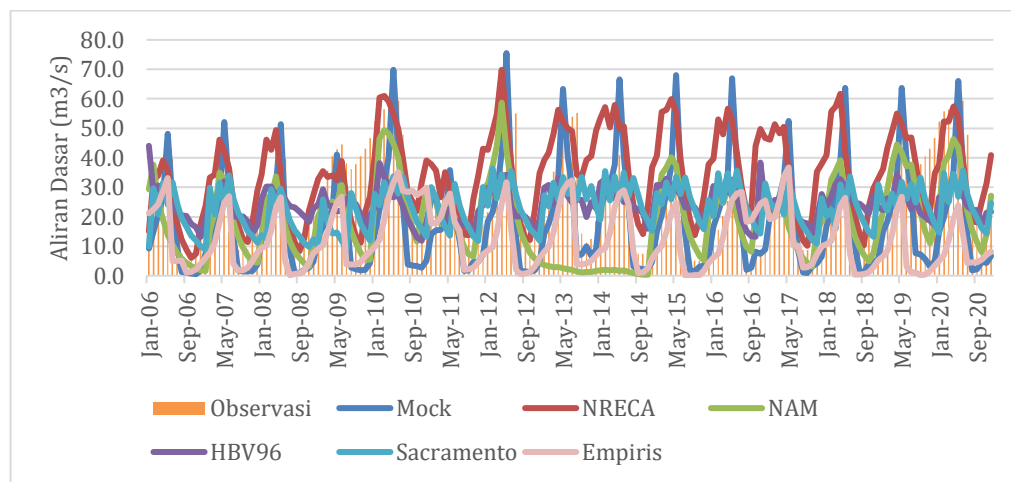
Berdasarkan hasil pemisahan aliran dasar dari debit total observasi, didapatkan rerata aliran dasar Sub-DAS Nanjung 24,7 m³/s dan Sub-DAS Cisokan 10,4 m³/s. Nilai ini berada diantara nilai Q₅₀ dan Q₈₀, oleh karena itu dalam penilaian performa model

pada aliran dasar perlu ditinjau dari dua aspek, yakni selisih simulasi dengan observasi pada nilai debit Q₅₀ dan Q₈₀. Bila hanya melihat pada selisih nilai debit Q₅₀, di Sub-DAS Nanjung Model Mock memberikan hasil paling baik dengan *underestimate*

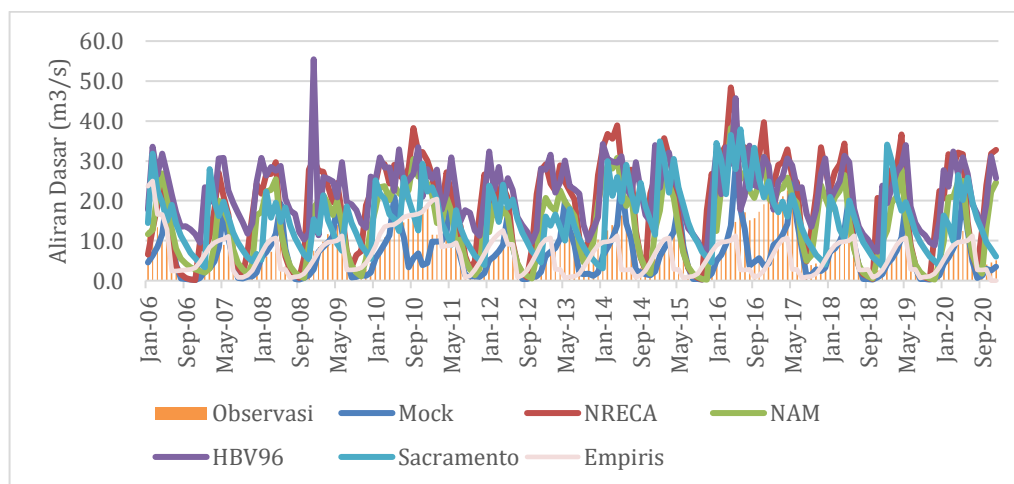
sebesar -11% sedangkan di Sub-DAS Cisokan Model NAM dan HBV96 memberikan hasil paling baik dengan selisih sebesar 1%-2%. Sedangkan bila melihat pada nilai debit Q_{80} , Model Mock menunjukkan performa yang paling baik pada kedua sub-DAS dengan memberikan nilai yang sama dengan debit observasi yakni sekitar 18 m³/s pada Sub-DAS Nanjung dan 5 m³/s pada Sub-DAS Cisokan. Dari keempat nilai (masing-masing Q_{50} dan Q_{80} pada dua sub-DAS), Model Mock memberikan hasil yang paling baik pada tiga nilai, yakni nilai Q_{50} di Sub-DAS Nanjung dan nilai Q_{80} pada kedua sub-DAS.

Evaluasi Model Hujan-Aliran dalam Mensimulasikan Aliran Dasar

Untuk debit aliran dasar model, dihitung dari parameter aliran dasar atau aliran muka tanah dari masing-masing model, kecuali untuk model empiris digunakan kembali metode RDF Lyne dan Hollick satu filter untuk mendapatkan simulasi aliran dasar. Kalibrasi dilakukan dengan memfokuskan untuk mengejar nilai debit rendah sehingga diharapkan aliran dasar yang dihasilkan menunjukkan performa yang lebih baik, Hasil simulasi hujan observasi menjadi aliran dasar dengan enam model ditunjukkan pada Gambar 4.



(a) Sub-DAS Nanjung



(b) Sub-DAS Cisokan

Gambar 4 Hasil simulasi hujan aliran Sub-DAS Nanjung (a) dan Sub-DAS Cisokan (b) tahun 2006-2020

Pada akhir tahun 2009 hingga tahun 2010 dan tahun 2016 hingga awal tahun 2017, terlihat pada kedua sub-DAS nilai aliran dasar cenderung lebih tinggi dibandingkan dengan tahun-tahun lainnya dikarenakan curah hujan yang tinggi akibat

perpaduan fenomena La-Nina dan *Indian Ocean Dipole* fase positif yang menyebabkan wilayah Indonesia secara keseluruhan mengalami kondisi basah.

Tabel 4 Perbandingan hasil simulasi hujan-aliran dasar hujan observasi tahun 2006-2020

Model	Sub-DAS Nanjung		Sub-DAS Cisokan	
	NSE	RMSE	NSE	RMSE
Mock	63%	16,7	65%	4,8
NRECA	68%	16,4	66%	14,0
NAM	40%	16,1	53%	8,5
HBV96	41%	17,5	51%	15,5
Sacramento	46%	17,7	44%	15,2
Empiris	25%	19,2	0%	8,2

Model yang paling baik mensimulasikan aliran dasar adalah Mock (Tabel 4). Pada Sub-DAS Nanjung, Model Mock, NRECA, dan NAM memiliki nilai RMSE paling kecil dan NSE paling besar, hal ini juga terjadi pada simulasi aliran dasar di Sub-DAS Cisokan. Model HBV96 dan Sacramento menunjukkan performa yang lebih rendah dibandingkan keempat model lain.

Evaluasi Model Hujan Aliran dengan Matriks Multi-kriteria

Dengan mengombinasikan hasil evaluasi terhadap performa model aliran serta kriteria penilaian model lain seperti yang sudah dijabarkan dalam

Metode, didapatkan matriks hasil penilaian model hujan aliran dasar di Sub-DAS Nanjung dan Cisokan yang ditunjukkan pada Tabel 5.

Simulasi aliran dasar di Sub-DAS Nanjung dan Sub-DAS Cisokan menunjukkan, Model Mock memberikan hasil yang paling stabil. Hasil simulasi juga menunjukkan bahwa Model Mock, NRECA, dan NAM menghasilkan estimasi aliran dasar yang lebih baik daripada model dengan parameter yang lebih kompleks (HBV96 dan Sacramento).

Dalam kajian yang dilakukan oleh Matonse *and* Kroll (2013), dirangkum beberapa beberapa penelitian terkait dengan pemodelan aliran dasar dan debit sungai aliran rendah seperti Van Lanen *et al.* (1997), Querner and van Lanen (2001), Engeland *and* Hisdal (2009), dan Samuel *et al.* (2011). Beberapa penelitian tersebut menunjukkan bahwa model yang lebih kompleks justru lebih sulit mensimulasikan aliran sungai bernilai rendah, model hujan-aliran skala regional dengan perhitungan lebih sederhana justru menunjukkan estimasi aliran rendah yang lebih baik daripada model yang kompleks seperti Model HBV dan Sacramento.

Tabel 5 Matriks hasil penilaian model hujan- aliran dasar Sub-DAS Nanjung dan Cisokan

No	Kriteria	Variabel Penilaian		Hasil					
				Mock	NRECA	NAM	HBV96	Sacramento	Empiris
1	Kemudahan pemodelan	Jumlah Parameter yang Ditentukan		3	5	1	3	1	10
		Jumlah Total Parameter		3	2	1	2	1	10
		Waktu pengerjaan		10	10	10	10	10	10
		Kepopuleran Model		10	10	0	0	0	0
		Aksesibilitas		10	10	10	10	10	10
2	Parameter aliran dasar	Adanya parameter aliran dasar		10	10	10	10	10	0
3	Hasil Kinerja Model	Selisih Q_{50}	Nanjung	10	4	5	7	3	3
			Cisokan	1	1	7	10	0	2
		Selisih Q_{80}	Nanjung	10	10	10	10	10	10
			Cisokan	10	1	3	0	0	2
		NSE	Nanjung	9	10	6	6	7	4
			Cisokan	10	10	8	8	7	0
		RMSE	Nanjung	9	10	8	9	9	8
			Cisokan	10	3	6	3	3	6
		Selisih Rerata TA Tahunan	Nanjung	10	3	1	3	0	4
			Cisokan	3	2	2	10	3	2

Model Sacramento sendiri pada awalnya ditujukan untuk simulasi harian atau hingga enam jam, seiring perkembangan model kemudian dikembangkan agar dapat mensimulasikan interval waktu bulanan, namun hal ini menjadi tantangan tersendiri mengingat seluruh parameter model sensitif terhadap skala waktu (Bournas & Baltas,

2021). Pada Model Sacramento, terdapat tiga parameter resesi yang menggunakan satuan harian, yaitu laju drainase lateral zona atas, tingkat drainase dari penyimpanan air primer bebas zona bawah, dan tingkat drainase dari penyimpanan air primer bebas zona bawah tambahan. Pada HBV96, terdapat dua parameter dengan satuan harian yakni

kecepatan air mengalir ke atas melalui tanah karena gaya kapilaritas dan kecepatan air mengalir ke bawah karena proses perkolasi alami. Hal ini menunjukkan, pada model kompleks seperti Sacramento dan HBV96 yang memiliki parameter model berbasis temporal harian, menunjukkan hasil yang kurang representatif untuk mensimulasikan variabel dengan skala temporal lebih panjang, seperti aliran dasar dalam skala bulanan. Model *lumped* yang relatif lebih sederhana, seperti Mock, menunjukkan performa yang lebih baik.

Dari keenam model (ditunjukkan dalam Tabel 6), Model Mock paling direkomendasikan untuk mensimulasikan aliran dasar, mengingat selain dari keandalan hasil simulasi, model ini juga relatif mudah dalam pengerjaan dengan jumlah parameter dan asumsi yang lebih sedikit dibandingkan model lain, *open accessed*, dan sudah terdapat dalam Modul Pelatihan BPSDM Kementerian PUPR. Diharapkan dengan adanya penelitian ini, disamping dapat diketahui kondisi aliran dasar di DAS Citarum, juga dapat direkomendasikan model hujan-aliran populer yang paling baik dalam mensimulasikan aliran dasar.

Tabel 6 Matriks hasil penilaian model hujan- aliran dasar Sub-DAS Nanjung dan Cisokan

No	Kriteria	Skor					
		Mock	NRECA	NAM	HBV96	Sacramento	Empiris
1	Kemudahan pemodelan	6	6	4	5	4	8
2	Parameter <i>aliran dasar</i>	10	10	10	10	10	0
3	Hasil kinerja model	9	5	5	7	4	4
SKOR TOTAL		8	7	6	7	6	4

KESIMPULAN

Aliran dasar memiliki peran penting dalam sistem sungai DAS Citarum, meskipun demikian kajian mengenai aliran dasar masih jarang dilakukan dibandingkan dengan kajian banjir. Dalam mensimulasikan aliran dasar di Sub-DAS Nanjung dan Sub-DAS Cisokan tahun 2005-2020, dipilih enam model lumped yaitu FJ Mock, NRECA, NAM, HBV96, Sacramento, dan Empiris. Lima model dipilih dengan kriteria memiliki kemudahan pemodelan-kompleksitas data, populer di lingkup Kementerian PUPR, mudah untuk diakses, dan memiliki perhitungan untuk aliran dasar, sedangkan satu model yaitu Model Empiris merupakan model yang banyak digunakan karena tidak memerlukan karakteristik fisik sungai. Dalam lima model yang membutuhkan informasi karakteristik fisik sungai, parameter yang perlu diperhatikan dalam mensimulasikan aliran dasar adalah karakteristik tanah (jenis, permeabilitas, kapasitas tampungan), infiltrasi, perkolasi, dan karakteristik aliran tanah (koefisien dan waktu routing).

Model Mock direkomendasikan untuk mensimulasikan aliran dasar dengan memberikan nilai performa “Memuaskan” (nilai 8 dari nilai total 10), dari nilai RMSE dan NSE, selisih Q_{50} - Q_{80} , dan selisih tinggi aliran. Model Mock juga relatif mudah dalam pengerjaan dengan jumlah parameter dan asumsi yang lebih sedikit dibandingkan model lain, *open accessed*, dan sudah terdapat dalam Modul Pelatihan BPSDM sehingga relatif familiar dalam lingkup Kementerian PUPR. Diharapkan dengan

adanya penelitian ini, disamping dapat diketahui kondisi aliran dasar di DAS Citarum, juga dapat direkomendasikan model hujan-aliran populer yang paling baik dalam mensimulasikan aliran dasar.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung dan Balai Hidrologi dan Lingkungan Keairan Kementerian PUPR atas dukungan sehingga tulisan ilmiah ini dapat berhasil diselesaikan.

DAFTAR PUSTAKA

- Arnold, J. G., & Allen, P. M. (1999). Automated methods for estimating baseflow and ground water recharge from streamflow records. *Journal of the American Water Resources Association*, 35(2), 411–424. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1999.tb03599.x>
- Bloomfield, J., Gong, M., Marchant, B., Coxon, G., & Addor, N. (2021). How is Baseflow Index (BFI) impacted by water resource management practices?. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, May, 1–34. <https://doi.org/10.5194/hess-2021-259>
- Bournas, A., & Baltas, E. (2021). Increasing the Efficiency of the Sacramento Model on Event Basis in a Mountainous River Basin. *Environmental Processes*, 8(2), 943–958. <https://doi.org/10.1007/s40710-021-00504-4>

- Burek, P., Satoh, Y., Kahil, T., Tang, T., Greve, P., Smilovic, M., Guillaumot, L., Zhao, F., & Wada, Y. (2020). Development of the Community Water Model (CWatM v1.04) - A high-resolution hydrological model for global and regional assessment of integrated water resources management. *Geoscientific Model Development*, 13(7), 3267–3298. <https://doi.org/10.5194/gmd-13-3267-2020>
- Fu, G., Charles, S. P., & Chiew, F. H. S. (2007). A two-parameter climate elasticity of streamflow index to assess climate change effects on annual streamflow. *Water Resources Research*, 43(11), 1–12. <https://doi.org/10.1029/2007WR005890>
- Hidayat, Y., Murtiaksiono, K., Wahjunie, E. D., & Panuju, D. R. (2013). Pencirian Debit Aliran Sungai Citarum Hulu. *Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia*, 18(2), 109–114.
- Indarto, I., Novita, E., Wahyuningsih, S., Herlinda, N. D., & Hidayah, E. (2019). Application of recursive digital filter (RDF) methods for baseflow separation: study at Brantas watershed. *Jurnal Pengelolaan Sumberdaya Alam Dan Lingkungan (Journal of Natural Resources and Environmental Management)*, 9(3), 626–640. <https://doi.org/10.29244/jpsl.9.3.626-640>
- Komariah, I., & Matsumoto, T. (2019). Application of hydrological method for sustainable water management in the Upper-Middle Ciliwung (UMC) river basin, Indonesia. *Journal of Water and Environment Technology*, 17(4), 203–217. <https://doi.org/10.2965/jwet.18-003>
- Kuntoro, A. A., Putro, A. W., Kusuma, M. S. B., & Natasaputra, S. (2017). The effect of land use change to maximum and minimum discharge in Cikapundung River Basin. *AIP Conference Proceedings*, 1903(May 2018). <https://doi.org/10.1063/1.5011621>
- Kusuma, M. S. B., Hutasoit, L. M., Kombaitan, B., Syafila, M., Setiadi, T., Aryantha, I. N. P., & Piliang, Y. A. (2018). *Strategi Pengelolaan Terpadu Penyelesaian Permasalahan Daerah Aliran Sungai Citarum*. Forum Guru Besar ITB.
- Matonse, A. H., & Kroll, C. N. (2013). Applying hillslope-storage models to improve low flow estimates with limited streamflow data at a watershed scale. *Journal of Hydrology*, 494, 20–31. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.04.032>
- Ngoc, T. A., Hiramatsu, K., & Harada, M. (2013). Optimizing parameters for two conceptual hydrological models using a genetic Algorithm: A case study in the Dau Tieng River Watershed, Vietnam. *Japan Agricultural Research Quarterly*, 47(1), 85–96. <https://doi.org/10.6090/jarq.47.85>
- Peraturan Presiden (PERPRES) Nomor 27 Tahun 2020 tentang Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat
- Roslani, D., Zulfan, J., & Kumala, Y. E. (2013). Kajian Optimasi Desain Saluran dalam Rangka Pengendalian Banjir di Citarum Hulu. *Jurnal Teknik Hidraulik*, 4(1), 13–24. <https://jurnalth.pusair-pu.go.id/index.php/JTH/article/view/273/195>
- 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>
- Singh, S. K., Pahlow, M., Booker, D. J., & Shankar, U. (2018). Towards baseflow index characterisation at national scale in New Zealand. *Journal of Hydrology*, 23266. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.11.025>
- Sulistiyorini, R., & Herianto, D. (2010). Analisis Multi Kriteria Sebagai Metode Pemilihan Suatu Alternatif Ruas Jalan di Provinsi Lampung. *Jurnal Ilmiah Fakultas Teknik Universitas Lampung*, 14(3), 147–156. <https://www.ptonline.com/articles/how-to-get-better-mfi-results>
- Wei, H. P., Yeh, K. C., Liou, J. J., Chen, Y. M., & Cheng, C. T. (2016). Estimating the risk of river flow under climate change in the Tsengwen River Basin. *Water*, 8(3), 1–15. <https://doi.org/10.3390/w8030081>
- Zaim, R. S., Sulistiyono, H., & Budianto, M. B. (2016). *Aplikasi Metode Mock, NRECA, Artificial Neural Network, dan Regresi Dalam Pengalihan Hujan-Limpasan Terkait Dengan Pembangkitan Data Debit Di Awlr ...* [Universitas Mataram]. <http://eprints.unram.ac.id/id/eprint/7255%0Ahttp://eprints.unram.ac.id/7255/1/3.jurnal.pdf>