

Analisis Karakteristik Hujan Ekstrim Menggunakan Model Iklim di Wilayah Gunung Merapi

*Elenora Gita Alamanda Sapan^{1,2}, Joko Sujono¹, Karlina¹

¹Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta

²Badan Riset dan Inovasi Nasional

*elenoragita27@gmail.com

Received: 1 Februari 2021 Revised: 25 Mei 2022 Accepted: 30 Juni 2022

Abstract

Extreme rainfall is one of the trigger factors for debris floods in stratovolcanos. It caused by volcanic materials will be easily eroded in large quantity with surface water flow as the result of extreme rainfall. Extreme rainfall is avnatural phenomenon which is often related with climate change. In the future, changes in extreme rainfall characteristics may occur. Therefore, it's necessary to conduct extreme rainfall analysis for historical and future periods. In this study, the characteristics of rainfall analyzed were the variability of extreme rain as shown by trend analysis of extreme rain indices namely R_{TOT} . Hourly rainfall data at eight rain stations used as input. Future rainfall data was projected using the global climate model CanESM2 (RCP4.5 and RCP8.5 and downscaling process using Statistical Downscaling Model (SDSM). Comparison of the projection rainfall with historical rainfall shows a different trend at each station. Increasing trend occurred at four stations including Plosokerep, Pucanganom, Sopalan, and Talun stations, with the highest increasing trend occurring at Sopalan stations. In addition, there was also a decreasing trend that occurred at Ngandong station for both scenarios and at Sorasan station in the RCP8.5 scenario. The Jrahah and Randugunting stations show a steady trend.

Keywords: Rainfall projection, extreme precipitation indices, IDF curve, Statistical downscaling model

Abstrak

Hujan ekstrim merupakan salah satu pemicu terjadinya banjir lahar di wilayah gunung berapi. Hal ini disebabkan karena material vulkanik sisa erupsi mudah tererosi bersama dengan limpasan akibat hujan ekstrim. Hujan ekstrim juga merupakan fenomena alam yang sering dikaitkan dengan perubahan iklim. Pada masa mendatang, kemungkinan perubahan karakteristik hujan ekstrim akan terjadi. Oleh karena itu, perlu dilakukan analisis hujan ekstrim untuk kondisi historis dan masa depan. Pada penelitian ini, karakteristik hujan yang dianalisis adalah variabilitas hujan ekstrim yang ditunjukkan dengan analisis trend indeks hujan ekstrim yakni R_{TOT} . Data hujan yang digunakan adalah data jam-jaman dari delapan stasiun curah hujan di wilayah Merapi. Hujan masa mendatang diproyeksi menggunakan model iklim CanESM2 dengan skenario RCP4.5 dan RCP8.5. Proyeksi data dilakukan menggunakan Statistical Downscaling Model (SDSM). Perbandingan curah hujan rerata tahunan hasil proyeksi dengan curah hujan historis menunjukkan trend yang relatif berbeda pada setiap stasiun. Trend kenaikan terjadi pada empat stasiun yang meliputi stasiun Plosokerep, Pucanganom, Sopalan dan Talun, dengan trend kenaikan tertinggi terjadi pada stasiun Sopalan. Selain itu, terjadi pula trend penurunan yang terjadi di stasiun Ngandong untuk kedua skenario dan stasiun Sorasan pada skenario RCP8.5. Untuk stasiun Jrahah dan Randugunting menunjukkan trend tetap.

Kata kunci: Proyeksi hujan, Indeks hujan ekstrim, kurva IDF, Statistical downscaling model

Pendahuluan

Tahun 2010 Gunung Merapi mengalami erupsi terbesar dalam 100 tahun terakhir. Pasca erupsi Gunung Merapi menysaikan material vulkanik.

Daerah aliran sungai (DAS) bagian hulu merupakan tempat penampungan material vulkanik. Material tersebut akan sangat mudah tererosi dan mengalir ke hilir dalam kuantitas yang sangat besar bersama dengan limpasan akibat turunnya hujan deras. Oleh

karena itu, besaran hujan merupakan faktor dominan yang memicu peristiwa ini yang dikenal sebagai peristiwa banjir lahar.

Hujan adalah salah satu variabel iklim. Menurut BMKG (2010), hujan dengan intensitas 10-20 mm/jam atau >50 mm/hari disebut dengan hujan ekstrim. Peningkatan signifikan pada intensitas dan frekuensi hujan ekstrim cenderung merupakan hasil dari perubahan iklim (Liew, 2012). Hal serupa juga diungkapkan oleh Allen dan Ingram (2002) bahwa daerah yang memiliki iklim tropis, kejadian hujan ekstrim akan lebih sering terjadi karena global warming. Menurut Sucahyono dan Ribudiyanto (2013), pengetahuan perilaku dari nilai-nilai cuaca dan iklim ekstrim diperlukan sehingga masalah adaptasi atau penyesuaian dalam menyikapi cuaca dan iklim ekstrim dapat dilakukan. Oleh karena itu, perlu dilakukan analisis karakteristik hujan ekstrim di untuk kondisi historis dan masa mendatang. Studi ini diperlukan dalam penentuan kebijakan mitigasi bencana di masa depan. Analisis hujan ekstrim untuk periode historis dan masa depan dapat dilakukan dengan menggunakan indeks hujan ekstrim (Sofia, 2015; Nigussie & Altunkaynak, 2019; Joshi *et al.*, 2013).

Penelitian mengenai perubahan iklim erat kaitannya dengan organisasi Intergovernmental Panel on Climate Change (Karlina, 2013) yang telah mempublikasi beberapa *Global Climate Model* (GCM). Data luaran GCM merupakan alat utama untuk memprediksi iklim global. GCM juga memiliki skenario-skenario konsentrasi gas rumah kaca yakni *Representative Concentration Pathways* (RCP) di masa mendatang. GCM dikembangkan oleh beberapa lembaga seperti Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis (CCCma). Salah satu model iklim yang dikembangkan oleh CCCma adalah CanESM2. Resolusi spasial GCM masih cukup kasar namun dapat diturunkan ke skalaregional atau skala lokal dengan menggunakan teknik downscaling. Analisis ini selanjutnya akan menggunakan GCM CanESM2 dengan dua skenario RCP yaitu RCP4.5 dan RCP8.5 untuk proyeksi iklim masa depan. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kondisi hujan ekstrim berdasarkan analisis trend indeks hujan ekstrim yakni R_{TOT} pada kondisi historis dan masa depan.

Metode

Lokasi dan data penelitian

Lokasi penelitian terletak di wilayah Gunung Merapi. Gunung Merapi yang terletak di antara Provinsi Jawa Tengah dan Daerah Istimewa Yogyakarta. Gunung ini terletak 25 km di utara

Kota Yogyakarta. Wilayah-wilayah sekitar Gunung Merapi meliputi sembilan kecamatan, dimana tiga kecamatan terdapat di Kabupaten Sleman, satu kecamatan di Kabupaten Klaten, tiga kecamatan di Kabupaten Boyolali, dan dua kecamatan di Kabupaten Magelang. Data penelitian diambil dari delapan stasiun pencatat hujan dari tahun 1980-2019, yaitu Stasiun Jrahah, Ngandong, Plosokerep, Pucanganom, Randugunting, Sopalan, Sorasan, dan Talun. Keterangan mengenai periode data untuk kalibrasi dan validasi serta persentase data hilang disajikan pada Tabel 1. Data curah hujan jam-jaman dari Balai Penelitian dan Pengembangan Sabo dan data GCM CanESM2. Peta lokasi penelitian dan sebaran stasiun hujan tersaji pada Gambar 1.

Kepanggahan data

Dalam Harto (2009), pengujian dilakukan dengan cara *Rescaled Adjusted Partial Sum* (RAPS) dianggap lebih teliti karena tidak tergantung dari data stasiun lain sebagai referensi. Beberapa persamaan yang digunakan adalah:

$$S_k^* = \sum_{i=1}^k (Y_i - \bar{Y}) \quad (1)$$

$$S_k^{**} = \frac{S_k^*}{D_y} \quad (2)$$

$$D_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}{n} \quad (3)$$

dengan n = jumlah data y , Y_i = nilai hujan tahunan ke- i , \bar{Y} = nilai Y rata-rata, S_k^* = nilai deviasi kumulatif, S_k^{**} = *rescaled adjusted partial sum* (RAPS) dan D_y = deviasi standar.

Statistik yang dapat digunakan sebagai alat pengujian kepenggahannya adalah:

$$Q = \max |S_k^{**}| \quad (4)$$

atau nilai *Range*:

$$R = \max |S_k^{**}| - \min |S_k^{**}| \quad (5)$$

Indeks hujan ekstrim

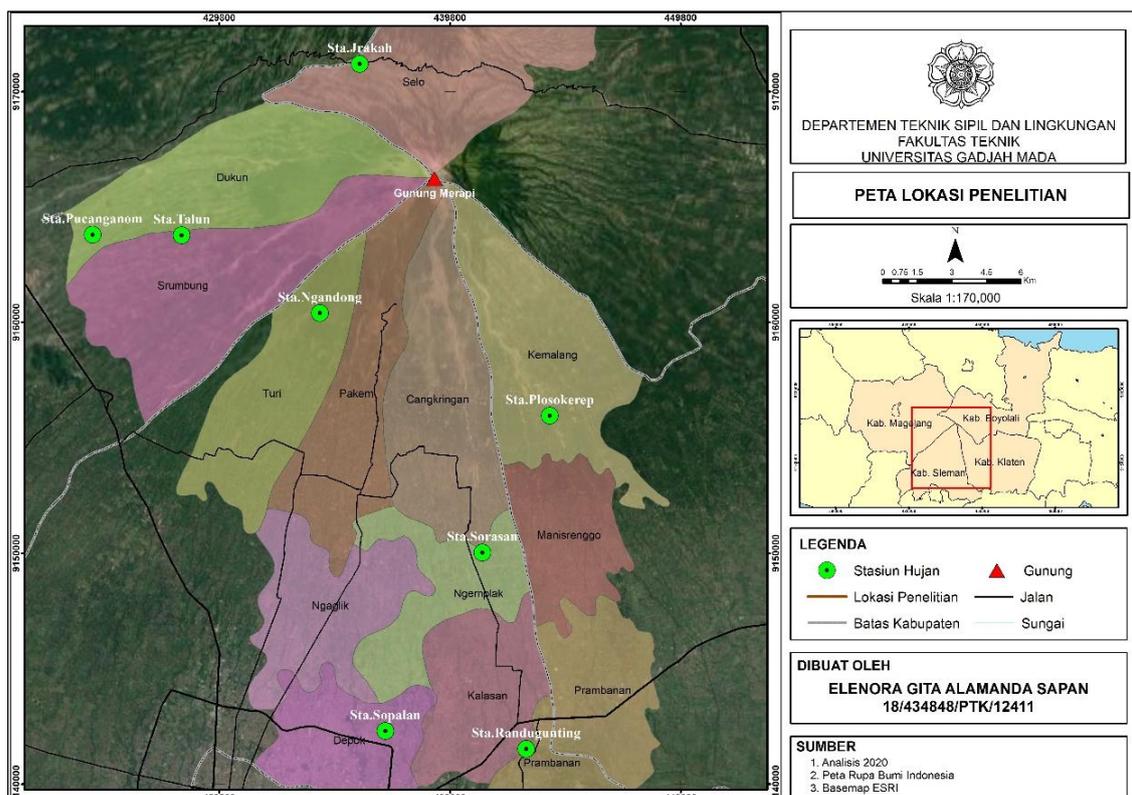
Indeks hujan ekstrim dapat ditinjau berdasarkan frekuensi dan intensitas hujannya (Joshi *et al.*, 2013; Sofia, 2015). Beberapa indeks hujan ekstrim dikembangkan oleh World Meteorological Organization (2009). Indeks hujan ekstrim yang digunakan adalah R_{TOT} (hujan tahunan total).

Model iklim

Lebih dari 40 model iklim yang telah dikembangkan di dunia ini (IPCC, 2013). Model iklim yang digunakan dalam penelitian ini adalah CanESM2 (*The Second Generation Canadian Earth System Model*).

Tabel 1. Keterangan periode data dan presentasi data hilang

No	Keterangan data	Periode data	Kalibrasi	Validasi	% data hilang
1	Sta. Jrakah	1980-2019	1980-1995	1996-2019	26,3%
2	Sta. Ngandong	1983-2019	1983-1995	1996-2019	37,6%
3	Sta. Plosokerep	1983-2019	1983-1995	1996-2019	33,5%
4	Sta. Pucanganom	1983-2019	1983-1995	1996-2019	40,5%
5	Sta. Randugunting	1983-2019	1983-1995	1996-2019	15,8%
6	Sta. Sopalan	1985-2019	1985-1995	1996-2019	28,6%
7	Sta. Sorasan	1980-2019	1980-1995	1996-2019	16,6 %
8	Sta. Talun	1980-2019	1980-1995	1996-2019	34,3 %
9	Data NCEP/NCAR	1961-2005	-	-	-
10	Data GCM CanESM2 (<i>Historical</i>)	1961-2005	-	-	-
11	Data GCM CanESM2 (<i>RCP</i>)	2006-2100	-	-	-



Gambar 1. Peta lokasi penelitian

CanESM2 menjadi wakil model yang dikembangkan oleh CCCma untuk menjadi kontribusi untuk IPCC *Assessment Report* (AR5). CanESM2 memiliki resolusi $2,81^\circ \times 2,81^\circ$, simulasi periode historis 1961-2005 dan periode proyeksi 2006-2100 (Hussain *et al.*, 2017), dan memiliki tiga skenario RCP masa depan yakni RCP2.6, RCP4.5 dan RCP8.5. Penjelasan mengenai skenario RCP dapat ditemukan pada penelitian (Moss *et al.*, 2010; Van Vuuren *et al.*, 2011).

Selain data luaran GCM, data *re-analysis* dari NCEP (*National Center for Atmospheric Research*) dan NCAR (*National Centre for Atmospheric Research*) juga diperlukan untuk keperluan metode

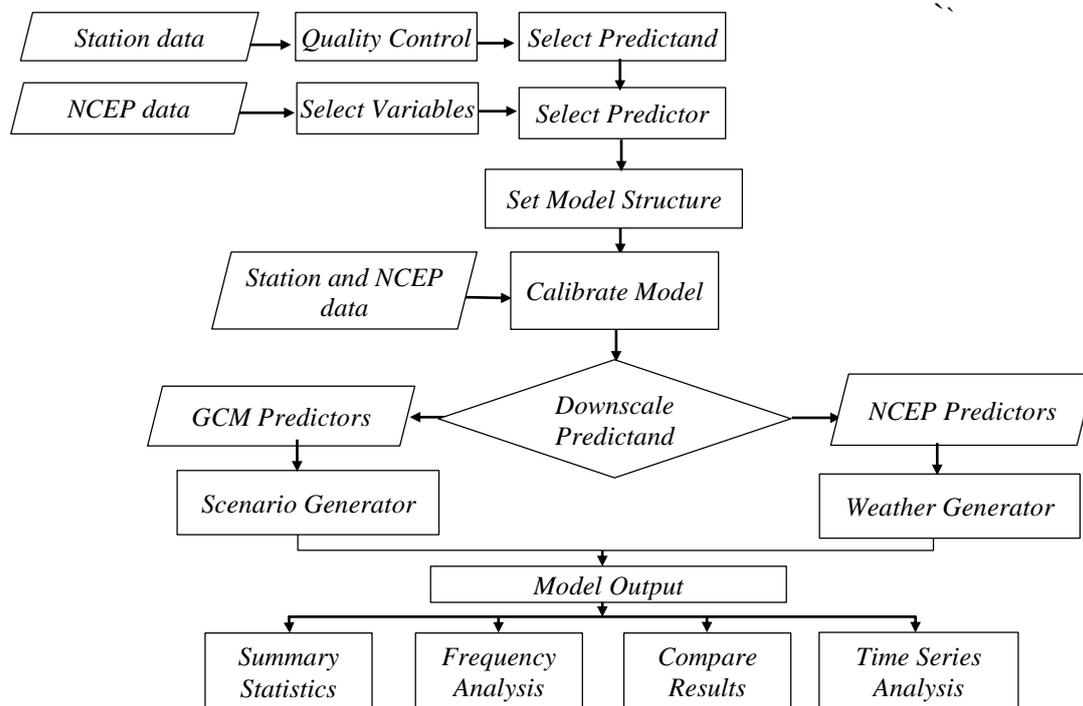
downscaling. CanESM2 memiliki *ensemble* variabel *predictor* harian sejumlah 25 variabel dasar serta jumlah curah hujan total. Variabel *predictor* (http://climate-scenarios.canada.ca/?page=canesm2_predictor-notes#table4) disajikan pada Tabel 2.

Statistical downscaling model (SDSM)

Dalam Wilby *et al.* (2002), SDSM adalah perangkat lunak yang dikembangkan untuk menghasilkan skenario perubahan iklim beresolusi tinggi. Metode *downscaling* dimulai dengan persiapan data *predictor* dan *predictan*. Bagan alir proses *statistical downscaling* pada SDSM (Wilby *et al.*, 2002) ditampilkan pada Gambar 2.

Tabel 2. Variabel-variabel predictor

No	Nama File	Nama Variabel	No	Nama File	Nama Variabel
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_uvgl.dat	1000 hPa Zonal wind component	16	P*p8_fgl.dat	850 hPa Wind speed
4	P*p1_vvgl.dat	1000 hPa Meridional wind component	17	P*p8_uvgl.dat	850 hPa Zonal wind component
5	P*p1_zvgl.dat	1000 hPa Relative vorticity of true wind	18	P*p8_vvgl.dat	850 hPa Meridional wind component
6	P*p1thgl.dat	1000 hPa Wind direction	19	P*p8_zvgl.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 wind
9	P*p5_fgl.dat	500 hPa Wind speed	22	P*prcpgl.dat	Total precipitation
10	P*p5_uvgl.dat	500 hPa Zonal wind component	23	P*s500gl.dat	500 hPa Specific humidity
11	P*p5_vvgl.dat	500 hPa Meridional wind component	24	P*s850gl.dat	850 hPa Specific humidity
12	P*p5_zvgl.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



Gambar 2. Bagan alir SDSM

Analisis trend

Analisis *trend* dilakukan dengan metode regresi linier. Untuk mengetahui signifikansi kemiringan garis regresi linier, dilakukan uji hipotesis (Pratiwi, 2012). Parameter uji yang digunakan adalah t . Penjelasan mengenai uji hipotesis garis regresi

dapat ditemukan pada (Helsel & Hirsch, 2002). Tingkat signifikansi (α) yang digunakan dalam penelitian ini sebesar 5%. Besarnya nilai t_{kritik} dapat dilihat pada tabel distribusi- t . Analisis *trend* regresi linier dengan menggunakan bantuan perangkat lunak *Microsoft Excel*. Dasar pengambilan keputusan (Pratiwi, 2011) ditunjukkan oleh Tabel 3.

Tabel 3. Cara pengambilan keputusan

Gradien	Nilai t_{uji} dan t_{kritis}	Kesimpulan
Positif	$t_{uji} > t_{kritis}$	Trend meningkat
Positif	$t_{uji} \leq t_{kritis}$	Tanpa trend
Negatif	$t_{uji} > t_{kritis}$	Trend menurun
Negatif	$t_{uji} \leq t_{kritis}$ dan $Cv < 1$	Trend tetap
Negatif	$t_{uji} \leq t_{kritis}$ dan $Cv \geq 1$	Tanpa trend

Hasil dan Pembahasan

Analisis kepenggahan data

Analisis kepenggahan hujan dilakukan dengan metode RAPS. Analisis RAPS dilakukan untuk depan stasiun pada masing-masing periode data. Rekapitulasi hasil uji kepenggahan dan faktor koreksi untuk seluruh stasiun hujan di lokasi penelitian ditunjukkan pada Tabel 4. Berdasarkan analisis dari Tabel 4, terdapat ketidakpenggahan data hujan pada stasiun Jrasah, Randugunting dan Sorasan. Untuk memperbaiki data hujan yang tidak panggah, maka perlu dilakukan koreksi data dengan menggunakan nilai koreksi.

Analisis data hujan historis

Gambar 3 merupakan grafik hujan tahunan rerata di setiap stasiun. Hujan tahunan rerata berkisar antara 1117 mm/tahun pada stasiun Randugunting dan 30789 mm/tahun pada stasiun Ngandong. Hasil uji- t untuk signifikansi kemiringan garis linier dapat dilihat pada Tabel 5. Berdasarkan hasil uji regresi linier pada Tabel 5, hanya stasiun Jrasah, stasiun Randugunting dan stasiun Sopalan yang menunjukkan *trend* yang signifikan. Namun kenaikan curah hujan yang signifikan hanya terjadi di stasiun Sopalan dengan nilai t_{uji} sebesar 3.9826, sisanya mengalami penurunan curah hujan dan tidak memiliki *trend* yang signifikan.

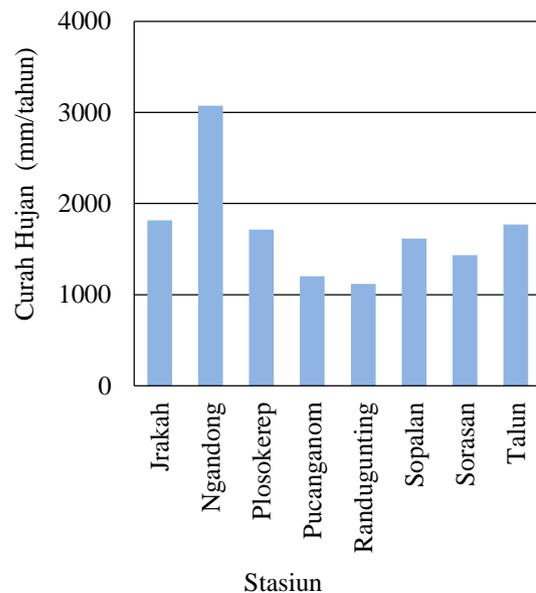
Tidak adanya suatu *trend* yang signifikan dapat disebabkan karena minimnya data yang tersedia dan besarnya presentase data yang hilang. Hal ini secara umum sesuai dengan penelitian Manton *et al.* (2001) dan Supari *et al.* (2012). Bila signifikansi diabaikan, jumlah stasiun yang mengalami

penurunan sama dengan stasiun yang mengalami kenaikan curah hujan tahunan.

Tabel 4. Kepenggahan data tiap stasiun

No	Stasiun hujan	Uji RAPS	Faktor koreksi
1	Jrasah	x	0,56
2	Ngandong	√	-
3	Plosokerep	√	-
4	Pucanganom	√	-
5	Randugunting	x	0,24
6	Sopalan	√	-
7	Sorasan	x	0,61
8	Talun	√	-

Keterangan: x = tidak panggah, √ = panggah



Gambar 3. Curah hujan tahunan rerata tiap stasiun

Proyeksi curah hujan masa depan

Curah hujan diproyeksi dengan bantuan perangkat lunak SDSM. Pemilihan *predictor* untuk tiap stasiun mengadopsi metode yang digunakan oleh Mahmood dan Babel (2013). Tabel 6 menyajikan tiga *predictor* yang terpilih.

Tabel 5. Hasil uji regresi linier curah hujan tahunan historis

Nama stasiun	Regresi linier		Uji t		Kesimpulan <i>trend</i> r_{tot}
	$y=a+bx$	r^2	t_{uji}	t_{kritis}	
Jrasah	$y = 38087-18,164x$	0,194	2,686	2,042	<i>trend</i> menurun
Ngandong	$y = -16009+9,541x$	0,011	0,532	2,060	tanpa <i>trend</i>
Plosokerep	$y = -20733+11,221x$	0,027	0,856	2,056	tanpa <i>trend</i>
Pucanganom	$y = -11873+6,538x$	0,014	0,603	2,056	tanpa <i>trend</i>
Randugunting	$y = 54332-26,593x$	0,331	3,983	2,037	<i>trend</i> menurun
Sopalan	$y = -51907+26,747x$	0,331	3,725	2,048	<i>trend</i> meningkat
Sorasan	$y = 24208-11,389x$	0,097	1,943	2,030	<i>trend</i> tetap
Talun	$y = 48507-23,385x$	0,117	1,961	2,042	<i>trend</i> tetap

Tabel 6. Predictor-predictor terpilih

Jrakah	Ngandong	Plosokerep	Pucang-anom	Randu-gunting	Sopalan	Sorasan	Talun
P*p1_ugl	P*p1_ugl	P*p1_ugl	P*p1_vgl	P*p1_ugl	P*p1_ugl	P*p1_ugl	P*p1_ugl
P*p1_vgl	P*s850gl	P*s850gl	P*tempgl	P*p5_ugl	P*s850gl	P*p1_vgl	P*shumgl
P*p8zhgl	P*tempgl	P*p1zhgl	P*s500gl	P*s500gl	P*p1zhgl	P*shumgl	P*tempgl

Tabel 7. Nilai RMSE pada periode kalibrasi

Nama stasiun	Curah hujan		Nama stasiun	Curah hujan	
	CH (mm)	RMSE		CH (mm)	RMSE
<i>Jrakah</i>			<i>Randugunting</i>		
Obs	5,55		Obs	4,36	
NCEP	5,76	10,86	NCEP	4,44	10,23
CanESM2 Historical	5,45	11,04	CanESM2 Historical	4,32	10,27
<i>Ngandong</i>			<i>Sopalan</i>		
Obs	9,28		Obs	4,30	
NCEP	9,57	17,78	NCEP	4,23	9,67
CanESM2 Historical	9,24	17,93	CanESM2 Historical	4,49	10,02
<i>Plosokerep</i>			<i>Sorasan</i>		
Obs	5,36		Obs	4,73	
NCEP	5,32	10,20	NCEP	4,81	10,73
CanESM2 Historical	5,35	10,55	CanESM2 Historical	4,68	10,78
<i>Pucanganom</i>			<i>Talun</i>		
Obs	3,33		Obs	6,11	
NCEP	3,57	7,39	NCEP	6,39	12,52
CanESM2 Historical	3,33	7,45	CanESM2 Historical	6,27	12,84

Tabel 8. Nilai RMSE pada periode validasi

Nama stasiun	Curah hujan		Nama stasiun	Curah hujan	
	CH (mm)	RMSE		CH (mm)	RMSE
<i>Jrakah</i>			<i>Randugunting</i>		
Obs	5,85		Obs	3,15	
NCEP	5,70	9,77	NCEP	4,64	7,39
CanESM2 Historical	5,57	9,67	CanESM2 Historical	4,63	7,29
<i>Ngandong</i>			<i>Sopalan</i>		
Obs	9,84		Obs	5,58	
NCEP	9,95	13,71	NCEP	4,65	12,79
CanESM2 Historical	9,90	13,47	CanESM2 Historical	4,45	12,67
<i>Plosokerep</i>			<i>Sorasan</i>		
Obs	5,55		Obs	4,01	
NCEP	5,48	7,59	NCEP	4,70	7,73
CanESM2 Historical	5,20	7,31	CanESM2 Historical	4,57	7,71
<i>Pucanganom</i>			<i>Talun</i>		
Obs	3,25		Obs	6,62	
NCEP	3,62	10,59	NCEP	6,52	12,69
CanESM2 Historical	3,22	10,63	CanESM2 Historical	6,39	12,66

Satu hingga tiga *predictor* dianggap cukup untuk menjelaskan *predictand* (data terukur) tanpa menimbulkan multikolinieritas (Mahmood & Babel, 2013). Setelah pemilihan *predictor*, dilakukan proses kalibrasi model untuk membuat hubungan empiris bulanan dengan menggunakan metode *ordinary least square* untuk optimasi, metode *fourth-root* untuk transformasi dan skenario *conditional*. Pemilihan metode ini disesuaikan

dengan jenis *predictand* yang digunakan. Proyeksi hujan akan dilakukan untuk tiga periode masa depan atau *future period* (FP) yakni FP-1 (2020-2046), FP-2 (2047-2073) dan FP-3 (2074-2100) dengan skenario RCP4.5 dan RCP8.5. Kalibrasi model dengan menggunakan data *re-analysis* NCEP/NCAR dan GCM CanESM2 periode historis. Sebanyak 100 *ensemble* diperoleh dalam proses ini dan nilai rerata tiap *ensemble* akan

digunakan untuk mengevaluasi kinerja dari model tersebut. Tabel 7 menunjukkan nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) dari kalibrasi model. Perbedaan curah hujan harian data terukur dan data yang dimodelkan dengan NCEP/NCAR dan CanESM2 berkisar antara 0,04-0,29 mm/hari untuk NCEP dan 0 – 0,19 mm/hari untuk CanESM2 periode historis. Nilai RMSE berkisar antara 7,39-17,78 untuk NCEP dan 7,45-17,93 untuk CanESM2 periode historis. Periode kalibrasi tiap stasiun berbeda tergantung dengan ketersediaan data, panjang data yang biasanya dibutuhkan untuk proses *downscaling* adalah 30 tahun. Hal ini bisa menjadi salah satu penyebab hasil kalibrasi *downscaling* memiliki nilai RMSE yang tinggi.

Validasi model dibagi menjadi dua periode yakni periode tahun 1996-2005 menggunakan data NCEP/NCAR dan CanESM2 periode historis yang ditampilkan pada Tabel 8, serta periode 2006-2019 dengan menggunakan data CanESM2 skenario RCP4.5 dan RCP8.5. Validasi model dengan periode 2006-2019 digunakan untuk pemilihan *ensemble* yang akan digunakan, berdasarkan nilai RMSE terendah. *Ensemble* yang terpilih ditampilkan pada Tabel 9.

Berdasarkan analisis dari Tabel 8, perbedaan nilai terukur dan simulasi berkisar antara 0,07-1,49 mm/hari untuk NCEP kemudian untuk CanESM2 periode histori sebesar 0,02-1,48. Pada proses validasi, nilai RMSE yang dihasilkan lebih kecil dari nilai RMSE yang dihasilkan pada proses kalibrasi. Nilai RMSE berkisar antara 7,39-13,71 untuk NCEP dan 7,29-13,47 untuk CanESM2 periode historis. Nilai RMSE tertinggi pada proses validasi dihasilkan oleh stasiun Ngandong, sama halnya dengan proses kalibrasi.

Analisis data hujan masa depan

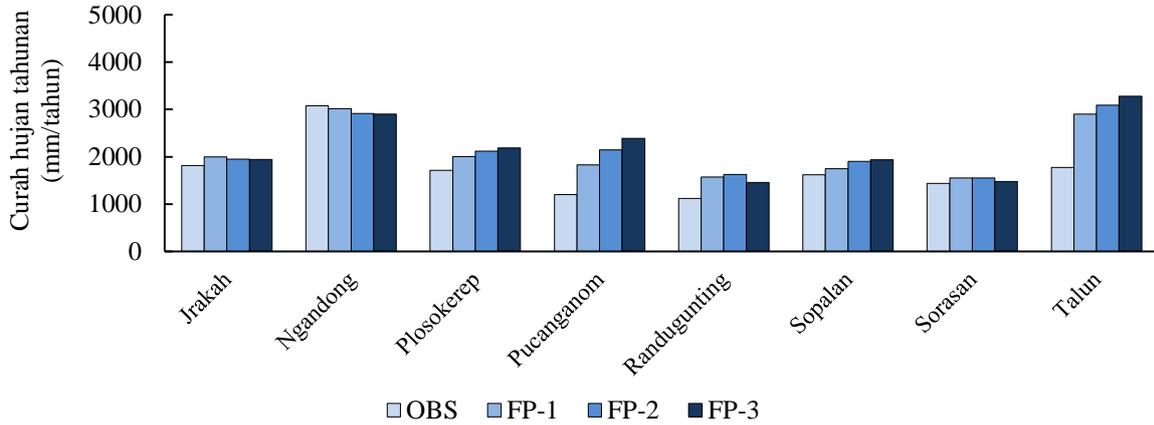
Hujan masa depan pada tiap stasiun diproyeksi untuk FP-1, FP-2, FP-3 menggunakan GCM CanESM2 dengan skenario RCP4.5 dan RCP8.5. Proyeksi hujan tersebut dibandingkan dengan periode historis yang tergantung dengan panjang

data masing-masing stasiun. Pada semua skenario, kenaikan curah hujan rerata tahunan di setiap periode masa depan bila dibandingkan dengan curah hujan rerata tahunan historis terjadi pada stasiun Jrasah, Plosokerep, Pucanganom, Randugunting, Sopalan, Talun. Berbeda halnya dengan stasiun Sorasan, pada skenario RCP4.5 terjadi kenaikan curah hujan rerata tahunan untuk semua periode masa depan, namun pada skenario RCP8.5 kenaikan curah hujan rerata tahunan hanya terjadi pada FP-1 dan FP-2 sedangkan pada FP-3 mengalami penurunan curah hujan rerata tahunan. Kemudian penurunan curah hujan rerata tahunan juga terjadi pada stasiun Ngandong tiap skenario pada semua periode masa depan (FP-1, FP-2 dan FP-3), persentase penurunan curah hujan rerata tahunan stasiun Ngandong pada FP-3 sebesar 5,8% untuk skenario RCP4.5 dan 17,3% untuk skenario RCP8.5. Pada skenario RCP4.5, kenaikan curah hujan rerata tahunan terbesar bila dibandingkan dengan periode historis terjadi di stasiun Talun dan Pucanganom. Sama halnya dengan skenario RCP8.5, kenaikan curah hujan rerata terbesar terjadi di stasiun Talun dan Pucanganom.

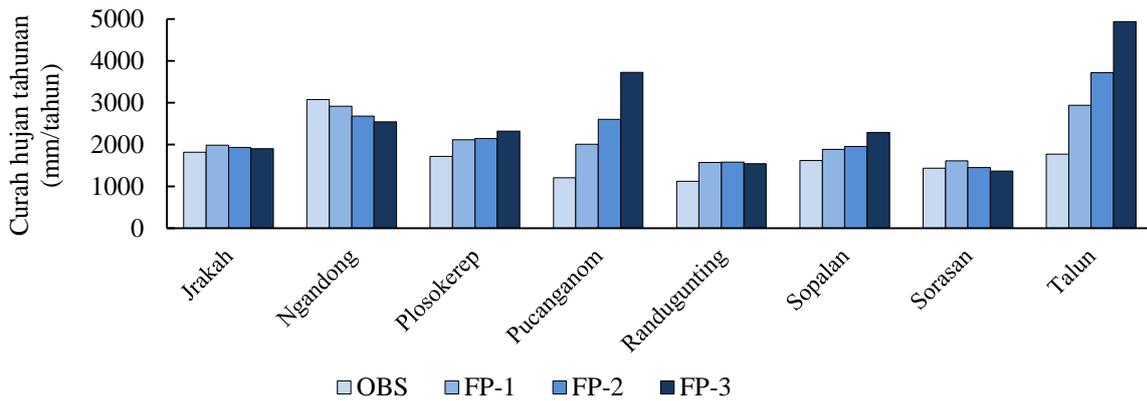
Skenario RCP8.5 memiliki kenaikan curah hujan terbesar dibandingkan dengan skenario RCP4.5, dapat dilihat pada persentase kenaikan curah hujan rerata tahunan yang signifikan RCP 8.5 pada FP-3 yakni sebesar 209,7% bila dibandingkan dengan periode historis. Sedangkan persentase kenaikan curah hujan terbesar RCP4.5 sebesar 98,6%. Skenario RCP8.5 juga memiliki penurunan curah hujan terbesar dibandingkan dengan skenario RCP4.5. Perbedaan pada kedua skenario tersebut disebabkan oleh perbedaan nilai *radiative forcing* tiap skenario, selain itu RCP4.5 memiliki karakteristik dengan kondisi gas rumah kaca yang stabil, sedangkan RCP8.5 memiliki karakteristik dengan kondisi gas rumah kaca yang relatif tinggi (Hussain *et al.*, 2017). Berikut adalah Gambar 4 dan 5 yang akan menjelaskan secara visual mengenai proyeksi curah hujan rerata tahunan. Hasil uji-*t* untuk signifikansi kemiringan garis linier proyeksi curah hujan tahunan skenario RCP4.5 dan RCP8.5 dapat dilihat pada Tabel 10 dan Tabel 11.

Tabel 9. Ensemble terpilih tiap stasiun

No.	Nama Stasiun	RCP 4.5		RCP8.5	
		Ensemble	RMSE	Ensemble	RMSE
1	Jrasah	22	13,05	60	13,00
2	Ngandong	42	24,15	16	24,65
3	Plosokerep	78	16,22	80	16,22
4	Pucanganom	40	11,97	100	12,28
5	Randugunting	86	11,61	6	11,94
6	Sopalan	80	15,87	33	16,15
7	Sorasan	67	12,34	46	12,57
8	Talun	7	16,11	67	16,41



Gambar 4. Curah hujan rerata tahunan historis dan masa depan berdasarkan skenario RCP4.5



Gambar 5. Curah hujan rerata tahunan historis dan masa depan berdasarkan skenario RCP8.5

Tabel 10. Hasil uji regresi linier curah hujan tahunan berdasarkan skenario RCP4.5

Nama Stasiun	Regresi Linier		Uji <i>t</i>		Kesimpulan Trend R_{TOT}
	$y=a+bx$	r^2	t_{uji}	t_{kritis}	
Jrakah	$y = 3831,7 - 0,908x$	0,013	1,036	1,990	tetap
Ngandong	$y = 7571,7 - 2,247x$	0,026	1,444	1,990	tetap
Plosokerep	$y = -3462,4 + 2,701x$	0,087	0,087	1,990	meningkat
Pucanganom	$y = -18146 + 9,839x$	0,444	7,944	1,990	meningkat
Randugunting	$y = 5717,2 - 2,021x$	0,045	1,934	1,990	tetap
Sopalan	$y = -5506,8 + 3,576x$	0,123	3,330	1,990	meningkat
Sorasan	$y = 4930 - 1,651x$	0,041	1,833	1,990	tetap
Talun	$y = -8799,4 + 5,772x$	0,112	3,163	1,990	meningkat

Tabel 11. Hasil uji regresi linier curah hujan tahunan berdasarkan skenario RCP8.5

Nama stasiun	Regresi linier		Uji <i>t</i>		Kesimpulan trend R_{TOT}
	$y=a+bx$	r^2	t_{uji}	t_{kritis}	
Jrakah	$y = 4329,5 - 1,160x$	0,019	1,234	1,990	tetap
Ngandong	$y = 17102 - 6,986x$	0,164	3,940	1,990	menurun
Plosokerep	$y = -7203,8 + 4,561x$	0,154	3,789	1,990	meningkat
Pucanganom	$y = -62766 + 31,817x$	0,760	15,834	1,990	meningkat
Randugunting	$y = 1697,3 - 0,066x$	0,000	0,074	1,990	tetap
Sopalan	$y = -10832 + 6,249x$	0,225	4,792	1,990	meningkat
Sorasan	$y = 11284 - 4,761x$	0,342	6,411	1,990	menurun
Talun	$y = -71385 + 36,531x$	0,832	19,794	1,990	meningkat

Berdasarkan kedua tabel, *trend* R_{TOT} pada delapan stasiun sangat bervariasi. Pada skenario RCP4.5 dan RCP8.5, stasiun Plosokerep, Pucanganom, Sopalan dan Talun menunjukkan *trend* meningkat yang signifikan, sedangkan pada RCP4.5, stasiun-stasiun hujan lainnya (Jrakah, Ngandong, Randugunting, dan Sorasan) tidak menunjukkan adanya *trend* yang signifikan. Berbeda pada skenario RCP8.5, terdapat *trend* menurun pada stasiun Ngandong dan Sorasan. Sedangkan stasiun Jrakah dan Randugunting tidak menunjukkan *trend* yang signifikan. Namun bila tidak memperhatikan signifikansi statistik uji-*t* pada RCP4.5 dan RCP8.5, terlihat *trend* menurun pada stasiun Jrakah, Ngandong, Randugunting dan Sorasan karena gradien garis regresi bernilai negatif, sedangkan empat stasiun lainnya mengalami *trend* meningkat.

Tabel 12. Kesimpulan *trend* R_{TOT} pada tiap FP (RCP4.5)

Nama stasiun	<i>Trend</i> R_{TOT}		
	FP-1	FP-2	FP-3
Jrakah	tetap	tetap	meningkat
Ngandong	tetap	tp trend	menurun
Plosokerep	tp <i>trend</i>	tetap	menurun
Pucanganom	tp <i>trend</i>	tp trend	tp trend
Randugunting	tetap	tp trend	tetap
Sopalan	tp <i>trend</i>	tetap	tp trend
Sorasan	tp trend	tetap	menurun
Talun	tp trend	tp trend	menurun

Keterangan : tp trend = tanpa trend

Tabel 13. Kesimpulan *trend* R_{TOT} pada tiap FP (RCP8.5)

Nama Stasiun	<i>Trend</i> R_{TOT}		
	FP-1	FP-2	FP-3
Jrakah	tetap	tetap	meningkat
Ngandong	tetap	tp trend	menurun
Plosokerep	tp trend	tetap	menurun
Pucanganom	tp trend	tp trend	tp trend
Randugunting	tetap	tp trend	tetap
Sopalan	tp trend	tetap	tp trend
Sorasan	tp trend	tetap	menurun
Talun	tp trend	tp trend	menurun

Keterangan : tp trend = tanpa trend

Bila ditinjau dari setiap periode masa depan, beberapa stasiun pada skenario RCP4.5 dan RCP8.5 tidak menunjukkan adanya *trend* yang signifikan pada setiap periode masa depan. Pada Tabel 12 dan 13 menunjukkan kesimpulan *trend* untuk skenario RCP4.5 dan RCP8.5. Berdasarkan Tabel 12 dan Tabel 13, *trend* meningkat hanya terjadi pada stasiun Jrakah (RCP4.5) pada FP-3, kemudian Pucanganom (RCP8.5) pada semua FP, hal itu juga terjadi pada stasiun Talun.

Kesimpulan

Variabilitas hujan ekstrim ditunjukkan dengan *trend* indeks hujan ekstrim yakni R_{TOT} (hujan tahunan total). Pada periode historis, curah hujan tahunan berkisar 1117-3078 mm/tahun. Berdasarkan uji regresi linier dengan parameter *t*, curah hujan tahunan historis menunjukkan adanya *trend* meningkat pada stasiun Sopalan sedangkan stasiun lain mengalami *trend* menurun, *trend* tetap dan tidak menunjukkan *trend* yang signifikan. Pada proses *downscaling*, kalibrasi dan validasi model memiliki nilai RMSE yang tinggi, hal ini disebabkan oleh panjang data yang digunakan tidak memadai yakni kurang dari 30 tahun untuk proses kalibrasi. Bila dibandingkan dengan curah hujan tahunan rerata historis, semua stasiun mengalami kenaikan curah hujan rerata tahunan pada tiap periode masa depan kecuali stasiun Ngandong untuk semua skenario tiap periode masa depan dan stasiun Sorasan untuk skenario RCP8.5 pada FP-3 (2074-2100). Pada skenario RCP4.5 dan RCP8.5, stasiun Plosokerep, Pucanganom, Sopalan dan Talun menunjukkan *trend* meningkat yang signifikan. Sedangkan stasiun lainnya tidak menunjukkan *trend* yang signifikan, selain stasiun Ngandong dan Sorasan pada RCP8.5 yang menunjukkan *trend* menurun. Perbandingan curah hujan rerata tahunan hasil proyeksi dengan curah hujan historis menunjukkan *trend* yang relatif berbeda pada setiap stasiun.

Perbedaan *trend* yang terjadi sangat bervariasi pada stasiun-stasiun namun berbeda dengan stasiun Sopalan yang menunjukkan jenis *trend* yang sama, yakni dalam kedua kondisi menunjukkan *trend* meningkat. Bila ditinjau dari *trend* tiap periode masa depan, *trend* yang terjadi sangat bervariasi. Studi mengenai proyeksi variabel iklim selalu memiliki ketidakpastian, hal ini dapat terjadi akibat ketidakpastian skenario RCP, pemilihan GCM, dan proses *downscaling* (BAPPENAS, 2010). Oleh karena itu, studi proyeksi iklim perlu dilakukan dengan menggunakan beberapa model iklim untuk mendapatkan hasil yang lebih komprehensif.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terimakasih ditujukan kepada Balai Teknik Sabo dalam penyediaan data hujan jam-jaman sebagai bahan penelitian ini.

Daftar Pustaka

Allen, M.R and Ingram, W.J. (2002). Constraints on future changes in climate and the hydrologic cycle. *Nature*, 419(6903), 228-232.

- BMKG. (2010, Oktober). Kondisi Cuaca Ekstrem dan Iklim Tahun 2010-2011. *Jakarta: BMKG.*
- IPCC. (2013). *Annex I: Atlas of Global and Regional Climate Projections. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge and New York: Cambridge University Press.
- Helsel, D. R., dan Hirsch, R. M. (2002). *Hydrologic Analysis and Interpretation.* US: US Geological Survey.
- Hussain, M., Yusof, K. W., Mustafa, M. R., Mahmood, R., and Shaofeng, J. (2017). Projected changes in temperature and precipitation in sarawak state of Malaysia for selected CMIP5 climate scenarios. *International Journal of Sustainable Development and Planning*, 12(8), 1299–1311.
- BAPPENAS. (2010). *ICCSR, Analysis and Projection of Temperature and Rainfall.* Jakarta: BAPPENAS.
- Harto, S., Br. (2009). *Hidrologi: Teori, Masalah, Penyelesaian.* Yogyakarta: Nafiri.
- Joshi, S., Kumar, K., Joshi, V., and Pande, B. (2013). Rainfall variability and indices of extreme rainfall-analysis and perception study for two stations over Central Himalaya, India. *Natural Hazards*, 72(2), 361–374.
- Karlina. (2013). Analisis Kekeringan Meteorologis di Wilayah Kabupaten Wonogiri, *Master Thesis*, Yogyakarta: Universitas Gadjah Mada.
- Liew, S. C. (2012). A Novel Approach Using Regional Climate Model To Derive Present and Future Intensity-Duration-Frequency Curves, *Master Thesis*, Singapore: National University of Singapore.
- Mahmood, R., and 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.
- Manton, M.J., Della-Marta, P., Haylock, M.R., Hennessy, K., Nicholls, N., Chambers, L., Collins, D.A., Daw, G., Finet, A., Gunawan, D., Inape, K., Isobe, H., Kestin, T.S., Lefale, P., Leyu, C.H., Lwin, T., Maitrepierre, L., Ouprasitwong, N., Page, C.M., & Yee, D.. (2001). Trends in extreme daily rainfall and temperature in Southeast Asia and The South Pacific: 1961–1998. *International Journal of Climatology*. 21(3), 269-284.
- Moss, R. H., Edmonds, J. A., Hibbard, K. A., Manning, M. R., Rose, S. K., Van Vuuren, D. P., Wilbanks, T. J. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463(7282), 747–756.
- Nigussie, T. A., and Altunkaynak, A. (2019). Impacts of climate change on the trends of extreme rainfall indices and values of maximum precipitation at Olimpiyat Station, Istanbul, Turkey. *Theoretical and Applied Climatology*, 135(3–4), 1501–1515.
- Pratiwi, E. P. A. (2011). Kajian Variabilitas Curah Hujan di Kawasan Lereng Gunung Merapi, *Master Thesis*, Yogyakarta: Universitas Gadjah Mada.
- Pratiwi, E.P.A., Sujono, J., Jayadi, R. (2012). Kajian Variabilitas Curah Hujan di Wilayah Lereng Gunung Merapi dengan Uji Mann-Kendall. *Info Teknik*, 13(1), 1-10.
- Sofia, D. A. (2015). Karakteristik Curah Hujan di Wilayah Merapi, *Master Thesis*, Yogyakarta: Universitas Gadjah Mada.
- Sucahyono, D., dan Ribudiyanto, K. (2013). *Cuaca Dan Iklim Ekstrem.* Pusat Penelitian dan Pengembangan Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, Jakarta.
- Supari, Sudibyakto, Ettema, J. and Aldrian, E. (2012). Spatiotemporal Characteristics Of Extreme Rainfall Events Over Java Island, Indonesia. *The Indonesian journal of geography*. 44. 62-86.
- 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., and 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.
- World Meteorological Organization. (2009). *Guidelines on Analysis of extremes in a changing climate in support of informed decisions for adaptation.* Geneva: World Meteorological Organization.