



Dampak Perubahan Iklim Terhadap Indeks Erosivitas Hujan Pada Daerah Tangkapan Air Waduk Saguling¹

The Effect of Climate Change on Rain Erosivity Index in the Saguling Reservoir Catchment Area

Ahmad Zaki Romadhoni^{a,2}, Dyah Ari Wulandari^b, Suharyanto^b

^a Program Magister Operasi dan Instrumentasi Hidro-Meteorologi Bendungan, Universitas Diponegoro, Jl. Prof. Soedarto, SH, Kampus UNDIP Tembalang, Semarang.

Balai Wilayah Sungai Maluku, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, Jl. Mr. Chr. Soplanit, Rumah Tiga, Kec. Tlk. Ambon, Kota Ambon.

^b Departemen Teknik Sipil, Universitas Diponegoro, Jl. Prof. Soedarto, SH, Kampus UNDIP Tembalang, Semarang.

ABSTRAK

Perubahan iklim merupakan fenomena global yang kini menjadi perhatian. Perubahan iklim mempengaruhi kondisi hidrologi suatu DTA (Daerah Tangkapan Air) antara lain terjadinya perubahan curah hujan. Waduk Saguling memiliki laju erosi tinggi pada DTA. Salah satu faktor yang mempengaruhi erosi berdasarkan Persamaan USLE adalah indeks erosivitas hujan yang terkait erat dengan besarnya curah hujan. Sehingga Pengaruh perubahan iklim terhadap faktor erosivitas hujan di DTA Waduk Saguling perlu diteliti karena akan mempengaruhi laju erosi yang berguna untuk menentukan laju sedimentasi waduk. Tujuan penelitian ini adalah menganalisis pengaruh perubahan iklim terhadap indeks erosivitas hujan. Analisis perubahan iklim (curah hujan) dilakukan dengan Model GCM CanESM2 skenario RCP melalui proses *downscaling*. *Downscaling* dilakukan dengan metode SDSM. Indeks erosivitas hujan dianalisis berdasarkan rumus Lenvain. *Downscaling* dengan metode SDSM mampu memberikan hasil yang baik berdasarkan koefisien determinasi dan didapatkan perubahan curah hujan bulanan pada periode jangka pendek, menengah dan panjang, serta untuk curah hujan tahunan terdapat peningkatan hingga 34,3%. Indeks erosivitas hujan tahunan di DTA Waduk Saguling mengalami perubahan seiring dengan berubahnya curah hujan akibat perubahan iklim dan terdapat peningkatan hingga 44,1%.

Kata kunci: perubahan iklim, SDSM, CanESM2, erosivitas hujan

ABSTRACT

Climate change is a global phenomenon that become a concern. Climate change affects the hydrological conditions of a watershed, including rainfall. Saguling Reservoir has a high erosion rate on the watershed. One factor that affects erosion based on USLE is the rain erosivity index which has a relation with rainfall amount. So the climate change effect of rainfall on erosivity factor in Saguling Reservoir watershed needs to be investigated because it will affect the erosion rate which is useful to determine the sedimentation rate of the reservoir. The purpose of this study was to analyze the effect of climate change on the erosivity index. Climate change (rainfall) was analyzed using GCM CanESM2 Model in the RCP scenario through a downscaling process. Downscaling has been done with SDSM. The rain erosivity index was analyzed using Lenvain's formula. Downscaling with the SDSM method was able to give good results based on the coefficient of determination and it was found that there was a change of monthly rainfall in the short, medium, and long term periods, as well as an increase in annual rainfall up to 34.3%. The annual rainfall erosivity index changes along with changes in rainfall due to climate change and there is an increase of up to 44.1%.

Keywords: climate change, SDSM, CanESM2, rain erosivity

¹ Info Artikel: Received: 7 Juli 2021, Accepted: 2 Agustus 2021.

² Corresponding Author: Ahmad Zaki Romadhoni, azakiromadhoni@gmail.com.

PENDAHULUAN

Perubahan iklim merupakan fenomena global yang kini menjadi perhatian. Perubahan iklim merupakan suatu perubahan yang terjadi pada kondisi iklim yang dapat diidentifikasi salah satunya melalui pengujian statistik terhadap perubahan-perubahan rata-rata tengahnya dan/atau variabilitas komponen-komponennya dan berlangsung dalam periode panjang, biasanya dalam satu dekade atau lebih panjang (Agard dkk., 2014). Salah satu alat untuk menilai dampak perubahan iklim yaitu dengan Model GCM (*General Circulation Model*) (Zhang, Huang, Wang, & Zhang, 2011). Model GCM telah digunakan dalam penelitian terkait parameter perubahan iklim, namun penggunaannya dalam skala regional dibatasi oleh resolusi spasial dan perlu dilakukan *downscaling* untuk menjembatani batasan tersebut (Baiati dkk., 2018). Terdapat beberapa metode *downscaling* salah satunya SDSM (*Statistical Downscaling Model*). SDSM merupakan alat untuk *downscaling* berdasarkan multi regresi (Wilby dkk., 2002). SDSM mampu melakukan *downscaling* Model GCM dengan hasil yang baik (Suo dkk., 2019). Terdapat beberapa Model GCM yang dikembangkan oleh institusi di seluruh dunia dengan resolusi spasial dan model perhitungan yang berbeda. Salah satu Model GCM yaitu CanESM2 merupakan model yang dikembangkan oleh *Canadian Center for Climate Modelling and Analysis*. Model ini dapat digunakan sebagai input data *downscaling* Metode SDSM sebagaimana dalam penelitian proyeksi iklim yang dilakukan oleh Tahir (2018). Model CanESM2 menggunakan Skenario RCP (*Representative Concentration Pathway*). Skenario RCP dikembangkan dengan data komprehensif meliputi kondisi penggunaan lahan dan data emisi dari polusi udara dan gas rumah kaca (van Vuuren dkk., 2011). Perubahan iklim memberikan dampak signifikan terhadap proses hidrologi di seluruh dunia (Stocker dkk., 2013). Perubahan iklim menyebabkan perubahan curah hujan bulanan (Setiawan, 2012). Hasil proyeksi iklim Model CanESM2 pada periode 2071-2100 menunjukkan peningkatan curah hujan apabila dibandingkan dengan periode *baseline* (Tahir dkk., 2018). Perubahan curah hujan mempengaruhi perubahan karakteristik hidrologi pada suatu DTA (Daerah Aliran Sungai).

Waduk Saguling terletak pada DAS (Daerah Aliran Sungai) Citarum Hulu. DAS Citarum Hulu memiliki laju erosi tinggi yang menyebabkan laju sedimentasi pada waduk juga tinggi sehingga berpotensi pada berkurangnya umur layanan waduk (Bakhtiar dkk., 2014). Erosi lahan yang terjadi pada suatu DAS umumnya diprediksi dengan model akibat keterbatasan biaya dan waktu (Sulistyo, 2011). Salah satu model yang banyak digunakan adalah Model USLE (*Universal Soil Loss Equation*). Dalam model ini salah satu parameter yang mempengaruhi laju erosi lahan yaitu Indeks Erosivitas hujan yang dinotasikan *R*. Faktor *R* ini memiliki hubungan erat dengan besarnya curah hujan. Mengingat perubahan iklim yang menyebabkan terjadinya perubahan curah hujan serta pengaruh curah hujan pada besarnya laju erosi, maka perlu dilakukan penelitian pengaruh perubahan iklim terhadap faktor erosivitas hujan di DTA Waduk Saguling.

METODE PENELITIAN

Lokasi Penelitian

Penelitian dilakukan pada DTA Waduk Saguling dengan luas 2.300 km² yang masuk ke dalam wilayah administratif Kota Bandung, Kabupaten Bandung, Kabupaten Sumedang, Kabupaten Garut, Kabupaten Bandung Barat, Kota Cimahi dan Kabupaten Purwakarta. Peta DTA Waduk Saguling dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Peta DTA Waduk Saguling

Data

Parameter iklim yang ditinjau dalam penelitian ini yaitu curah hujan. Data observasi curah hujan yang digunakan berasal dari 11 pos pengukur curah hujan yang dikelola oleh PT Indonesia Power selaku pengelola Bendungan Saguling. Data curah hujan yang digunakan adalah data tahun 1986-2015 sepanjang 30 tahun, data sepanjang 20 tahun (tahun 1986-2005) akan digunakan untuk kalibrasi dan data sepanjang 10 tahun berikutnya (tahun 2006-2015) untuk validasi. Pada penelitian lain terkait metode SDSM juga digunakan data observasi sepanjang 30 tahun (Suo dkk., 2019). Untuk perhitungan curah hujan wilayah dibutuhkan peta DTA Waduk Saguling yang didapatkan melalui proses deliniasi data DEM (*Digital Elevation Model*) dari DEMNAS. Selain itu dibutuhkan koordinat lokasi dari 11 pos pengukur curah hujan. Dalam analisis *downscaling* dibutuhkan data NCEP/NCAR sebagai *Predictor* dan Model GCM yaitu CanESM2 yang diunduh melalui *website Government of Canada* yaitu <https://climate-scenarios.canada.ca/?page=pred-canesm2> pada *grid* yang mencakup lokasi penelitian yaitu *grid cell 39X 30Y*.

Tahapan Analisis

Analisis curah hujan wilayah

Curah hujan wilayah didapat berdasarkan data curah hujan dari 11 pos pengukur hujan yang dianalisis dengan Metode Thiessen. Dari analisis ini akan didapat satu seri data curah hujan wilayah dari tahun 1986-2015 sebagai periode *baseline*.

Analisis downscaling

Dalam penelitian ini *downscaling* dilakukan dengan Model GCM dengan bantuan *Software* SDSM 4.2. SDSM adalah metode *downscaling hybrid* antara regresi multi-linear dan pembangkit data stokastik. Regresi multi-linier membangun hubungan statistik antara Data NCEP/NCAR sebagai *Predictor* dengan Data Observasi Iklim sebagai *Predictand* menghasilkan parameter regresi yang nantinya digunakan oleh pembangkit data stokastik untuk mensimulasikan data hingga seri waktu yang lebih panjang (Wilby dkk., 2002).

Model GCM yang digunakan yaitu CanESM2 yang memiliki 26 parameter atmosfer sebagaimana pada Tabel 2 dengan resolusi spasial 2.8125° x 2.8125°. Model CanESM yang diunduh melalui *website Government of Canada* menggunakan skenario proyeksi perubahan iklim RCP yang terdiri dari RCP 2.6, RCP 4.5 dan RCP 8.5. Skenario RCP 2.6 merupakan skenario dengan kondisi mitigasi terhadap dampak perubahan iklim yang ketat, Skenario RCP 4.5 sebagai skenario kondisi dengan emisi sedang dan Skenario RCP 8.5 sebagai skenario kondisi emisi tinggi (Pachauri et al., 2014). Sehingga berdasarkan ketersediaan data pada *website Government of Canada* dan skenario yang mewakili masing-masing kondisi proyeksi perubahan iklim digunakan skenario RCP 2.6, RCP 4.5 dan RCP 8.5. Penggunaan ketiga skenario ini juga dilakukan pada beberapa penelitian perubahan iklim (Hassan & Hashim, 2020; Koutsovili dkk., 2021). Skenario RCP didasarkan pada perbedaan *Radiative Forcing* yang merupakan perubahan naik turunnya *radiative flux* diekspresikan dalam W/m² pada atmosfer paling atas yang dipicu parameter perubahan iklim seperti konsentrasi CO² atau radiasi matahari (Agard, 2014).

Tabel 1. Parameter atmosfer Model CanESM2

No.	Nama File	Nama Variabel Atmosfer	No.	Nama File	Nama Variabel Atmosfer
1	P*mslpgl.dat	Mean sea level pressure	14	P*p5zhgl.dat	500 hPa Divergence of true wind
2	P*p1_fgl.dat	1000 hPa Wind speed	15	P*p850gl.dat	850 hPa Geopotential
3	P*p1_ugl.dat	1000 hPa Zonal wind component	16	P*p8_fgl.dat	850 hPa Wind speed
4	P*p1_vgl.dat	1000 hPa Meridional wind component	17	P*p8_ugl.dat	850 hPa Zonal wind component
5	P*p1_zgl.dat	1000 hPa Relative vorticity of true wind	18	P*p8_vgl.dat	850 hPa Meridional wind component
6	P*p1thgl.dat	1000 hPa Wind direction	19	P*p8_zgl.dat	850 hPa Relative vorticity of true wind
7	P*p1zhgl.dat	1000 hPa Divergence of true wind	20	P*p8thgl.dat	850 hPa Wind direction
8	P*p500gl.dat	500 hPa Geopotential	21	P*p8zhgl.dat	850 hPa Divergence of true wind
9	P*p5_fgl.dat	500 hPa Wind speed	22	P*prcpgl.dat	Total precipitation
10	P*p5_ugl.dat	500 hPa Zonal wind component	23	P*s500gl.dat	500 hPa Specific humidity
11	P*p5_vgl.dat	500 hPa Meridional wind component	24	P*s850gl.dat	850 hPa Specific humidity
12	P*p5_zgl.dat	500 hPa Relative vorticity of true wind	25	P*shumgl.dat	1000 hPa Specific humidity
13	P*p5thgl.dat	500 hPa Wind direction	26	P*tempgl.dat	Air temperature at 2 m

Data NCEP/NCAR *Reanalysis* 1 adalah set data atmosfer global hasil re-analysis berdasarkan asimiliasi data observasi satelit sejak 1948 (Kalnay dkk., 1996). Data ini dibandingkan dengan data observasi untuk menentukan parameter iklim yang akan digunakan dalam proses *downscaling*. Data NCEP/NCAR terdiri dari parameter atmosfer yang sama dengan Model CanESM2. Data NCEP/NCAR digunakan Tahun 1986-2015 sesuai dengan seri data observasi.

Tahapan metode SDSM adalah sebagai berikut:

a. *Screen Variabels*

Pemilihan *Predictor* merupakan hal terpenting dalam proses *downscaling* dengan metode SDSM (Wilby dkk., 2002). Proses pemilihan *Predictor* berdasarkan tahapan sesuai yang dilakukan Mahmood & Babel (2013) yaitu memilih *Super Predictor* yang memiliki korelasi paling tinggi dengan *Predictand*, dan dipilih *Predictor* selanjutnya yang tidak memiliki *multi-co-linearity* dengan *Super Predictor*. Pada beberapa penelitian penggunaan 1 hingga 3 *Predictor* cukup untuk menghasilkan hubungan dengan *Predictand*. Dalam penelitian ini digunakan 3 *Predictor* yaitu P*p1_fgl.dat, P*p8_fgl.dat dan P*s850gl.dat.

b. *Calibrate Model*

Kalibrasi dilakukan dengan menghasilkan parameter regresi dari prediktor terpilih. Kalibrasi dilakukan tahun 1986-2005 (20 tahun data). Untuk parameter curah hujan digunakan transformasi Model *Fourth Root Transformation (Conditional Process)* karena adanya distribusi yang tidak linier (Supriya & Krishnaveni, 2018). Hasil proses kalibrasi berupa file berekstensi .par nantinya digunakan dalam *Weather Generator dan Scenario Generator*.

c. *Weather Generator dan Scenario Generator*

File berekstensi .par yang dihasilkan proses kalibrasi dijadikan sebagai masukan dalam proses *Weather Generator dan Scenario Generator*. Pada *Weather Generator* dilakukan simulasi data sintesis dari NCEP/NCAR pada periode yang sama dengan proses kalibrasi yaitu tahun 1986-2005. Hasil pembangkitan data dibandingkan dengan data observasi untuk diuji berdasarkan parameter statistik yaitu koefisien determinasi (R^2) dan *Root Mean Square Error* (RMSE). Pada *Scenario Generator* dilakukan pembangkitan data dari data NCEP/NCAR untuk validasi pada tahun 2006-2015 dan data Model GCM Skenario RCP 4.5 dan RCP 8.5 untuk proyeksi perubahan iklim pada 3 periode di masa depan. Periode di masa depan dalam penelitian ini yaitu periode jangka pendek di tahun 2025-2049, jangka menengah di tahun 2050-2075 dan jangka panjang di tahun 2075-2100 sebagaimana juga digunakan dalam Talchabhadel (2020).

Analisis indeks Erosivitas Hujan

Indeks Erosivitas hujan dihitung berdasarkan persamaan empiris. Auliyani & Wijaya (2017) melakukan analisis erosi hujan dari beberapa rumus yang ada dan didapatkan Rumus Lenvain (Asdak, 2007) menunjukkan hasil paling baik. Rumus Lenvain juga digunakan dalam penelitian Poerbandono (2006) di DAS Citarum Hulu yang masuk wilayah DTA Waduk Saguling. Penelitian ini menggunakan rumus tersebut. Dengan persamaan indeks erosi hujan sebagai berikut:

$$R_m = 2,21 (Rain)_m^{1,36} \quad (1)$$

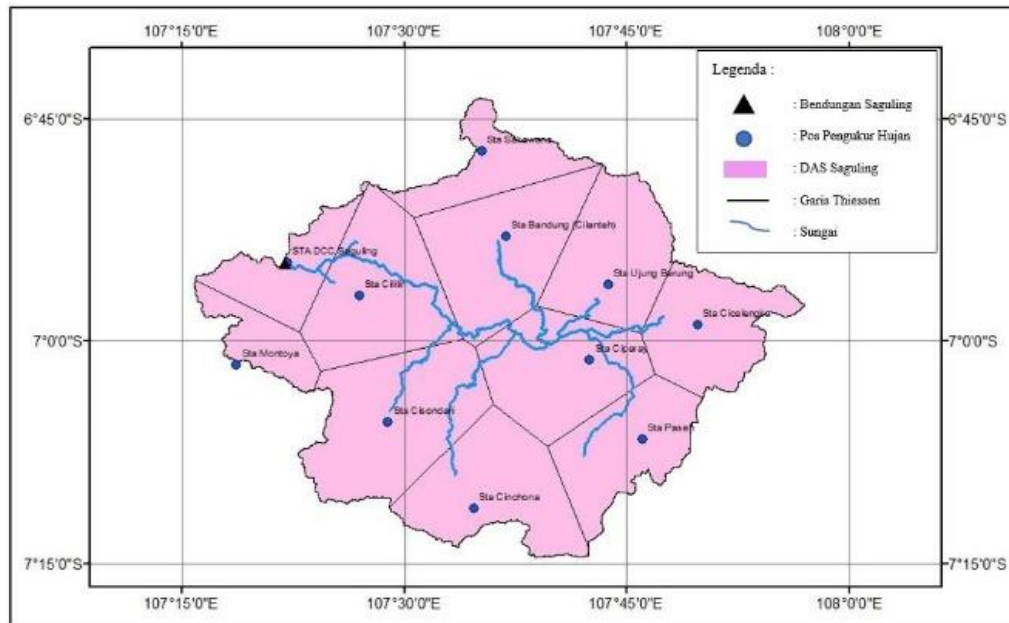
Dimana R_m adalah rata-rata indeks erosi hujan dalam unit/bulan dan $(Rain)_m$ adalah rata-rata jumlah hujan bulanan (cm/bulan).

Curah hujan yang digunakan untuk menghitung indeks erosi hujan adalah curah hujan hasil *downscaling*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Curah hujan wilayah

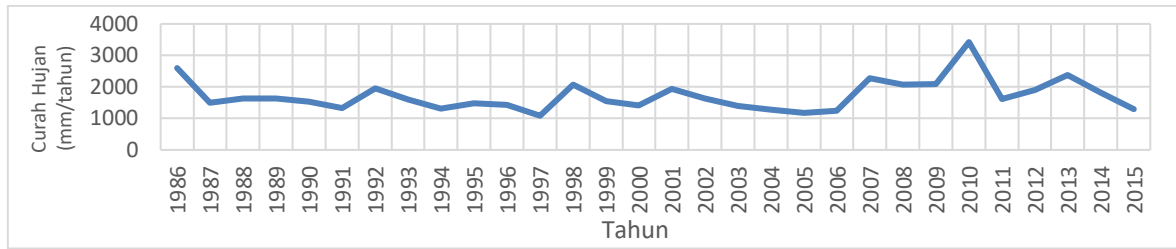
Analisis curah hujan wilayah dengan menggunakan Metode Thiessen karena *Downscaling* Model GCM dari data curah hujan yang dianalisis dengan Metode Thiessen telah dilakukan oleh beberapa peneliti (Hashmi dkk., 2011; Supriya & Krishnaveni, 2018). Peta polygon Thiessen dapat dilihat pada Gambar 2. Koordinat dan bobot thiessen tiap-tiap pos pengukur hujan dapat dilihat pada Tabel 1. Besar curah hujan wilayah total tahunan dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2 Peta polygon Thiessen DTA Waduk Saguling

Tabel 2. Koordinat lokasi pos pengukur hujan di DTA Waduk Saguling

No.	Nama Pos Hujan	Koordinat (<i>Decimal Degree</i>)		Bobot Thiessen (%)
		Lintang (°)	Bujur (°)	
1	Montoya	-7,0265	107,3115	8,65%
2	Cicalengka	-6,9813	107,83	8,60%
3	Paseh	-7,1102	107,7676	10,84%
4	Chinchona	-7,1882	107,578	10,43%
5	Ciparay	-7,021	107,7078	9,51%
6	Ujung Berung	-6,936	107,7295	11,80%
7	Bandung (Cilanteh)	-6,8825	107,6144	11,76%
8	Cililin	-6,949	107,45	3,71%
9	Sakawana	-6,787	107,587	5,52%
10	DCC Saguling	-6,9116	107,3683	5,49%
11	Cisondari	-7,0908	107,4817	13,70%



Gambar 3. Curah hujan wilayah tahunan periode *baseline* (1986-2015)

Berdasarkan grafik pada Gambar 3 curah hujan wilayah tahunan tertinggi sebesar 3.422 mm di tahun 2010 dan terendah sebesar 1.088 mm di tahun 1997.

Downscaling GCM

Pemilihan prediktor berdasarkan Mahmood & Babel (2013) dilakukan dengan tahapan sebagai berikut:

1. Menghitung koefisien korelasi antara NCEP sebagai *predictor* dengan data observasi sebagai *predictand* dan dipilih *predictor* dengan nilai terbesar (dalam penelitian ini dipilih 13 *predictor* yang mempunyai nilai koefisien korelasi tinggi). *Predictor* NCEP dengan nilai koefisien korelasi tertinggi dipilih sebagai *Super Predictor* (SP) yaitu *nceps850gl*.
2. Untuk *predictor* selain SP yaitu sebanyak 12 *predictor* dihitung nilai koefisien korelasi absolutnya antar *predictor*, nilai korelasi parsial absolut dan nilai P. Perhitungan nilai korelasi parsial dan nilai P menggunakan fitur *Screen Variables* dalam SDSM yang terbatas untuk memproses sebanyak 12 *predictor*. *Predictor* yang memiliki nilai P lebih dari $\alpha=0,05$ dan koefisien korelasi antar *predictor* lebih dari 0,7 dihilangkan supaya tidak muncul *multi co-linearity* dengan SP.
3. Menghitung nilai PRP (*Percentage Reduction in Partial Correlation*) dengan persamaan berikut:

$$PRP = \frac{(P.r - R1)}{R1} \quad (2)$$

Dimana P.r adalah koefisien korelasi parsial absolut dan R1 adalah koefisien korelasi absolut antara *predictor* dan *predictand*. Kemudian dipilih *predictor* dengan nilai PRP terendah sebagai *predictor* kedua yaitu *ncepp8_fgl*.

4. Lakukan kembali perhitungan pada tahap 2 dan 3 untuk memilih *predictor* selanjutnya. Dan untuk *predictor* ketiga didapatkan *predictor* *ncepp1fgl*.
5. Berdasarkan prosedur diatas karena keterbatasan fitur SDSM yang hanya bisa memproses sebanyak 12 *predictor* serta *penghapusan predictor* yang memiliki nilai P lebih dari $\alpha=0,05$ dan koefisien korelasi antar *predictor* lebih dari 0,7 maka hanya diperoleh 3 *predictor*. Hasil perhitungan dalam pemilihan *predictor* dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Perhitungan dalam pemilihan *predictor*

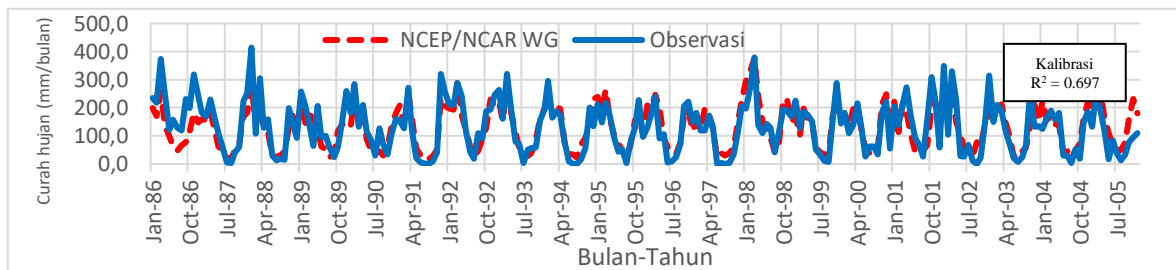
No	Predictor	R1	R2'	P.r'	P value'	PRP'	R2''	P.r''	P value''	PRP''
1	nceps850gl	0.355								
2	ncepp1_fgl	0.306	0.378	0.001	0.564	0.997	0.6573714	0.166	0	0.457
3	nceps500gl	0.260	0.442	0.074	0	0.715	0.0964113	0.058	0.0006	0.777
4	ncepp1_ugl	0.239	0.403	0.033	0.060	0.862	0.2002777	0.019	0.2685	0.921
5	ncepp8_fgl	0.226	0.137	0.161	0	0.287				
6	ncepp8_ugl	0.195	0.331	0.003	0.556	0.985	0.213428	0.011	0.4359	0.944
7	nceptempgl	0.194	0.347	0.024	0.176	0.876	-0.018688	0.009	0.4802	0.954
8	ncepp8zhgl	0.193	0.331	0.057	0.001	0.704	-0.114263	0.049	0.0045	0.745
9	ncepp1_vgl	0.188	0.330	0.045	0.009	0.760	-0.211361	0.008	0.4968	0.957
10	ncepprcpgl	0.180	0.501	0.083	0	0.538	-0.003749	0.085	0	0.527
11	ncepp8thgl	0.176	0.280	0.007	0.515	0.960	0.1826733	0.008	0.4946	0.955
12	ncepp1thgl	0.165	0.279	0.007	0.504	0.958	0.2458819	0.003	0.5552	0.982
13	ncepp5_fgl	0.157	0.130	0.039	0.028	0.751	0.2243635	0.07	0	0.553

Keterangan:

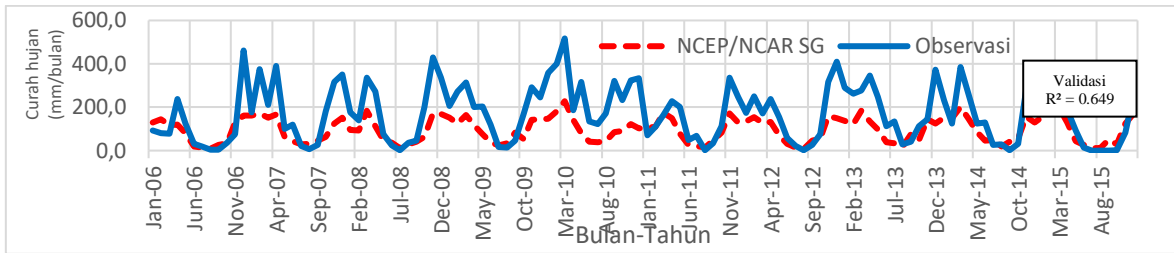
R1 adalah nilai koefisien korelasi absolut antara *predictor* dan *predictand*
R2 adalah nilai koefisien korelasi absolut antara *predictor* dan *Super Predictor*
P.r adalah nilai korelasi parsial absolut
P value adalah nilai P

Angka tebal menunjukkan *predictor* terpilih
' parameter untuk pemilihan *predictor* ke 2
" parameter untuk pemilihan *predictor* ke 3

Berdasarkan 3 *predictor* terpilih yaitu ncepp1_fgl (1000 hPa *Wind speed*), ncepp8_fgl (850 hPa *Wind speed*) dan nceps850gl (850 hPa *Specific humidity*) dari data NCEP/NCAR dilakukan kalibrasi dan dihasilkan file berekstensi .par, File ekstensi .par ini digunakan sebagai masukan dalam proses *Weather Generator* dan *Scenario Generator* untuk validasi. Hasil proses kalibrasi NCEP/NCAR *Weather Generator* (WG) dibandingkan dengan data observasi tahun 1986-2005 dan hasil proses validasi membandingkan NCEP/NCAR *Scenario Generator* (SG) dengan data observasi tahun 2006-2015. Hasil proses kalibrasi dan validasi dapat dilihat pada Gambar 4 dan 5.



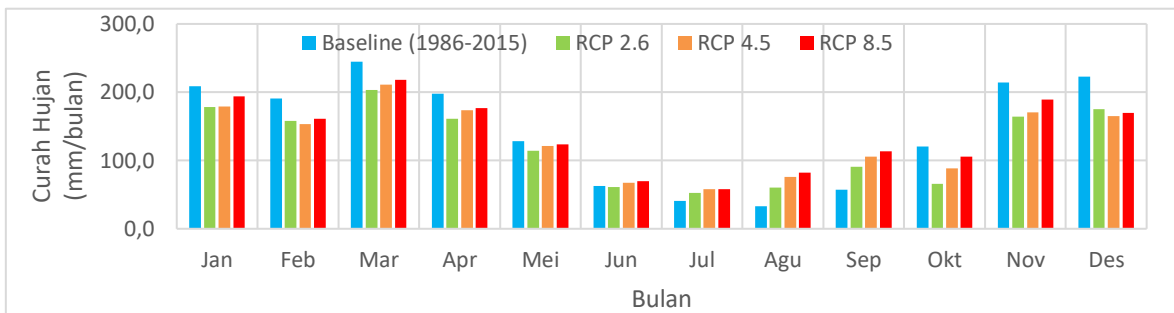
Gambar 4. Hasil kalibrasi curah hujan bulanan data NCEP/NCAR *Weather Generator* dengan data observasi tahun 1986-2005



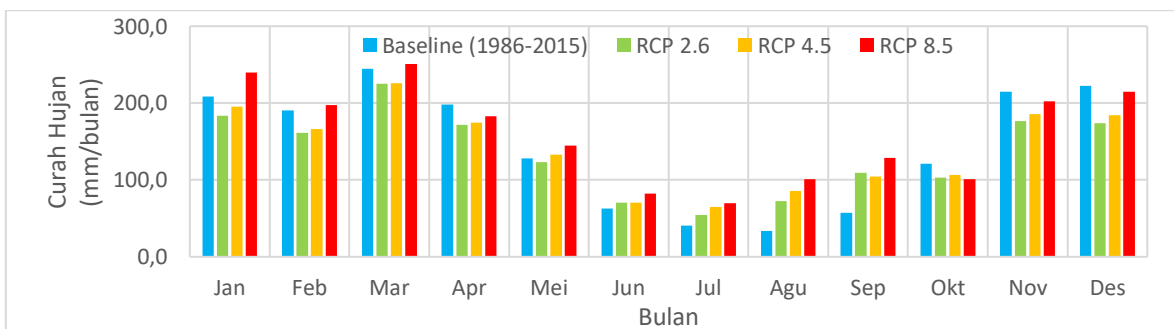
Gambar 5. Hasil validasi curah hujan bulanan data NCEP/NCAR *Scenario Generator* dengan data observasi tahun 2006-2015

Berdasarkan Gambar 4 dan Gambar 5, hasil kalibrasi menunjukkan nilai R^2 sebesar 0,697 dan hasil validasi nilai R^2 sebesar 0,649. Nilai koefisien determinasi (R^2) pada interval 0,600-0,799 menunjukkan tingkat hubungan yang kuat (Sugiyono, 2006). Sehingga hasil kalibrasi dan validasi dapat diterima. Nilai RMSE pada hasil proses kalibrasi dan validasi berturut-turut yaitu 47,9 dan 115,9. Pada proses validasi terdapat peningkatan nilai RMSE sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 5 nilai NCEP/NCAR *Scenario Generator underestimate* terhadap nilai observasi.

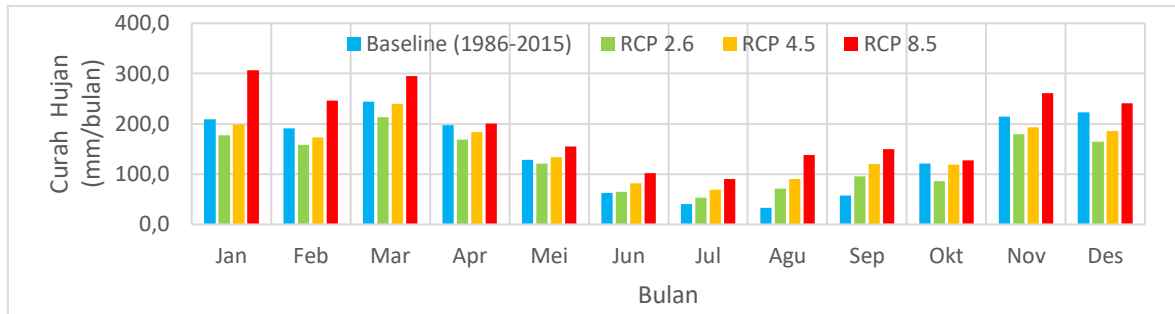
Setelah dilakukan kalibrasi dan validasi dan hasilnya dapat diterima kemudian dilakukan *Scenario Generator* untuk membangkitkan data Model GCM sebagai proyeksi perubahan iklim berdasarkan skenario RCP 2.6, RCP 4.5 dan RCP 8.5. Data hasil pembangkitan data proyeksi iklim dirata-rata pada 3 periode yaitu periode jangka pendek, jangka menengah dan jangka panjang serta dibandingkan dengan periode *baseline* tahun 1986-2015. Hasil proyeksi perubahan iklim dapat dilihat pada Gambar 6, Gambar 7 dan Gambar 8.



Gambar 6. Proyeksi perubahan iklim curah hujan bulanan skenario RCP 2.6, RCP 4.5 dan RCP 8.5 periode jangka pendek (2025-2049)



Gambar 7. Proyeksi perubahan iklim curah hujan bulanan skenario RCP 2.6, RCP 4.5 dan RCP 8.5 periode jangka menengah (2050-2074)



Gambar 8. Proyeksi perubahan iklim curah hujan bulanan skenario RCP 2.6, RCP 4.5 dan RCP 8.5 periode jangka panjang (2075-2100)

Berdasarkan proyeksi perubahan iklim terjadi perubahan intensitas curah hujan bulanan rata-rata tahunan. Pada periode jangka pendek untuk skenario RCP 2.6, RCP 4.5, dan RCP 8.5 curah hujan bulanan menurun di bulan Januari sampai Mei, Oktober sampai Desember serta meningkat di bulan Juni sampai September. Apabila curah hujan bulanan ditotal dalam tahunan untuk skenario RCP 2.6, RCP 4.5 dan RCP 8.5 masing-masing mengalami perubahan sebesar -13,8%, -8,8% dan -3,5%.

Pada periode jangka menengah untuk skenario RCP 2.6 curah hujan bulanan menurun di bulan Januari sampai Mei, Oktober sampai Desember serta meningkat di bulan Juni sampai September. Untuk skenario RCP 4.5 curah hujan bulanan menurun di bulan Januari sampai April, Oktober sampai Desember serta meningkat di bulan Mei sampai September. Untuk skenario RCP 8.5 curah hujan bulanan menurun di bulan April, Oktober, November dan Desember serta meningkat di bulan Januari sampai Maret, Mei sampai September. Apabila curah hujan bulanan ditotal dalam tahunan untuk skenario RCP 2.6, RCP 4.5 dan RCP 8.5 masing-masing berubah sebesar -5,6%, -1,4% dan 11,2%.

Pada periode jangka panjang, untuk skenario RCP 2.6 curah hujan bulanan meningkat di bulan Juni sampai September serta menurun di bulan lain. Untuk skenario RCP 4.5 curah hujan bulanan meningkat di bulan Mei sampai September serta menurun di bulan lain. Untuk skenario RCP 8.5 curah hujan bulanan menurun di bulan Oktober dan meningkat di bulan lain. Apabila curah hujan bulanan ditotal dalam tahunan untuk skenario RCP 2.6, RCP 4.5 dan RCP 8.5 masing-masing berubah sebesar -9,8%, 3,8% dan 34,3%.

Naik dan turunnya proyeksi curah hujan tergantung dari nilai *Radiative Forcing* yang dipicu parameter perubahan iklim seperti konsentrasi CO² atau radiasi matahari sesuai yang dinyatakan Agard (2014) serta skenario RCP yang digunakan sesuai Pachauri et al. (2014).

Dalam penelitian ini proyeksi perubahan iklim skenario RCP menunjukkan peningkatan curah hujan tahunan yang signifikan atau lebih dari 10% pada periode jangka menengah dan jangka panjang untuk skenario RCP 8.5, sedangkan pada periode jangka pendek (sebelum tahun 2050) mengalami penurunan. Hal ini sesuai dengan adanya reduksi emisi CO₂ pada tahun 2050 akibat adanya mitigasi dampak perubahan iklim dan stabilisasi emis untuk skenario RCP 2.6 dan RCP 4.5, dan untuk skenario RCP 8.5 emisi CO₂ terus meningkat hingga tahun 2100 sebagaimana dinyatakan van Vuuren (2011).

Perubahan emisi CO₂ ini sejalan dengan perbedaan nilai *radiative forcing* sebagaimana dalam van Vuuren dkk. (2011) dimana untuk Skenario RCP 2.6 nilai *radiative forcing* mencapai puncak pada tahun 2050 sebesar 3 W/m² (setara CO₂ sebesar 490 ppm) dan turun menjadi 2,6 W/m² pada tahun 2100 (terjadi reduksi emisi CO₂), untuk skenario RCP 4.5

radiative forcing mengalami stabilisasi setelah tahun 2050 dan pada tahun 2100 nilainya sebesar $4,5 \text{ W/m}^2$ (setara CO_2 sebesar 650 ppm), sedangkan untuk skenario RCP 8.5 *radiative forcing* dan emisi CO_2 terus mengalami peningkatan hingga tahun 2100 mencapai nilai sebesar $8,5 \text{ W/m}^2$ (setara CO_2 sebesar 1370 ppm). Hal ini menyebabkan proyeksi curah hujan menunjukkan adanya peningkatan intensitas curah hujan sejalan dengan peningkatan *radiative forcing* dan emisi CO_2 .

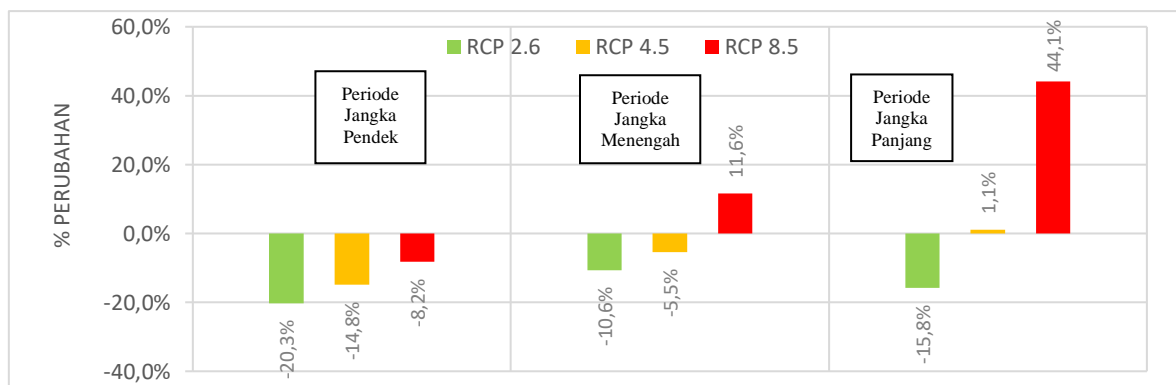
Pada penelitian yang dilakukan Santikayasa (2014) terkait dampak perubahan iklim pada DAS Citarum didapatkan proyeksi curah hujan meningkat secara signifikan pada periode tahun 2040-2069 dan periode tahun 2070-2099. Sehingga dampak perubahan iklim berupa peningkatan curah hujan terjadi setelah tahun 2050 (periode jangka menengah dan jangka panjang) sejalan dengan peningkatan *radiative forcing* dan emisi CO_2 .

Perubahan Indeks Erosivitas Hujan

Indeks erosivitas hujan dihitung berdasarkan Persamaan 1 dengan menggunakan parameter curah hujan dari hasil *downscaling*. Hasilnya dapat dilihat sebagaimana pada Tabel 3.

Tabel 4. Indeks erosivitas hujan tahunan rata-rata berdasarkan curah hujan proyeksi perubahan iklim skenario RCP 2.6, RCP 4.5 dan RCP 8.5 pada periode *baseline* jangka pendek, jangka menengah dan jangka Panjang

Skenario	Indeks Erosivitas Hujan Tahunan Rata-Rata (unit/tahun)			
	Baseline (1986-2015)	Jangka Pendek (2025-2049)	Jangka Menengah (2050-2074)	Jangka Panjang (2075-2100)
RCP 2.6	1064.7	848.9	951.4	896.5
RCP 4.5	1064.7	906.9	1006.3	1075.9
RCP 8.5	1064.7	977.5	1188.2	1534.1



Gambar 9. Perubahan indeks erosivitas hujan tahunan berdasarkan curah hujan proyeksi perubahan iklim skenario RCP 2.6, RCP 4.5 dan RCP 8.5 pada jangka pendek (2025-2049), jangka menengah (2050-2074) dan jangka panjang (2075-2100) terhadap periode *baseline* (1986-2015).

Jika dibandingkan terhadap periode *baseline* sebagaimana pada Gambar 9, pada periode jangka pendek indeks erosivitas hujan tahunan untuk skenario RCP2.6, RCP 4.5 dan RCP

8.5 masing-masing mengalami penurunan sebesar 20,3%, 14,8% dan 8,2%. Pada periode jangka menengah indeks erosivitas hujan tahunan untuk skenario RCP 2.6 dan RCP 4.5 mengalami penurunan sebesar 10,6% dan 5% serta untuk skenario RCP 8.5 mengalami peningkatan sebesar 11,6%. Pada periode jangka panjang indeks erosivitas hujan tahunan untuk skenario RCP 2.6 mengalami penurunan sebesar 15,8% dan untuk skenario RCP 4.5 dan RCP 8.5 masing-masing mengalami peningkatan sebesar 1,1% dan 44,1%. Hal tersebut menunjukkan seiring perubahan curah hujan berdasarkan skenario perubahan iklim mempengaruhi perubahan indeks erosivitas hujan tahunan terhadap periode *baseline* sebagaimana dalam penelitian Duulatov (2019) juga menunjukkan terjadinya peningkatan erosivitas hujan seiring meningkatnya curah hujan berdasarkan Model GCM.

KESIMPULAN

Downscaling dengan metode SDSM mampu memberikan hasil yang baik berdasarkan koefisien determinasi dan didapatkan perubahan intensitas curah hujan tahunan pada DTA Waduk Saguling berupa penurunan pada periode jangka pendek serta peningkatan pada jangka menengah dan jangka panjang. Jika dibandingkan dengan periode *baseline* curah hujan tahunan pada periode jangka pendek mengalami penurunan untuk semua skenario dengan penurunan terbesar yaitu 13,8% untuk skenario RCP 2.6, pada periode jangka menengah perubahan signifikan terjadi untuk skenario RCP 8.5 yang meningkat sebesar 11,2%, dan pada periode jangka panjang perubahan signifikan yang terjadi adalah penurunan 9,8% untuk skenario RCP 2.6 dan peningkatan sebesar 34,3% untuk RCP 8.5. Perubahan curah hujan tahunan mempengaruhi nilai indek erosivitas. Jika dibandingkan dengan periode *baseline* indeks erosivitas hujan tahunan pada periode jangka pendek mengalami perubahan dengan penurunan terbesar 20,3% untuk skenario RCP 2.6, pada periode jangka menengah perubahan signifikan berupa penurunan sebesar 10,6% untuk skenario RCP 2.6 dan peningkatan sebesar 11,6% untuk skenario RCP 8.5, serta pada periode jangka panjang perubahan signifikan berupa penurunan sebesar 15,8% untuk skenario RCP 2.6 dan peningkatan sebesar 44,1% untuk skenario RCP 8.5. Hal tersebut menunjukkan seiring perubahan curah hujan berdasarkan skenario perubahan iklim mempengaruhi perubahan indeks erosivitas hujan tahunan.

DAFTAR PUSTAKA

- Agard, J., E.L.F. Schipper, J. Birkmann, M. Campos, C. Dubeux, Y. Nojiri, L. Olsson, B. Osman-Elasha, M. Pelling, M.J. Prather, M.G. Rivera-Ferre, O.C. Ruppel, A. Sallenger, K.R. Smith, A.L. St. Clair, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, and T.E. Bilir (eds.)], and L. L. W. (eds. . (2014). IPCC, 2014: Annex II: Glossary. In *Cambridge University Press*.
- Asdak, C. (2007). *Hidrologi dan pengelolaan daerah aliran sungai*. Gadjah Mada University Press.
- Auliyani, D., & Wijaya, W. W. (2017). Perbandingan prediksi hasil sedimen menggunakan pendekatan model universal soil loss equation dengan pengukuran langsung. *Jurnal Penelitian Pengelolaan Daerah Aliran Sungai (Journal of Watershed Management Research)*, 1(1), 61–71.
- Baiati, A., Tavakoli, M., Babaeian, I., & Dargahian, F. (2018). Assessment and Application of Two General Circulation Models (HadCM3 and MPEH5) for Investigating Climate Change (Case Study : Khorramabad. 7, 21–36.

- Bakhtiar, Hadihardaja, J., & Hadihardaja, I. K. (2014). Pengaruh Curah Hujan Rata-rata Tahunan terhadap Indeks Erosi dan Umur Waduk pada DAS Citarum Hulu. *Media Komunikasi Teknik Sipil*, 19(1), 41–53.
- Duulatov, E., Chen, X., Amanambu, A. C., Ochege, F. U., Orozbaev, R., Issanova, G., & Omurakunova, G. (2019). Projected rainfall erosivity over Central Asia based on CMIP5 climate models. *Water (Switzerland)*, 11(5), 1–16.
- Hashmi, M. Z., Shamseldin, A. Y., & Melville, B. W. (2011). Comparison of SDSM and LARS-WG for simulation and downscaling of extreme precipitation events in a watershed. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 25(4), 475–484.
- Hassan, W. H., & Hashim, F. S. (2020). The effect of climate change on the maximum temperature in Southwest Iraq using HadCM3 and CanESM2 modelling. *SN Applied Sciences*, 2(9), 1–11.
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., ... Joseph, D. (1996). The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 77, pp. 437–471.
- Koutsovili, E. I., Tzoraki, O., Theodossiou, N., & Gaganis, P. (2021). Numerical assessment of climate change impact on the hydrological regime of a small Mediterranean river, Lesvos Island, Greece. *Acta Horticulturae et Regioecturae*, 24(1), 28–48.
- Mahmood, R., & Babel, M. S. (2013). Evaluation of SDSM developed by annual and monthly sub-models for downscaling temperature and precipitation in the Jhelum basin, Pakistan and India. *Theoretical and Applied Climatology*, 113(1–2), 27–44.
- Pachauri, R. K., Allen, M. R., Barros, V. R., Broome, J., Cramer, W., Christ, R., ... others. (2014). Climate change 2014: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Ipcc.
- Poerbandono, Basyar, A., Harto, A. B., & Rallyanti, P. (2006). Evaluasi perubahan perilaku erosi Daerah Aliran Sungai Citarum Hulu dengan pemodelan spasial. *Poerbandono, Ahmad Basyar, Agung B. Harto Dan Puteri Rallyanti ABSTRAK*, 2(2), 21–28.
- Santikayasa, I. P., Babel, M. S., Shrestha, S., Jourdain, D., & Clemente, R. S. (2014). Evaluation of water use sustainability under future climate and irrigation management scenarios in Citarum River Basin, Indonesia. *International Journal of Sustainable Development and World Ecology*, 21(2), 181–194.
- Setiawan, O. (2012). Rainfall and temperature variability analysis in Bali. *Jurnal Analisis Kebijakan Kehutanan*, 9(1), 66–79.
- Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M. M. B., Allen, S. K., Boschung, J., ... Midgley, P. M. (2013). Climate Change 2013: The physical science basis. contribution of working group I to the fifth assessment report of IPCC the intergovernmental panel on climate change.
- Sugiyono. (2006). *Statistik Untuk Penelitian* (pp. 1–370). pp. 1–370. Bandung: Alfabeta.
- Sulistyo, B. (2011). Effect of Rain Erosivity Obtained from Different Formulas on Raster-Based Erosion Modeling. *Agritech*, 31(3), 250–259.
- Suo, M. Q., Zhang, J., Zhou, Q., & Li, Y. P. (2019). Applicability Analysis of SDSM Technology to Climate Simulation in Xingtai City, China. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 223(1).
- Supriya, P., & Krishnaveni, M. (2018). Flooding under changing climate in Vellar river basin using global circulation models. *Mausam*, 69(4), 509–522.

- Tahir, T., Hashim, A. M., & Yusof, K. W. (2018). Statistical downscaling of rainfall under transitional climate in Limbang River Basin by using SDSM. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 140(1).
- Talchabhadel, R., Nakagawa, H., Kawaike, K., & Prajapati, R. (2020). Evaluating the rainfall erosivity (R-factor) from daily rainfall data: an application for assessing climate change impact on soil loss in Westrapti River basin, Nepal. *Modeling Earth Systems and Environment*, 6(3), 1741–1762.
- van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., ... Rose, S. K. (2011). The representative concentration pathways: An overview. *Climatic Change*, 109(1), 5–31.
- Wilby, R. L., Dawson, C. W., & Barrow, E. M. (2002). SDSM - A decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. *Environmental Modelling and Software*, 17(2), 145–157.
- Zhang, H., Huang, G. H., Wang, D., & Zhang, X. (2011). Uncertainty assessment of climate change impacts on the hydrology of small prairie wetlands. *Journal of Hydrology*, 396(1–2), 94–103.