

## **PENILAIAN DEBIT LINGKUNGAN BERBASIS PENDEKATAN HIDROLOGI PADA DAS CITARUM HULU**

Ika Sari Damayanthi Sebayang\*, Indratmo Soekarno,  
M. Cahyono, Arno Adi Kuntoro

Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung

\*ika.sebayang@gmail.com

Pemasukan: 1 Nopember 2022 Perbaikan: 19 Mei 2023 Diterima: 19 Mei 2023

### **Intisari**

Di Indonesia, kawasan Sungai Citarum mengalami tantangan lingkungan yang cukup signifikan, antara lain meluapnya Sungai Citarum dan daerah aliran sungainya yang menyebabkan banjir, dan kekurangan air pada musim kemarau. Namun, tantangan utama adalah ketersediaan air di Citarum, karena debit yang mempengaruhi keseimbangan ekologi Daerah Aliran Sungai (DAS). Penelitian ini mengkaji beberapa metode penilaian debit lingkungan dengan pendekatan berbasis hidrologi diantaranya Tennant, *Range of Variability Approach* (RVA). Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui besarnya aliran lingkungan (EF) yang diperlukan untuk menopang fungsi sungai dalam mendukung keseimbangan ekologi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode penilaian aliran lingkungan berbasis hidrologi merupakan langkah pertama yang diperlukan dalam perencanaan alokasi debit untuk perlindungan lingkungan. Ditunjukkan bahwa penggunaan fitur-fitur pelengkap dari teknik penilaian aliran lingkungan yang ada dapat digunakan untuk mencapai perkiraan aliran lingkungan yang dapat dibenarkan, bahkan dalam kondisi keterbatasan informasi terkait hubungan ekologi-hidrologi spesifik pada DAS Citarum. Penelitian ini bermaksud untuk mempromosikan perlunya perencanaan alokasi debit lingkungan dalam pengembangan DAS dan dapat dirumuskan ke dalam kebijakan nasional yang relevan. Kajian EF dilakukan dengan membandingkan 7Q10 dan Q95 dari kedua data pengamatan debit Nanjung dan pemodelan curah hujan-limpasan. Hasilnya ditemukan bahwa metode Weibull minima, hasil 7Q10 untuk pemodelan Sacramento, adalah 2,18 m<sup>3</sup>/s sedangkan AWLR Nanjung adalah 1,24 m<sup>3</sup>/s. Selain itu, nilai Q95 untuk Nanjung AWLR adalah 6,55 m<sup>3</sup>/s sedangkan hasil pemodelan curah hujan limpasan Sacramento adalah 7,06 m<sup>3</sup>/s. Besaran debit yang tersedia perlu dipastikan dapat mendukung kondisi ekologi di wilayah DAS Citarum Hulu. Hal ini relevan karena perbedaan tersebut tentunya mempengaruhi keseimbangan ekologi dan pengelolaan Sungai Citarum.

Kata Kunci: debit lingkungan, Citarum, FDC, Sacramento, RVA, sungai

### **Latar Belakang**

Sungai Citarum dan DASnya memiliki permasalahan yang kritis dan kompleks. Kompleksitas permasalahan tersebut membuat Sungai Citarum perlu mendapat

perhatian khusus, sehingga pemerintah mengeluarkan Perpres no. 15 Tahun 2018 tentang Percepatan Pengendalian Pencemaran dan Kerusakan Daerah Aliran Sungai Citarum. Salah satu bentuk pengendalian DAS adalah dengan memenuhi debit pemeliharaan. Kajian debit lingkungan di Indonesia belum banyak diterapkan, terutama dalam menentukan besarnya debit pemeliharaan sungai. Di Indonesia masih terdapat anggapan bahwa penentuan debit pemeliharaan sungai ditentukan pada skala statistik probabilitas dengan menetapkan debit sebesar 95% atau dikenal dengan Q95. Kondisi sungai di Indonesia bervariasi, ada jenis sungai yang tersedia debit sepanjang tahun (Perennial) dan ada jenis sungai yang debitnya dapat kering sewaktu-waktu (Ephemeral). Selain itu, di Indonesia juga terdapat sungai yang memiliki waduk dan yang tidak memiliki waduk. Debit pemeliharaan juga dapat berbeda untuk lokasi sungai hulu, tengah dan hilir. Hal ini perlu dikaji lebih lanjut untuk memastikan ketersediaan debit pemeliharaan mampu mendukung keseimbangan pemeliharaan jasa lingkungan.

Pembahasan mengenai debit pemeliharaan, harus dilihat dari definisi debit pemeliharaan itu sendiri. Debit pemeliharaan berhubungan dengan aliran rendah (*low flow*). Berdasarkan *International glossary of hydrology* (WMO, 1974) definisi aliran rendah adalah 'aliran air selama musim kemarau yang berkepanjangan'. Debit pemeliharaan merupakan parameter penting mengingat perannya bagi kelestarian sungai itu sendiri. Dalam menilai keandalan debit di Sungai Citarum, Sub DAS Citarum Hulu perlu mempertimbangkan beberapa aspek, antara lain vegetasi riparian, hewan air, banjir di sungai (*floodplains*) dan aspek jasa ekosistem (misalnya: penyediaan air minum/air bersih).

Masalah yang akan dikaji dalam penelitian ini adalah penentuan debit pemeliharaan di Sungai Citarum di DAS Citarum Hulu, yang dapat mendukung ekologi dan keberlanjutan sungai dalam beberapa aspek. Permasalahan selanjutnya adalah bagaimana membuat alternatif pengendalian yang dapat menjamin keberlangsungan aspek-aspek tersebut dalam jangka waktu yang lama.

Penelitian-penelitian sebelumnya membahas berbagai masalah termasuk deskripsi teknik yang ada dari analisis aliran rendah dari perekaman aliran (analisis durasi aliran, analisis frekuensi aliran rendah, analisis resesi aliran, dan analisis penyimpanan). McMahon dan Arenas (1982) mempresentasikan kumpulan metode yang digunakan di berbagai negara untuk menghitung karakteristik debit rendah, menggambarkan beberapa metode ini dengan studi kasus dan membahas beberapa aspek teoritis dari faktor alam dan faktor ulah manusia yang mempengaruhi aliran rendah. Aspek spesifik dari analisis aliran rendah, manajemen dan topik terkait (seringkali termasuk tinjauan literatur yang komprehensif) diselidiki oleh Searcy (1959), Hall (1968), Riggs (1976), Vasak (1977), Kurdov (1977), McMahon dan Mein (1986), Gustard (1989), Ponce dan Lindquist (1990), Amusja et al., (1991), Heicher (1993), Demuth (1994), Tallaksen (1995) dan Vogel dan Fennessey (1995). Perhitungan debit rendah menggunakan berbagai metode pemodelan curah hujan-limpasan juga diteliti oleh Beven (2001).

Smakhtin (2001) menulis ulasan untuk melihat subjek hidrologi debit rendah secara sistematis termasuk interaksi yang timbul dari hidrologi aliran rendah dengan

bidang terkait air lainnya (misalnya pengelolaan sungai). Debit aliran rendah berkaitan dengan keberlanjutan sumber daya air, terutama dalam hal peningkatan kebutuhan air (Wijayanti, 2020). Beberapa metode telah banyak digunakan untuk menentukan dan juga menguji besarnya debit rendah yang nantinya dapat diuji sebagai debit pemeliharaan sungai.

Air yang dialokasikan untuk memelihara habitat perairan dan proses ekologis dalam keadaan yang diinginkan disebut sebagai “*instream flow requirement (IFR)*”, “*environmental flow (EF)*”, “*environmental flow requirement (EFR)*”, or “*environmental water demand (EWD)*” Karimi, Yasi dan Eslamian (2012). Dalam penelitian ini digunakan untuk mendefinisikan debit pemeliharaan. Proses untuk menentukan aliran ini disebut sebagai *environmental flow assessment (EFA)* (Davis dan Hirji 2003; Dyson dkk. 2003; Lankford 2002; Smakhtin dkk. 2006).

Penilaian debit lingkungan sangat bergantung pada fitur-fitur apa yang perlu dilindungi. Adapun penjelasan fitur-fitur yang dilindungi secara garis besar dapat terlihat pada Tabel 1 berikut:

Tabel 1 Penjelasan fitur-fitur

Fitur	Penjelasan Nilai	Contoh alasan debit lingkungan diperlukan
Hewan akuatik sebagai pemijahan atau bertelur.	Ikan air tawar adalah sumber yang sangat berharga, protein untuk masyarakat pedesaan. Fauna bernilai lainnya termasuk: ikan pemancing, burung air langka, atau kehidupan air kecil yang membentuk dasar rantai makanan.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aliran untuk mempertahankan habitat fisik;</li> <li>• Aliran untuk menjaga kualitas air yang sesuai;</li> <li>• Aliran untuk memungkinkan perjalanan ikan bermigrasi;</li> <li>• banjir kecil untuk memicu isyarat siklus hidup seperti pemijahan atau bertelur.</li> </ul>
Vegetasi riparian	Menstabilkan tepian sungai, menyediakan makanan dan kayu bakar untuk masyarakat pedesaan dan habitat hewan, dan melindungi sungai terhadap hilangnya nutrisi dan sedimen dari aktivitas manusia di daerah tangkapan air.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• aliran yang menjaga tingkat kelembaban tanah di tepian</li> <li>• aliran tinggi untuk menyimpan nutrisi di tanggungan (<i>bank</i>) dan mendistribusikan benih.</li> </ul>
Pasir Sungai	Digunakan untuk bangunan.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aliran untuk mengangkut pasir dan memisahkannya dari partikel yang lebih halus.</li> </ul>
Muara	Menyediakan area pembibitan untuk ikan laut.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• aliran yang menjaga keseimbangan garam / air tawar dan koneksi laut ke muara.</li> </ul>
Akuifer dan air tanah	Mempertahankan sifat sungai perennial yang bertindak sebagai sumber air selama musim kemarau.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aliran untuk mengisi ulang akuifer.</li> </ul>
Dataran banjir	Mendukung perikanan dan pertanian saat terjadi resesi akibat banjir untuk masyarakat pedesaan.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• banjir yang menggenangi dataran banjir pada waktu yang tepat tahun tertentu.</li> </ul>

Fitur	Penjelasan Nilai	Contoh alasan debit lingkungan diperlukan
Estetika	Suara air mengalir di bebatuan, bau dan pemandangan sungai dengan pepohonan, burung, dan ikan.	• aliran yang cukup untuk memaksimalkan fitur estetika alami, termasuk banyak aliran yang disebutkan di atas.
Fitur rekreasi dan budaya	Air bersih dan jeram untuk arung jeram sungai atau kolam yang bersih untuk upacara pembaptisan atau mandi. Juga fitur yang dihargai oleh pemancing, pengamat burung dan fotografer.	• Aliran yang mengguyur sedimen dan ganggang, dan yang menjaga kualitas air - lihat juga hewan air.
Layanan ekosistem	Mempertahankan kapasitas ekosistem perairan untuk mengatur proses ekologis penting, misalnya untuk memurnikan air, menipiskan banjir, atau mengendalikan hama.	• aliran yang menjaga fungsi keanekaragaman hayati dan ekosistem.
Perlindungan lingkungan secara keseluruhan	Keinginan untuk meminimalkan dampak manusia dan melestarikan sistem alam untuk generasi mendatang.	• beberapa atau semua jenis aliran di atas.

Sumber: Terjemahan dari World Bank (King and Brown, 2003)

## Metodologi Studi

### Indeks Debit Rendah

Penentuan debit lingkungan dengan menggunakan pendekatan hidrologi menggunakan metode indeks debit rendah telah digunakan secara luas di beberapa negara (Smakhtin, 2001; Granemann, 2018). USGS sering menggunakan statistik aliran 7Q10 untuk membantu memandu keputusan dalam pekerjaan sehari-hari mereka dalam pengaturan Total Beban Harian Maksimum, pasokan air dan pengelolaan, izin pembuangan air limbah, dan perlindungan habitat perairan yang terancam punah. 7Q10 adalah debit aliran terendah dalam 7 hari yang terjadi setiap 10 tahun (Nnaji, 2014). Untuk nalisa neraca air, dalam penelitian ini dilakukan beberapa metode, antara lain HBV, Sacramento, dan NRECA.

### *Distribusi Gumbel untuk Minima*

Perhitungan debit rendah dengan distribusi Gumbel<sub>min</sub> telah digunakan, meskipun tidak sering, sebagai distribusi ekstrim untuk pemodelan minimum tahunan variabel terkait kekeringan, seperti Q7, dimana debit rata-rata terendah 7 hari berturut-turut pada tahun tertentu digunakan sebagai input perhitungan (Naghattini, 2017). Fungsi distribusi kumulatif untuk Gumbel<sub>min</sub> adalah:

$$Fz(z) = 1 - \exp \left[ -\exp \left( \frac{z-\beta}{\alpha} \right) \right] \text{ for } -\infty < z < \infty, -\infty < \beta < \infty, \alpha > 0 \quad (1)$$

di mana  $\alpha$  mewakili parameter skala dan  $\beta$  parameter lokasi. Sama seperti fungsi Gumbel<sub>max</sub>, sebenarnya  $\beta$  adalah modus dari Z. Fungsi kepadatan probabilitas (*probability density function*) dari distribusi Gumbel<sub>min</sub> diberikan oleh:

$$Fz(z) = \frac{1}{\alpha} \exp \left[ \frac{z-\beta}{\alpha} - \exp \left( \frac{z-\beta}{\alpha} \right) \right] \quad (2)$$

Nilai rata-rata, varians, dan koefisien skewness dari varian Gumbel<sub>min</sub> masing-masing dinyatakan sebagai:

$$E(Z) = \beta - 0.5772\alpha \quad (3)$$

$$Var[Z] = \sigma_z^2 = \frac{\pi^2 \alpha^2}{6} \quad (4)$$

$$\gamma = -1.1396 \quad (5)$$

Perlu dijadikan catatan bahwa distribusi Gumbel<sub>min</sub> miring ke kiri dengan koefisien tetap  $\gamma = -1,1396$ . Fungsi kepadatan probabilitas Gumbel<sub>min</sub> dan Gumbel<sub>max</sub>, keduanya dengan parameter yang identik, adalah simetris terhadap garis vertikal yang melintasi sumbu absis pada mode umum (Naghetini, 2017). Fungsi kuantil Gumbel<sub>min</sub> ditulis sebagai:

$$Z(F) = \beta + \alpha \ln[-\ln(1 - F)] \text{ or } \gamma(T) = \beta + \alpha \ln \left[ -\ln \left( 1 - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (6)$$

di mana T menunjukkan periode ulang (*return period*), dalam tahun, dan F mewakili probabilitas non-kelebihan tahunan (Naghetini, 2017). Untuk minimum tahunan, periode ulang adalah kebalikan dari F atau  $T=1/P(Z \leq z) = 1/(F z(z))$ . Perlu dicatat bahwa, perhitungan kuantil Gumbel<sub>min</sub> mungkin dapat menghasilkan angka negatif tergantung pada nilai numerik dari parameter distribusi dan pada periode ulang target. Ini adalah salah satu kelemahan utama dari distribusi Gumbel<sub>min</sub>, yang telah membatasi penggunaan sebagai model untuk analisis frekuensi aliran rendah (Naghetini, 2017).

### ***Distribusi Weibull untuk Minima***

Distribusi Extreme-Value type III (EV3) untuk minima juga dikenal sebagai Weibull<sub>min</sub>. Karena aliran rendah pasti dibatasi oleh nol dalam kasus yang paling parah, distribusi Weibull<sub>min</sub> adalah kandidat alami untuk model hidrologi minima (Naghetini, 2017; Granemann, 2018; Nnaji, 2014). Jika aliran rendah dibatasi oleh nol, distribusi EV3 disebut sebagai Weibull<sub>min</sub> dua parameter. Di sisi lain, jika aliran rendah dibatasi oleh beberapa nilai  $\xi$ , distribusi EV3 disebut sebagai Weibull<sub>min</sub> tiga parameter (Naghetini, 2017). Fungsi distribusi kumulatif untuk Weibull<sub>min</sub> dua parameter diberikan oleh:

$$Fz(Z) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{z}{\beta} \right)^\alpha \right] \text{ para } z \geq 0, \beta \geq 0 \text{ e } \alpha > 0 \quad (7)$$

di mana  $\beta$  dan  $\alpha$  masing-masing adalah parameter skala dan bentuk. Jika 1, Weibull<sub>min</sub> menjadi distribusi eksponensial satu parameter dengan parameter skala  $\beta$ . Fungsi kepadatan probabilitas dari distribusi Weibull<sub>min</sub> dua parameter dinyatakan sebagai Variabel Acak Kontinu: Distribusi Probabilitas (Naghetini, 2017).

$$Fz(z) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{z}{\beta}\right)^{\alpha-1} \exp \left[-\left(\frac{z}{\beta}\right)^\alpha\right] \tag{8}$$

Rata-rata dan varians dari dua parameter Weibull<sub>min</sub> variate, masing-masing diberikan oleh

$$E(Z) = \beta \Gamma \left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \tag{9}$$

$$Var [Z] = \beta^2 \left[\Gamma \left(1 + \frac{2}{\alpha}\right) - \Gamma^2 \left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)\right] \tag{10}$$

Koefisien variasi dan skewness dari variabel Weibull<sub>min</sub> dua parameter berturut-turut adalah,

$$CVZ = \frac{\sqrt{\Gamma(1+\frac{2}{\alpha}) - \Gamma^2(1+\frac{1}{\alpha})}}{\Gamma(1+\frac{1}{\alpha})} = \frac{\sqrt{B(\alpha) - A^2(\alpha)}}{A(\alpha)} \tag{11}$$

dan 
$$\gamma = \frac{\Gamma(1+\frac{3}{\alpha}) - 3\Gamma(1+\frac{2}{\alpha})\Gamma(1+\frac{1}{\alpha}) + 2\Gamma^3(1+\frac{1}{\alpha})}{\sqrt{[\Gamma(1+\frac{2}{\alpha}) - \Gamma^2(1+\frac{1}{\alpha})]^3}} \tag{12}$$

Perhitungan parameter dan probabilitas untuk distribusi Weibull<sub>min</sub> dua parameter dilakukan dengan terlebih dahulu menyelesaikan Persamaan. (13) untuk  $\alpha$ , baik melalui prosedur iterasi numerik, mirip dengan yang digunakan untuk menghitung parameter bentuk GEV, atau dengan tabulasi (atau regresi) nilai  $\alpha$  yang mungkin dari dan fungsi bantu  $A(\alpha) = \Gamma(1 + 1/\alpha)$  terhadap CVZ (Naghetini, 2017). Analisis ketergantungan  $\alpha$  dan  $A(\alpha)$  pada koefisien variasi CVZ mengarah pada hubungan korelatif berikut:

$$\alpha = 1.0079(CV)^{-1.084}, \text{ for } 0.08 \leq CVz \leq 2 \tag{13}$$

$$A(\alpha) = -0.0607(CVz)^3 + 0.5502(CVz)^2 - 0.4937(CVz) + 1.003, \text{ for } 0.08 \leq CVz \leq 2 \tag{14}$$

yang memberikan pendekatan yang baik untuk solusi numerik dari Persamaan. (14). Setelah  $\alpha$  dan  $A(\alpha)$  telah ditentukan, parameter dapat dihitung dari Persamaan. (15), atau

$$\beta = \frac{E(Z)}{A(\alpha)} \tag{15}$$

Dengan kedua parameter diketahui, kuantil Weibull<sub>min</sub> dua parameter ditentukan oleh

$$z(F) = \beta [-\ln(1 - F)]^{\frac{1}{\alpha}} \text{ or } z(T) = \beta \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{T}\right)\right]^{\frac{1}{\alpha}} \tag{16}$$

### Analisis Kurva Debit Aliran/Flow Duration Curve Analysis (FDCA)

Metodologi berbasis hidrologi lainnya yang diterapkan di seluruh dunia dalam bentuk umumnya adalah metode FDCA (Smakhtin, 2001). Dalam penelitian ini FDCA juga digunakan untuk mempelajari distribusi probabilitas dari data yang direkam. Menggunakan FDCA, data diberi peringkat dan dihitung probabilitasnya yang sesuai dengan menggunakan persamaan berikut:

$$P = \left( \frac{m}{n} + 1 \right) 100\% \quad (17)$$

Smakhtin (2001) menunjukkan bahwa desain rentang aliran rendah dari FDC berkisar antara 70 dan 99% (dilambangkan sebagai Q70 dan Q99%). Q90 dan Q95 % adalah bentuk yang sering digunakan sebagai indikator aliran rendah dan telah banyak digunakan untuk menetapkan debit lingkungan minimum (Pyrce, 2004; Karimi, 2012; Nikghalb, 2016).

### Kalibrasi Model

Indeks efisiensi *Nash-Sutcliffe* (EF) adalah cara uji statistik yang digunakan secara luas dan berpotensi andal untuk menilai tingkat kecocokan model hidrologi. (Richard H. McCuen; dkk, 2006). Dalam menghitung penyimpangan yang terjadi menggunakan metode *Nash-Sutcliffe Coefficient* (NSE) untuk menghitung perbedaan jumlah kuadrat dari data observasi dengan data hasil pemodelan dan metode *Relative Volume Error* (RVE) untuk menghitung volume dari data observasi dari AWLR dengan data hasil pemodelan.

Berikut adalah persamaan umum *Nash-Sutcliffe Coefficient*:

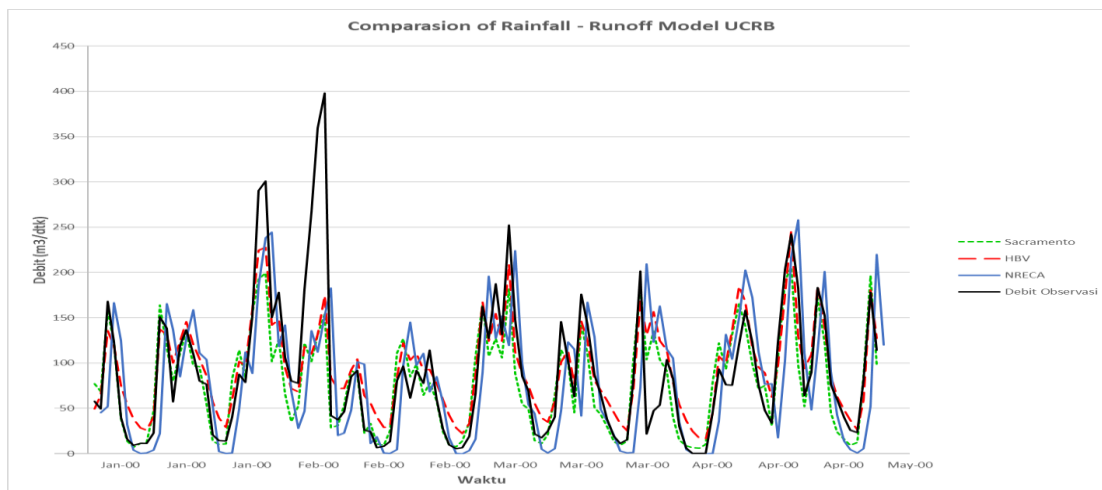
$$R^2 = 1 - \frac{\text{MSE}(Q)}{\text{VAR}(Q_{\text{ons}})} \quad (18)$$

Persamaan umum *Relative Volume Error*:

$$\text{VE} = \frac{\sum (Q_{\text{sim}} - Q_{\text{obs}})}{\sum (Q_{\text{obs}})} \quad (19)$$

### Hasil Studi dan Pembahasan

Dari hasil yang diperoleh dari analisis yang telah dilakukan ada beberapa hal yang menarik untuk dibahas. Yang pertama adalah dari ketiga metode yang digunakan, hasil terbaik ditunjukkan oleh metode Sacramento (Gambar 1). Hal ini mengacu pada hasil pengujian model dengan data debit observasi menggunakan metode *Nash-Sutcliffe Efficiency* (NSE), dimana nilai NSE mendekati satu ditunjukkan dengan pemodelan Sacramento (Tabel 2).



Gambar 1. Perbandingan debit harian

Hal ini mengacu pada hasil pengujian model dengan data debit observasi menggunakan metode Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE), dimana nilai NSE mendekati nilai satu ditunjukkan dengan pemodelan Sacramento (Tabel 2).

Tabel 2 Nash-Sutcliffe Efficiency model Sacramento pada UCRB

Periode	2008-2017	2008-2009
NSE	0,63	0,78

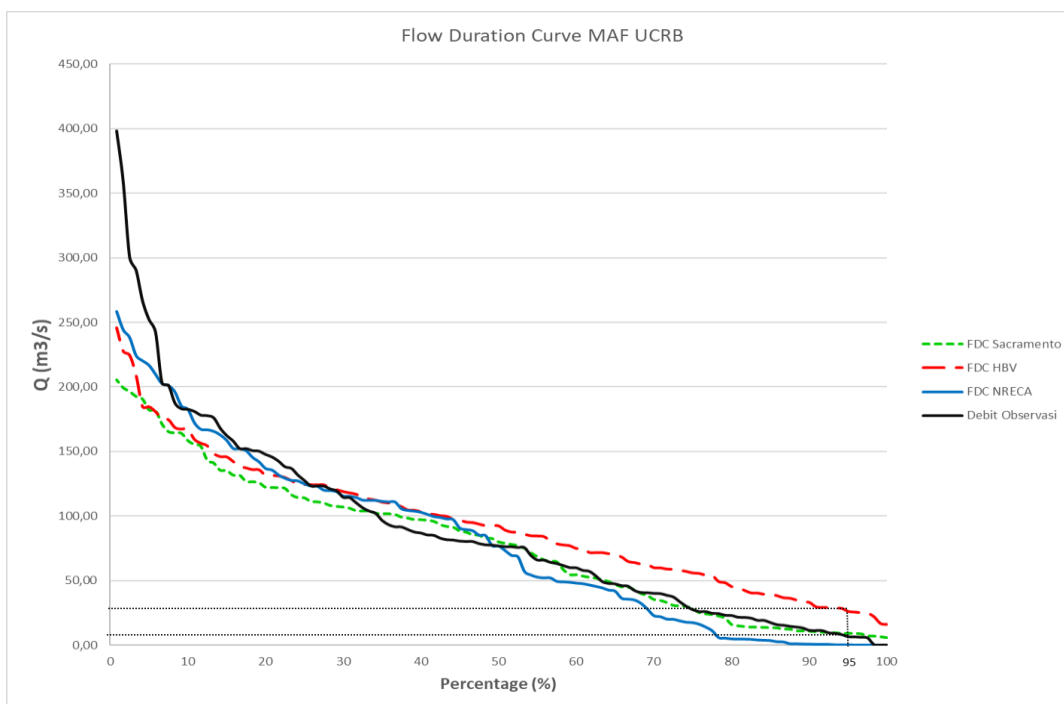
Hasil optimasi parameter akhir yang dapat menjadi acuan model bagi para perekayasa dan *modeler* di UCRB ditunjukkan pada Table 3.

Tabel 3. Parameters Sacramento model untuk Citarum Hulu

Model Parameter	Default Value	Default Minimum	Default Maximum
ADIMP	0,80	0	1
LZFPM	50,00	0	1000
LZFSM	50,00	0	1000
LZPK	0,01	0	1
LZSK	0,00	0	1
LZTWM	200,00	0	400
PCTIM	0,18	0	1
PFREE	0,80	0	1
REXP	1,50	0	3
RSERV	1,00	0	1
SARVA	0,60	0	1
SIDE	1,00	0	1
SSOUT	0,80	0	1
UZFWM	80,00	0	80
UZK	0,14	0	1
UZTWM	2,00	0	100
ZPERC	12,00	0	80



Hal kedua dari penelitian ini adalah hasil perhitungan debit 7Q10 yang dilakukan dengan menggunakan metode Gumbel minima dan Weibull minima, baik dari data pencatatan debit harian Nanjung maupun hasil perhitungan Sacramento. Jumlah debit 7Q10 untuk keduanya seperti yang disajikan dalam Table 2. Dari hasil tersebut didapatkan bahwa hasil dari metode Gumbel minima mendapatkan hasil yang negatif dimana hal ini tidak dapat digunakan untuk mengestimasi debit rendah pada sungai. Hal ini sesuai dengan hipotesis yang menyatakan bahwa metode Gumbel minima memiliki keterbatasan dalam perhitungan 7Q10 (Naghetini, 2017).



Gambar 2. Flow duration curve UCRB (2008-2017)

Untuk metode Weibull minima, hasil 7Q10 untuk pemodelan Sacramento adalah 2,18 m<sup>3</sup>/s sedangkan AWLR Nanjung adalah 1,24 m<sup>3</sup>/s. Hasil inilah yang dijadikan acuan sebagai pembanding debit lingkungan UCRB dengan metode FDCA.

Tabel 4. Debit lingkungan DAS Citarum Hulu

	7Q10 (m <sup>3</sup> /s)		Q95
	Gumbel min	Weibull min	(m <sup>3</sup> /s)
Sacramento Model	0,38	2,18	9,26
HBV Model			26,19
NRECA Model			0,22
Nanjung AWLR	-5,05	1,24	6,55

Nilai Q95 untuk Nanjung AWLR adalah 6,55 m<sup>3</sup>/s sedangkan hasil pemodelan curah hujan limpasan Sacramento adalah 7,06 m<sup>3</sup>/s, HBV adalah 26,19 m<sup>3</sup>/s dan NRECA 0,22 m<sup>3</sup>/s (Gambar 2). Nilai 7Q10 menunjukkan hasil yang secara signifikan lebih kecil dari Q95 untuk Sacramento dan HBV (Tabel 4), dimana di Indonesia penentuan debit pemeliharaan banyak digunakan Q95 (Hatmoko, 2020).

## Kesimpulan dan Saran

### Kesimpulan

1. Hasil analisis aliran rendah di UCRB menunjukkan bahwa debit aliran rendah yang diperoleh dengan metode indeks aliran rendah adalah Q95 sekitar 9 m<sup>3</sup>/s dan untuk 7Q10 2,18 m<sup>3</sup>/s dan 1,24 m<sup>3</sup>/s. Debit terbatas pada kondisi UCRB tanpa reservoir. Kedua debit ini dapat menjadi dasar penentuan debit lingkungan dengan menguji respon ekologi terhadap fitur lingkungan.
2. Dari hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa kedua metode yang digunakan untuk menentukan besarnya debit lingkungan (EF) memiliki perbedaan yang signifikan sehingga perlu dilakukan pengujian dan analisis lebih lanjut dengan mempertimbangkan kondisi ekologi atau habitat. Untuk selanjutnya, perlu dipastikan bahwa jumlah debit dapat mendukung kondisi ekologi di kawasan UCRB.
3. Dalam kegiatan Percepatan Pengendalian Pencemaran dan Kerusakan Daerah Aliran Sungai Citarum yang dicanangkan pemerintah sebagai implementasi dari Keppres tersebut, juga perlu dipastikan ketersediaan jumlah debit lingkungannya. Karena perbedaan yang signifikan tersebut tentunya mempengaruhi kondisi ekologi, serta mempengaruhi pengelolaan Sungai Citarum, khususnya di UCRB.

### Saran

Perlu dilakukan pengujian dan analisis lebih lanjut dengan mempertimbangkan kondisi ekologi atau habitat dalam penentuan debit lingkungan.

### Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Program Doktor Teknik Sipil ITB yang telah mendukung sebagian penelitian ini dan Universitas Mercu Buana atas dukungan dana terhadap penulis. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Balai Besar Wilayah Sungai (BBWS) Citarum yang telah memberikan data sekunder yang digunakan dalam penelitian ini.

### Daftar Referensi

- Amusja, A.Z., Ratner, N.S., Sokolov, B.L., 1991. Minimum river flow: state of art and prospects for research, Trudy GGI (Trans. State Hydrol. Inst., Leningrad, USSR) 350, 3–28.

- Beven, K.J., 2001. Rainfall-Runoff Modelling: The Primer. John Wiley & Sons, Chichester, United Kingdom.
- Bovee, K. D., 1982. A Guide to Stream Habitat Analysis Using the Instream Flow Incremental Methodology. Instream Flow Information Paper 12. U.S. Fish Wildl. Serv. FWS/OBS-82/26.
- Brunner, P., R. Therrien, P. Renard, C. T. Simmons, and H.-J. H. Franssen, 2017. Advances in understanding river-groundwater interactions, *Rev. Geophys.*, 55, 818–854. <https://doi.org/10.1002/2017RG000556>
- Davis, R., dan Hirji, R., 2003. Environmental Flows: Concepts and Methods, *Water Resources And Environment Technical Note C.1*, World Bank.
- Demuth, S., 1994. Regionalisation of low flows using a multiple regression approach—a review, *Proceedings of the XVIIth Conference of Danube countries*, Budapesht, vol. 1, pp. 115–122.
- Dyson M., Bergkamp G., Scanlon J. (eds), 2003. Flow. The essential of environmental flows. IUCN, Gland, Switzerland and Cambridge, UK.
- Granemann A.R.B., Mine M.R.M., Kaviski E., 2018. Frequency analysis of minimum flows, *Brazilian Journal of Water Resources*, Porto Alegre, 23, e17. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.0318170080>
- Hatmoko W., Levina, Radhika, Amirwandi, Firmansyah R., 2020. Quantification of Environmental Flow Requirement for some Rivers in West Java, *E3S Web of Conferences*, 148, 07003. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202014807003>
- Karimi S., Salarijazi M., Ghorbani K, dkk., 2021. Comparative assessment of environmental flow using hydrological methods of low flow indexes, Smakhtin, Tennant and flow duration curve. *Acta Geophys*, 69, 285–293. <https://doi.org/10.1007/s11600-021-00539-z>
- Karimi, S.S., Yasi, M., dan Eslamian, S., 2012. Use of hydrological methods for assessment of environmental flow in a river reach, *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, 9, 549–558. <https://doi.org/10.1007/s13762-012-0062-6>
- Kuntoro A.A., Cahyono M., Soentoro E.A., 2018. Land Cover and Climate Change Impact on River Discharge: Case Study of Upper Citarum River Basin. *J. Eng. Technol. Sci.*, 50(3), 364-381. <https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2018.50.3.4>
- McCuen, R.H., Knight, Z. dan Cutter, A.G., 2006. Evaluation of the Nash-Sutcliffe Efficiency Index, *Journal of Hydrologic Engineering*, 11, 597-602. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2006\)11:6\(597\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2006)11:6(597))
- Naghattini, M., 2017. Fundamentals of Statistical Hydrology. *Springer International Publishing Switzerland*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-43561-9>
- Nash J.E., Sutcliffe J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models: Part 1. A discussion of principles, *J. 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)

- Nestler, J. M., Milhous, R. T., Payne, T. R., Smith, D.L., 2019. History and review of the habitat suitability criteria curve in applied aquatic ecology, *River Res Applic*, 1–26, <https://doi.org/10.1002/rra.3509>
- Nikghalb S., Shokoohi A., Singh V.P., Yu R., 2016. Ecological Regime versus Minimum Environmental Flow: Comparison of Results for a River in a Semi Mediterranean Region. *Water Resour Manage*, 30(13), 4969–4984. <https://doi:10.1007/s11269-016-1488-2>
- Nnaji G.A., Huang W., Gitau M.W., Clark C., 2014. Frequency Analysis of Minimum Ecological Flow and Gage Height in Suwannee River, Florida, *Journal of Coastal Research*, 68(sp1), 152-159. <https://doi.org/10.2112/SI68-020.1>
- Pemerintah Indonesia, 1974. Undang-Undang No. 11 Tahun 1974 tentang Pengairan, *Lembaran Negara RI Tahun Tahun 1974 No. 65*, Sekretariat Negara, Jakarta.
- Pemerintah Indonesia, 2004. Undang-Undang No. 7 Tahun 2004 tentang Sumber Daya Air, *Lembaran Negara RI Tahun Tahun 2004 No. 32*, Sekretariat Negara, Jakarta.
- Pemerintah Indonesia, 2019. Undang-Undang No. 17 Tahun 2019 tentang Sumber Daya Air, *Lembaran Negara RI Tahun Tahun 2019 No. 190*, Sekretariat Negara, Jakarta.
- Pemerintah Indonesia, 2020. Undang-Undang No. 11 Tahun 2020 tentang Cipta Kerja, *Lembaran Negara RI Tahun Tahun 2020 No. 245*, Sekretariat Negara, Jakarta.
- Pemerintah Indonesia, 2011. Peraturan Pemerintah Nomor 38 Tahun 2011 tentang Sungai, *Lembaran Negara RI Tahun Tahun 2011 No. 74*, Sekretariat Negara, Jakarta.
- Pemerintah Indonesia, 2018. Peraturan Presiden Nomor 15 Tahun 2018 tentang Percepatan Pengendalian Pencemaran dan Kerusakan Daerah Aliran Sungai Citarum, *Lembaran Negara RI Tahun Tahun 2018 No. 30*, Sekretariat Negara, Jakarta.
- Podger, G., 2004. Rainfall Run Off Library Versi 1.05 User Guide, *Department of Infrastructure, Planning and Natural Resources*; CRC for Catchment Hydrology.
- Ponce, V.M., Lindquist, D.S., 1990. Management of baseflow augmentation: a review. *Water Resour. Bull.*, 26 (2), 259–268. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1990.tb01369.x>
- Poovakka A.K., Eldho T.I., 2019. A comparative study of conceptual rainfall-runoff models GR4J, AWBM and Sacramento at catchments in the upper Godavari river basin, India. *J. Earth Syst. Sci.*, 128:33. <https://doi.org/10.1007/s12040-018-1055-8>
- Pyrce, R. Hydrological low flow indices and their uses. Canada, 2004. <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/20714343> (accessed in September 20th, 2014).

- Riggs, H.C., 1972. Low flow investigations. Techniques of Water Resources Investigations of the USGS, Book 4, *Hydrological Analysis and Interpretation*, Washington DC, 18 pp.
- Riggs, H.C., 1976. Effects of man on low flows. Proceedings of the Conference on Environment, Aspects Irrigation and Drainage, University of Ottawa, *American Society of Civil Engineers*, New York, pp. 306–314.
- Searcy, J.C., 1959. Flow duration curves. United States Geological Survey, Washington, DC, *Water Supply Paper*, 1542A.
- Smakhtin, V.U., 2001. Low flow hydrology: A Review, *Journal of Hydrology*, 240, 147-186. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00340-1](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00340-1)
- Smakhtin, V.U., Shilpakar R.L. dan Hughes D.A., 2006. Hydrology based assessment of environmental flows: an example from Nepal, *Hydrological Sciences Journal*, 51:2, 207-222. <https://doi.org/10.1623/hysj.51.2.207>
- Supatmanto B.D., Yusuf S.M., 2015. Hydrological study based on climate changes using SWAT model in Jatiluhur water catchment area, *J. Sains & Teknologi Modifikasi Cuaca*, 16(2), 55-60. <https://doi.org/10.29122/jstmc.v16i2.1047>
- Suwelo, I. S., 2005. Spesies Ikan Langka dan Terancam Punah Perlu Dilindungi Undang-undang, *Jurnal Ilmu-ilmu Perairan dan Perikanan Indonesia*, Jilid 12, Nomor 2: 161-168
- Syiva, H., et al, 2020. Rainfall distribution in relation to flooding in upper Citarum watershed, Indonesia. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 500, 012088. <https://doi:10.1088/1755-1315/500/1/012088>
- Solander K.C., Bennett K.E., Middleton R.S., 2017. Shifts in historical streamflow extremes in the Colorado River Basin, *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 12, 363-377. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2017.05.004>
- Tallaksen, L.M., 1995. A review of baseflow recession analysis, *Journal Hydrology*, 165, 349–370. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(94\)02540-R](https://doi.org/10.1016/0022-1694(94)02540-R)
- Tharme, R. E., 2003. A Global Perspective on Environmental Flow Assessment: Emerging Trends in The Development and Application of Environmental Flow Methodologies for Rivers, *River Research and Applications*, 19: 397–441. <https://doi.org/10.1002/rra.736>
- Toriman M.E., Jaafar M., Abdullah S.M.S., 2008. Environmental flow modelling as a tool for water resources management: a study of detailed environmental impact assessment (DEIA) in Sungai Pelus catchment, Malaysia, *Journal of Social Sciences and Humanities*, 3(1), 1-10.
- United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization/World Meteorological Organization, 1992. International Glossary of Hydrology. Second edition, UNESCO, Paris.
- Vasak, L., 1977. Low flow studies. A literature survey. Free University, Amsterdam, Netherlands.

- Verma RK, Murthy S, Verma S. et. al., 2017. Design flow duration curves for environmental flows estimation in Damodar River Basin, India, *Appl Water Sci*, 7, 1283–1293. <https://doi.org/10.1007/s13201-016-0486-0>
- Vogel, R.M., dan Fennessey, N.M., 1994. Flow duration curves. I. A new interpretation and confidence intervals, *J. Water Resour. Plan. Manag.*, 120 (4), 485–504. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(1994\)120:4\(485\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(1994)120:4(485))
- Vogel, R.M., dan Fennessey, N.M., 1995. Flow duration curves. II. a review of applications in water resource planning, *Water Resour. Bull.*, 31 (6), 1029–1039. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1995.tb03419.x>
- Vogel, R.M., dan Kroll, C.N., 1989. Low-flow frequency analysis using probability-plot correlation coefficients, *J. Water Res. Plan. Manag. (ASCE)*, 115 (3), 338–357. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(1989\)115:3\(338\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(1989)115:3(338))
- Wijayanti, Y., Anda, M., Safitri, L., Tarmadja, S., Juliastuti, dan Setyandito, O., 2020. Water-energy nexus development for sustainable water management in Indonesia, *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 426, 012058. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/426/1/012058>
- World Meteorological Organization, 1988, 2004, 2006. Technical Regulations (WMO-No. 49), Geneva.
- World Meteorological Organization, 2009. Manual on Low Flow Estimation and Prediction, (WMO-No. 1029), Geneva.
- Xu W., Dong Z., Hao Z., Ren L., Wang W., Li D., 2019. Ecological flow regime and its satisfactory degree assessment based on an integrated method, *Polish Journal of Environmental Studies*, 28(5), 3959-3970. <https://doi:10.15244/pjoes/97395>
- Zeiringer B., Seliger C., Greimel F., Schmutz S., 2018. River Hydrology, Flow Alteration, and Environmental Flow. In: Schmutz S., Sendzimir J. (eds) Riverine Ecosystem Management. *Aquatic Ecology Series*, vol 8. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-73250-3\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-73250-3_4)