



## Penentuan Indeks Ekstrem Hidrologi menggunakan Hasil Simulasi Model HBV (Studi Kasus : DAS Ciliwung Hulu)

Determination of Extreme Hydrological Index using HBV Model Simulation Results (Case Study: Upper Ciliwung Watershed)

Isnayulia Lestari dan Bambang Dwi Dasanto\*

Departemen Geofisika dan Meteorologi, Gedung FMIPA, IPB, Jl. Meranti Wing 19 Lv.4 Kampus IPB Darmaga, Bogor 16680

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 23 October 2018

Received in revised form 16 April 2019

Accepted 28 April 2019

doi: 10.29244/j.agromet.33.1.20-29

#### Keywords:

Automatic calibration  
Climate change impact  
Discharged simulation  
General circulation model  
Parameter optimization

### ABSTRACT

The study of climate change on hydrological response is a crucial as climate change impact will drive the change in hydrological regimes of river. Upper Ciliwung watershed is one of the critical rivers in Java Island, which has been affected by climate change. This study aims to: (i) simulate the discharge flow using the Hydrologiska Byrans Vattenbalansavdelning (HBV) model; (ii) simulate future flow using three general circulation models (GCM) namely Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO) Mk.3.6.0, Model for Interdisciplinary Research on Climate version 5 (MIROC5), and Geophysical Fluid Dynamics Laboratory-Coupled Model generation 3 (GFDL-CM3); (iii) determine the changes of extreme hydrological index during historical period (2001-2015) and projected period (2031-2045). The historical year simulation and projections are used to determine eight hydrologic extreme indices for high flow and low flow. We calibrated the HBV model for two years (2001-2002) and validated it for two years (2003-2004). Our model performed well in discharge simulation as shown by the NSE values (0.66 for calibration and validation). Then we calculated the indices for each period used (historical and projected). To show the changes in hydrological regimes, we compare the indices between two periods. Changes in the index of the two periods tend to decrease in value on the index parameters that characterize the minimum extreme events. Hence, that it is possible in the projected period there will be extreme hydrological events in the form of drought.

## PENDAHULUAN

Perubahan iklim sering dikaitkan dengan pemanasan global (AghaKouchak et al., 2014; James dan Washington, 2013) yang disebabkan oleh peningkatan gas rumah kaca dan berdampak pada kondisi lingkungan dan atmosfer bumi. Dampak perubahan iklim dapat merugikan bagi manusia (Mitchell et al., 2016), sehingga perubahan iklim menjadi kajian yang penting untuk diteliti saat ini. Kajian perubahan iklim terhadap respon hidrologi suatu daerah aliran sungai (DAS) berkaitan erat dengan kuantitas debit aliran sungai (Arnell dan Gosling, 2013; Hoang et al., 2016). Peningkatan frekuensi kejadian banjir (Winsemius et al., 2015) dan kekeringan (Taufik et al., 2017), terutama di Indonesia, merupakan salah

satu dampak perubahan iklim terhadap lingkungan. Menurut data informasi bencana Indonesia (DIBI) yang disusun oleh Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB, 2018), kejadian bencana hidrometeorologi (banjir dan kekeringan) di Indonesia pada tahun 2007-2017 sebesar 88% dari jumlah total kejadian bencana. Jumlah tersebut selalu mengalami peningkatan pada setiap tahun.

Secara ilmiah, perubahan iklim ditandai dengan peningkatan suhu yang dapat mempengaruhi intensitas siklus hidrologi, debit aliran dan hujan. Proyeksi suhu yang meningkat secara konsisten secara bersamaan akan meningkatkan evapotranspirasi potensial dan mengarah pada pengurangan debit aliran sungai (Ferijal et al., 2016; Taye et al., 2015). Perubahan frekuensi kejadian hujan akibat pengaruh

\* Corresponding author: [bambangdwi@apps.ipb.ac.id](mailto:bambangdwi@apps.ipb.ac.id)

perubahan iklim telah terjadi di beberapa wilayah Indonesia. Hasil proyeksi iklim pada tahun 2050 menunjukkan peningkatan curah hujan di sebagian besar Jawa, Nusa Tenggara dan Papua, hingga penurunan curah hujan di Sumatera dan Kalimantan (Ministry of Environment, 2010). Peningkatan curah hujan menjadi penyebab peningkatan intensitas debit aliran (Hoang et al., 2016; Supatmanto dan Yusuf, 2015; Suripin dan Kurniani, 2016). Selain perubahan suhu dan curah hujan, perubahan lahan dan hutan ternyata mempengaruhi karakteristik hidrologi. Hal tersebut ditandai dengan perubahan nilai koefisien aliran dan debit aliran sungai (Febryanto dan Farda, 2016; Harifa et al., 2017; Mubarak et al., 2015).

Karakteristik hidrologi yang berubah sering dikaitkan dengan kejadian ekstrem hidrologi. Ekstrem hidrologi berkaitan dengan perubahan nilai maksimum dan minimum dari debit aliran sungai akibat gangguan pada siklus hidrologi. Peningkatan curah hujan pada bulan basah (musim hujan) meningkatkan potensi kejadian banjir pada hilir sungai, sedangkan penurunan curah hujan yang ekstrem dapat meningkatkan potensi kekeringan di DAS. Identifikasi secara kuantitatif dari kejadian ekstrem hidrologi dapat dianalisis menggunakan data debit yang dijadikan sebagai indeks. Proyeksi indeks ekstrem hidrologi dapat dihitung dengan data debit proyeksi yang disimulasikan dengan model hidrologi. Beberapa studi menyimulasikan debit aliran sungai menggunakan data *general circulation model* (GCM) di berbagai wilayah dunia (Hagemann et al., 2013; Meresa dan Gatachew, 2015; van Vliet et al., 2013).

Studi mengenai indeks ekstrem hidrologi belum banyak dilakukan di Indonesia. Padahal, Indonesia memiliki 108 DAS dalam kategori kritis (berdasarkan Keputusan Menteri Kehutanan No. 328/Menhut-II/2009) yang berpotensi tinggi mengalami banjir pada musim hujan dan kekeringan pada musim kemarau. DAS Ciliwung merupakan salah satu DAS kritis yang mana aliran sungai Ciliwung bermuara di Provinsi Jakarta dan sering mengakibatkan banjir. Beberapa studi telah mengidentifikasi dampak dari skenario perubahan iklim terhadap kondisi hidrologi DAS Ciliwung, meliputi perubahan intensitas banjir, nilai debit puncak, kualitas dan kuantitas air (Kumar et al., 2017; Mishra et al., 2018; Rafiei Emam et al., 2016), namun belum ada penelitian yang spesifik mengidentifikasi pengaruh skenario perubahan iklim terhadap nilai indeks hidrologi ekstrim. Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi perubahan nilai indeks ekstrem

hidrologi di DAS Ciliwung bagian Hulu berdasarkan skenario perubahan iklim.

## METODE PENELITIAN

### Data Penelitian

Sebagai input data pada model HBV, data yang digunakan berupa data parameter iklim harian (meliputi data curah hujan, suhu maksimum, suhu minimum, kecepatan angin, dan kelembaban relatif) dari stasiun Meteorologi Citeko tahun 2001-2015, data curah hujan harian di tiga pos pengukuran curah hujan Gadog, Cilember, Gunung Mas tahun 2001-2015, data debit harian hasil pengukuran di Bendung Katulampa tahun 2001-2004. Wilayah subDAS Ciliwung bagian Hulu dibatasi oleh Bendung Katulampa yang disajikan pada Gambar 1. Untuk memproyeksikan debit harian pada tahun 2050, data iklim yang digunakan sebagai input model HBV, berupa data curah hujan dan suhu harian hasil proyeksi yang telah dikoreksi oleh program penelitian *Climate Change, Agricultural and Food Security* (CCAFS) menggunakan metode *bias correction* (Navarro-Racines dan Tarapues, 2015). Terdapat tiga model GCM yang digunakan dalam penelitian ini, meliputi *Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO) Mk.3.6.0, Model for Interdisciplinary Research on Climate version 5 (MIROC5)*, dan *Geophysical Fluid Dynamics Laboratory-Coupled Model generation 3 (GFDL-CM3)*. Ketiga data tersebut diperoleh dari website <http://ccafs-climate.org/>, dan informasi lain mengenai data proyeksi iklim disajikan pada Tabel 1.

### Perhitungan Curah Hujan Wilayah dan Evapotranspirasi Potensial Bulanan

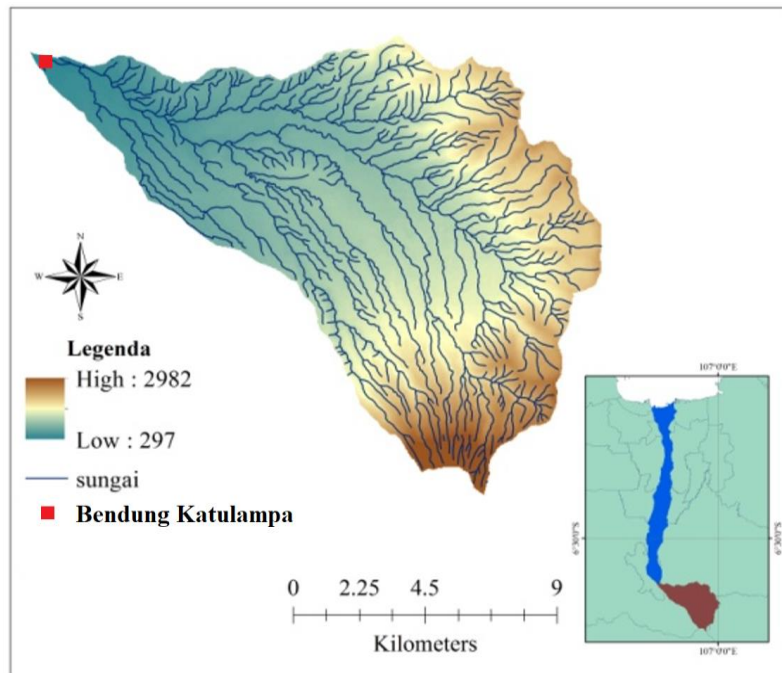
Curah hujan wilayah dan evapotranspirasi potensial bulanan digunakan sebagai input data dalam model HBV. Curah hujan wilayah dihitung menggunakan metode *polygon Thiessen*. Data yang digunakan adalah data curah hujan di pos pengukuran Gadog, Cilember, Gunung Mas, dan Citeko. Secara matematis, perhitungan curah hujan wilayah disajikan pada Persamaan (1).

$$P_w = \frac{\sum P_i A_i}{A} \quad (1)$$

dimana  $P_w$  curah hujan wilayah (mm),  $P_i$  curah hujan pada stasiun ke- $i$ ,  $A_i$  luas poligon yang terwakili oleh stasiun  $i$  ( $m^2$ ),  $A$  luas wilayah total ( $m^2$ ). Sedangkan untuk nilai evapotranspirasi potensial dihitung menggunakan metode *Thornthwaite* (Thornthwaite, 1948).

**Tabel 1** Model GCM yang digunakan dalam penelitian.

No	Nama GCM	Institusi	Resolusi (lon x lat)
1	CSIRO Mk 3.6.0	CSIRO-QCCCE ( <i>Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization in collaboration with the Queensland Climate Change Centre of Excellence</i> )	1.87° x1.87°
2	GFDL cm3	GFDL-NOAA ( <i>Geophysical Fluid Dynamic Laboratory, National Oceanic and Atmospheric Administration</i> )	1.875°x1.875°
3	MIROC5	MIROC ( <i>Model for Interdisciplinary Research on Climate</i> ), Japan Agency for Marine Earth Science and Technology	1.95°x1.95°

**Gambar 1** Wilayah kajian penelitian di DAS Ciliwung, Jawa Barat.

### Kalibrasi dan Validasi Model HBV

Model *Hydrologiska Byrans Vattenbalansavdelning* (HBV) merupakan model distribusi *rainfall-runoff* yang bersifat semi konseptual dari suatu daerah tangkapan air untuk mensimulasikan debit aliran sungai (Seibert, 1996). Model HBV terbagi kedalam empat submodel meliputi *snow routine*, *soil moisture routine*, *response function*, dan *routing routine*. Untuk kawasan tropis, submodel *snow routine* tidak mempengaruhi debit aliran yang dihasilkan oleh model. Input neraca air pada model hanya berasal dari nilai curah hujan. Submodel *soil moisture routine* berperan untuk menghitung evaporasi aktual, kelembaban tanah dan *groundwater recharge* berdasarkan input data evaporasi potensial. Perhitungan nilai *runoff* dan *groundwater level* menggunakan input nilai *groundwater recharge* dan evaporasi potensial diolah pada submodel *response routine* dan *routing routine*.

Kalibrasi model HBV dilakukan pada 10 parameter yang terbagi dalam tiga submodel, yaitu *soil moisture routine*, *response function*, dan *routing*

*routine* (Tabel 2). Kalibrasi dilakukan secara otomatis menggunakan *tools* simulasi *Monte Carlo* yang tersedia pada model. Pada tiap iterasi, nilai tiap parameter diambil secara acak dalam rentang nilai minimum dan maksimum yang telah ditentukan. Pada penelitian ini, kalibrasi model menggunakan data periode 2001-2002, sedangkan validasi model menggunakan data periode 2003-2004.

Indikator statistik yang digunakan sebagai nilai kemampuan model HBV adalah *Nash-Sutcliffe efficiency* (NSE). Model HBV dapat digunakan untuk mensimulasikan prediksi debit jika nilai NSE mendekati angka 1 atau minimal 0.60 (Moriyas et al., 2007). Secara matematis perhitungan nilai NSE diperoleh menggunakan Persamaan (2).

$$NSE = 1 - \frac{\sum(Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum(Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (2)$$

dimana  $Q_{obs}$  adalah nilai debit observasi, dan  $Q_{sim}$  nilai debit hasil simulasi. Kedua parameter harus memiliki satuan yang sama yaitu mm/hari atau  $m^3/s$ .

**Tabel 2** Tabulasi rentang nilai parameter untuk simulasi otomatis Monte Carlo di DAS Ciliwung Hulu.

Submodel	Parameter	Definisi	Min	Maks
Soil Moisture Routine	FC	Penyimpanan maksimum kelembaban tanah	50	500
	LP	Nilai kelembaban tanah di atas yang AET mencapai PET	0.3	1
	BETA	Parameter yang menentukan kontribusi relatif terhadap limpasan dari hujan atau lelehan salju	0.1	6
Response Routine	PERC	Parameter ambang batas	0	10
	UZL	Parameter ambang batas	0	100
	K0	Koefisien penyimpanan (atau resesi) 0	0	0.5
	K1	Koefisien penyimpanan (atau resesi) 1	0	0.3
Routing Routine	K2	Koefisien penyimpanan (atau resesi) 2	0	0.1
	MAXBAS	Panjang fungsi pembobotan segitiga	1	5
Other	Cet	Faktor koreksi evaporasi potensial	0	0.3

### Perhitungan nilai Indeks Ekstrem Hidrologi

Simulasi model dilakukan pada dua periode, yaitu tahun 2001-2015 (proyeksi masa lampau), dan tahun 2031-2045 (proyeksi masa depan). Debit yang dihasilkan oleh model digunakan untuk menghitung nilai indeks ekstrem hidrologi pada tiap periode. Indeks ekstrem hidrologi, antara lain: MIN7, MIN, MAX, CMIN, CMAX, NHF, Q10 dan Q90 yang diuraikan sebagai berikut.

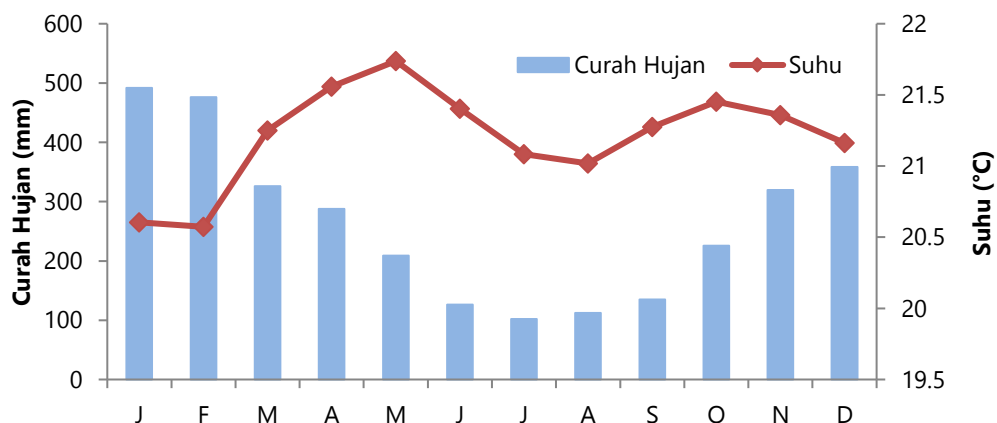
1. *MIN7* rata-rata nilai debit minimum 7-harian.
2. *MIN* rata-rata debit minimum tahunan.
3. *MAX* rata-rata debit maksimum tahunan.
4. *CMIN* koefisien variasi dari minimum debit tahunan.
5. *CMAX* koefisien variasi dari maksimum debit tahunan.
6. *NHF* (*number of high flow*) debit yang melebihi nilai *Q* yang ditentukan berdasarkan debit rata-rata ( $\alpha$ ) dan standar deviasi dari debit harian ( $\sigma$ ). *NHF* ditentukan saat nilai debit lebih besar dari  $Q = \alpha + 3\sigma$ .
7. *Q10* presentil debit aliran yang sama atau melebihi peluang 10% terjadinya debit. Penentuan nilai ini berdasarkan kurva *flow duration curve*.

8. *Q90* merupakan presentil debit aliran yang sama atau melebihi peluang 90% terjadinya debit. Penentuan nilai ini berdasarkan kurva *flow duration curve*.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Kondisi SubDAS Ciliwung Hulu

SubDAS Ciliwung Hulu berada di wilayah administrasi Kabupaten Bogor yang merupakan wilayah pegunungan dengan elevasi antara 297-2982 mdpl (Gambar 1). Secara astronomis, subDAS Ciliwung bagian hulu terletak pada 6°37'30"-6°46'10" LS dan 106°49'36"-107°0'15" BT. Topografi wilayah subDAS Ciliwung Hulu didominasi (sekitar 52% dari total wilayah) oleh lereng gunung dan perbukitan, dengan kemiringan lahan lebih dari 15%. Bentuk topografi tersebut mengakibatkan aliran sungai Ciliwung bagian hulu berarus deras dengan penampang sungai berbatu. Berdasarkan analisis pola curah hujan (Gambar 2), subDAS Ciliwung Hulu memiliki dua puncak bulan basah dalam satu tahun (Januari dan Desember), yaitu pola curah hujan musonik (Aldrian dan Susanto, 2003).

**Gambar 2** Variabilitas curah hujan dan suhu rata-rata bulanan di subDAS Ciliwung Hulu tahun 2001-2015.

Curah hujan bulanan pada periode kering (Juni-September) relatif tinggi (lebih dari 100 mm/bulan) disebabkan kondisi geografis wilayah yang berada di kaki gunung sehingga sering terjadi hujan orografis. Menurut Narulita et al. (2010), DAS Ciliwung memiliki tipe hujan dengan intensitas rendah berdurasi lama pada periode basah, dan intensitas tinggi berdurasi singkat pada periode kemarau. Kondisi rerata suhu bulanan yang berkisar 20-22 °C dan kondisi topografi yang menyajikan pemandangan indah, menjadikan kawasan subDAS Ciliwung Hulu sebagai salah satu lokasi wisata di Bogor. Hal tersebut berdampak pada peningkatan laju konversi lahan (Indriastuti, 2016; Ruspenti et al., 2016), sehingga terjadi penurunan fungsi hidrologis kawasan hulu (Dewi, 2015; Rafiei Emam et al., 2016).

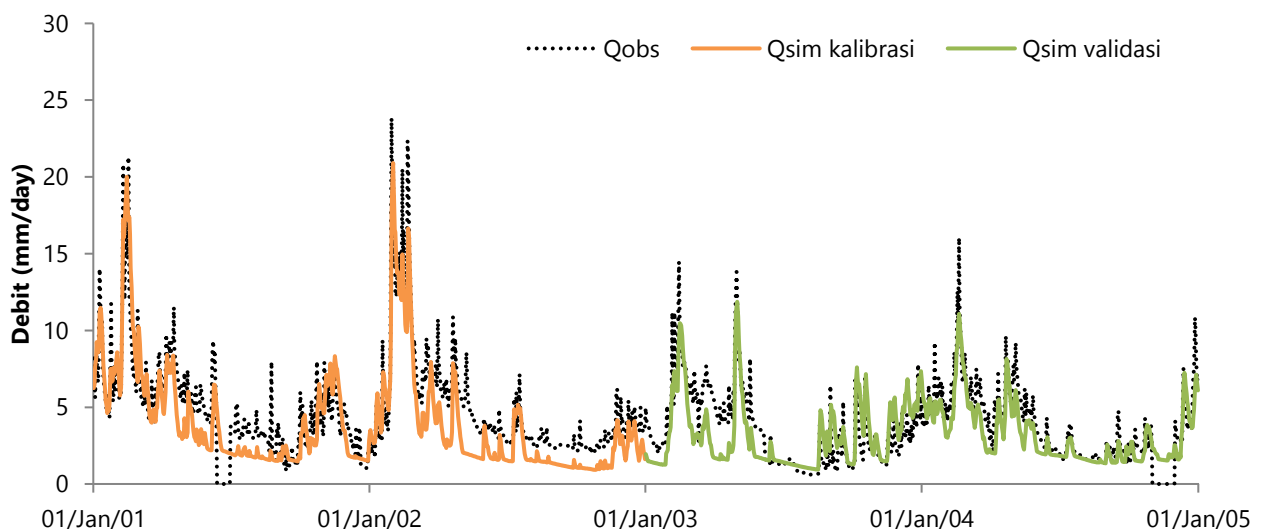
### Evaluasi Model HBV

Evaluasi secara visual dilakukan dengan membandingkan grafik debit harian hasil observasi dan hasil simulasi model (Gambar 3). Grafik debit simulasi pada periode kalibrasi maupun validasi memiliki pola

yang sama dengan debit hasil observasi. Kesamaan pola tersebut menunjukkan bahwa data iklim yang digunakan sebagai input model sudah mampu merepresentasikan kondisi iklim di subDAS Ciliwung Hulu. Pada periode kalibrasi, grafik debit simulasi bagian aliran rendah (*baseflow*) cenderung lebih rendah dari pada debit observasi, namun hal tersebut tidak terjadi pada periode validasi. Simulasi aliran rendah yang kurang sesuai dengan hasil observasi menunjukkan bahwa terdapat parameter model yang perlu dikalibrasi lebih lanjut. Namun, dalam penelitian kali ini, kami tidak melakukan kalibrasi tambahan, selain hasil kalibrasi otomatis *Monte Carlo*. Pada proses kalibrasi, dihasilkan perubahan nilai pada parameter model yang disajikan pada Tabel 3. Nilai parameter yang baru digunakan untuk simulasi model pada periode validasi. Berdasarkan indikator statistik, nilai NSE pada periode kalibrasi menghasilkan nilai yang hampir sama (0.66) dengan periode validasi (0.65). Nilai NSE periode validasi yang lebih rendah dari periode kalibrasi disebabkan oleh data kosong yang terdapat pada debit observasi tahun 2004.

**Tabel 3** Nilai optimum parameter setelah kalibrasi.

Parameter	Nilai setelah kalibrasi
PERC	3.40
UZL	13.30
K0	0.03
K1	0.07
K2	0.01
MAXBAS	1.00
FC	466.65
LP	0.44
BETA	0.18
Cet	0.17

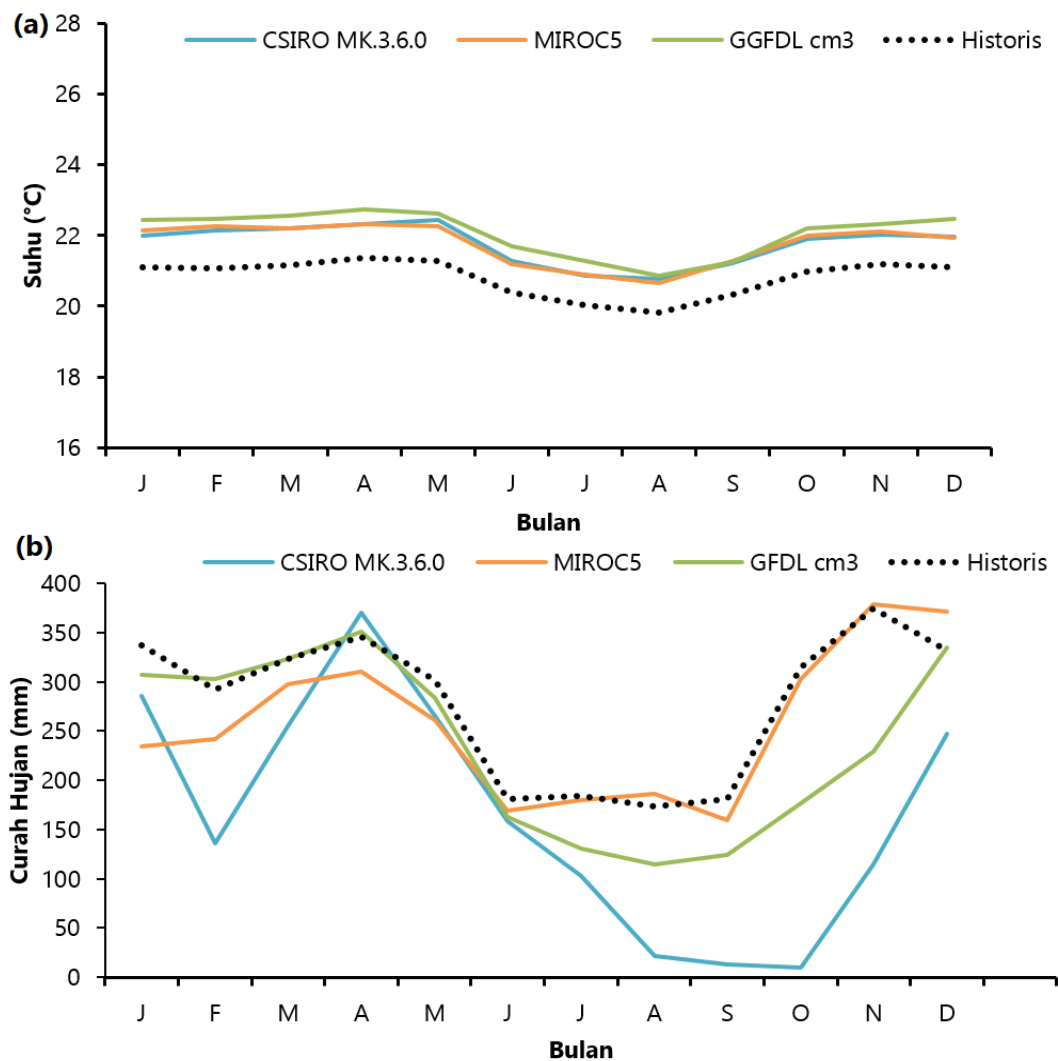


**Gambar 3** Grafik perbandingan debit hasil simulasi dengan debit observasi pada periode kalibrasi (2001-2002, jingga) dan periode validasi (2003-2004, hijau).

### Proyeksi Perubahan Iklim

Curah hujan dan suhu diprediksi menggunakan data GCM. GCM (*General Circulation Model*) merupakan model numerik yang menggambarkan proses fisik di atmosfer, laut, kriosfer dan permukaan tanah berdasarkan prinsip-prinsip fisika, kimia dan biologi. GCM juga dapat mensimulasikan respon sistem iklim global terhadap peningkatan konsentrasi gas rumah kaca (IPCC 2013). GCM memiliki resolusi spasial yang terbatas sehingga akan memberikan kesalahan penilaian (*bias*) dalam pemanfaatannya secara langsung. Perlu dilakukan *downscaling* sehingga memberikan hasil penilaian yang sesuai dengan wilayah yang diteliti. *Downscaling* merupakan teknik regionalisasi yang dimaksudkan untuk menyediakan iklim dengan resolusi yang tinggi. Metode koreksi *bias* merupakan salah satu metode *downscaling* yang mengoreksi keluaran GCM yang diproyeksikan menggunakan perbedaan rata-rata dan variabilitas antara GCM dan data observasi dalam periode tertentu dengan variabilitas data diasumsikan sama antara keduanya (Hawkins *et al*/2013).

Hasil proyeksi suhu dari ketiga model GCM memiliki nilai yang lebih tinggi dibandingkan dengan suhu *baseline*. Suhu *baseline* atau historis ada pada rentang 20-21°C, sedangkan suhu proyeksi ada pada rentang 21-23°C. Nilai suhu cenderung konstan sepanjang tahun karena DAS Ciliwung berada di wilayah tropis yang mana terjadi penyinaran matahari sepanjang tahun, sehingga nilai suhu konstan. Hal tersebut berbeda dengan curah hujan. Berdasarkan bentuk grafik pada Gambar 4, curah hujan di DAS Ciliwung mengikuti pola *moonsunal* dimana pola tersebut dicirikan dengan adanya satu lembah yang menandakan musim kemarau dan satu gunung yang menandakan musim penghujan. Musim penghujan terjadi pada bulan basah (Desember-Januari-Februari), sedangkan musim kemarau terjadi pada bulan kering (Juni-Juli-Agustus). Dari pola dan persebaran data tersebut, maka ditentukan model GCM yang bagus untuk digunakan.



**Gambar 4** Grafik perbandingan data iklim bulanan hasil proyeksi (tahun 2031-2045) dengan data observasi (tahun 1980-2001), untuk parameter: (a) suhu, dan (b) curah hujan.

Dari ketiga model hanya model GCM MIROC5 dan GFDL cm3 yang digunakan. Model GCM CSIRO Mk.3.6.0 tidak digunakan karena polanya yang jauh berbeda dari curah hujan historis dan sebaran nilainya berbeda dengan data historis. Dalam hal ini model CSIRO Mk.3.6.0 dianggap tidak mewakili kondisi klimatologis di DAS Ciliwung Hulu.

### Perubahan Indeks Ekstrem Hidrologi

Nilai yang menunjukkan sifat atau karakteristik suatu wilayah bisa ditunjukkan dalam nilai indeks. Indeks ekstrem hidrologi merupakan nilai yang mencirikan bahwa suatu wilayah terjadi ekstrem hidrologi atau tidak menggunakan analisis statistik sederhana dari data debit. Indeks ini dapat melihat peluang terjadinya bencana hidrologi ekstrem (banjir atau kekeringan). Ada beberapa indeks yang digunakan, yaitu MIN7, MIN, MAX, CMIN, CMAX, NHF, Q10 dan Q90. Masing-masing indeks memiliki arti yang berbeda. Namun secara keseluruhan indeks tersebut saling berhubungan.

Penelitian ini mencoba menghitung indeks di wilayah hulu sungai Ciliwung. Wilayah hulu dipilih karena stasiun hidrologi pertama yang ada, yaitu Bendung Katulampa merupakan titik pengamatan pertama yang digunakan sebagai dasar peringatan dini (*Early Warnig System*) banjir di Jakarta. Dengan dihitungnya nilai indeks di wilayah hulu, nilai tersebut dapat dijadikan acuan untuk kejadian bencana ekstrem hidrologi di Jakarta. Indeks yang dihitung didasarkan pada data debit. Data debit observasi yang tidak lengkap menjadi kendala dalam perhitungan indeks. Perhitungan indeks perlu data yang lengkap dan panjang. Sehingga, simulasi model HBV dengan keluaran debit menjadi solusi dari kendala tersebut. Selain itu, simulasi model HBV juga dapat menentukan seberapa besar debit proyeksi dengan *input* simulasi menggunakan data proyeksi iklim.

Perhitungan nilai indeks secara statistik disajikan pada Tabel 4. Indeks tersebut dihitung dalam rentang waktu 15 tahun supaya memudahkan dalam melihat perbedaan nilai indeks antara tahun historis (2001-

2015) dan tahun proyeksi (2031-2045). Sehingga persentase kenaikan atau penurunan masing-masing indeks terlihat. Persentase tersebut disajikan dalam Gambar 6. Nilai indeks dapat dihitung secara tahunan. Indeks tahunan dapat digunakan untuk menentukan ambang batas kejadian ekstrem hidrologi dengan beberapa syarat, misal seberapa persen nilai dari masing-masing indeks berubah. Penentuan syarat tersebut juga harus disesuaikan dengan kondisi wilayah yang dikaji.

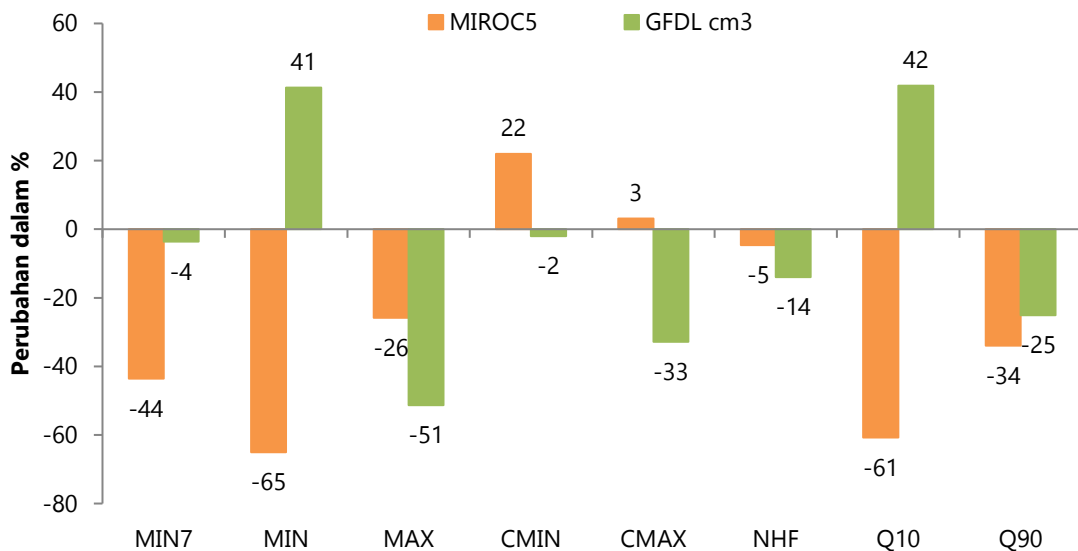
Indeks antara periode historis dan periode proyeksi dari kedua model cenderung menunjukkan penurunan nilai indeks. Penurunan nilai indeks MIN7 pada model GCM MIROC5 terjadi penurunan sebesar 44%. Sedangkan pada model GCM GFDL cm3 hanya sebesar 4%. Indeks MIN dan MAX pada kedua model mengalami penurunan nilai, kecuali pada indeks MIN model GCM GFDL cm3 mengalami kenaikan indeks MIN sebesar 41%. Jika nilai MIN dan MAX mengalami penurunan dan kenaikan yang hampir sama, maka peluang persebaran debit di masa depan cenderung menyebar pada debit rata-rata.

Persentase persebaran nilai debit maksimum dan minimum dapat dilihat melalui indeks CMIN dan CMAX. Model GCM MIROC5, presentase debit minimum akan lebih banyak terjadi dibanding debit maksimumnya. Sedangkan pada model GCM GFDL cm3, persentase debit maksimumnya mengalami penurunan lebih banyak dibandingkan debit minimumnya. NHF atau jumlah debit tinggi pada setiap model mengalami penurunan jumlahnya. Begitupun pada indeks Q10 dan Q90, pada kedua model mengalami penurunan indeks kecuali indeks Q10 pada model GFDL cm3 mengalami peningkatan sebesar 42%. Indeks-indeks tersebut mengalami penurunan nilai yang beragam.

Berdasarkan persentase kenaikan atau penurunan nilai indeks dan hubungan antar indeks, kedua model tersebut menunjukkan karakteristik ekstrem hidrologi pada periode proyeksi adalah ekstrem minimum. Ekstrem minimum berarti debit selama periode 15 tahun kedepan cenderung terjadi penurunan nilai debit.

**Tabel 4** Indeks ekstrem hidrologi.

Indeks	2001-2015	2031-2045	
		GFDL	MIROC
MIN7	2.77	1.56	2.67
MIN	1.16	0.41	1.64
MAX	16.74	12.41	8.15
CMIN	26.08	48.07	24.04
CMAX	53.05	56.14	20.23
NHF	107	102	92
Q10	1.20	0.47	1.70
Q90	6.70	4.42	5.02



**Gambar 5** Selisih indeks ekstrem hidrologi antara periode 2001-2015 dengan 2031-2045.

Penurunan nilai tersebut memungkinkan terjadi selama periode 2031-2045 akan ada tahun yang mengalami bencana hidrologi kekeringan. Dari kedua model tersebut, proyeksi menggunakan model GCM GFDL cm3 memiliki peluang ekstrem minimum lebih besar dibandingkan model GCM MIROC5. Hal tersebut dapat dilihat dari indeks yang mengarah pada debit minimum lebih banyak terjadi peningkatan pada tahun kedepan. Bencana hidrologi di Ciliwung Hulu selama periode historis memang belum terjadi, hanya karakteristik hidrologi sudah mulai menunjukkan perubahan. Perubahan nilai debit di DAS wilayah hulu lebih berdampak pada DAS bagian hilir. Penentuan proyeksi kejadian ekstrem hidrologi hanya digunakan perhitungan indeks dari perhitungan simulasi dengan *input* dua model GCM. Data *input* yang sedikit digunakan bisa membingungkan jika terjadi selisih yang berkebalikan antara dua model GCM. Akan lebih baik jika digunakan banyak model GCM. Proyeksi dari banyak model akan memudahkan dalam penentuan kejadian ekstrem karena dapat melihat pola dan nilai indeks secara umum.

Bencana hidrologi di Ciliwung Hulu selama periode historis memang belum terjadi, hanya karakteristik hidrologi sudah mulai menunjukkan perubahan. Perubahan karakteristik hidrologi DAS wilayah hulu lebih berdampak pada DAS bagian hilir. Bagian hilir sungai Ciliwung sering terkena bencana hidrologi berupa banjir. Namun tidak menutup kemungkinan pada tahun mendatang akan terjadi bencana hidrologi kekeringan di wilayah Hulu. Banjir tahunan di wilayah hilir tidak hanya disebabkan oleh debit yang tinggi. Ada faktor lain yang mempengaruhi seperti tutupan lahan, irigasi dan lain sebagainya.

Studi ini perlu pengembangan lanjutan. Dari penggunaan model hidrologi HBV, *software* HBV-Light

sangat mudah diaplikasikan. Namun, perlu pengembangan kembali dengan melibatkan parameter dan faktor lain dari model sehingga model lebih kompleks dan lebih menggambarkan kondisi permukaan serta keluarannya. Selain itu, penggunaan model GCM perlu diperbanyak kembali supaya dapat dipilih model yang bagus dan sesuai pada wilayah kajian. Skenario iklim perlu dicoba skenario dengan tingkat *radiative forcing* tinggi dan rendah.

## KESIMPULAN

Proyeksi kejadian ekstrem hidrologi dapat dilihat dengan menghitung indeks ekstrem hidrologi menggunakan data debit dari simulasi model hidrologi HBV dengan *input* data observasi dan GCM. Model HBV dapat digunakan untuk simulasi debit di DAS Ciliwung Hulu menggunakan data curah hujan observasi periode 2001-2015 dan proyeksi periode 2031-2045 dari model GCM, yaitu MIROC5 dan GFDL cm3. Model GCM CSIRO Mk3.6.0 tidak diikuti karena hasil proyeksi curah hujan memiliki pola dan sebaran yang berbeda dengan periode sebelumnya. Indeks ekstrem digunakan untuk mengindikasikan kejadian ekstrem hidrologi minimum dan maksimum. Nilai indeks pada kedua model cenderung mengalami penurunan pada indeks yang menunjukkan ekstrem hidrologi minimum atau kekeringan.

## DAFTAR PUSTAKA

- AghaKouchak, A., Cheng, L., Mazdidasni, O., Farahmand, A., 2014. Global warming and changes in risk of concurrent climate extremes: Insights from the 2014 California drought. *Geophysical Research Letters* 41, 8847–8852.



- Aldrian, E., Susanto, R.D., 2003. Identification of three dominant rainfall regions within Indonesia and their relationship to sea surface temperature. *Int. J. Climatol.* 23, 1435–1452. <https://doi.org/10.1002/joc.950>
- Arnell, N.W., Gosling, S.N., 2013. The impacts of climate change on river flow regimes at the global scale. *Journal of Hydrology* 486, 351–364. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.02.010>
- BNPB, 2018. Data Informasi Bencana Indonesia-Bencana Alam di Indonesia tahun 1815 s/d 2018 [WWW Document]. URL <http://bnpb.cloud/dibi/>
- Dewi, I.K., 2015. Evaluation of land use change in the upstream of ciliwung watershed to ensure sustainability of water resources. *Asian Journal of Water, Environment and Pollution* 12, 11–19.
- Febryanto, D.A., Farda, N.M., 2016. Pengaruh Perubahan Penggunaan Lahan Terhadap Debit Puncak Sub-das Opak Hulu Tahun 2009 Dan 2014 Menggunakan Citra Landsat 5 Dan Landsat 8. *Jurnal Bumi Indonesia* 5.
- Ferijal, T., Mustafiril, M., Jayanti, D.S., 2016. Dampak perubahan iklim terhadap debit andalan sungai Krueng Aceh. *Rona Teknik Pertanian: Jurnal Ilmiah dan Penerapan Keteknikan Pertanian* 9, 50–61. <https://doi.org/10.17969/rtp.v9i1.4407>
- Hagemann, S., Chen, C., Clark, D.B., Folwell, S., Gosling, S.N., Haddeland, I., Hanasaki, N., Heinke, J., Ludwig, F., Voss, F., 2013. Climate change impact on available water resources obtained using multiple global climate and hydrology models. *Earth System Dynamics* 4, 129–144.
- Harifa, A.C., Sholichin, M., Prayogo, T.B., 2017. Analisa pengaruh perubahan penutupan lahan terhadap debit sungai Sub DAS Metro dengan menggunakan program ARCSWAT. *Jurnal Teknik Pengairan* 8, 1–14.
- Hoang, L.P., Lauri, H., Kumm, M., Koponen, J., van Vliet, M., Supit, I., Leemans, R., Kabat, P., Ludwig, F., 2016. Mekong River flow and hydrological extremes under climate change. *Hydrology and Earth System Sciences* 20, 3027–3041.
- Indriastuti, D., 2016. Analysis of Runoff due to The Change in Land Use at The Watershed of Upstream Ciliwung. Presented at the Journal of the Civil Engineering Forum, pp. 19–26.
- James, R., Washington, R., 2013. Changes in African temperature and precipitation associated with degrees of global warming. *Climatic Change* 117, 859–872. <https://doi.org/10.1007/s10584-012-0581-7>
- Kumar, P., Masago, Y., Mishra, K.B., Jalilov, S., Rafiei Emam, A., Kefi, M., Fukushi, K., 2017. Current Assessment and Future Outlook for Water Resources Considering Climate Change and a Population Burst: A Case Study of Ciliwung River, Jakarta City, Indonesia. *Water* 9. <https://doi.org/10.3390/w9060410>
- Meresa, H.K., Gatachew, M.T., 2015. Modeling of Hydrological Extremes Under Climate Change Scenarios in The Upper Blue Nile River Basin, Ethiopia. *Journal of Civil & Environmental Engineering* 6, 252. <https://doi.org/10.4172/2165-784X.1000252>
- Ministry of Environment, 2010. Indonesian second national communication under the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). Jakarta.
- Mishra, B.K., Rafiei Emam, A., Masago, Y., Kumar, P., Regmi, R.K., Fukushi, K., 2018. Assessment of future flood inundations under climate and land use change scenarios in the Ciliwung River Basin, Jakarta. *Journal of Flood Risk Management* 11, S1105–S1115. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12311>
- Mitchell, D., Heaviside, C., Vardoulakis, S., Huntingford, C., Masato, G., Guillod, B.P., Frumhoff, P., Bowery, A., Wallom, D., Allen, M., 2016. Attributing human mortality during extreme heat waves to anthropogenic climate change. *Environmental Research Letters* 11, 074006.
- Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D., Veith, T.L., 2007. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE* 50, 885–900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- Mubarok, Z., Murtalaksono, K., Wahjunie, D., 2015. Kajian respons perubahan penggunaan lahan terhadap karakteristik hidrologi DAS Way Betung, Lampung. *Jurnal Penelitian Kehutanan Wallacea* 4, 1–10.
- Narulita, I., Maria, R., Djuwansah, M.R., 2010. KARAKTERISTIK CURAH HUJAN DI WILAYAH PENGALIRAN SUNGAI (WPS) CILIWUNG-CISADANE. *Riset Geologi dan Pertambangan* 20, 95–110. <http://dx.doi.org/10.14203/risetgeotam2010.v20.37>
- Navarro-Racines, C.E., Tarapues, J., 2015. Bias-correction in the CCAFS-Climate Portal: A description of methodologies.
- Rafiei Emam, A., Mishra, K.B., Kumar, P., Masago, Y., Fukushi, K., 2016. Impact Assessment of Climate and Land-Use Changes on Flooding

- Behavior in the Upper Ciliwung River, Jakarta, Indonesia. *Water* 8. <https://doi.org/10.3390/w8120559>
- Ruspendi, D., Hadi, S., Rusdiana, O., 2016. Kajian perubahan penutupan lahan pada DAS Ciliwung Hulu dengan pendekatan spasial dinamik. *Jurnal Lanskap Indonesia* 5, 1–5.
- Seibert, J., 1996. HBV light. User's manual, Uppsala University, Institute of Earth Science, Department of Hydrology, Uppsala.
- Supatmanto, B.D., Yusuf, S.M., 2015. Studi hidrologi berdasarkan climate changes menggunakan model swat di daerah tangkapan air Waduk Jatiluhur. *Jurnal Sains dan Teknologi Modifikasi Cuaca* 16, 55–60.
- Suripin, S., Kurniani, D., 2016. Pengaruh Perubahan Iklim terhadap Hidrograf Banjir di Kanal Banjir Timur Kota Semarang. *Media Komunikasi Teknik Sipil* 22, 119–128.
- Taufik, M., Torfs, P.J.J.F., Uijlenhoet, R., Jones, P.D., Murdiyoso, D., Van Lanen, H.A.J., 2017. Amplification of wildfire area burnt by hydrological drought in the humid tropics. *Nature Climate Change* 7, 428.
- Taye, M.T., Willems, P., Block, P., 2015. Implications of climate change on hydrological extremes in the Blue Nile basin: A review. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 4, 280–293. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.07.001>
- Thorntwaite, C.W., 1948. An approach toward a rational classification of climate. LWW.
- van Vliet, M.T.H., Franssen, W.H.P., Yearsley, J.R., Ludwig, F., Haddeland, I., Lettenmaier, D.P., Kabat, P., 2013. Global river discharge and water temperature under climate change. *Global Environmental Change* 23, 450–464. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2012.11.002>
- Winsemius, H.C., Aerts, J.C.J.H., van Beek, L.P.H., Bierkens, M.F.P., Bouwman, A., Jongman, B., Kwadijk, J.C.J., Ligtoet, W., Lucas, P.L., van Vuuren, D.P., Ward, P.J., 2015. Global drivers of future river flood risk. *Nature Climate Change* 6, 381.