



**ASESMEN DAMPAK PERUBAHAN IKLIM TERHADAP  
BENCANA KEKERINGAN DI DAS SAMPEAN BARU  
BERBASIS DATA GCM**

**TESIS**

Oleh

**VICTORIUS SETIAJI PUTRA  
NIM 181920301001**

**PROGRAM STUDI STRATA 2 (S2) TEKNIK  
JURUSAN TEKNIK SIPIL  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS JEMBER  
2021**



**ASESMEN DAMPAK PERUBAHAN IKLIM TERHADAP  
BENCANA KEKERINGAN DI DAS SAMPEAN BARU  
BERBASIS DATA GCM**

**TESIS**

Diajukan Guna Melengkapi Tugas Akhir Dan Memenuhi Syarat-syarat  
Untuk Menyelesaikan Program Studi Teknik Sipil (S2) Dan Mencapai  
gelar Magister Teknik

Oleh

**VICTORIUS SETIAJI PUTRA  
NIM 181920301001**

**PROGRAM STUDI STRATA 2 (S2) TEKNIK  
JURUSAN TEKNIK SIPIL  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS JEMBER  
2021**

## PERSEMBAHAN

Tesis ini saya persembahkan untuk :

1. Almamater Program Studi Teknik Universitas Jember
2. Ayahhanda Ir. Valentinus Nanang Setiaji, Ibunda Cicilia Tri Widoyati, Saudara-saudara saya Georgius Guido Setiaji Putra dan Virginia Viola Setiaji Putri, dan keluarga besar saya yang selalu mendoakan, memberikan dukungan dan pengorbanan selama ini
3. Guru-guruku sejak SD sampai SMA dan semua dosen jurusan teknik sipil yang terhormat, yang telah memberikan ilmu dan bimbingannya dengan penuh kesabaran

**MOTTO**

” Iman adalah dasar dari segala sesuatu yang kita harapkan dan bukti dari segala sesuatu yang tidak kita lihat.”

(Ibrani 11:1)\*

” Sebab Aku ini mengetahui rancangan-rancangan apa yang ada pada-Ku mengenai kamu, demikianlah firman TUHAN, yaitu rancangan damai sejahtera dan bukan rancangan kecelakaan, untuk memberikan kepadamu hari depan yang penuh harapan.”

(Yeremia 29:11)\*

“Tangan yang lamban membuat miskin, tetapi tangan orang rajin menjadikan kaya”

(Amsal 10:4)\*

\* Alkitab

**PERNYATAAN**

Saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Victorius Setiaji Putra

NIM : 181920301001

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa karya ilmiah yang berjudul "Asesmen Dampak Perubahan Iklim Terhadap Bencana Kekeringan di DAS Sampean Baru Berbasis Data GCM" adalah benar-benar hasil karya sendiri, kecuali kutipan yang sudah saya sebutkan sumbernya, belum pernah diajukan pada institusi manapun, dan bukan karya jiplakan. Saya bertanggung jawab penuh atas keabsahan dan kebenaran isinya sesuai dengan sikap ilmiah yang harus dijunjung tinggi.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya, tanpa adanya tekanan dan paksaan dari pihak manapun serta bersedia mendapat sanksi akademik jika ternyata di kemudian hari pernyataan ini tidak benar.

Jember, 17 Juli 2021

Yang menyatakan



Victorius Setiaji Putra  
NIM. 181920301001

**PERSETUJUAN**



**ASESMEN DAMPAK PERUBAHAN IKLIM TERHADAP  
BENCANA KEKERINGAN DI DAS SAMPEAN BARU  
BERBASIS DATA GCM**

**TESIS**

Diajukan Guna Melengkapi Tugas Akhir Dan Memenuhi Syarat-syarat  
Untuk Menyelesaikan Program Studi Teknik Sipil (S2) Dan Mencapai  
gelar Magister Teknik

Oleh

**VICTORIUS SETIAJI PUTRA  
NIM 181920301001**

Tesis ini telah disetujui oleh dosen pembimbing  
pada tanggal 17 Juli 2021:

Pembimbing Utama

Dr. Ir. Gusfan Halik, S.T., M.T.  
NIP 19710804 199803 1 002

Pembimbing Anggota

Retno Utami A. Wiyono, S.T., M.Eng, Ph.D  
NIP 760017219

**PENGESAHAN**

Tesis yang berjudul “Asesmen Dampak Perubahan Iklim Terhadap Bencana Kekeringan di DAS Sampean Baru Berbasis Data GCM” telah diuji dan disahkan pada

Hari/Tanggal : Sabtu, 17 Juli 2021

Tempat : Fakultas Teknik Universitas Jember

Tim Pembimbing

Pembimbing Utama



Dr. Ir. Gusfan Halik, S.T., M.T.  
NIP. 19710804 199803 1 002

Pembimbing Anggota



Retno Utami A. Wiyono, S.T., M.Eng, Ph.D  
NIP. 760017219

Tim Penguji

Penguji Utama



Dr. Ir. Entin Hidayah, M.U.M.  
NIP. 19661215 199503 2 001

Penguji Anggota I



Dr. Ir. Yeny Dhokhikah, S.T., M.T.  
NIP. 19730127 199903 2 002

Penguji Anggota II



Dr. Ir. Anik Ratnaningsih, S.T., M.T.  
NIP. 19700530 199803 2 001

Dekan Fakultas Teknik Universitas Jember,



Dr. Ir. Triswahu Hardianto, ST., MT  
NIP. 19700826199721001

## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah Bapa, Putra, dan Roh Kudus atas segala rahmat, tuntunan, dan karunia-Nya telah terselesaikannya penyusunan tesis ini yang berjudul “Asesmen Dampak Perubahan Iklim Terhadap Bencana Kekeringan di DAS Sampean Baru Berbasis Data GCM”.

Tesis ini disusun untuk melengkapi tugas akhir dan memenuhi syarat-syarat untuk menyelesaikan Program Studi Strata 2 (S2) dan mencapai gelar Magister Teknik pada Jurusan Sipil Fakultas Teknik Universitas Jember.

Dalam penyusunan dan pelaksanaannya banyak terdapat rintangan, halangan, dan cobaan. Tetapi penulis mendapat banyak bantuan dari berbagai pihak, untuk itu penulis menyampaikan rasa hormat dan terima kasih kepada :

1. Ayahhanda Ir. Valentinus Nanang Setiaji, Ibunda Cicilia Tri Widoyati, Saudara-saudara saya Georgius Guido Setiaji Putra dan Virginia Viola Setiaji Putri, dan keluarga besar saya yang selalu mendoakan, memberikan dukungan dan pengorbanan selama ini;
2. Dr. Ir. Jojok W. Soetjipto, S.T., M.T. selaku Ketua Program Studi Strata 2 (S2) Teknik Sipil Universitas Jember;
3. Dr. Ir. Gusfan Halik, S.T., M.T. selaku Ketua Jurusan Teknik Sipil Universitas Jember;
4. Dr. Gusfan Halik, S.T., M.T. dan Retno Utami A. Wiyono, S.T., M.Eng, Ph.D selaku Dosen Pembimbing dalam penyusunan tesis ini telah membimbing dengan sabar dan memberikan masukan untuk penyusunan tesis ini;
5. Dr. Ir. Entin Hidayah, M.U.M, Dr. Ir. Yeny Dhokhikah, S.T., M.T. dan Dr. Ir. Anik Ratnaningsih, S.T., M.T. selaku Dosen Penguji yang telah masukan yang bermanfaat dalam penyusunan tesis ini;
6. Bapak maupun Ibu Dosen Teknik Sipil Universitas Jember beserta jajarannya yang banyak membantu dalam menyelesaikan tesis ini;



7. Guru-guruku yang telah berjasa membimbing dan memberi banyak ilmu sejak TK hingga SMA;
8. Almamater Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Jember, tempatku menuntut ilmu;
9. Teman-teman mahasiswa magister Teknik Sipil 2018 yang selalu memberikan semangat selama penyusunan penelitian ini.

Tanpa bantuan dan dorongan dari berbagai pihak tersebut, maka penyusunan tesis ini tidak dapat terselesaikan.

Demikian kiranya semoga Tesis ini dapat memberi manfaat bagi peneliti dan pembaca, serta penulis menerima segala kritik dan saran dari semua pihak demi kesempurnaan tesis ini. Dan akhirnya selain ucapan terima kasih, penulis juga meminta maaf yang sebesar-besarnya apabila ada kekurangan-kekurangan dalam tesis ini.

Jember, 17 Juli 2021  
Penulis,



Victorius Setiaji Putra  
NIM. 181920301001

## RINGKASAN

**Asesmen Dampak Perubahan Iklim Terhadap Bencana Kekeringan di DAS Sampean Baru Berbasis Data *General Circulation Model* (GCM);** Victorius Setiaji Putra, 181920301001; 2021; 177 halaman, Magister Teknik Sipil Universitas Jember.

DAS Sampean Baru dikategorikan sebagai daerah dengan tingkat kerawanan kekeringan yang sangat tinggi. Kondisi ini akan semakin parah dan berdampak luas pada kehidupan manusia jika perubahan iklim terus berlangsung hingga beberapa tahun mendatang. Tujuan dari penelitian ini adalah (a) memprediksi perubahan curah hujan menggunakan data sirkulasi atmosfer dengan pendekatan *downscaling*; (b) memprediksi debit aliran pada berbagai skenario perubahan iklim di DAS Sampean Baru; dan (c) asesmen tingkat kerentanan bencana kekeringan secara spasial di DAS Sampean Baru pada berbagai skenario perubahan iklim.

Penelitian ini dilaksanakan di Daerah Aliran Sungai (DAS) Sampean Baru yang berada di Kabupaten Bondowoso, Jawa Timur. Secara geografis, DAS Sampean Baru yang memiliki luas 761 Km<sup>2</sup>, terletak pada posisi 7°48'-7°58' LS dan 114°40'-114°48' BT. Penelitian ini terdiri dari beberapa tahapan antara lain: (a) *Downscaling* data sirkulasi atmosfer dengan Jaringan Syaraf Tiruan (JST); (b) Pemodelan hujan-aliran dengan SWAT; (c) Pemodelan kekeringan hidrologis SRI; dan (d) Pemetaan kekeringan prediksi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa koefisien korelasi (R) pada model hujan menggunakan JST tahun 2006-2018 terhadap data sirkulasi atmosfer (GCM) adalah diatas 0,8 baik pada proses *training*, validasi, dan *testing* pada tiap skenario perubahan iklim (RCP). Berdasarkan hasil tersebut, model *downscaling* dapat digunakan untuk memprediksi hujan dimasa mendatang. Hasil prediksi hujan maksimum secara berturut-turut pada RCP 4.5, RCP 6.0, dan RCP 8.5 adalah 1017 mm; 699 mm; dan 563 mm. Hasil uji keandalan pada pemodelan debit tahun 2006-2018 tiap skenario perubahan iklim menunjukkan bahwa nilai koefisien determinasi (R<sup>2</sup>) lebih besar dari 0,8 dan *Nash Sutcliffe Error* (NSE) lebih besar dari 0,75. Hasil prediksi debit pada Bendungan Sampean Baru menunjukkan debit maksimal secara berturut-turut pada skenario perubahan iklim RCP 4.5, RCP 6.0, dan RCP 8.5 adalah 216,3 m<sup>3</sup>/detik; 214,9 m<sup>3</sup>/detik; dan 119,8 m<sup>3</sup>/detik. Pemetaan spasio temporal kekeringan prediksi tiap skenario perubahan iklim menunjukkan bahwa terjadi peningkatan luasan ancaman kekeringan. Hal ini dapat diamati pada kekeringan tahun 2028, dimana kekeringan dengan kategori amat sangat kering mengalami peningkatan sebesar 15% dan 77% pada RCP 6.0 dan RCP 8.5 sedangkan kekeringan dengan kategori cukup kering mengalami penurunan. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa perubahan iklim yang terus berlangsung berdampak pada bencana kekeringan di DAS Sampean Baru.

Kata kunci : Asesmen kekeringan, Model SWAT, GCM, Skenario RCP, SRI

## SUMMARY

**Assessment of Climate Change Impact on Drought Disasters in the Sampean Baru Watershed Based on General Circulation Model (GCM) Data;** Victorius Setiaji Putra, 181920301001; 2021; 177 pages, Master of Civil Engineering, University of Jember.

The Sampean Baru watershed is categorized as an area with a very high level of drought vulnerability. This condition will get worse and have a wide impact on human life if climate change continues for the next few years. The objectives of this study are (a) predict changes in rainfall using atmospheric circulation data with a *downscaling* approach; (b) predicting flow rates in various climate change scenarios in the Sampean Baru watershed; and (c) spatial assessment of vulnerability to drought in the Sampean Baru watershed in various climate change scenarios.

This research was conducted in the Sampean Baru Watershed (DAS) in Bondowoso Regency, East Java. Geographically, the Sampean Baru watershed which has an area of 761 Km<sup>2</sup>, is located at a position of 7°48'-7°58' South Latitude and 114°40'-114°48' East Longitude. This study consisted of several stages, including: (a) Downscaling of atmospheric circulation data with an Artificial Neural Network (ANN); (b) Rain-flow modeling with SWAT; (c) SRI hydrological drought modeling; and (d) Predictive drought mapping. The results showed that the correlation coefficient (R) in the rain model using ANN 2006-2018 on atmospheric circulation data (GCM) was above 0.8 both in the training, validating, and testing processes in each climate change scenario (RCP). Based on these results, the downscaling model can be used to predict future rain. The maximum rainfall prediction results for RCP 4.5, RCP 6.0, and RCP 8.5, respectively, are 1017 mm; 699 mm; and 563 mm. The reliability test results in the 2006-2018 discharge model for each climate change scenario show that the coefficient of determination (R<sup>2</sup>) is greater than 0.8 and the Nash Sutcliffe Error (NSE) is greater than 0.75. The results of the discharge prediction at the Sampean Baru Dam show that the maximum discharge in a climate change scenario of RCP 4.5, RCP 6.0, and RCP 8.5 is 216,3 m<sup>3</sup>/second; 214,9 m<sup>3</sup>/sec; and 119,8 m<sup>3</sup>/sec. The spatio-temporal mapping of drought predictions for each climate change scenario shows that there is an increase in the extent of the threat of drought. This can be observed in the 2028 drought, where drought in the extreme category increased by 15% and 77% in RCP 6.0 and RCP 8.5 while drought in the moderately dry category decreased. Thus, it can be concluded that the ongoing climate change has an impact on the drought disaster in the Sampean Baru watershed.

Keywords : Drought Assessment, SWAT Model, GCM, RCP Scenario, SRI

DAFTAR ISI

	Halaman
<b>JUDUL</b> .....	ii
<b>HALAMAN PERSEMBAHAN</b> .....	iii
<b>HALAMAN MOTTO</b> .....	iv
<b>HALAMAN PERNYATAAN</b> .....	v
<b>HALAMAN PERSETUJUAN</b> .....	vi
<b>HALAMAN PENGESAHAN</b> .....	vii
<b>HALAMAN KATA PENGANTAR</b> .....	viii
<b>RINGKASAN</b> .....	x
<b>SUMMARY</b> .....	xi
<b>DAFTAR ISI</b> .....	xii
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xv
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	xvi
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b> .....	xviii
<b>BAB 1. PENDAHULUAN</b> .....	1
<b>1.1 Latar Belakang</b> .....	1
<b>1.2 Perumusan Masalah</b> .....	3
<b>1.3 Tujuan Penelitian</b> .....	4
<b>1.4 Manfaat Penelitian</b> .....	4
<b>1.5 Batasan Masalah</b> .....	4
<b>BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	5
<b>2.1 Siklus Hidrologi</b> .....	5
<b>2.2 Daerah Aliran Sungai</b> .....	6
<b>2.3 Perubahan Iklim Global</b> .....	7
<b>2.4 General Circulation Model</b> .....	10
<b>2.5 Model <i>Downscaling</i></b> .....	11
2.5.1 Jaringan Saraf Tiruan (JST) .....	12
<b>2.6 Analisis Hidrologi</b> .....	17
2.6.1 Pengisian Data Hujan Hilang .....	17

2.6.2	Pengecekan Kualitas Data Hujan.....	17
2.6.3	Hujan Rerata Wilayah.....	18
<b>2.7</b>	<b>Model Hidrologi.....</b>	<b>19</b>
2.7.1	<i>Soil and Water Assessment Tool</i> (SWAT).....	20
<b>2.8</b>	<b>Uji Keandalan Model.....</b>	<b>23</b>
<b>2.9</b>	<b>Model Kekeringan dengan SRI.....</b>	<b>25</b>
<b>2.10</b>	<b>Pemetaan dengan SIG.....</b>	<b>27</b>
2.10.1	Pengertian Sistem Informasi Geografis (SIG).....	27
2.10.2	Cara Kerja SIG.....	28
2.10.3	Alasan Penggunaan SIG.....	28
<b>2.11</b>	<b>Hasil Penelitian Sebelumnya.....</b>	<b>29</b>
<b>BAB 3.</b>	<b>METODE PENELITIAN.....</b>	<b>33</b>
<b>3.1</b>	<b>Gambaran Umum Daerah Penelitian.....</b>	<b>33</b>
<b>3.2</b>	<b>Data-data yang diperlukan.....</b>	<b>34</b>
<b>3.3</b>	<b>Tahapan Penelitian.....</b>	<b>34</b>
3.3.1	Tahap Persiapan.....	34
3.3.2	Tahap Pengumpulan Data.....	35
3.3.3	Tahap Pengolahan Data.....	35
3.3.3.1	Analisis Hidrologi.....	35
3.3.3.2	<i>Downscaling</i> Data Sirkulasi Atmosfer.....	36
3.3.3.3	Pemodelan Hujan-Aliran.....	38
3.3.3.4	Asesmen dan Pemetaan Kekeringan SRI.....	40
<b>3.4</b>	<b>Diagram Alur Penelitian.....</b>	<b>42</b>
<b>BAB 4.</b>	<b>PEMBAHASAN.....</b>	<b>46</b>
<b>4.1</b>	<b>Analisa Hidrologi.....</b>	<b>46</b>
4.1.1	Pengolahan Data Hujan Hilang.....	46
4.1.2	Uji Konsistensi Data Hujan.....	47
4.1.3	Pengolahan Hujan Rerata Wilayah.....	48
<b>4.2</b>	<b><i>Downscaling</i> Data Sirkulasi Atmosfer dengan JST.....</b>	<b>48</b>
4.2.1	Penentuan <i>Domain</i> Grid Optimal dan Prediktor Potensial.....	48
4.2.2	<i>Downscaling</i> Data Sirkulasi Atmosfer NCEP/NCAR.....	50

4.2.3 <i>Downscaling</i> Data Sirkulasi Atmosfer CSIRO Mk 3.6.0 .....	52
<b>4.3 Pemodelan Hujan-Aliran dengan SWAT</b> .....	54
4.2.4 Pemodelan Hujan-Aliran dengan Hujan Observasi .....	54
4.2.5 Kalibrasi dan Validasi.....	56
4.2.6 Pemodelan Hujan Aliran dengan Hujan NCEP/NCAR .....	57
4.2.7 Pemodelan Hujan Aliran dengan Hujan CSIRO Mk 3.6.0 .....	59
<b>4.3 Pemodelan Kekeringan Hidrologis SRI</b> .....	61
4.2.5 Pemodelan Kekeringan Historis .....	61
4.2.6 Pemodelan Kekeringan Prediksi.....	62
<b>4.4 Pemetaan Kekeringan Prediksi</b> .....	63
<b>BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN</b> .....	65
5.1 Kesimpulan .....	65
5.2 Saran .....	66
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	67
<b>LAMPIRAN</b> .....	76

**DAFTAR TABEL**

	Halaman
2.1	Skenario perubahan iklim ..... 9
2.2	Perbedaan RCP dan SRES ..... 10
2.3	Bilangan kurva aliran permukaan ..... 22
2.4	Koefisien kebutuhan air ..... 22
2.5	Nilai kekasaran manning saluran utama ..... 22
2.6	Nilai konduktivitas hidrolik saluran utama ..... 23
2.7	Klasifikasi indeks NSE dan $R^2$ ..... 25
2.8	Indeks kekeringan hidrologis ..... 27
2.9	Penelitian terdahulu ..... 30
3.1	Pengelompokan data sekunder ..... 35
3.2	<i>Database</i> ArcSWAT ..... 38
4.1	Stasiun pengamat curah hujan dan koordinat geografisnya ..... 46
4.2	Uji konsistensi data hujan tiap stasiun pengamat hujan ..... 47
4.3	Hasil koefisien korelasi pada tiap koefisien grid NCEP/NCAR ..... 49
4.4	Prediktor potensial yang digunakan ..... 50
4.5	Uji keandalan hasil <i>downscaling</i> NCEP/NCAR Re-Analysis ..... 51
4.6	Uji keandalan hasil <i>downscaling</i> CSIRO Mk 3.6.0. .... 53
4.7	Kemiringan lereng ..... 54
4.8	Jenis tata guna lahan ..... 55
4.9	Jenis tanah ..... 55
4.10	Data distribusi air bersih Kab. Bondowoso tahun 2018 ..... 62

**DAFTAR GAMBAR**

	Halaman
2.1	Siklus hidrologi ..... 5
2.2	Konsep daerah aliran sungai ..... 6
2.3	Proses terjadinya perubahan iklim ..... 8
2.4.a	Perubahan konsentrasi antropogenik GRK tahun 1950-2010 ..... 8
2.4.b	Aktivitas sektor ekonomi yang menyumbang emisi GRK ..... 8
2.5	Ilustrasi downscaling ..... 12
2.6	Neuron natural dan neuron buatan ..... 13
2.7	Arsitektur JST ..... 14
3.1	Lokasi DAS Sampean Baru ..... 33
3.2	Diagram alir penelitian ..... 42
3.3	Diagram alir JST ..... 43
3.4	Diagram alir pemodelan ArcSWAT ..... 44
3.5	Diagram alir SRI ..... 45
4.1	Lokasi penelitian dan domain grid NCEP/NCAR ..... 49
4.2	Domain grid CSIRO Mk 3.6.0 ..... 50
4.3	Plot hujan bulanan observasi dan hasil <i>downscaling</i> NCEP/NCAR ..... 52
4.4	Plot hujan bulanan observasi dan hasil <i>downscaling</i> CSIRO ..... 54
4.5	Uji keandalan debit simulasi awal tahun 1988-2007 ..... 56
4.6	Uji keandalan debit simulasi awal tahun 2008-2018 ..... 56
4.7	Uji keandalan debit simulasi awal tahun 1988-2007 terkalibrasi ..... 57
4.8	Uji keandalan debit simulasi awal tahun 2008-2018 tervalidasi ..... 57
4.9	Uji keandalan debit debit-hujan NCEP/NCAR tahun 1988-2007 .... 58
4.10	Uji keandalan debit debit-hujan NCEP/NCAR tahun 2008-2018 .... 58
4.11	Uji keandalan debit debit-hujan RCP 4.5 tahun 2006-2018 ..... 59
4.12	Uji keandalan debit debit-hujan RCP 6.0 tahun 2006-2018 ..... 60
4.13	Uji keandalan debit debit-hujan RCP 8.5 tahun 2006-2018 ..... 60
4.14	Luas tanaman padi terdampak kekeringan ..... 61



4.15    Persentase sebaran keparahan kekeringan tahun 2028 ..... 64



**DAFTAR LAMPIRAN**

	Halaman
1 Hasil perhitungan metode rasio normal hujan DAS Sampean Baru .	77
2 Perhitungan uji konsistensi Sta. Ancar .....	93
3 Perhitungan uji konsistensi Sta. Blimbing .....	94
4 Perhitungan uji konsistensi Sta. Cermee .....	95
5 Perhitungan uji konsistensi Sta. Jero .....	96
6 Perhitungan uji konsistensi Sta. Kejayan .....	97
7 Perhitungan uji konsistensi Sta. Kesemek .....	98
8 Perhitungan uji konsistensi Sta. Klabang .....	99
9 Perhitungan uji konsistensi Sta. Kolpoh .....	100
10 Perhitungan uji konsistensi Sta. Maesan .....	101
11 Perhitungan uji konsistensi Sta. Maskuning .....	102
12 Perhitungan uji konsistensi Sta. Pakisan .....	103
13 Perhitungan uji konsistensi Sta. Pandan .....	104
14 Perhitungan uji konsistensi Sta. Pinang pait .....	105
15 Perhitungan uji konsistensi Sta. Prajekan .....	106
16 Perhitungan uji konsistensi Sta. Ramban wetan .....	107
17 Perhitungan uji konsistensi Sta. Sumber Dompok .....	108
18 Perhitungan uji konsistensi Sta. Sumber Gading .....	109
19 Perhitungan uji konsistensi Sta. Selolembu .....	110
20 Perhitungan uji konsistensi Sta. Sentral (PU Pengairan) .....	111
21 Perhitungan uji konsistensi Sta. Sukokerto .....	112
22 Perhitungan uji konsistensi Sta. Taal .....	113
23 Perhitungan uji konsistensi Sta. Talep .....	114
24 Perhitungan uji konsistensi Sta. Tamanan .....	115
25 Perhitungan uji konsistensi Sta. Tlogo .....	116
26 Perhitungan uji konsistensi Sta. Wonobojo .....	117
27 Perhitungan uji konsistensi Sta. Wonosari .....	118

28	Perhitungan uji konsistensi Sta. Wonosari 2 .....	119
29	Perhitungan uji konsistensi Sta. Wringin .....	120
30	Grafik lengkung massa ganda Sta. Ancar .....	121
31	Grafik lengkung massa ganda Sta. Blimbing .....	121
32	Grafik lengkung massa ganda Sta. Cermeo .....	122
33	Grafik lengkung massa ganda Sta. Jero .....	122
34	Grafik lengkung massa ganda Sta. Kejayan .....	123
35	Grafik lengkung massa ganda Sta. Kesemek .....	123
36	Grafik lengkung massa ganda Sta. Klabang .....	124
37	Grafik lengkung massa ganda Sta. Kolpoh .....	124
38	Grafik lengkung massa ganda Sta. Maesan .....	125
39	Grafik lengkung massa ganda Sta. Maskuning .....	125
40	Grafik lengkung massa ganda Sta. Pakisan .....	126
41	Grafik lengkung massa ganda Sta. Pandan .....	126
42	Grafik lengkung massa ganda Sta. Pinang pait .....	127
43	Grafik lengkung massa ganda Sta. Prajekan .....	127
44	Grafik lengkung massa ganda Sta. Ramban wetan .....	128
45	Grafik lengkung massa ganda Sta. Sumber Dompok .....	128
46	Grafik lengkung massa ganda Sta. Sumber Gading .....	129
47	Grafik lengkung massa ganda Sta. Selolembu .....	129
48	Grafik lengkung massa ganda Sta. Sentral (PU Pengairan) .....	130
49	Grafik lengkung massa ganda Sta. Sukokerto .....	130
50	Grafik lengkung massa ganda Sta. Taal .....	131
51	Grafik lengkung massa ganda Sta. Talep .....	131
52	Grafik lengkung massa ganda Sta. Tamanan .....	132
53	Grafik lengkung massa ganda Sta. Tlogo .....	132
54	Grafik lengkung massa ganda Sta. Wonoboyo .....	133
55	Grafik lengkung massa ganda Sta. Wonosari .....	133
56	Grafik lengkung massa ganda Sta. Wonosari 2 .....	134
57	Grafik lengkung massa ganda Sta. Wringin .....	134
58	Hasil perhitungan hujan rerata wilayah .....	135

59	Hasil downscaling hujan NCEP/NCAR .....	136
60	Hasil downscaling hujan RCP 4.5 CSIRO Mk 3.6.0 .....	137
61	Hasil downscaling hujan RCP 6.0 CSIRO Mk 3.6.0 .....	139
62	Hasil downscaling hujan RCP 8.5 CSIRO Mk 3.6.0 .....	141
63	Running downscaling hujan NCEP/NCAR .....	143
64	Running downscaling hujan RCP 4.5 CSIRO Mk 3.6.0.....	143
65	Running downscaling hujan RCP 6.0 CSIRO Mk 3.6.0.....	144
66	Running downscaling hujan RCP 8.5 CSIRO Mk 3.6.0.....	144
67	Peta sebaran koordinat stasiun pengamat hujan.....	145
68	Peta kemiringan lereng DAS Sampean Baru .....	146
69	Peta jenis tanah DAS Sampean Baru .....	147
70	Peta jenis tata guna lahan DAS Sampean Baru .....	148
71	Hidrograf simulasi debit-hujan rerata observasi kondisi awal.....	149
72	Hidrograf simulasi debit-hujan rerata observasi terkalibrasi .....	149
73	Hidrograf simulasi debit-hujan rerata NCEP/NCAR tahun 1988-2008 .....	150
74	Hidrograf simulasi debit-hujan rerata RCP 4.5 CSIRO Mk 3.6.0 tahun 1988-2018 .....	150
75	Hidrograf simulasi debit-hujan rerata RCP 6.0 CSIRO Mk 3.6.0 tahun 1988-2018 .....	151
76	Hidrograf simulasi debit-hujan rerata RCP 8.5 CSIRO Mk 3.6.0 tahun 1988-2018 .....	151
77	Hidrograf simulasi debit-hujan rerata RCP 4.5 CSIRO Mk 3.6.0 tahun 2019-2050 .....	152
78	Hidrograf simulasi debit-hujan rerata RCP 6.0 CSIRO Mk 3.6.0 tahun 2019-2050 .....	152
79	Hidrograf simulasi debit-hujan rerata RCP 8.5 CSIRO Mk 3.6.0 tahun 2019-2050 .....	153
80	Grafik kekeringan SRI-6 NCEP/NCAR tahun 1988-2018 .....	154
81	Grafik kekeringan SRI-6 RCP 4.5 CSIRO Mk 3.6.0 tahun 2019-2050 .....	155

82	Grafik kekeringan SRI-6 RCP 6.0 CSIRO Mk 3.6.0 tahun 2019-2050 .....	156
83	Grafik kekeringan SRI-6 RCP 8.5 CSIRO Mk 3.6.0 tahun 2019-2050 .....	157
84	Peta kekeringan SRI-6 DAS Sampean Baru tahun 2018.....	158
85	Peta kekeringan SRI-6 RCP 4.5 DAS Sampean Baru tahun 2019 ....	159
86	Peta kekeringan SRI-6 RCP 4.5 DAS Sampean Baru tahun 2024 ....	160
87	Peta kekeringan SRI-6 RCP 4.5 DAS Sampean Baru tahun 2028 ....	161
88	Peta kekeringan SRI-6 RCP 4.5 DAS Sampean Baru tahun 2035 ....	162
89	Peta kekeringan SRI-6 RCP 4.5 DAS Sampean Baru tahun 2044 ....	163
90	Peta kekeringan SRI-6 RCP 4.5 DAS Sampean Baru tahun 2046 ....	164
91	Peta kekeringan SRI-6 RCP 6.0 DAS Sampean Baru tahun 2024 ....	165
92	Peta kekeringan SRI-6 RCP 6.0 DAS Sampean Baru tahun 2028 ....	166
93	Peta kekeringan SRI-6 RCP 6.0 DAS Sampean Baru tahun 2032 ....	167
94	Peta kekeringan SRI-6 RCP 6.0 DAS Sampean Baru tahun 2036 ....	168
95	Peta kekeringan SRI-6 RCP 6.0 DAS Sampean Baru tahun 2043 ....	169
96	Peta kekeringan SRI-6 RCP 6.0 DAS Sampean Baru tahun 2046 ....	170
97	Peta kekeringan SRI-6 RCP 6.0 DAS Sampean Baru tahun 2050 ....	171
98	Peta kekeringan SRI-6 RCP 8.5 DAS Sampean Baru tahun 2023 ....	172
99	Peta kekeringan SRI-6 RCP 8.5 DAS Sampean Baru tahun 2028 ....	173
100	Peta kekeringan SRI-6 RCP 8.5 DAS Sampean Baru tahun 2031 ....	174
101	Peta kekeringan SRI-6 RCP 8.5 DAS Sampean Baru tahun 2038 ....	175
102	Peta kekeringan SRI-6 RCP 8.5 DAS Sampean Baru tahun 2042 ....	176
103	Peta kekeringan SRI-6 RCP 8.5 DAS Sampean Baru tahun 2047 ....	177

## BAB 1. PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Manusia sebagai penghuni bumi memiliki peranan atas peristiwa alam perubahan iklim yang terjadi saat ini. Sejak dimulainya era pra industrialisasi pada tahun 1750, emisi gas rumah kaca (GRK) mengalami peningkatan. GRK telah mengalami peningkatan 70% antara tahun 1970-2004. Aktivitas manusia pada sektor industri, transportasi, dan pasokan energi merupakan penyumbang terbesar atas bertambahnya emisi GRK (IPCC, 2007).

Peningkatan emisi GRK menyebabkan perubahan komposisi dan kondisi pada atmosfer bumi. Hal ini berdampak pada meningkatnya temperatur bumi karena sinar matahari yang tidak dapat dipantulkan dengan sempurna kembali ke atmosfer (Anderson dkk., 2016). Wilayah daratan menghangat lebih cepat daripada di lautan (IPCC, 2015). Meningkatnya temperatur bumi mengakibatkan perubahan pola curah hujan sehingga beberapa wilayah berpotensi mengalami bencana kekeringan.

Berdasarkan pemetaan yang dilakukan Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB) tentang zonasi ancaman bencana kekeringan di Indonesia, Daerah Aliran Sungai (DAS) Sampean Baru yang terletak di Kabupaten Bondowoso memiliki tingkat kekeringan sangat tinggi (BNPB, 2010). Salah satu dampak bencana kekeringan adalah meningkatnya permintaan kebutuhan air bersih. Sebagai instansi yang menyediakan layanan air bersih, Perusahaan Daerah Air Minum (PDAM) Bondowoso bekerja sama dengan Badan Penanggulangan Bencana Daerah (BPBD) Bondowoso untuk mendistribusikan air bersih ke daerah yang terdampak kekeringan. Data PDAM-BPBD Bondowoso tentang distribusi air bersih tahun 2018 menunjukkan bahwa 7 desa pada 4 kecamatan mengajukan permintaan air bersih (BPBD Bondowoso, 2018).

Kekeringan yang terjadi di Bondowoso juga memberikan dampak terhadap pengelolaan air irigasi Daerah Aliran Sungai (DAS) Sampean Baru. Berdasarkan data kekeringan tahun 2018 dari Dinas Pertanian Tanggul

menunjukkan jumlah luasan lahan yang mengalami gagal panen (puso) antara tahun 1990-2018 di Kabupaten Bondowoso dan Situbondo adalah 153 Hektar. Gagal panen terbesar terjadi pada tahun 2005 dengan luasan 105 Hektar. Hal ini menunjukkan bahwa suplai air irigasi tidak dapat memenuhi kebutuhan air sebagian lahan pertanian. Terjadinya perubahan iklim global membawa dampak buruk terhadap sektor pertanian.

Bencana kekeringan akibat perubahan iklim global tidak dapat dicegah, tetapi dapat diantisipasi dengan melakukan prediksi kekeringan jangka panjang (Bayissa dkk., 2018). Prediksi kekeringan jangka panjang memiliki peranan yang penting untuk menemukan solusi terbaik dalam pengelolaan sumber daya air dan mitigasi bencana kekeringan dimasa mendatang (Bordi dkk., 2006). Walaupun dalam prosesnya, bencana kekeringan datang secara perlahan dan sulit untuk dideteksi (Halik dan Anwar, 2017). Tetapi tingkat keparahannya dapat diukur. Berbagai indeks kekeringan sudah dikembangkan mengacu pada berbagai jenis kekeringan (meteorologis, agrikultural, hidrologis, dan sosio-ekonomi) (Wilhite, 2000). Salah satunya adalah indeks kekeringan hidrologis (*Standardized Runoff Index/SRI*) yang dapat mengasesmen kekeringan berdasarkan debit aliran (Shukla dan Wood, 2008). Dibandingkan dengan indeks kekeringan hidrologis (*Standardized Flow Index/SFI*), SRI memberikan hasil yang baik dalam mengasesmen kekeringan akibat perubahan iklim dan perubahan tata guna lahan (Maskey dan Trambauer, 2015). Berdasarkan hasil penelitian Puslitbang Sumber Daya Air (Hatmoko dkk., 2016), SRI menghasilkan korelasi yang baik dengan data luas sawah yang terdampak kekeringan, sehingga SRI dapat digunakan dalam mengasesmen dampak perubahan iklim terhadap bencana kekeringan di Indonesia.

Perubahan iklim akan berdampak pada kekeringan. Perubahan iklim dapat disimulasikan dengan menggunakan data *General Circulation Model* (GCM). Berdasarkan laporan kelima dari *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC AR-5), kelebihan GCM adalah mensimulasikan berbagai aspek iklim di masa depan termasuk temperatur atmosfer dan lautan, hujan, angin, arus laut, dan tingkat es laut. Untuk memperoleh proyeksi perubahan iklim di masa mendatang, model iklim menggunakan informasi yang diuraikan melalui skenario GRK, emisi

polusi udara, dan pola tata guna lahan. Skenario-skenario ini disebut *Representative Concentration Pathway* (RCP) (Core Writing Team dkk., 2015). GCM merupakan model iklim dengan skala global dan beresolusi spasial kasar. Agar bisa digunakan pada skala regional atau lokal (DAS Sampean Baru), digunakan teknik *downscaling* (Berliana dan Sutikno, 2007; Agmalaro, 2011; Belayneh dkk., 2014; Wilby dkk., 2014). Pendekatan *downscaling* terhadap data luaran GCM akan menghasilkan prediksi curah hujan skala regional di masa mendatang (Halik dan Anwar, 2017). Hasil prediksi curah hujan digunakan sebagai data masukan pada perangkat lunak *Soil and Water Assessment Tools* (SWAT) untuk memodelkan prediksi debit aliran. Hasil prediksi debit aliran digunakan sebagai data masukan dalam mengasesmen kekeringan hidrologis (SRI).

Berdasarkan latar belakang diatas, maka dapat diketahui dampak perubahan iklim terhadap bencana kekeringan DAS Sampean Baru di masa mendatang. Asesmen ini diharapkan dapat membantu mengatasi dampak bencana kekeringan di DAS Sampean Baru dan sebagai masukan bagi instansi terkait dalam membuat kebijakan mitigasi dan adaptasi terhadap perubahan iklim di masa mendatang.

## 1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini antara lain:

1. Bagaimana prediksi perubahan curah hujan akibat skenario perubahan iklim berdasarkan data GCM CSIRO 3.6.0 AR-5?
2. Bagaimana prediksi perubahan debit aliran pada berbagai skenario perubahan iklim di DAS Sampean Baru?
3. Bagaimana pemetaan spasio-temporal bencana kekeringan pada berbagai skenario perubahan iklim di DAS Sampean Baru?



### 1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk:

1. Memprediksi perubahan curah hujan menggunakan data sirkulasi atmosfer dengan pendekatan *downscaling*.
2. Memprediksi debit aliran pada berbagai skenario perubahan iklim di DAS Sampean Baru.
3. Asesmen tingkat kerentanan bencana kekeringan secara spasial di DAS Sampean Baru pada berbagai skenario perubahan iklim.

### 1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah:

1. Berkontribusi dalam mengembangkan ilmu bidang hidrologi khususnya dalam pemodelan *downscaling* curah hujan berdasarkan data sirkulasi atmosfer sehingga dapat dimanfaatkan untuk memprediksi ancaman bencana kekeringan akibat perubahan iklim pada berbagai skenario.
2. Memberikan alternatif dalam memprediksi bahaya kekeringan yang setiap tahunnya terjadi di DAS Sampean Baru ini. Sehingga otoritas lokal dapat mengambil keputusan yang tepat dalam menentukan strategi mitigasi dalam menghadapi kekeringan dan beradaptasi terhadap perubahan iklim.

### 1.5 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini antara lain:

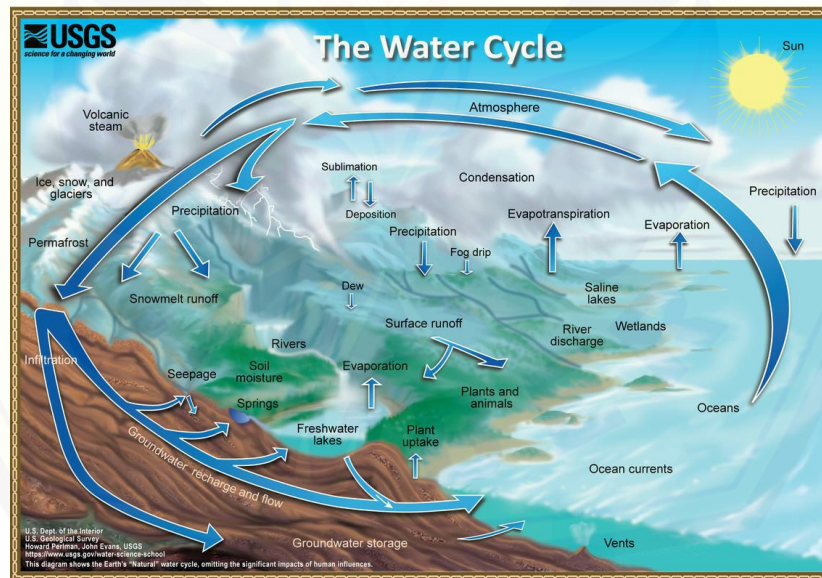
1. Metode asesmen bencana kekeringan yang digunakan adalah indeks kekeringan hidrologis (*Standardized Runoff Index/SRI*).
2. Data masukan yang digunakan adalah NCEP/NCAR *Re-Analysis NOAA* dan *General Circulation Model (GCM) CSIRO Mk 3.6.0*.
3. Penelitian ini tidak meninjau perubahan tata guna lahan.
4. Perangkat lunak yang digunakan untuk pemodelan adalah *Soil Water Assessment Tools (SWAT)*

## BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Siklus Hidrologi

Pada prinsipnya jumlah air yang ada di bumi adalah sama, walaupun manusia, hewan, dan tumbuhan mengkonsumsi air untuk kebutuhan hidup mereka sehari-hari. Proses siklus hidrologi yang berlangsung secara terus menerus membuat air menjadi sumber daya yang terbarukan. Jumlah air yang ada di bumi ini sangat banyak dan tersedia dalam berbagai bentuk yaitu padat, cair, dan gas. Akhirnya ini jumlah air seakan-akan menjadi banyak karena es di wilayah kutub mengalami pencairan akibat pemanasan global (Hadisusanto, 2010).

Siklus hidrologi merupakan pergerakan air secara terus menerus melalui berbagai komponen pada sistem iklim di bumi. Air terdapat di samudra, atmosfer, atas dan bawah permukaan tanah (Pagano dan Sorooshian, 2014). Siklus hidrologi secara alamiah dapat dilihat pada Gambar 2.1



Sumber: Perlman dkk., 2019

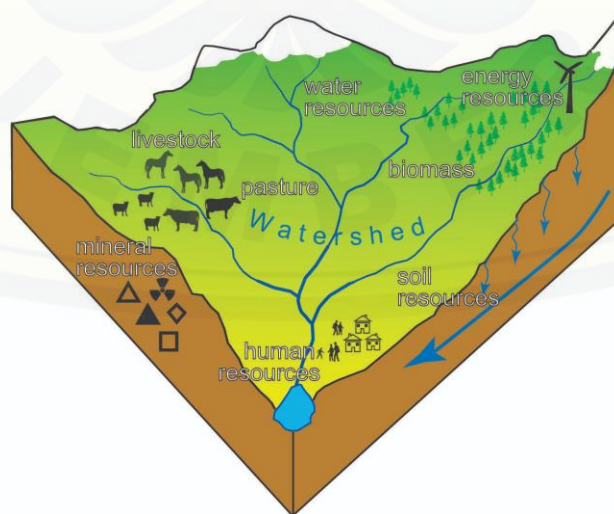
Gambar 2.1 Siklus Hidrologi

Dalam siklus hidrologi, energi panas matahari dan faktor-faktor iklim lainnya menyebabkan terjadinya proses penguapan air (*evaporasi*) yang ada di lautan ataupun di daratan. Air yang menguap sebagai hasil dari evaporasi akan

terbawa oleh angin yang akan berubah menjadi awan kemudian mengembun dan sebagian uap air tersebut akan terkondensasi dan turun ke permukaan bumi sebagai hujan. Sebelum mencapai permukaan tanah, sebagian air hujan yang jatuh akan tertahan oleh tumbuhan, sebagian lainnya tidak akan pernah mencapai permukaan tanah melainkan ter evaporasi kembali ke atmosfer, dan sebagian lainnya akan mencapai permukaan tanah. Air hujan yang jatuh ke daratan, sebagian masuk ke dalam tanah (*infiltrasi*), sebagian lain yang tidak teresap dalam tanah akan mengalir sebagai air permukaan (sungai, danau, dan genangan air), dan sebagian lain menguap langsung ataupun melalui tumbuhan (*intersepsi* dan *transpirasi*) (Setiawan, 2017). Proses perjalanan air melalui sungai di daratan membentuk suatu daerah aliran sungai (DAS).

## 2.2 Daerah Aliran Sungai (DAS)

Menurut Direktorat Kehutanan dan Konservasi Sumber Daya Air (2008), Daerah Aliran Sungai (DAS) secara umum didefinisikan sebagai suatu hamparan wilayah/kawasan yang dibatasi oleh pembatas topografi (punggung bukit) yang menerima, mengumpulkan air hujan, sedimen dan unsur hara serta mengalirkannya melalui anak-anak sungai dan keluar pada sungai utama ke laut atau danau, seperti yang diperlihatkan pada Gambar 2.2.



Sumber: Leipner dan Topbaev, 2015

Gambar 2.2 Konsep daerah aliran sungai (DAS)

DAS dibagi menjadi tiga menjadi tiga bagian yaitu bagian hulu (wilayah pemberi air) yang biasanya merupakan daerah konservasi, bagian tengah (wilayah penyalur air) dimana daerah ini merupakan daerah transisi dari bagian hulu serta bagian hilir (wilayah penerima air) yang biasanya merupakan daerah pemanfaatan air (Kehutanan). Karakteristik yang dimiliki oleh tiap-tiap DAS adalah berbeda. Parameter-parameter DAS yang berkaitan dengan keadaan topografi, tata guna lahan, tanah dan lain sebagainya mempengaruhi kondisi hidrologi DAS tersebut terutama debit pemodelan (Setyorini, 2019).

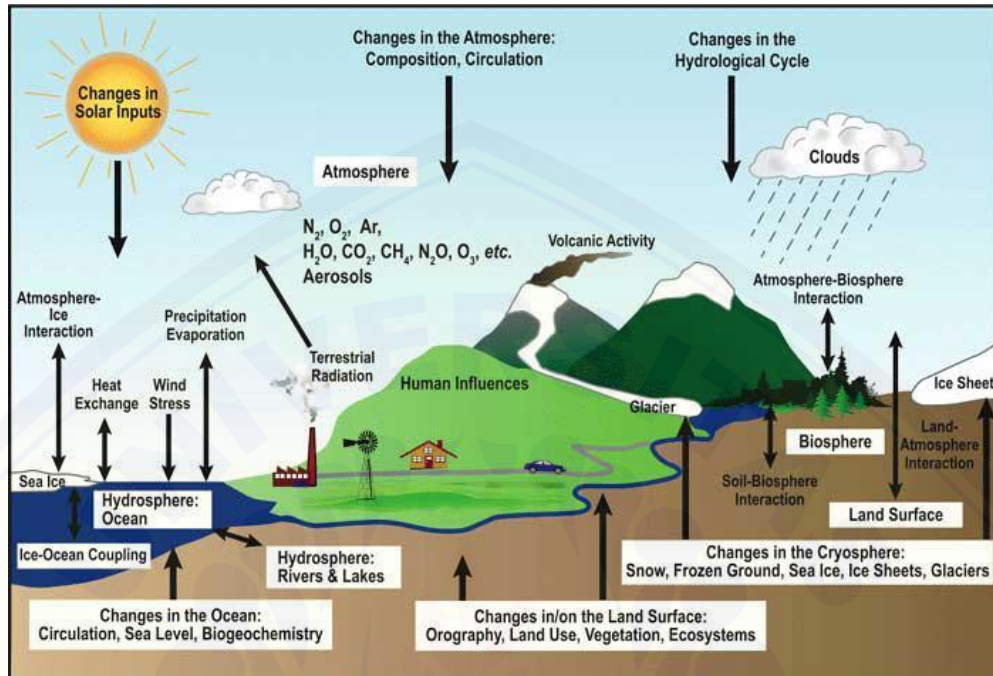
Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 37 Tahun 2012 menyebutkan bahwa pengelolaan Daerah Aliran Sungai (DAS) merupakan upaya manusia dalam mengatur hubungan timbal balik antara sumber daya alam dengan manusia di dalam DAS dan segala aktivitasnya yang terkait, agar terwujud kelestarian dan keserasian ekosistem serta meningkatnya manfaat dari sumber daya alam bagi manusia secara berkelanjutan.

### **2.3 Perubahan Iklim Global**

Perubahan iklim global merupakan suatu kondisi yang ditandai dengan berubahnya pola iklim dunia yang mengakibatkan terjadinya fenomena-fenomena cuaca yang tidak menentu (Hidayati, 2015). Perubahan iklim dibahas sebagai topik penelitian hampir di seluruh bidang keilmuan karena kejadian alam ini merupakan salah satu ancaman terhadap kehidupan manusia dan lingkungan (Batanghari dkk., 2018). Proses terjadinya perubahan iklim dapat dilihat pada Gambar 2.3.

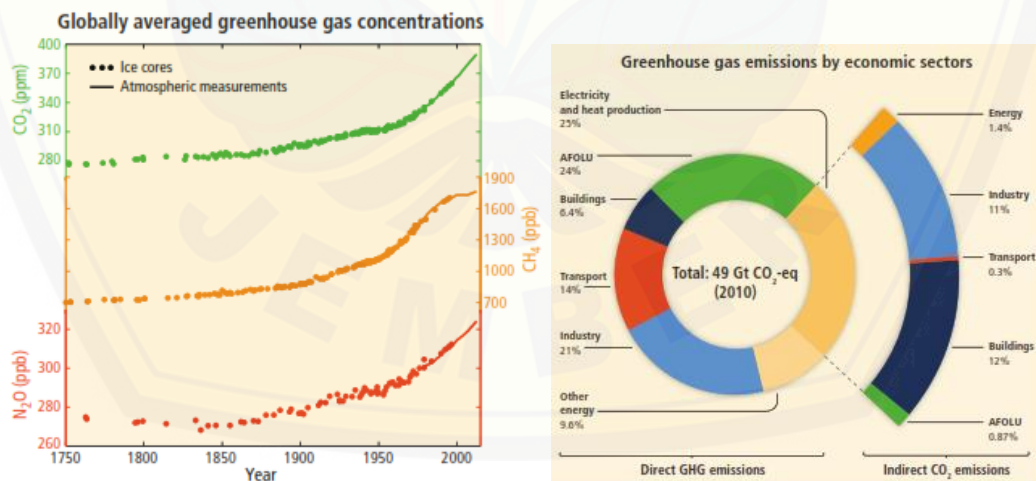
Perubahan iklim global dimulai sejak era pra-industrialisasi tahun 1700-an. Penyebab terjadinya perubahan iklim adalah aktivitas manusia. Beberapa aktivitas manusia tersebut adalah sektor suplai energi, AKPL (Agrikultur, Kehutanan, Penggunaan Lahan), industri, dan transportasi Gambar 2.4(a). Konsentrasi antropogenik Gas Rumah Kaca (GRK), seperti gas karbondioksida ( $\text{CO}_2$ ), metana ( $\text{CH}_4$ ), dan nitrogen oksida, mengalami peningkatan sebesar 40%, 150%, dan 20% sejak tahun 1750 Gambar 2.4(b). Sebanyak 40% antropogenik

GRK tertinggal di atmosfer bumi, lalu sisanya terdapat pada siklus karbon di permukaan bumi (IPCC, 2014).



Sumber: Le Treut dkk., 2007

Gambar 2.3 Proses terjadinya perubahan iklim



(a)

(b)

Sumber: IPCC, 2014

Gambar 2.4 (a) Perubahan konsentrasi antropogenik GRK tahun 1750-2010, (b) Aktivitas sektor ekonomi yang menyumbang emisi GRK.

Perubahan iklim mengalami peningkatan secara ekstrim (Chowdhury dkk., 2016). Hal dapat memberikan dampak buruk terhadap sektor pertanian. Tiga faktor terkait perubahan iklim yang dapat mempengaruhi sektor pertanian adalah perubahan pola hujan, peningkatan temperatur udara dan permukaan laut, dan kejadian ekstrim (bencana kekeringan dan banjir) (Surmaini dan Runtuuwu, 2010). Pola hujan di Indonesia telah mengalami perubahan signifikan (Susilokarti dkk., 2015). Perubahan ini mengakibatkan bergesernya awal musim, sehingga musim kemarau terjadi lebih awal dan lebih panjang (Rentuwu dan Syahbuddin, 2007). Musim kemarau panjang menimbulkan terjadinya bencana kekeringan.

Keberadaan antropogenik GRK di atmosfer bumi akan menyebabkan pemanasan global berkepanjangan dan mengubah seluruh komponen pada sistem iklim. Peristiwa alam ini tidak dapat dihindari, tetapi dapat diantisipasi. *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), sebagai badan internasional terkemuka untuk mengasesmen perubahan iklim, membuat proyeksi perubahan iklim hingga tahun 2100 (IPCC, 2014). Dalam laporan asesmen kelima, proyeksi perubahan iklim dikembangkan dan dibagi menjadi 4 skenario yang didasarkan pada perubahan konsentrasi antropogenik GRK di atmosfer yang dapat dilihat pada Tabel 2.1. Skenario perubahan iklim global ini selanjutnya dinamakan *Representative Concentration Pathways* (RCP). RCP ini merupakan pengembangan dari skenario SRES (Hasil laporan asesmen keempat) sehingga terdapat perbedaan yang dapat di lihat pada Tabel 2.2.

Tabel 2.1 Skenario perubahan iklim

No	Skenario		Kekuatan Radiasi Tahun 2100 (Watt/m <sup>2</sup> )	CO <sub>2</sub> (P.P.M)	Temp (°C)	Pathway
	RCP	SRES				
1	2.6	None	2.6	490	1.5	Menanjak, Menurun
2	4.5	B1	4.5	650	2.4	Stabil
3	6.0	B2	6.0	850	3.0	Stabil
4	8.5	A1, F1	8.5	1370	4.9	Menanjak

Sumber : Moss dkk., 2010

Tabel 2.2 Perbedaan RCP dan SRES

No	Skenario		Perbedaan
	RCP	SRES	
1	2.6	-	-
2	4.5	B1	Temperatur rata-rata RCP menanjak lebih cepat daripada SRES hingga pertengahan abad, lalu melambat
3	6.0	B2	Temperatur rata-rata RCP menanjak lebih lambat daripada SRES antara tahun 2035 - 2080, lalu menanjak cepat hingga abad ke 22
4	8.5	A1, F1	Temperatur rata-rata RCP menanjak lebih cepat daripada SRES antara tahun 2060 - 2090, lalu melambat hingga abad ke 23

Sumber : Rogelj dkk., 2012

#### 2.4 General Circulation Model (GCM)

Skenario proyeksi perubahan iklim masa depan telah dimodelkan secara matematika. Model ini disebut Model Sirkulasi Umum (*General Circulation Model/GCM*). GCM merupakan representasi dari proses-proses penting sistem iklim di bumi (IPCC, 2014). GCM mempunyai bentuk luaran grid-grid yang berukuran 100-250 km menurut garis lintang dan bujurnya (Halik dan Anwar, 2017). GCM digunakan untuk mensimulasikan cuaca, pengertian iklim dan kajian perubahan iklim akibat perubahan CO<sub>2</sub> (Mechoso dkk., 2015).

Menurut Smith dan Dennis (1989), GCM mempunyai kelebihan dengan pendekatan skenariosasi, yaitu:

1. Model tersebut dapat digunakan untuk mengestimasi perubahan iklim global dalam merespon terjadinya peningkatan GRK.
2. Estimasi variabel iklim (seperti: curah hujan, suhu, dan kelembapan) secara fisik sesuai dengan model-model fisika.
3. Estimasi variabel cuaca (seperti: angin, radiasi, tutupan awan, dan kelembapan tanah) cukup untuk memasukkan model.
4. Dapat mensimulasikan keragaman iklim siklus harian.

Namun demikian, model GCM ini juga memiliki keterbatasan, diantaranya:

1. Resolusi spasial berskala global, sehingga terjadi gap antara hasil simulasi iklim global, regional, dan lokal.
2. Model ini sulit untuk mengkopel dengan model-model sirkulasi lautan.
3. Proses-proses umpan balik atmosfer-biosfer tidak terpenuhi.

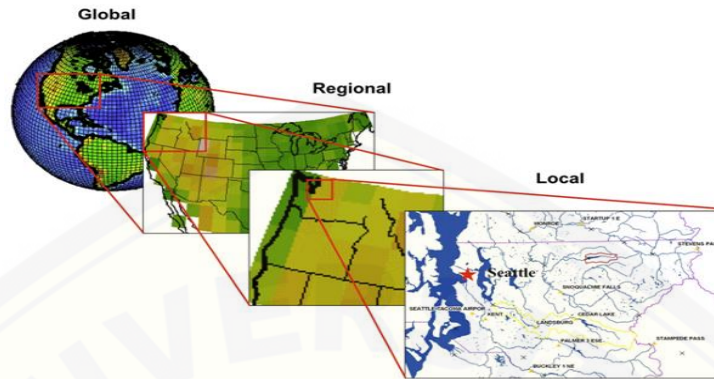
Dalam laporan asesmen yang keempat, IPCC telah berhasil dalam mengatasi kelemahan GCM dalam mengkopel model sirkulasi lautan (IPCC, 2007). Berbagai negara maju telah mengembangkan model GCM dengan resolusi spasial yang berbeda. Penelitian ini menggunakan data GCM CSIRO Mk 3.6.0 yang dikembangkan oleh Australia karena memiliki resolusi spasial yang rendah dan memiliki posisi yang dekat dengan Indonesia. Sehingga data GCM yang digunakan menyerupai kondisi iklim di Indonesia. Resolusi spasial data GCM dapat diatasi menggunakan teknik *downscaling*.

## **2.5 Model Downscaling**

Model *downscaling* merupakan suatu metode yang dikembangkan untuk menjembatani antara data atmosfer berskala luas/global (Temperatur, Kelembapan, Kecepatan Angin, dll) dengan kondisi iklim lokal (hujan) pada selang waktu tertentu (ARCC, 2014). Model ini didasarkan pada pandangan bahwa iklim berskala global mempengaruhi iklim berskala regional/lokal (Berliana dan Sutikno, 2007). Permasalahan resolusi rendah pada data GCM dapat diatasi dengan menggunakan teknik *downscaling* (Jadmiko dan Murdiyarso, 2017) ilustrasi *downscaling* ditunjukkan pada Gambar 2.5. Model *downscaling* dibedakan menjadi 2 jenis, yaitu: Model *dynamic downscaling* (DD) dan Model *statistical downscaling* (SD) (Sharma dkk., 2017). Model DD merupakan proses unduh data yang dilakukan pada grid dengan skala regional mengikuti perubahan variabel prediktor yang sama pada grid berskala global (GCM) untuk mensimulasikan iklim berskala lokal (Shamir dkk., 2019). Keterbatasan model DD adalah memerlukan waktu



komputasi yang lama untuk mendapatkan hasil dengan resolusi yang baik (Le dkk., 2018)



Sumber: ESGF-CoG

Gambar 2.5 Ilustrasi *Downscaling*

Model SD merupakan pendekatan unduh data yang didasarkan pada hubungan empiris antara beberapa variabel (prediktor) pada grid berskala luas/global (GCM) dan variabel (prediktan) lokal yang berskala lebih kecil (Chen dkk., 2011). Salah satu kelebihan model SD dibanding model SD adalah cepatnya proses komputasi dalam mengasesmen dampak perubahan iklim lokal (Wilby, 2002). Oleh karena itu, penelitian ini menggunakan model SD.

### 2.5.1 Jaringan Saraf Tiruan (JST)

Jaringan Saraf Tiruan (JST) atau *Artificial Neural Networks* (ANN) merupakan pengembangan hubungan empiris atau fungsi transfer SD antara variabel prediktor dan prediktan dengan metode regresi non-linear (Halik dan Anwar, 2017). JST sering digunakan dalam pemodelan *downscaling* data presipitasi karena kemampuan JST dalam mengatasi permasalahan hubungan nonlinear tiap parameter meteorology-klimatologi dan nonlinearitas data *time series* (Retalis dkk., 2017; Taiwo dkk., 2018; Salimi dkk., 2019). JST memberikan hasil *downscaling* yang lebih baik dibandingkan dengan model SD metode regresi linear. Hal ini ditinjau dari koefisien determinasi ( $R^2$ ), *Mean Square Error* (MSE), *Root Mean*

*Square Error* (RMSE), Korelasi Pearson, dan BIAS dalam penelitian-penelitian terdahulu (Campozano dkk., 2016; Chandwani dkk., 2016; Tsanis, 2016; Debbarma dkk., 2019).

Konsep kerja JST dirancang menyerupai sistem kerja otak manusia. Hal ini membuat JST memiliki kemampuan untuk belajar dan beradaptasi terhadap hal baru (Retalis dkk., 2017). Seperti halnya struktur neuron pada otak manusia, JST memiliki neuron buatan (*Artificial Neuron*) yang merupakan model matematika sederhana dapat dilihat pada Gambar 2.6. Dalam prosesnya, informasi akan diterima oleh bagian *input* neuron dan diberi bobot. Kemudian badan neuron buatan memproses data *input* melalui fungsi transfer. Hasil dari pemrosesan, ditampilkan pada bagian *output* neuron (Krenker dkk., 2011). Model matematika sederhana dalam proses neuron buatan dinyatakan dalam persamaan:

$$y(k) = F \left( \sum_{t=0}^m w_i(k) \cdot x_i(k) + b \right) \quad (2.1)$$

Keterangan:

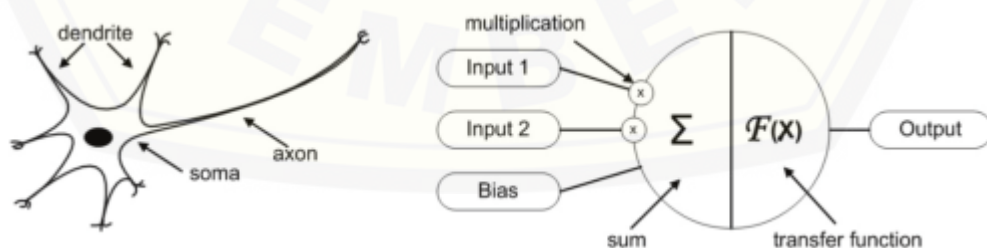
$x_i$  = nilai input

$w_i$  = nilai bobot

$b$  = bias

$F$  = Fungsi transfer

$y(k)$  = nilai output

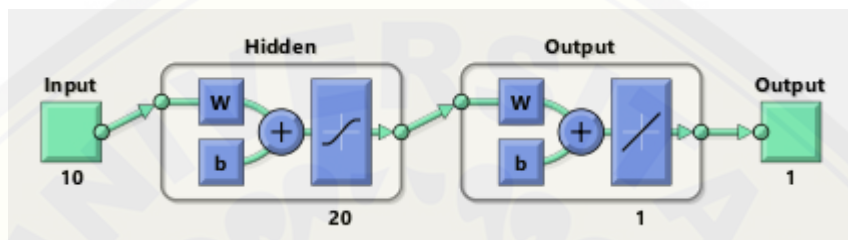


Sumber: Krenker dkk., 2011

Gambar 2.6 Neuron Natural dan Neuron Buatan

Dalam pemodelan menggunakan JST, hasil model ditentukan oleh 3 hal, yaitu: pola hubungan antar neuron (arsitektur jaringan), metode untuk menentukan

bobot penghubung (metode *Training*), dan fungsi aktivasi (Halik dan Anwar, 2017). Arsitektur jaringan menggunakan 1 *hidden layer* dan 20 neuron memberikan akurasi hasil yang baik dengan rata-rata kesalahan kecil (Buono dkk., 2012; Windarto dkk., 2012). Ilustrasi arsitektur JST ditampilkan pada Gambar 2.7. Komposisi data menggunakan proporsi 70% untuk *Training*, 15% untuk validasi, dan 15% *Testing*. Komposisi ini memberikan hasil yang baik (Chakravarti dkk., 2015; Widodo dkk., 2017).



Gambar 2.7 Arsitektur JST

Metode *Training* JST menggunakan *backpropagation*. *Backpropagation* JST merupakan pemodelan dengan supervisi menggunakan pasangan data *input* dan target luaran. Data target luaran berupa data observasi yang berfungsi sebagai target dalam proses pelatihan melalui tiga fase. Fase pertama adalah fase maju dimana data *input* diproses dalam *hidden layer* sehingga menghasilkan luaran model. Fase kedua adalah fase mundur dimana luaran model dibandingkan dengan data target. Selisih antara data *input* dan data target luaran merupakan kesalahan yang terjadi. Fase ketiga adalah modifikasi bobot untuk menurunkan tingkat kesalahan sehingga menghasilkan luaran model yang handal (Jumarwanto dkk., 2009). Adapun tahapan algoritma *backpropagation* JST adalah sebagai berikut (Siang, 2005)

1) Fase Maju

Tahap 1. Masing-masing unit *input* ( $x_i, i = 1, 2, 3, \dots, n$ ) menerima sinyal *input*  $x_i$ , dan mengirim sinyal ini ke semua unit di dalam layer (*hidden layer*)

Tahap 2. Masing-masing unit tersembunyi (*hidden unit*) ( $z_j, j = 1, 2, 3, \dots, p$ ) menghitung sinyal dari bobot *input*

$$z_{in_j} = v_{oj} + \sum_{i=1}^n x_i v_{ij} \quad (2.2)$$

Menerapkan fungsi pengaktifannya untuk menghitung sinyal keluaran,  $z_j = f(z_{in_j})$ , dan mengirim sinyal tersebut kedalam unit luaran.

Tahap 3. Masing - masing unit luaran ( $Y_k, k = 1,2,3,\dots,m$ ) menghitung bobot sinyal *input*

$$y_{in_k} = w_{ok} + \sum_{j=1}^n z_j w_{jk} \quad (2.3)$$

Menerapkan fungsi pengaktifannya untuk menghitung sinyal keluaran,  $Y_k = f(y_{in_k})$

2) Fase Mundur, pada fase ini kesalahan  $t_k - y_k$ , dihitung faktor  $\delta_k (k = 1,2,3, \dots, m)$  yang digunakan untuk mendistribusikan kesalahan ke unit  $y_k$  kesemua unit tersembunyi yang dipakai untuk merubah bobot yang terhubung langsung dengan unit keluaran.

Tahap 4. Masing-masing unit luaran  $y_k (k = 1,2,3, \dots, m)$  menerima pola target sesuai dengan pola pelatihan *input*. Hitung faktor  $\delta_k$ .

$$\delta_k = (t_k - y_k) \cdot f'(y_{in_k}) \quad (2.4)$$

Menghitung bobot korelasi

$$\Delta w_{jk} = \alpha \delta_k z_j \quad (2.5)$$

Menghitung bias korelasi

$$\Delta w_{ok} = \alpha \delta_k \quad (2.6)$$

Dan mengirim  $\delta_k$  ke unit-unit layer bawahnya

Tahap 5. Masing-masing unit tersembunyi  $z_j (j = 1,2,3, \dots, p)$  menghitung *input* delta

$$\delta_{in_j} = \sum_{k=1}^n \delta_k w_{jk} \quad (2.7)$$

Mengalikan dengan turunan dari fungsi aktivasi untuk menghitung kesalahannya

$$\delta_{in_j} = \delta_{in_j} \cdot f'(z_{in_j}) \quad (2.8)$$

Hitung bobot korelasinya

$$\Delta v_{ij} = \alpha \delta_j z_i \quad (2.9)$$

Hitung bias korelasinya

$$\Delta v_{oj} = \alpha \delta_j \quad (2.10)$$

3) Fase Perubahan Bobot dan Bias

Tahap 6 Masing-masing unit luaran  $y_k$  ( $k = 1,2,3, \dots, m$ ) dirubah bobot dan biasnya ( $j = 0,1,2,3, \dots, p$ )

$$w_{jk}(\text{baru}) = w_{jk}(\text{lama}) + \Delta w_{jk} \quad (2.11)$$

Masing-masing unit tersembunyi  $z_j$  ( $j = 1,2,3, \dots, p$ ) dirubah bobot dan biasnya ( $i = 0,1,2,3, \dots, p$ )

$$v_{ij}(\text{baru}) = v_{ij}(\text{lama}) + \Delta w_{ij} \quad (2.12)$$

Tahap 7 Tes dalam kondisi berhenti

*Training* JST dalam penelitian ini menggunakan algoritma back propagation dimana teknik optimasi untuk update bobot menggunakan metode Leven Berg – Marcquart. Metode ini mengadopsi keunggulan yang dari metode Steppes Descen dan metode Newton dengan memodifikasi elemen diagonal dari matriks Jacobian (Demuth dan Raele, 2009). Algoritma Leven Berg-marcquart dinyatakan dalam persamaan:

$$\Delta W_k = -[J_k^T J_k + \mu_k I]^{-1} J_k^T e_k \quad (2.13)$$

Update bobot dinyatakan dalam persamaan:

$$\Delta W_{k+1} = W_k + \Delta W_k \quad (2.14)$$

Dengan:

J : Matriks Jacobian

I : Matriks Identitas

e : Kesalahan (error) jaringan

## 2.6 Analisis Hidrologi

### 2.6.1 Pengisian Data Hujan Hilang

Beberapa hal yang menyebabkan data curah hujan hilang adalah rusaknya alat ukur, tidak adanya pengamatan, atau data pengamatan hilang. Salah satu metode yang dapat digunakan untuk mencari data curah hujan hilang adalah metode rasio normal. Metode sederhana ini menghitung data curah hujan pada stasiun pembanding untuk mencari data curah hujan hilang di stasiun X. Metode perhitungan rasio normal dapat dilihat pada persamaan 2.15 (Soemarto, 1995).

$$D_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i \frac{An_x}{An_i} \quad (2.15)$$

dengan:

$D_x$  = Data hujan hilang

$An_x$  = tinggi hujan rata-rata pada stasiun x

$An_i$  = tinggi hujan rata-rata pada stasiun hujan disekitar stasiun x

$d_i$  = hujan pada saat yang sama dengan hujan yang dicari dari stasiun lain.

$n$  = jumlah stasiun hujan disekitar stasiun x

### 2.6.2 Pengecekan Kualitas Data Hujan

Kualitas data curah hujan harus dilakukan sebelum digunakan dalam analisis hidrologi. Kualitas data akan diuji kebenaran datanya melalui uji konsistensi menggunakan analisis kurva massa ganda (*double mass curve analysis*). Analisis kurva massa ganda dilakukan pada data musiman atau tahunan pada suatu DAS. Analisis ini dapat mengoreksi data curah hujan yang tidak konsisten. Langkah yang dapat dilakukan adalah membandingkan harga akumulasi curah hujan tahunan rerata stasiun dari stasiun sekitarnya (Hadisusanto, 2010). Langkah-langkah dalam melakukan uji konsistensi adalah sebagai berikut:

- 1) Membuat kumulatif data hujan tahunan yang akan diuji.
- 2) Membuat rata-rata tahunan dari data curah hujan stasiun pembanding.
- 3) Membuat kumulatif data hujan tahunan stasiun pembanding.

- 4) Plotting masing-masing kumulatif data hujan pada *chart* Ms. Excel.
- 5) Menarik garis-garis regresi diantara titik-titik tersebut.
- 6) Analisis garis yang terbentuk terkait ada atau tidaknya penyimpangan garis
- 7) Jika terjadi penyimpangan garis, maka dilakukan koreksi menggunakan rumus:

$$H_z = (\tan \alpha \cdot \tan \alpha_0^{-1}) \cdot H_0 \quad (2.16)$$

dengan:

- $H_z$  = data hujan yang diperbaiki
- $H_0$  = data hujan pengamatan
- $\tan \alpha$  = kemiringan sebelum penyimpangan
- $\tan \alpha_0^{-1}$  = kemiringan sesudah penyimpangan

### 2.6.3 Hujan Rerata Wilayah

Hujan yang terjadi dapat merata diseluruh kawasan yang luas atau hanya bersifat setempat. Jika terjadi hujan setempat, maka hanya hujan didaerah itu yang didapat. Beberapa alat penakar hujan ditempatkan pada suatu areal, sehingga dapat diambil nilai rata-rata untuk mendapatkan nilai curah hujan areal.

Ada tiga macam metode pendekatan yang dapat digunakan untuk menentukan curah hujan rerata wilayah antara lain (Soemarto, 1995)

- a) Metode rata-rata aritmatik, dihitung menggunakan persamaan 2.17

$$R = \frac{1}{n} (R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n) \quad (2.17)$$

dengan:

- $R$  = curah hujan daerah (mm)
- $R_1, R_2, \dots, R_n$  = curah hujan di titik pengamatan (mm)
- $N$  = jumlah titik pengamatan

- b) Metode poligon Thiessen, dihitung menggunakan persamaan 2.18

$$R = \frac{A_1 \cdot R_1 + A_2 \cdot R_2 + \dots + A_n \cdot R_n}{A} ; W_n = \frac{A_n}{A}$$

$$R = W_1 \cdot R_1 + W_2 \cdot R_2 + \dots + W_n \cdot R_n \quad (2.18)$$

dengan:

R = hujan rerata daerah (mm)

$R_n$  = hujan pada pos penakar hujan (mm)

$A_n$  = luas daerah pengaruh pos penakar hujan ( $\text{km}^2$ )

A = luas total DAS ( $\text{km}^2$ )

c) Metode Ishoyet, dihitung menggunakan persamaan 2.19

$$R = \frac{A_1 \cdot R_1 + A_2 \cdot R_2 + \dots + A_n \cdot R_n}{A_1 + A_2 + \dots + A_n} \quad (2.19)$$

dengan:

R = hujan rerata daerah (mm)

$R_1, R_2, \dots, R_n$  = curah hujan rata-rata di bagian  $A_n$  (mm)

$A_1, A_2, \dots, A_n$  = luas bagian antara garis isohyet ( $\text{km}^2$ )

## 2.7 Model Hidrologi

Model hidrologi merupakan gambaran sederhana dari suatu sistem hidrologi yang aktual. Model hidrologi biasanya dibuat untuk mempelajari fungsi dan respon dari suatu DAS dari berbagai masukan DAS. Menurut Pawitan dalam Emiyati (2012) model hidrologi adalah model yang menggambarkan keadaan hidrologi secara abstrak yang mempunyai kesamaan dengan keadaan hidrologi sebenarnya di lapangan.

Pengklasifikasian model simulasi hidrologi untuk analisis suatu DAS dapat dibedakan menjadi dua yaitu *lumped parameter* dan *distributed parameter*. Model *lumped parameter* adalah model yang didalamnya terdapat variabel atau parameter model yang tidak memiliki variabilitas ruang, artinya semua proses dalam suatu DAS terjadi pada satu titik spasial, sedangkan model *distributed parameter* merupakan model yang memiliki proses mekanisme fisik yang dibisualisasikan dalam bentuk ruang. Berdasarkan pada teori, model *distributed parameter* memiliki hasil akurasi yang memuaskan, namun data lapangan sering menjadi kendala dalam proses kalibrasi dan verifikasi hasil simulasi.



Beberapa jenis model hidrologi yang termasuk dalam lumped parameter antara lain: model *Universal Soil Loss Equation* (USLE), model tanki, model unit *hydrograph*, dan lain sebagainya. Sedangkan jenis model hidrologi yang termasuk dalam *distributed parameter* antara lain: HEC-HMS (Halwatura dan Najim, 2013; Abdulrazzak dkk., 2019; Patil dkk., 2019), *Precipitation Runoff Modelling System* (PRMS) (Teng dkk., 2017; Tardif, 2018; Risley, 2019), dan *Soil and Water Assessment Tools* (SWAT) (Firdaus dkk., 2014; Abbaspour dkk., 2015; Zuma dkk., 2017; Almeida dkk., 2018; Cordeiro dkk., 2018).

### 2.7.1 *Soil and Water Assessment Tools (SWAT)*

SWAT adalah model hidrologi yang dikembangkan oleh Dr. Jeff Arnold pada tahun 1990-an untuk pengembangan *Agricultural Research Service* (ARS) dari USDA. Model tersebut dikembangkan untuk memprediksi dampak pengelolaan tanah terhadap air, sedimentasi dan jumlah bahan kimia yang masuk ke sungai atau badan air pada suatu DAS dengan mempertimbangkan variasi jenis tanahnya, tata guna lahan, serta kondisi pengelolaan suatu DAS pada waktu yang lama. Model SWAT merupakan gabungan dari beberapa model hidrologi seperti *Chemicals Run Off and Erosion From Agricultural Management System* (CREAMS), *Groundwater Loading Effects on Agricultural Management System* (GLEAMS), *Erosion Productivity Impact Calculator* (EPIC), *Simulation for Water Resources in Rural Basin* (SWRB) (Setiawan, 2017).

SWAT dikembangkan untuk memprediksi dampak dari perubahan tata guna lahan terhadap limpasan air pada suatu DAS dengan mempertimbangkan kondisi tanah, penutupan lahan, dan pengelolaan DAS yang bervariasi. Menurut Djuniardi (2012) untuk mensimulasikan proses hidrologi pada suatu basin, basin dibagi kedalam sub basin melalui aliran yang dilewati. Sub unit dari subbasin disebut sebagai *Hydrologic Response Unit* (HRU) yang merupakan kombinasi unik dari karakteristik tanah dan penggunaan lahan dan dianggap homogen secara hidrologi. Perhitungan limpasan menggunakan metode *Soil Conservation Services* (SCS) dengan memodifikasi nilai *Curve Number* (CN).

Luaran utama model SWAT adalah kondisi hidrologi berupa nilai debit, erosi, dan sedimen terangkut. Nilai-nilai tersebut mencerminkan kondisi hidrologi terkait kinerja DAS seperti Koefisien Regim Sungai (KRS), *Sediment Delivery Ratio* (SDR), dan *Coefficient Runoff* (C). Kinerja model diukur dengan cara validasi, yaitu kalibrasi dan verifikasi menggunakan kriteria statistik  $R^2$  (*Coefficient of Determination*),  $E_f$  atau *Nash-Sutcliffe model Efficiency* (NSE) dan *Percent Bias* (PBIAS) (Hendra, 2017).

Menurut Djuniardi (2012) Hasil simulasi SWAT dapat dilihat pada tingkat Sub DAS, HRU maupun sungai. Pada tingkat Sub DAS dan HRU, Informasi yang diperoleh meliputi jumlah curah hujan, evapotranspirasi potensial dan aktual, kandungan air tanah, perkolasim aliran permukaan, aliran dasar, aliran lateral, dan total hasil air yang dihasilkan selama proses simulasi. Sedangkan pada tingkat sungai adalah jumlah aliran yang masuk dan keluar sungai utama. Jumlah air yang hilang melalui penguapan dan rembesan selama proses simulasi.

Debit aliran yang diperoleh dari simulasi model SWAT harus dikalibrasi dan validasi. Kalibrasi merupakan pengujian model agar dapat mendapatkan gambaran keadaan sebenarnya, sedangkan validasi adalah membandingkan secara visual debit hasil simulasi dengan kurva debit hasil pengukuran stasiun pengamat atau hasil observasi. Kalibrasi dan validasi model dilakukan dengan membandingkan antara hasil simulasi dengan hasil observasi terhadap parameter debit aliran.

Berdasarkan penelitian-penelitian terdahulu, terdapat beberapa parameter yang menentukan hasil dari kalibrasi dan validasi, seperti bilangan kurva aliran permukaan (*Curve Number/CN*), koefisien kebutuhan air (ALPHA\_BF), kekasaran maning untuk saluran utama (CH\_N2), dan konduktivitas hidrolis saluran utama (CH\_K2). Nilai parameter CN, ALPHA\_BF, CH\_N2, dan CH\_K2 dapat dilihat pada Tabel 2.3, Tabel 2.4, Tabel 2.5, dan Tabel 2.6.

Tabel 2.3 Bilangan kurva aliran permukaan (*Curve Number/CN*)

No	Penggunaan Tanah / Tutupan Lahan	Jenis Tanah			
		A	B	C	D
1	Permukiman	31	59	72	79
2	Sawah	61	73	81	84
3	Kebun Campur	32	58	72	79
4	Tegalan	67	78	85	89
5	Tanah Kosong/Semak Belukar	39	61	74	80
6	Hutan	36	60	73	79

Sumber: *Theoretical Documentation ArcSWAT*, 2012

Tabel 2.4 Koefisien kebutuhan air

No	Respon Aliran	Kisaran
1	Lahan memiliki respon lambat terhadap perubahan aliran bawah tanah	0 - 0.3
2	Lahan memiliki respon sedang terhadap perubahan aliran bawah tanah	0.31 - 0.89
3	Lahan memiliki respon cepat terhadap perubahan aliran bawah tanah	0.9 - 1

Sumber: *Theoretical Documentation ArcSWAT*, 2012

Tabel 2.5 Nilai kekasaran manning saluran utama

No	Karakteristik Saluran	Nilai Manning	
		Rata-rata	Kisaran
1	Sudah dikeruk atau digali		
	a. terpelihara. lurus. seragam	0.025	0.016 - 0.033
	b. terpelihara. berbelok. tidak seragam	0.035	0.023 - 0.05
	c. tidak terpelihara dan banyak tanaman liar	0.075	0.04 - 0.014
2	Alami		
	a. sedikit tanaman dan berbau	0.05	0.025 - 0.065
	b. banyak pohon dan berbatu	0.1	0.05 - 0.15

Sumber: *Theoretical Documentation ArcSWAT*, 2012

Tabel 2.6 Nilai konduktivitas hidrolis saluran utama

No	Kelompok Material Dasar	Karakteristik Material Dasar	Kecepatan Kehilangan (mm/jam)
1	Kecepatan kehilangan sangat cepat	Tidak ada kerikil dan pasir dengan ukuran besar	> 127
2	Kecepatan kehilangan cepat	Sedikit mengandung kerikil dan pasir	51 - 127
3	Kecepatan kehilangan sedang	Campuran kerikil dan pasir dengan kandungan liat-debu rendah	25 - 76
4	Kecepatan kehilangan rendah	Campuran kerikil dan pasir dengan kandungan liat-debu sedang	6 - 25
5	Kecepatan kehilangan sangat rendah	Campuran kerikil dan pasir dengan kandungan liat-debu tinggi	0.025 - 2.5

Sumber: *Theoretical Documentation ArcSWAT*, 2012

## 2.8 Uji Keandalan Model

Uji keandalan model yaitu dengan membandingkan hasil luaran model dengan nilai observasinya. Untuk uji keandalan model dinyatakan dalam beberapa indikator, yaitu

### a. Koefisien determinasi ( $R^2$ )

Menurut Santoso dan Azhari, (2005:125). Koefisien determinasi ( $R^2$ ) digunakan untuk mengetahui seberapa besar hubungan dari beberapa variabel dalam pengertian yang lebih jelas. Koefisien determinasi akan menjelaskan seberapa besar perubahan atau variansi suatu variabel bisa dijelaskan oleh perubahan atau variasi pada variabel yang lain. Nilai koefisien ini antara 0 dan 1, jika hasil lebih mendekati angka 0 berarti kemampuan variabel-variabel independent dalam menjelaskan variasi variabel sangat terbatas. Tapi jika hasil mendekati 1 berarti variabel-variabel independent memberi hampir informasi yang dibutuhkan untuk

memprediksi variasi variabel independent. Rumus koefisien determinasi adalah: (Santoso dan Azhari 2005)

$$R = \frac{[\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs,i})(Q_{mod,i} - \bar{Q}_{mod,i})]^2}{\sum (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs,i})^2 \sum (Q_{mod,i} - \bar{Q}_{mod,i})^2} \quad (2.20)$$

Dengan:

- Q obs : Debit observasi (m<sup>3</sup>/d)
- Q mod : Debit model model (m<sup>3</sup>/d)
- $\bar{Q}_{obs,i}$  : Rata-rata debit observasi (m<sup>3</sup>/d)
- $\bar{Q}_{mod,i}$  : Rata-rata debit model (m<sup>3</sup>/d)

b. *Root Mean Square Error (RMSE)*

RMSE merupakan fungsi dari tiga karakter dari serangkaian kesalahan, bukan dari satu karakter yaitu rata-rata error. RMSE dapat digunakan untuk mengumpulkan seberapa error data model yang digunakan. RMSE akan meningkat Bersama dengan total square error. Semakin mendekati nol, nilai RMSE semakin baik. (Wahyudi, 2017). Rumus RMSE adalah sebagai berikut:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n (Q_{mod} - Q_{obs})^2}{n}} \quad (2.21)$$

Dengan:

- Q obs : Debit observasi (m<sup>3</sup>/d)
- Q mod : Debit model model (m<sup>3</sup>/d)

c. *Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE)*

Indeks Nash Sutcliffe Efficiency (NSE) merupakan uji untuk mengetahui tingkat keandalan model terhadap observasi. Indeks NSE sering digunakan dalam penelitian-penelitian hidrologi (Jain, 2008; McCuen, 2006).

$$NSE = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{obs,i} - Q_{mod,i})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs,i})^2} \right] \quad (2.22)$$

dengan:

$Q_{obs}$  : Debit observasi ( $m^3/d$ )

$Q_{mod}$  : Debit model model ( $m^3/d$ )

$\bar{Q}_{obs,i}$  : Rata-rata debit observasi ( $m^3/d$ )

Model dapat dikatakan baik apabila nilai  $R^2$  dan NSE mendekati 1, klasifikasi nilai indeks dapat dilihat pada Tabel 2.7. Uji keandalan ini sangat sensitif terhadap variasi parameter-parameter model (Emyati, 2012).

Tabel 2.7 Klasifikasi Indeks NSE dan  $R^2$

No	NSE	$R^2$	Klasifikasi
1	$0.75 < NSE \leq 1.00$	$0.75 < R^2 \leq 1.00$	Sangat Baik
2	$0.60 < NSE \leq 0.75$	$0.60 < R^2 \leq 0.75$	Baik
3	$0.36 < NSE \leq 0.60$	$0.50 < R^2 \leq 0.60$	Memuaskan
4	$0.00 < NSE \leq 0.36$	$0.25 < R^2 \leq 0.50$	Buruk
5	$NSE \leq 0.00$	$R^2 \leq 0.25$	Tidak memenuhi

Sumber : (Almeida dkk., 2018)

## 2.9 Model Kekeringan dengan SRI

Metodologi yang dikembangkan oleh McKee (1993) untuk SPI, diterapkan dalam mendefinisikan SRI sebagai standar penyimpangan normal unit yang terkait dengan persentil limpasan hidrologi yang terakumulasi selama durasi tertentu. Prosedur dalam melakukan pemodelan kekeringan SRI dijabarkan sebagai berikut (Shukla dan Wood, 2008):

1. Rangkaian waktu dari limpasan didapatkan dari simulasi. Limpasan simulasi memiliki distribusi probabilitas yang sama dengan limpasan observasi.
2. Data dengan distribusi sama digunakan untuk menghitung probabilitas kumulatif limpasan yang diteliti.
3. Probabilitas kumulatif diubah menjadi bentuk distribusi normal menggunakan distribusi gamma (McKee, B., Doesken, R.J., Kleist, 1993).

Penentuan nilai SRI didasarkan pada skala 1, 3, 6, 9, dan 12 bulan. Distribusi gamma merupakan distribusi frekuensi yang dinyatakan dalam persamaan sebagai berikut:

$$g(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}}, \text{ untuk } x > 0 \quad (2.23)$$

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty y^{\alpha-1} e^{-y} dy \quad (2.24)$$

Kesesuaian distribusi terhadap data diperlukan parameter  $\alpha$  dan  $\beta$ . Edaward dan McKee (1997) mengestimasi parameter menggunakan likelihood berikut:

$$\hat{\alpha} = \frac{1}{4A} \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right) \quad (2.25)$$

$$\hat{\beta} = \frac{\bar{x}}{\alpha} \quad (2.26)$$

$$A = \ln(\bar{x}) - \frac{\sum \ln(x)}{n} \quad (2.27)$$

Parameter yang dihasilkan kemudian digunakan untuk menentukan kumulatif probabilitas dari pengamatan debit bulanan untuk skala berbeda dengan persamaan:

$$G(x) = \int_0^x g(x) dx = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} = \int_0^x x^{\hat{\alpha}-1} e^{-\frac{x}{\hat{\beta}}} \quad (2.28)$$

Jika fungsi gamma tidak di definisikan pada saat  $x = 0$  dan distribusi debit = 0, maka kumulatif probabilitas menjadi:

$$H(x) = q + (1-q) G(x) \quad (2.29)$$

SRI dihitung menggunakan prosedur yang sama dengan SPI, sebagai berikut:

$$SRI = + \left( t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right) \quad t = \sqrt{\ln \left[ \frac{1}{(H(x))^2} \right]}$$

$$\text{Untuk } 0 < H(x) \leq 0.5 \quad (2.30)$$

$$SRI = - \left( t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right) \quad t = \sqrt{\ln \left[ \frac{1}{(H(x))^2} \right]}$$

Untuk  $0.5 < H(x) \leq 1$  (2.31)

Sehingga didapatkan koefisien sebagai berikut.

$$\begin{aligned} c_0 &= 2.515517 & d_0 &= 1.432788 \\ c_1 &= 0.802853 & d_1 &= 0.189269 \\ c_2 &= 0.010328 & d_2 &= 0.001308 \end{aligned}$$

Nilai indeks kekeringan ini menunjukkan angka kualitatif kekeringan yang dapat diklasifikasikan seperti pada table 2.8.

Tabel 2.8 Indeks kekeringan hidrologis (SRI)

No	Nilai SRI	Klasifikasi
1	Diatas 2.00	Amat Sangat Basah
2	1.50 s/d 1.99	Sangat Basah
3	1.00 s/d 1.49	Basah
4	-0.99 s/d 0.99	Normal
5	-1.00 s/d -1.49	Kering
6	-1.50 s/d -1.99	Sangat Kering
7	Dibawah -2.00	Amat Sangat Kering

Sumber : (Meresa dkk., 2016)

## 2.10 Pemetaan spasial dengan SIG

### 2.10.1 Pengertian Sistem Informasi Geografis (SIG)

Menurut ESRI (*Environmental System Research Institute*) dalam Prahasta (2002:55), SIG adalah kumpulan yang terorganisir dari perangkat keras computer, perangkat lunak, data geografi, dan personil yang dirancang secara efisien untuk memperoleh, menyimpan, mengupdate, memanipulasi, menganalisis, dan menampilkan semua bentuk informasi yang bereferensi geografi.

Sedangkan menurut Aronoff dalam Prahasta, (2002:55), SIG adalah sistem yang berbasiskan computer yang digunakan untuk menyimpan dan memanipulasi informasi-informasi geografi. SIG dirancang untuk mengumpulkan, menyimpan, dan menganalisis obyek-obyek dan fenomena alam dimana lokasi geografi



merupakan karakteristik yang penting untuk dianalisis. Dengan demikian SIG merupakan sistem komputer yang memiliki empat kemampuan dalam menangani data yang bereferensi geografis yaitu masukan, manajemen data (penyimpanan dan pemanggilan data), analisis dan memanipulasi data, serta keluaran.

## 2.10.2 Cara kerja SIG

SIG dapat merepresentasikan *real world* (dunia nyata) diatas monitor computer sebagaimana lembaran peta dapat merepresentasikan dunia nyata diatas kertas. Tetapi SIG memiliki kekuatan lebih dan fleksibilitas daripada lembaran pada kertas (Falah, 2015). Peta merupakan representasi grafis dari dunia nyata, obyek-obyek yang direpresentasikan diatas peta disebut unsur peta atau *map features* (contohnya adalah sungai, taman, kebun, jalan, dan lain-lainnya). Karena peta mengorganisasikan unsur-unsur berdasarkan lokasinya, peta sangat baik dalam memperlihatkan hubungan atau relasi yang dimiliki unsur-unsurnya (Komputer, 2015).

SIG menyimpan semua informasi deskriptif unsur-unsurnya sebagai atribut-atribut dalam basis data. Kemudian SIG membentuk dan menyimpan dalam tabel-tabel (relasional). Setelah itu, SIG menghubungkan unsur-unsur diatas dengan tabel-tabel yang bersangkutan. Dengan demikian, atribut-atribut ini dapat diakses melalui lokasi-lokasi unsur-unsur peta, dan sebaliknya, unsur-unsur peta juga dapat diakses atribut-atributnya (Prahasta, 2002).

## 2.10.3 Alasan penggunaan SIG

Ada beberapa alasan yang menyebabkan aplikasi-aplikasi SIG menjadi menarik untuk digunakan dalam berbagai bidang ilmu, antara lain (Prahasta, 2002):

1. SIG dapat digunakan sebagai alat bantu (baik sebagai tools maupun bahan pembelajaran) utama yang interaktif, menarik, dan menantang didalam usaha-usaha untuk meningkatkan pemahaman, pengertian, pembelajaran, dan Pendidikan mengenai ide-ide atau konsep-konsep lokasi, ruang

(spasial), kependudukan, dan unsur-unsur geografis yang terdapat pada permukaan bumi berikut data-data atribut yang menyertainya.

2. SIG menggunakan baik data spasial maupun data atribut secara terintegrasi hingga sistemnya dapat menjawab dengan baik pertanyaan spasial dan non-spasial serta memiliki kemampuan analisis spasial dan non-spasial.
3. SIG memiliki kemampuan-kemampuan untuk menguraikan unsur-unsur yang terdapat dipermukaan bumi kedalam bentuk beberapa *layer* atas *coverage* data spasial.

## **2.11 Hasil Penelitian Sebelumnya**

Literatur atau penelitian sebelumnya yang berkaitan dengan penelitian yang akan dilakukan dapat dilihat pada Tabel 2.9.

Tabel 2.9 Penelitian Terdahulu

No.	Peneliti	Luaran GCM	Tujuan	Model <i>Statistical downscaling</i>		Negara	Kesimpulan
				Pemrosesan dan Pemilihan Variabel	Fungsi Transfer		
1	Raziei dkk., 2010	NCEP/NCAR, GPCC	Prediksi Kekeringan Meteorologis	PCA	Singular Spectral Analysis	Iran	Hasil yang didapat menunjukkan bahwa tidak ada satupun model luaran GCM yang dapat merepresentasikan kekeringan yang terjadi di Iran.
2	Agmalaro, 2011	CGCM3.1, GISS-ER, GISSAOM, MRI-CGCM2	Prediksi Curah Hujan	Principal Component Analysis (PCA)	Support Vector Machine (SVM)	Indonesia	Model yang dihasilkan cukup baik dalam memprediksi curah hujan pada kondisi normal, tetapi kurang baik dalam memprediksi curah hujan kondisi ekstrim.
3	Shahbazi dkk., 2011	NCEP	Prediksi Kekeringan	Mutual Information (MI)	Support Vector Machine (SVM)	Iran	Model SVM memberikan hasil yang sangat memuaskan dalam mensimulasikan hujan. Model menunjukkan bahwa kekeringan musiman SPI diprediksi maju lebih awal 2-5 bulan.
4	Chen dkk., 2012	NCEP/NCAR, CGCM3, HadCM3	Prediksi Hujan-Aliran	Analisis Korelasi	Smooth Support Vector Machine (SSVM), SDSM	China	Pada data GCM yang sama, hasil simulasi debit aliran dari hujan downscale SSVM dan SDSM menunjukkan perbedaan yang jauh. SDSM menunjukkan hasil yang lebih baik dari SSVM dalam melakukan <i>downscaling</i> hujan. NSE dan RMSE-OSDR dapat menjadi kunci dalam <i>downscaling</i> hujan

Tabel 2.9 Lanjutan

No.	Peneliti	Luaran GCM	Tujuan	Model <i>Statistical downscaling</i>		Negara	Kesimpulan
				Pemrosesan dan Pemilihan Variabel	Fungsi Transfer		
5	Halik dan Anwar, 2017	NCEP/NCAR CSIRO Mk 3.5.0	Prediksi Curah Hujan dan Kekeringan Meteorologis	PCA dan MSPCA	Artificial Neural Network (ANN)	Indonesia	Metode MSPCA menghasilkan reduksi dimensi data atmosfer yang lebih baik daripada metode PCA. Pengembangan model <i>downscaling</i> MSPCA-ANN memberikan pola hujan yang mendekati nilai observasinya.
6	Asyeifa, 2017	NCEP CFSR	Prediksi Curah Hujan	Projection Pursuit	Projection Pursuit Regression (PPR)	Indonesia	Hasil prediksi curah hujan di lima kabupaten mendekati nilai observasinya.
7	Nurdiansyah dkk., 2018	BCC, CWB, GDAPS_F, HMC, POAMA	Prediksi Awal Musim Hujan dan Kemarau	Cluster Analysis	Canonical Correlation Analysis (CCA)	Indonesia	Model CWB, GDAPS_F, dan POAMA memiliki tingkat kehandalan yang lebih baik daripada Model BCC dan HMC dalam memprediksi awal musim hujan dan kemarau. Pengaruh faktor topografi sangat signifikan terhadap tingkat akurasi model

Tabel 2.9 Lanjutan

No.	Peneliti	Luaran GCM	Tujuan	Model <i>Statistical downscaling</i>		Negara	Kesimpulan
				Pemrosesan dan Pemilihan Variabel	Fungsi Transfer		
8	Mekonnen dan Disse, 2018	NCEP/NCAR, CSIRO Mk 3, ECHAM5-OM, MRI-CGCM2.3, HadCM3, GFDL-CM2.1, CCSM3, CanESM2	Prediksi Curah Hujan	Analisis Korelasi	LARS-WG, <i>Statistical downscaling</i> Model (SDSM)	Ethiopia	Dari 6 data GCM CMIP3 yang diolah dengan LARS-WG, data HadCM3 menunjukkan hasil yang memuaskan dalam memprediksi presipitasi dan temperatur pada skenario SRES A2a dan B2a. Sedangkan CanESM2 yang diolah dengan SDSM pada skenario RCP4.5, RCP6.0, dan RCP8.5 memberikan hasil yang sama seperti HadCM3.
9	Safрил dan Ulfiana, 2019	NCEP	Prediksi Curah Hujan	Singular Value Decomposition (SVD)	Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS)	Indonesia	Perbandingan antara hasil prediksi curah hujan model dan observasi menunjukkan nilai RMSE yang kecil. Hasil prediksi menunjukkan pola hujan prediksi mampu mengikuti pola musonal dan antar tahunan (ENSO)

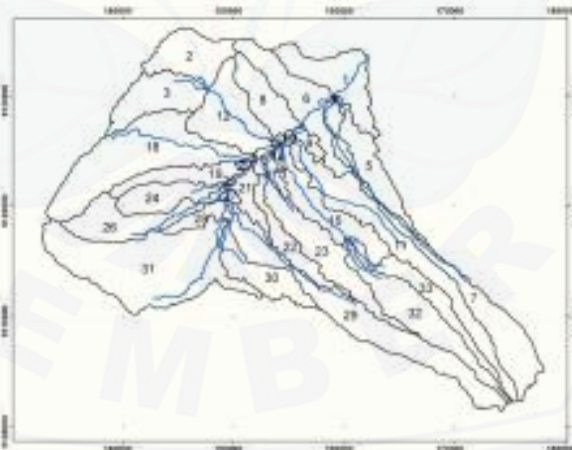
### BAB 3. METODE PENELITIAN

#### 3.1. Gambaran Umum Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Daerah Aliran Sungai (DAS) Sampean Baru yang berada di Kabupaten Bondowoso, Jawa Timur. Secara geografis, DAS Sampean Baru yang memiliki luas 761 Km<sup>2</sup>, terletak pada posisi 7°48'-7°58' LS dan 114°40'-114°48' BT dengan batas administrasi DAS sebagai berikut:

- Sebelah Utara : Kabupaten Situbondo
- Sebelah timur : Kabupaten Situbondo dan Kabupaten Banyuwangi
- Sebelah Selatan : Kabupaten Jember
- Sebelah Barat : Kabupaten Situbondo dan Kabupaten Probolinggo

DAS Sampean Baru terletak diantara titik 9101390 – 9136137 mS sampai titik 132689 – 178063 mT pada zona 50S dengan menggunakan sistem koordinat peta UTM 1983 pada sistem proyeksi *Transverse Mercator* dengan datum global WGS-84.



Sumber: Halik dkk., 2010

Gambar 3.1 Lokasi DAS Sampean Baru

DAS Sampean Baru memiliki bangunan kontrol yaitu Waduk Sampean Baru yang berfungsi untuk menyediakan air irigasi pada musim kemarau. Waduk ini mempunyai baku sawah seluas 8.613 Ha.

## 3.2. Data-data Penelitian

Data-data yang dihunakan untuk menyelesaikan penelitian ini sesuai dengan perumusan dan batasan masalah adalah sebagai berikut:

1. Peta digital topografi (DEM/*Digital Elevation Model*) diperoleh dari [www.earthexplorer.usgs.gov](http://www.earthexplorer.usgs.gov).
2. Data curah hujan harian dan bulanan dari tahun 1988-2018 diperoleh dari PU Pengairan Bondowoso.
3. Data koordinat letak stasiun hujan diperoleh dari PU Pengairan Bondowoso.
4. Data debit aliran bendung-bendung di Bondowoso diperoleh dari PU Pengairan Bondowoso.
5. Data koordinat letak bendung diperoleh dari PU Pengairan Bondowoso.
6. Peta digital jenis tanah diperoleh dari Badan Pengelolaan Daerah Aliran Sungai dan Hutan Lindung (BPDASHL) Brantas Sidoarjo.
7. Peta digital tata guna lahan tahun 2016 yang diperoleh dari Badan Informasi Geospasial (BIG)
8. Data sirkulasi atmosfer NOAA NCEP/NCAR *Re-Analysis* tahun 1988-2018 diperoleh dari [www.esrl.noaa.gov](http://www.esrl.noaa.gov).
9. Data sirkulasi atmosfer (*General Circulation Model/GCM*) CSIRO Mk 3.6.0 tahun 2006-2050 diperoleh dari [www.esgf-data.dkrz.de](http://www.esgf-data.dkrz.de).
10. Data Kekeringan diperoleh dari Dinas Pertanian Bondowoso

## 3.3. Tahapan Penelitian

### 3.3.1. Tahap Persiapan

Tahap ini meliputi kegiatan sebagai berikut:

- a) Studi literatur

Studi literatur dilakukan dengan mempelajari penelitian-penelitian terdahulu mengenai asesmen bencana kekeringan hidrologis (SRI), penggunaan data sirkulasi atmosfer baik data NCEP/NCAR (historis) maupun CSIRO Mk 3.6.0 (prediksi), penggunaan *software* MATLAB untuk melakukan *downscaling* data

sirkulasi atmosfer, penggunaan *software* ArcSWAT untuk pemodelan hidrologi beserta kalibrasi-validasinya, penggunaan ArcGIS untuk memetakan dampak bencana kekeringan. Referensi-referensi tersebut menjadi dasar dalam menyusun penelitian ini.

b) Perijinan dinas terkait

Meneruskan surat permohonan izin penelitian dari fakultas teknik Universitas Jember kepada 1.) Dinas PU Pengairan Jawa Timur yang kemudian diteruskan pada UPT PSAWS Sampean Baru 2) Badan Pengelolaan Daerah Aliran Sungai dan Hutan Lindung (BPDASHL) Brantas Sidoarjo.

### 3.3.2. Tahap Pengumpulan Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data sekunder dari instansi-instansi terkait. Data-data tersebut dibagi menjadi dua jenis data, yaitu data spasial dan non-spasial. Pengelompokan data-data tersebut dapat dilihat dalam Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Pengelompokan data sekunder

No	Jenis Data	Jenis Database	
		<i>TXT File</i>	<i>Raster File</i>
1	Peta Tata Guna Lahan	✓	✓
2	Peta Jenis Tanah	✓	✓
3	Peta DEM	-	✓
4	Koordinat Stasiun Curah Hujan	✓	-
5	Curah Hujan Harian	✓	-

### 3.3.3. Tahap Pengolahan Data

Tahap ini meliputi kegiatan sebagai berikut:

#### 3.3.3.1 Analisis Hidrologi

Berdasarkan data hujan yang diperoleh dari beberapa stasiun hujan, diketahui bahwa terdapat data hujan yang hilang pada setiap tahunnya. Untuk itu



diperlukan pengisian data hujan dari stasiun lain menggunakan metode rasio normal.

Setelah data hujan hilang terisi, data hujan tiap tahun diuji konsistensi datanya menggunakan teknik lengkung massa ganda. Data hujan yang tidak konsisten biasanya disebabkan karena perubahan atau gangguan lingkungan disekitar tempat penakar hujan tersebut dipasang, misalnya penakar hujan terlindung oleh pohon, bersebelahan dengan gedung tinggi, berubahnya cara pengambilan data hujan dilapangan, pemindahan alat penakar hujan, dan sebagainya, sehingga mengakibatkan berubahnya *trend* dari kondisi semula.

Selanjutnya, data hujan yang telah konsisten digunakan untuk mengetahui sebaran hujan yang terjadi pada tiap wilayah dan mencari hujan rerata di DAS Sampean Baru. Untuk mendapatkan hujan rerata wilayah, penelitian ini menggunakan metode Rata-rata Aljabar.

### **3.3.3.2 Downscaling Data Sirkulasi Atmosfer**

#### **a) Downscaling Data NCEP/NCAR Re-Analysis**

Data sirkulasi atmosfer NCEP/NCAR *Re-Analysis* merupakan data berskala global dan beresolusi kasar. Data sirkulasi atmosfer ini menyediakan data historis variabel-variabel (prediktor) di atmosfer seperti: suhu, kandungan uap air, tekanan permukaan laut, kelembapan udara relatif, kelembapan udara spesifik, kecepatan angin arah X dan Y. Agar data sirkulasi atmosfer dapat digunakan pada skala lokal, maka perlu adanya penentuan *domain* gridnya sekaligus pemilihan prediktor NCEP/NCAR *Re-Analysis* yang potensial. Penentuan *domain* grid yang akan digunakan didasarkan pada banyaknya prediktor yang terpilih dan rata-rata tertinggi korelasi prediktor tertinggi.

Kemudian dilakukan downscale statistik menggunakan pendekatan JST agar didapatkan hubungan antara data skala global dengan data skala lokal. Data yang diperlukan dalam *downscaling* adalah data prediktor (data variabel atmosfer terseleksi) dan data prediktan (data hujan harian rerata wilayah) Pendekatan JST

dilakukan pada *software* MATLAB. Pemrosesan data dapat dilihat pada Gambar

3.3. Adapun langkah-langkahnya sebagai berikut:

- 1) Menjalankan *software* MATLAB
- 2) Mengeklik kode “nnstart” pada halaman perintah (*Command Window*)
- 3) Memilih *Fitting App* pada halaman awal *Neural Network*.
- 4) Menentukan dan memasukkan data prediktor sebagai data *input* dan data prediktan sebagai data target pada halaman *Select Data*.
- 5) Menentukan komposisi evaluasi model, yaitu: 1) Tahap *Training* = 90%, 2) Tahap *Validasi* = 5%, 3) Tahap *Testing* = 5% pada halaman *Validation and Test Data*.
- 6) Menentukan jumlah *hidden neuron* pada halaman *Network Architecture*.
- 7) Menentukan fungsi aktivasi Levenberg-Marquardt untuk *Training Backpropagation* pada halaman *Train Network*.
- 8) Melakukan *running* model dengan menekan tombol “train” pada halaman *Train Network*. Hal ini dilakukan berulang kali hingga mendapatkan hasil koefisien determinasi yang memuaskan pada berbagai tahap.
- 9) Menyimpan hasil model pada halaman *Save Result*. Hasil model berupa data hujan harian ter-*downscale* dapat di buka pada *Command Window*.

b) *Downscaling* Data CSIRO Mk 3.6.0

Data sirkulasi atmosfer CSIRO Mk 3.6.0 merupakan data berskala global dan beresolusi kasar. Data sirkulasi atmosfer ini menyediakan data prediksi kondisi variabel-variabel (prediktor) atmosfer di masa depan akibat dari meningkatnya emisi gas rumah kaca. Sama seperti data NCEP/NCAR *Re-Analysis*, data CSIRO Mk 3.6.0 juga memerlukan perbaikan resolusi dan pengecilan skala dari skala global menjadi skala lokal. *Domain* grid dan jenis prediktor yang digunakan pada data CSIRO Mk 3.6.0 mengacu pada *domain* grid dan jenis prediktor data NCEP/NCAR *Re-Analysis* yang telah ditentukan sebelumnya. Kemudian data diolah menggunakan pendekatan JST pada *software* MATLAB dengan langkah-langkah seperti yang telah dijelaskan sebelumnya.

### 3.3.3.3 Pemodelan Hujan Aliran

Pada penelitian ini, pemodelan hujan aliran menggunakan *software* ArcSWAT dapat dilihat pada Gambar 3.4. Kegiatan pada tahap ini dibagi menjadi 2 bagian utama:

a) Tahap Pembuatan *Database*

Pada tahap ini, pembentukan *database* yang benar dan sesuai kondisi lapangan merupakan kunci keberhasilan *running* pemodelan sehingga hasil pemodelan menjadi representatif. *Database* ArcSWAT dibagi menjadi dua jenis yaitu *TXT file* dan *Raster file*. Data yang diperlukan pada pembuatan *database* adalah data peta jenis tata guna lahan, peta jenis tanah, data koordinat stasiun hujan, dan data hujan harian. Pengelompokan *database* dapat dilihat pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 *Database* ArcSWAT

No	Jenis Data	Jenis Database	
		Spasial	Non Spasial
1	Peta Tata Guna Lahan	✓	-
2	Peta Jenis Tanah	✓	-
3	Peta DEM	✓	-
4	Koordinat Stasiun Curah Hujan	-	✓
5	Curah Hujan Harian	-	✓

*Database TXT file* peta tata guna lahan dan jenis tanah berisikan berbagai macam klasifikasi fungsi lahan dan jenis tanah yang sesuai dengan kondisi lapangan. *Database Raster file* berisikan sebaran spasial klasifikasi fungsi lahan dan jenis tanah.

b) Tahap Pemodelan

Langkah-langkah pemodelan di ArcSWAT adalah sebagai berikut:

- 1) Menjalankan *software* ArcSWAT
- 2) Membuat file baru (*New SWAT Project*)
- 3) Pengolahan DAS pada halaman *Deliniation Watershed*:
  - Membuka data DEM DAS Sampean Baru yang sudah terproyeksi.
  - Mendefinisikan arah aliran dan akumulasi air pada DAS dengan menekan tombol *Flow direction and accumulation*.

- Mendefinisikan jaringan sungai pada DAS dengan menekan tombol *Create streams and outlets*.
  - Menentukan titik *Outlet* dan *Inlet* pada Sub DAS melalui fasilitas *Edit manually point*. Titik outlet ini adalah titik koordinat bendung yang didapatkan dari instansi terkait.
  - Menentukan titik Outlet DAS dan membuat batas DAS dengan menekan tombol *Whole watershed outlet(s)*.
  - Mendefinisikan batas Sub DAS dengan menekan tombol *Calculate subbasin parameters*.
- 4) Pengolahan *Hydrologic Response Unit* (HRU) pada menu *HRU Analysis*:
- Meng-*overlay database raster* SWAT yaitu tata guna lahan, jenis tanah, dan kemiringan lereng pada *sub* menu *LandUse/Soils/Slope Definition*. Klasifikasi fungsi lahan, jenis tanah, dan kemiringan lereng akan dimasukkan pada *sub* menu ini melalui *database TXT file*.
  - Membuat HRU dengan menekan tombol *Create HRUs* pada sub menu *HRU Definition*.
- 5) Pengolahan data curah hujan pada menu *Write Input Table*:
- Memasukkan koordinat stasiun penakar dan data curah hujan harian pada sub menu *Weather Station*. Data curah hujan yang digunakan pada pemodelan ini adalah data hujan observasi, data hujan historis NCEP/NCAR *Re-Analysis* dan data hujan prediksi CSIRO Mk 3.6.0.
  - Mendefinisikan data hujan pada model dengan menekan tombol *Create Tables* pada sub menu *Write SWAT Input Tables*.
- 6) Melakukan pengaturan model SWAT *simulation* pada sub menu *Run SWAT*, sebagai berikut:
- *Period of Simulation* : Kalibrasi = 01/01/1988 s/d 31/12/2007  
Validasi = 01/01/2008 s/d 31/12/2018
  - *Printout Settings* : *Monthly*
  - *SWAT.exe Version* : 64 bit, debug

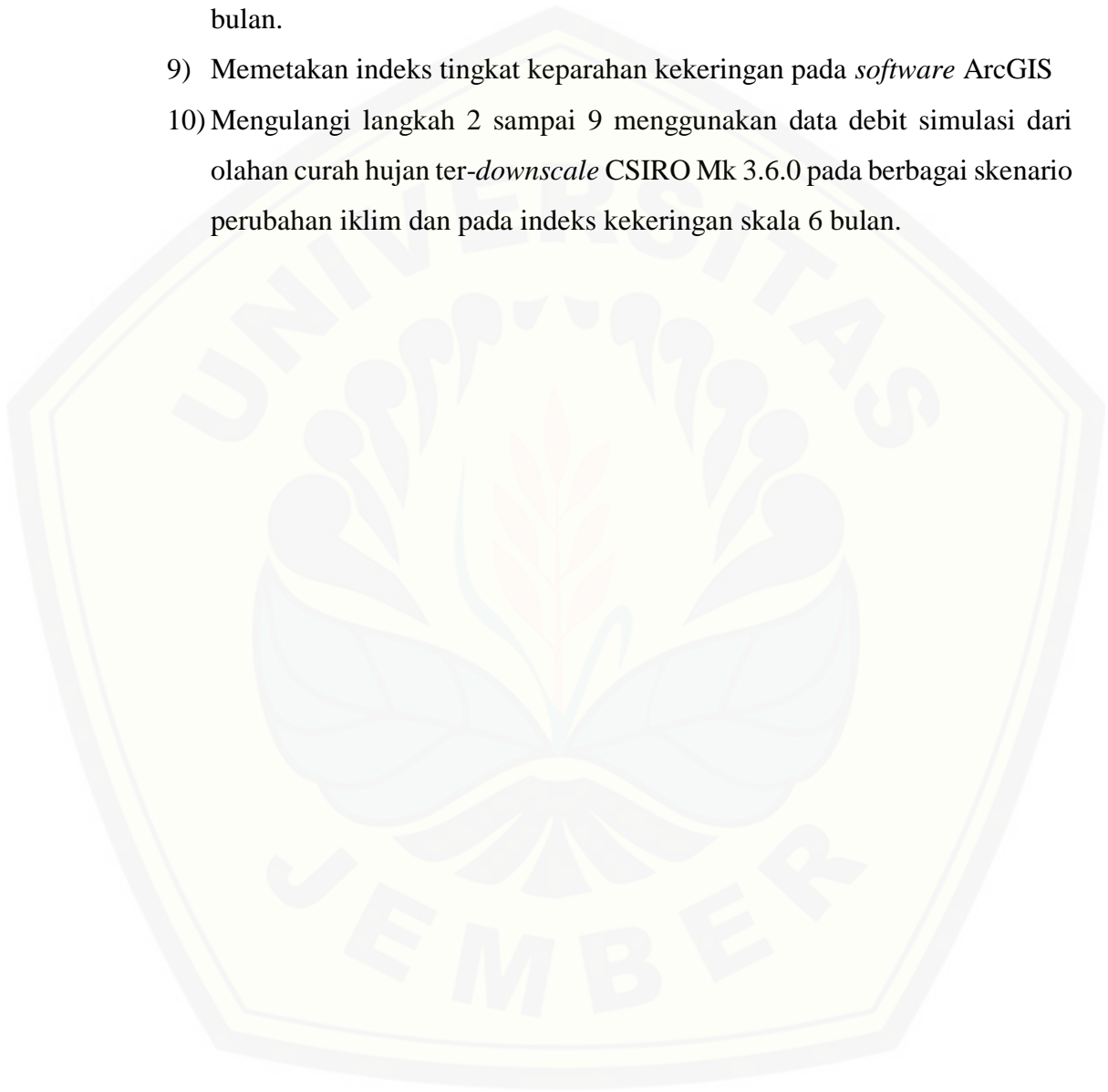
- 7) Menjalankan pemodelan dengan menekan tombol *Run* SWAT.
- 8) Menampilkan hasil *running* pemodelan (debit simulasi) melalui *sub* menu *Read SWAT Output*.
- 9) Melakukan kalibrasi menggunakan *sub* menu *Manual Calibration Helper*. Kalibrasi dilakukan berulang kali hingga uji keandalan model antara data debit simulasi dan debit observasi menunjukkan hasil yang memuaskan.
- 10) Mengulangi Langkah 1 sampai 9 dengan memasukan secara berurutan data hujan, yaitu data hujan historis NCEP/NCAR *Re-Analysis* dan data hujan prediksi CSIRO Mk 3.6.0.

#### 3.3.3.4 Asesmen dan Pemetaan Kekeringan SRI

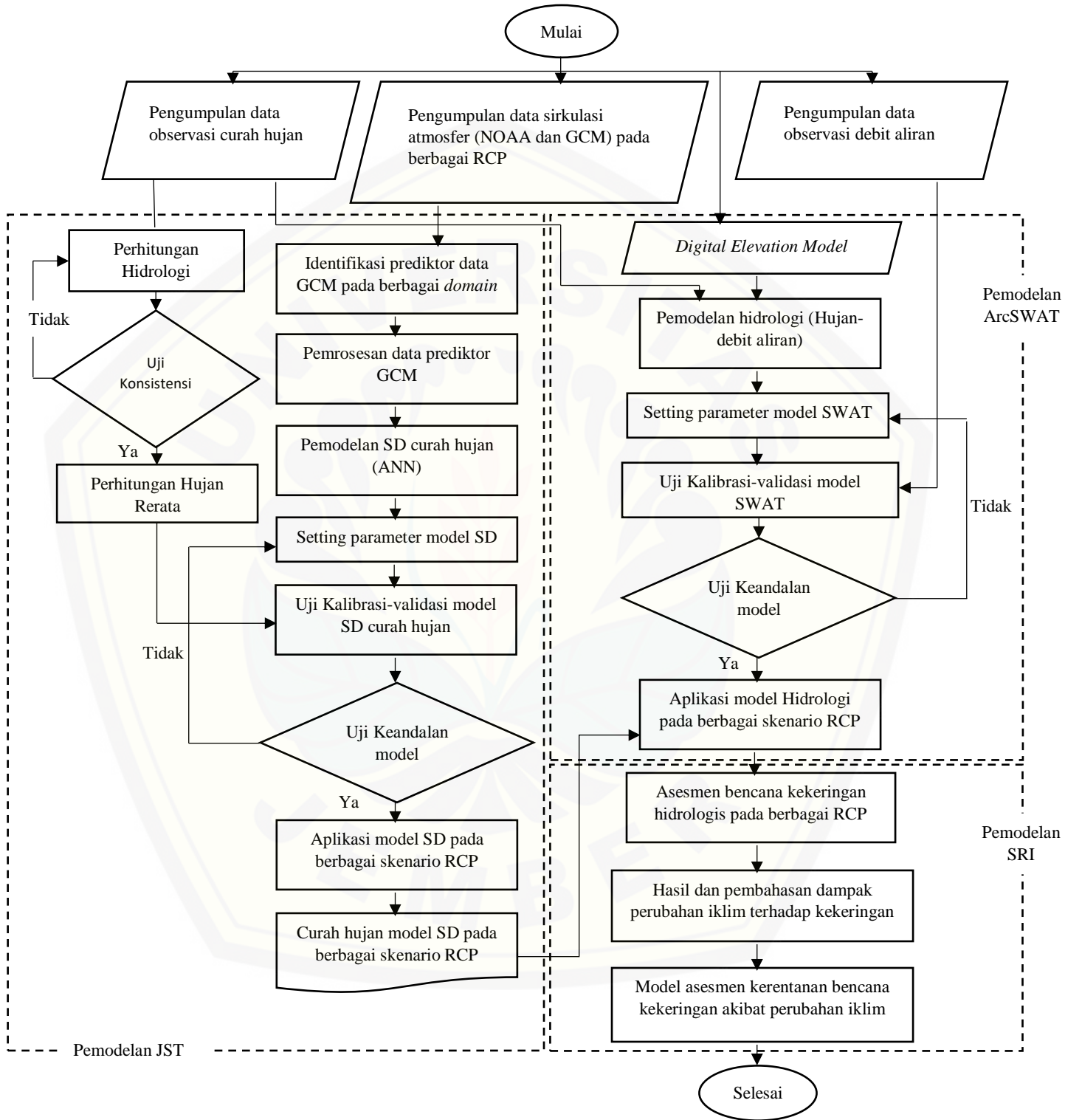
Data debit simulasi bulanan hasil dari olahan curah hujan ter-*downscale* NCEP/NCAR *Re-Analysis* dan CSIRO Mk 3.6.0, kemudian diimplementasikan untuk mengukur kekeringan historis dan prediksi secara spasial dan temporal. Pada tahapan ini, *software* SPIgenerator digunakan untuk mengasesmen kekeringan SRI dan *software* ArcGIS digunakan untuk memetakan secara spasial hasil asesmen kekeringan SRI. Pemrosesan data dapat dilihat pada Gambar 3.5. Adapun langkah-langkahnya sebagai berikut:

- 1) Menjalankan *software* SPIgenerator
- 2) Memasukkan data debit simulasi pada *sub* menu *Input Option*, contoh: data debit simulasi dari olahan curah hujan ter-*downscale* NCEP/NCAR *Re-Analysis*.
- 3) Menentukan skala waktu kekeringan pada *sub* menu *Output Option*, contoh kekeringan skala 1 bulan, 3 bulan, 6 bulan, 9 bulan, dan 12 bulan.
- 4) Menentukan jenis data *output* pada *sub* menu *Output As*.
- 5) Menentukan tempat penyimpanan data *output* pada *sub* menu *Output Option*.
- 6) Melakukan *running* pemodelan kekeringan dengan menekan tombol *generate*.

- 7) Membandingkan data model indeks tingkat keparahan kekeringan pada berbagai skala bulan terhadap data kekeringan observasi.
- 8) Menentukan skala model indeks tingkat kekeringan yang sesuai atau mirip terhadap data kekeringan observasi, contoh: indeks kekeringan skala 6 bulan.
- 9) Memetakan indeks tingkat keparahan kekeringan pada *software* ArcGIS
- 10) Mengulangi langkah 2 sampai 9 menggunakan data debit simulasi dari olahan curah hujan ter-*downscale* CSIRO Mk 3.6.0 pada berbagai skenario perubahan iklim dan pada indeks kekeringan skala 6 bulan.



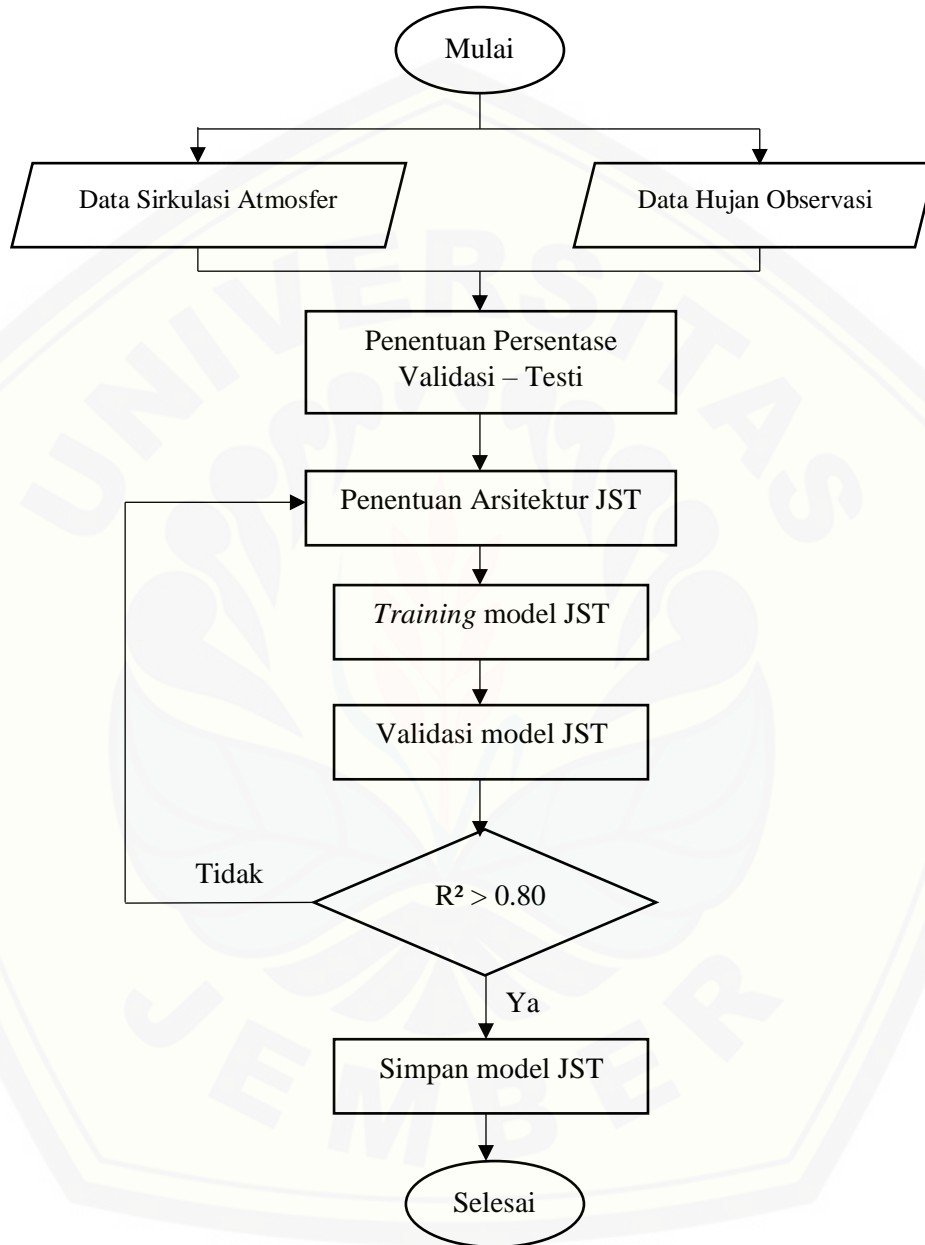
3.4. Diagram Alir (Flowchart)



Gambar 3.2 Diagram Alir Penelitian

### 3.4.1 Diagram Alir Pemodelan JST

Diagram alir pemodelan JST, selengkapnya dapat dilihat pada Gambar 3.3

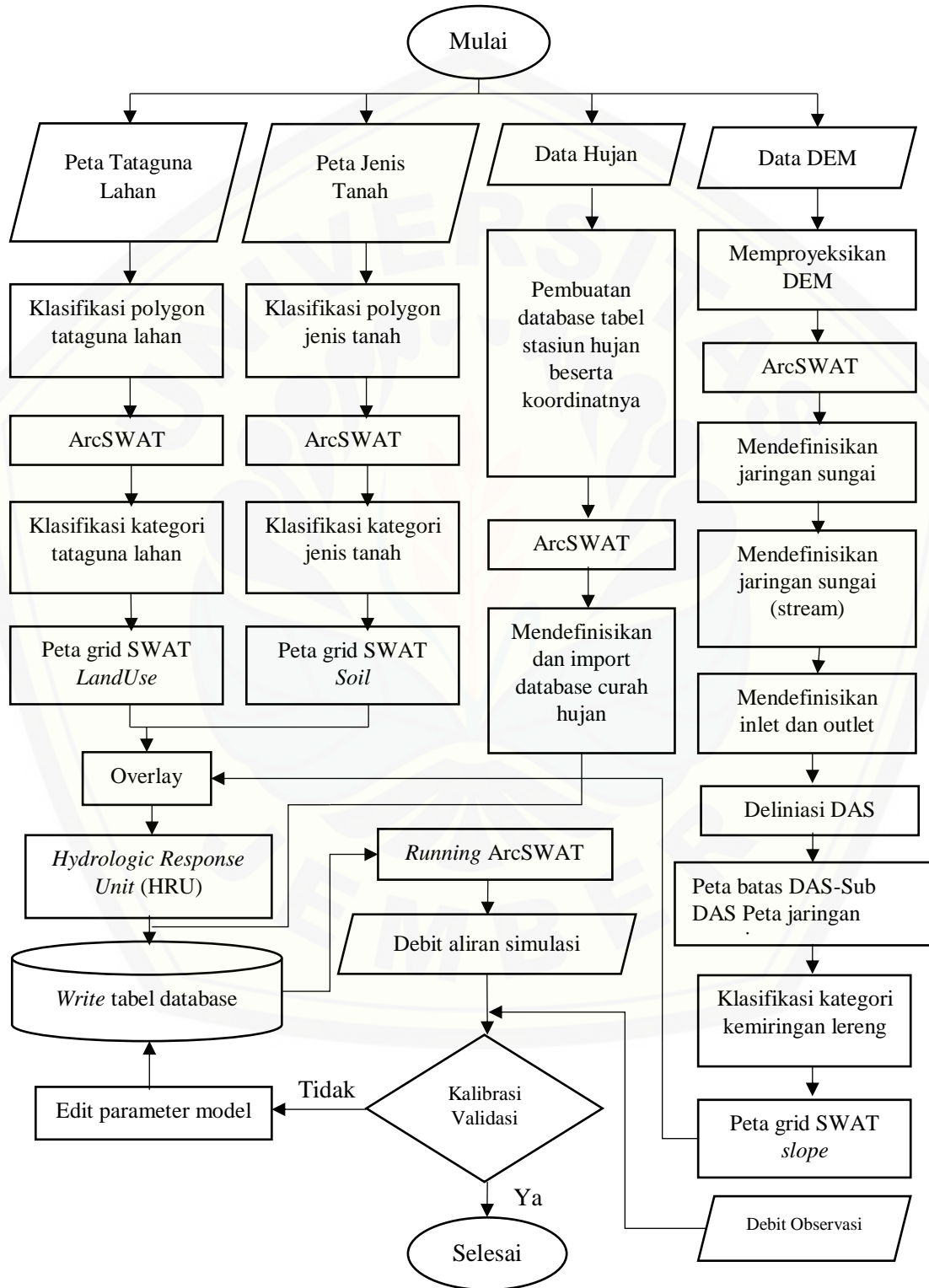


Gambar 3.3 Diagram alir JST



### 3.4.2 Diagram Alir Pemodelan SWAT

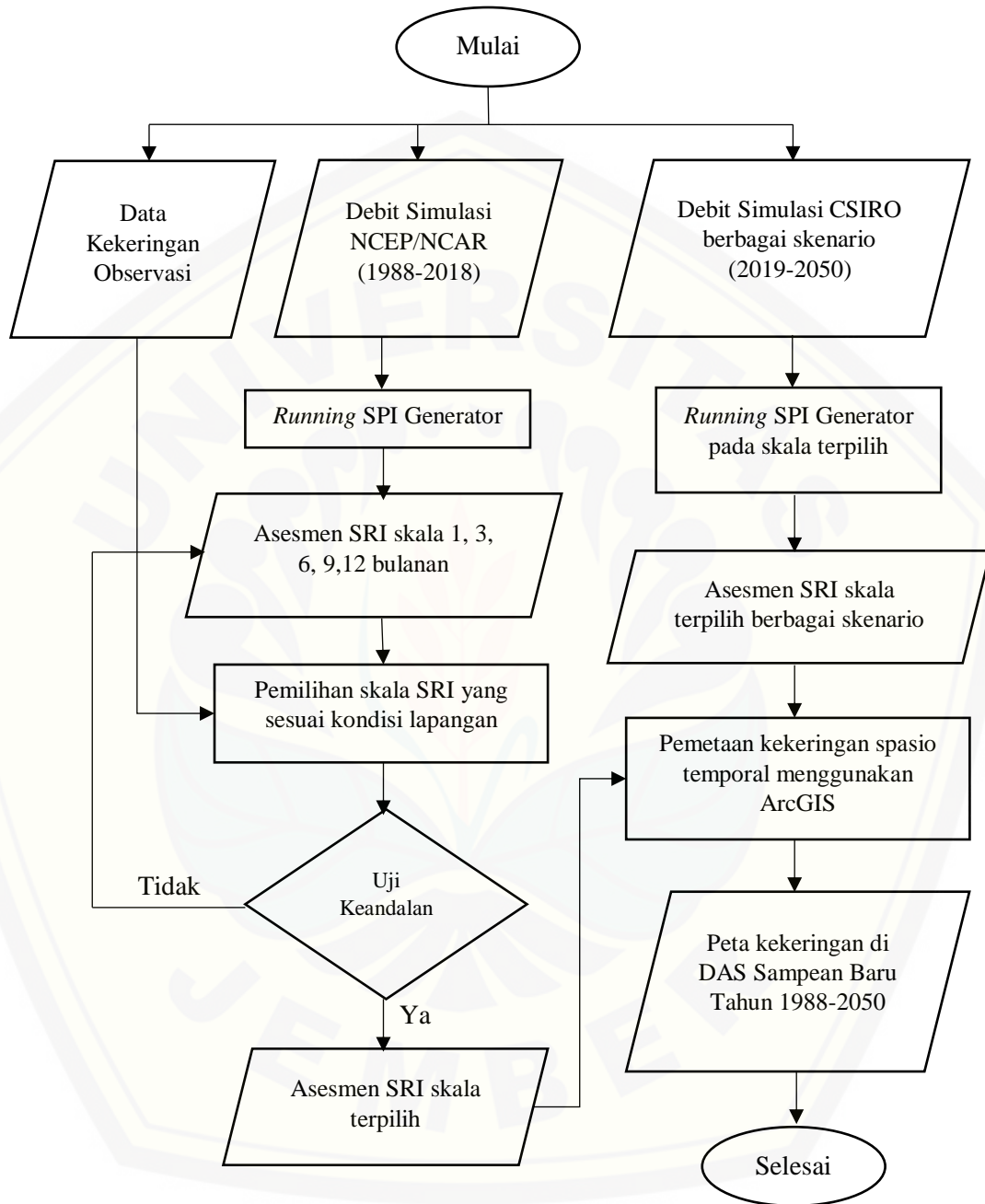
Diagram alir pemodelan ArcSWAT, selengkapnya dapat diamati pada Gambar 3.4



Gambar 3.4 Diagram alir pemodelan ArcSWAT

### 3.4.3 Diagram Alir Pemodelan SRI

Diagram alir pemodelan SRI, selengkapnya dapat diamati pada Gambar 3.5



Gambar 3.5 Diagram alir SRI

## BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Analisis Hidrologi

#### 4.1.1 Pengolahan Data Hujan Hilang

Analisis hujan pada studi ini digunakan untuk mengetahui nilai hujan rata-rata di DAS Sampean Baru. Dengan mengetahui nilai hujan rata-rata di DAS Sampean Baru, maka proses *downscaling* terhadap data sirkulasi atmosfer dapat dilakukan. Adapun stasiun pengamatan hujan yang digunakan untuk mengambil data hujan dari tiap Sub DAS Sampean Baru meliputi 28 stasiun hujan pada Tabel 4.1, sebagai berikut.

Tabel 4.1 Stasiun pengamat curah hujan dan koordinat geografisnya

No.	Stasiun Hujan	Latitude	Longitude	Elevation
1	Ancar	7.118	113.100	388.000
2	Blimbing	7.017	113.051	551.000
3	Cerme	7.102	114.052	99.000
4	Jeru	7.018	113.086	208.000
5	Kejayan	7.118	113.036	340.000
6	Kesemek	7.118	113.033	347.000
7	Klabang	7.034	113.151	296.000
8	Kolpoh	7.119	114.002	100.000
9	Maesan	8.018	113.102	382.000
10	Maskuning Wetan	7.150	113.067	460.000
11	Pakistan	7.150	113.086	478.000
12	Pandan	7.119	114.034	129.000
13	Pinang Pait	7.119	113.102	480.000
14	Prajejan	7.136	113.135	96.000
15	Rambanwetan	7.136	114.019	137.000
16	Selolembu	7.053	113.119	313.000
17	Sentral (PU Pengairan)	7.086	113.151	272.000
18	Sukokerto	7.150	113.051	443.000
19	Sumber Dumpyong	7.034	113.068	636.000
20	Sumber Gading	7.135	113.151	671.000
21	Taal	7.018	113.117	221.000
22	Talep	7.117	113.136	96.000
23	Tamanan	8.000	113.150	362.000
24	Tlogo	7.152	113.100	550.000

No.	Stasiun Hujan	Latitude	Longitude	Elevation
25	Wonobojo	7.119	113.035	317.000
26	Wonosari 1	7.136	113.101	447.000
27	Wonosari 2	7.036	113.052	240.000
28	Wringin	7.000	113.084	455.000

Untuk lebih jelasnya peta sebaran stasiun curah hujan di DAS Sampean Baru dapat dilihat pada **Lampiran 67**. Rentang waktu data hujan adalah 31 tahun (1988-2018). Data hujan hilang perlu diisi atau dilengkapi dengan bantuan data hujan dari stasiun-stasiun pengamat hujan yang lain dengan menggunakan metode rasio normal menggunakan persamaan 2.15. Hasil perhitungan metode rasio normal hujan DAS Sampean Baru dapat dilihat pada **Lampiran 1**.

#### 4.1.2 Uji Konsistensi Data Hujan

Setelah data hujan yang hilang di lengkapi, maka data hujan pada tiap-tiap stasiun pengamat curah hujan harus diuji kekonsistensiannya. Uji konsistensi dilakukan dengan menggunakan teknik lengkung massa ganda, yaitu membandingkan data kumulatif tahunan dari stasiun hujan yang diamati dengan data kumulatif tahunan stasiun disekitarnya.

Dari perhitungan dan analisis terhadap 28 stasiun hujan yang diamati, ternyata diketahui tidak adanya perubahan trendline pada tahun 1988 hingga 2018, jadi tidak ada koreksi pada data hujan tiap tahunnya. Perhitungan uji konsistensi dan grafik lengkung massa ganda dapat dilihat pada **Lampiran 2 s/d 29** dan **Lampiran 30 s/d 57**. Hasil rekapitulasi uji konsistensi dapat dilihat pada Tabel 4.2

Tabel 4.2 Uji konsistensi data hujan tiap stasiun pengamat hujan

No.	Stasiun Hujan	Persamaan	R <sup>2</sup>	Keterangan
1	Ancar	$y = 0.8246x + 1029.4$	0.9954	Konsisten
2	Blimbing	$y = 1.6416x - 6054.1$	0.9792	Konsisten
3	Cerme	$y = 0.7449x - 2363.1$	0.99	Konsisten
4	Jeru	$y = 0.9477x + 2878.5$	0.996	Konsisten
5	Kejayan	$y = 1.0566x + 283.19$	0.9968	Konsisten
6	Kesemek	$y = 0.9323x + 1714$	0.9955	Konsisten
7	Klabang	$y = 1.1712x - 1134.7$	0.9942	Konsisten
8	Kolpoh	$y = 0.9082x - 2582.6$	0.9936	Konsisten

No.	Stasiun Hujan	Persamaan	R <sup>2</sup>	Keterangan
9	Maesan	$y = 1.2747x - 542.93$	0.9992	Konsisten
10	Maskuning Wetan	$y = 0.9057x + 553.77$	0.998	Konsisten
11	Pakisan	$y = 1.0481x + 1427.9$	0.9954	Konsisten
12	Pandan	$y = 0.7882x - 3023.6$	0.9851	Konsisten
13	Pinang Pait	$y = 1.1319x + 108.33$	0.9994	Konsisten
14	Prajekan	$y = 0.8698x - 1224.6$	0.9937	Konsisten
15	Rambanwetan	$y = 0.7534x - 1801.5$	0.9905	Konsisten
16	Selolembu	$y = 1.2288x - 878.4$	0.9989	Konsisten
17	Sentral (PU Pengairan)	$y = 0.9254x + 1537$	0.9965	Konsisten
18	Sukokerto	$y = 1.1158x + 168.41$	0.9984	Konsisten
19	Sumber Dumpyong	$y = 1.0127x + 4200.1$	0.9795	Konsisten
20	Sumber Gading	$y = 1.2418x + 465.28$	0.9986	Konsisten
21	Taal	$y = 0.8983x + 4452.8$	0.9858	Konsisten
22	Talep	$y = 0.8854x - 2433.2$	0.9936	Konsisten
23	Tamanan	$y = 1.0979x + 387.03$	0.9996	Konsisten
24	Tlogo	$y = 0.8627x + 2754.7$	0.9866	Konsisten
25	Wonobojo	$y = 0.5099x - 57.453$	0.9994	Konsisten
26	Wonosari 1	$y = 0.9592x - 444.17$	0.9984	Konsisten
27	Wonosari 2	$y = 1.1445x - 12.372$	0.9995	Konsisten
28	Wringin	$y = 1.1568x + 660.83$	0.9966	Konsisten

#### 4.1.3 Pengolahan Hujan Rerata Wilayah

Pengolahan hujan rerata wilayah menggunakan metode rata-rata aritmatik (aljabar) dapat dilakukan setelah data hujan dianggap konsisten pada tiap-tiap stasiun pengamat hujan. Hasil perhitungan hujan rerata wilayah dapat digunakan sebagai data masukan untuk proses *downscaling* terhadap data sirkulasi atmosfer. Perhitungan hujan rerata wilayah metode aljabar menggunakan persamaan 2.16. Hasil perhitungan hujan rerata wilayah dapat dilihat pada **Lampiran 58**.

## 4.2 Downscaling Data Sirkulasi Atmosfer dengan JST

### 4.2.1 Penentuan Domain Grid Optimal dan Prediktor Potensial

Data sirkulasi atmosfer merupakan data yang berisikan nilai parameter-parameter penyusun atmosfer yang berorientasi secara spasial dan temporal serta memiliki skala besar (global) dan beresolusi kasar. Data sirkulasi atmosfer tidak

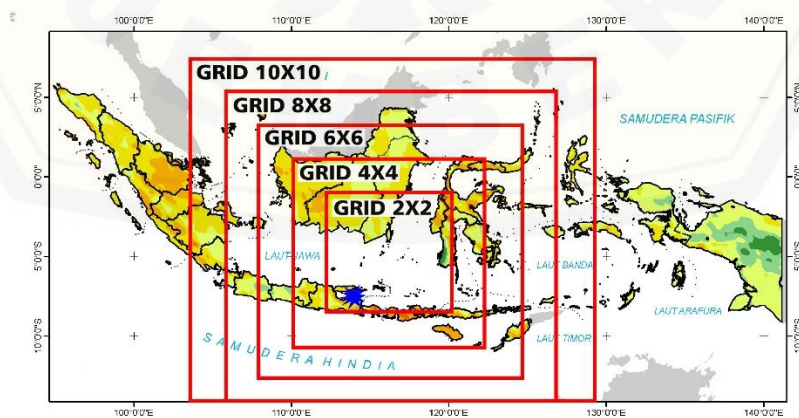
dapat langsung digunakan pada skala lokal sehingga perlu untuk dikembangkan dengan model *statistical downscaling*. Agar data sirkulasi atmosfer dapat diolah dalam model *downscaling*, maka skala lokal perlu diolah dan direpresentasikan dalam bentuk grid *domain*.

Dalam penentuan *domain grid* optimal tidak terdapat ketentuan-ketentuan khusus. Dalam model *downscaling* debit aliran yang dilakukan oleh Ghosh dan Mujumdar dan Sachindra, grid yang digunakan adalah 5 x 5 dan 7 x 6. Penelitian ini menggunakan koefisien korelasi tertinggi dalam menentukan *domain grid* optimal NCEP/NCAR. Hasil korelasi pada berbagai *domain grid* data sirkulasi atmosfer NCEP/NCAR dapat dilihat pada Tabel 4.3. Lokasi penelitian terdapat di tengah-tengah *domain grid* dapat dilihat pada Gambar 4.1.

Tabel 4.3 Hasil Koefisien Korelasi pada Tiap *Domain Grid* NCEP/NCAR

No.	Ukuran Grid	Korelasi Rerata
1	2 x 2	5.99
2	4 x 4	6.09
3	6 x 6	5.07
4	8 x 8	4.98
5	10 x 10	4.29

Hasil perhitungan korelasi tertinggi menunjukkan bahwa *domain grid* optimal NCEP/NCAR yang dapat digunakan dalam proses selanjutnya adalah *domain grid* 4 x 4 dengan nilai korelasi 6,09. Prediktor potensial yang terpilih untuk digunakan dalam proses selanjutnya dapat dilihat pada Tabel 4.4.



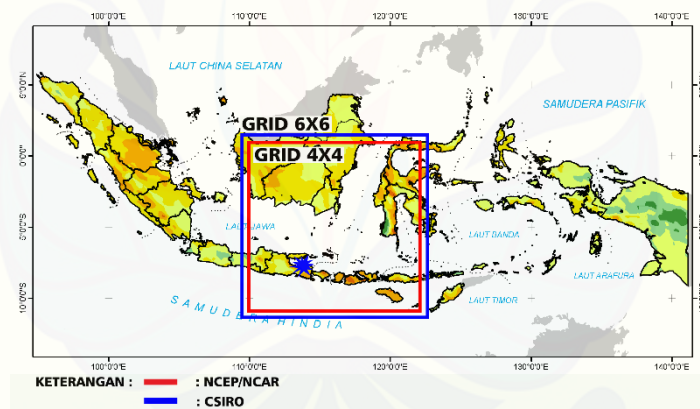
Sumber: Adaptasi BMKG, 2020

Gambar 4.1 Lokasi Penelitian dan *Domain Grid* NCEP/NCAR

Tabel 4.4 Prediktor potensial yang digunakan

No	Prediktor yang digunakan	Permukaan	Ketinggian	
			500 hPa	850 hPa
1	<i>Relative Humidity</i>	-	rhum500	rhum850
2	<i>Specific Humidity</i>	-	shum500	shum850
3	<i>Precipitation Water</i>	prec_wtr	-	-
4	<i>Zonal Velocity Component</i>	uwd	uwd500	uwd850
5	<i>Meridional Velocity Component</i>	vwd	-	uwd850

Dengan diperolehnya *domain* grid optimal NCEP/NCAR dan prediktor potensial yang digunakan, maka *domain* grid CSIRO Mk 3.6.0 dapat ditentukan dan prediktor yang digunakan adalah sama seperti prediktor NCEP/NCAR. Penentuan *domain* grid CSIRO Mk 3.6.0 dilakukan dengan menyesuaikan posisi koordinat terhadap *domain* grid 4 x 4 milik NCEP/NCAR. Hasil penyesuaian menunjukkan bahwa *domain* grid CSIRO Mk 3.6.0 yang digunakan adalah *domain* grid 6 x 6. *Domain* grid CSIRO Mk 3.6.0 dapat dilihat pada Gambar 4.2



Sumber: Adaptasi BMKG, 2020

Gambar 4.2 *Domain* Grid CSIRO Mk 3.6.0

Data variabel prediktan berupa data pengamatan curah hujan bulanan yang tersebar di DAS Sampean Baru Kabupaten Bondowoso-Situbondo, Jawa Timur. Data Prediktan yang digunakan dalam penyusunan model *Statistical downscaling* didasarkan pada data curah hujan yang lengkap tanpa data kosong.

#### 4.2.2 *Downscaling* Data Sirkulasi Atmosfer NCEP/NCAR

Pemodelan *statistical downscaling* (SD) dilakukan di DAS Sampean Baru.

Data hujan rerata wilayah DAS Sampean Baru digunakan sebagai data target (Prediktan), sedangkan data sirkulasi atmosfer NCEP/NCAR *Re-Analysis* digunakan sebagai data masukan (prediktor). Model SD hujan menggunakan JST dilakukan dengan arsitektur jaringan *multilayer perceptron* dan metode pembelajaran *backpropagation*. *Training* JST dilakukan pada hujan bulanan periode tahun 1988-2009, sedangkan periode validasi model adalah 2010-2014 dan periode *testing* adalah 2015-2018. Pembagian periode *training* dan validasi ini merupakan teknik untuk mencapai solusi optimal terhadap *overfitting*. Sedangkan periode *testing* hanya untuk menguji kemampuan JST yang dihasilkan.

Fungsi aktivasi yang dipertimbangkan diantaranya: fungsi linier (purelin), fungsi non linier (log-sigmoid dan tan-sigmoid). Pemilihan fungsi aktivasi dari lapisan *input* ke lapisan tersembunyi (*hidden layer*) dan ke lapisan *output* serta jumlah optimal unit di lapisan tersembunyi didasarkan pada nilai MSE (Mean Square Error) terendah. Hasil running JST menunjukkan bahwa arsitektur JST optimal dicapai dengan dua puluh unit neuron lapisan tersembunyi dengan fungsi aktivasi tansig dilapisan tersembunyi dan purelin di lapisan *output*. Perbaikan (*update*) bobot menggunakan metode Levenberg-Marquadt. Uji keandalan hasil *downscaling* pada tahap *Training*, validasi, dan *Testing* ditunjukkan pada Tabel 4.5

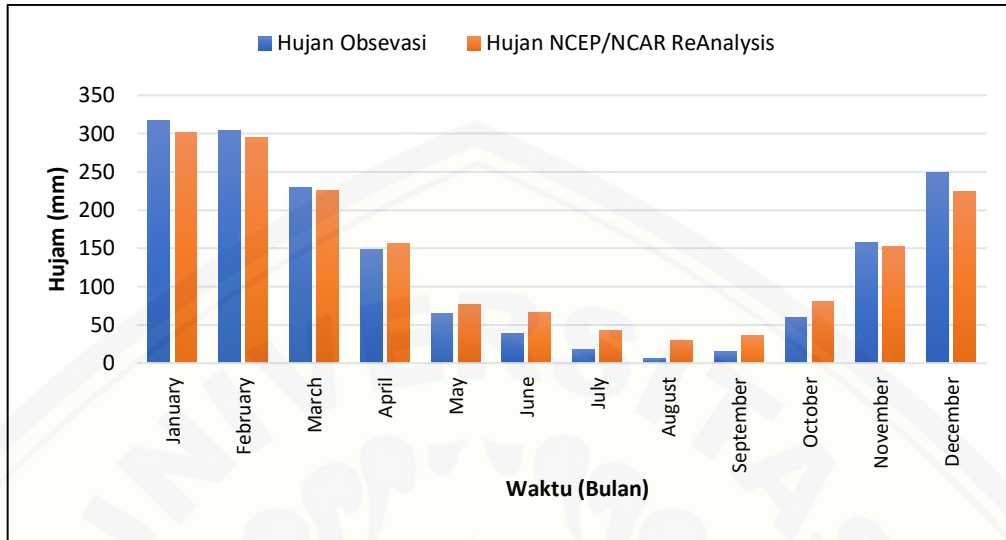
Tabel 4.5 Uji keandalan hasil *downscaling* NCEP/NCAR *Re-Analysis*

Tahap	NCEP/NCAR <i>Re-Analysis 2</i>	
	R	RMSE
<i>Training</i>	0,89242	61,27
Validasi	0,91428	53,04
<i>Testing</i>	0,94389	55,01

Uji keandalan hasil *downscaling* JST terhadap data sirkulasi atmosfer NCEP/NCAR *Re-Analysis* menunjukkan korelasi yang sangat baik terhadap data hujan observasi rerata. Hal ini dapat dilihat dari hasil model pada tahap *training*, validasi, dan *testing*. Koefisien korelasi pada tahap *training* adalah 0,89242. Koefisien korelasi pada tahap validasi adalah 0,91428. Koefisien korelasi pada tahap *testing* adalah 0,94389. Plot hujan bulanan observasi dan hasil *downscaling* NCEP/NCAR *Re-Analysis* dapat dilihat pada Gambar 4.3. Hasil dan running model



downcaling hujan dapat dilihat pada **Lampiran 59** dan **Lampiran 63**.



Gambar 4.3 Plot hujan bulanan observasi dan hasil *downscaling* NCEP/NCAR

#### 4.2.3 *Downscaling* Data Sirkulasi Atmosfer CSIRO Mk 3.6.0

Model SD curah hujan akibat perubahan iklim menggunakan data sirkulasi atmosfer luaran CSIRO Mk 3.6.0. Data GCM ini memiliki tiga skenario perubahan iklim yang didasarkan pada terjadinya peningkatan emisi gas rumah kaca atau gas CO<sub>2</sub> di atmosfer sebesar 1% per tahun yaitu RCP 4.5, RCP 6.0, dan RCP 8.5. Tiga skenario data GCM ini digunakan sebagai data masukan (prediktor), sedangkan data hujan rerata wilayah DAS Sampean Baru digunakan sebagai data target (Prediktan). Model SD hujan menggunakan JST dilakukan dengan arsitektur jaringan *multilayer perceptron* dan metode pembelajaran *backpropagation*. *training* JST dilakukan pada hujan bulanan periode tahun 2006-2016, sedangkan periode validasi adalah 2017 dan periode *testing* adalah 2018. Proses *downscaling* terhadap data GCM pada tahun 2006-2018 merupakan dasar atau acuan untuk melakukan prediksi hujan hingga tahun 2050.

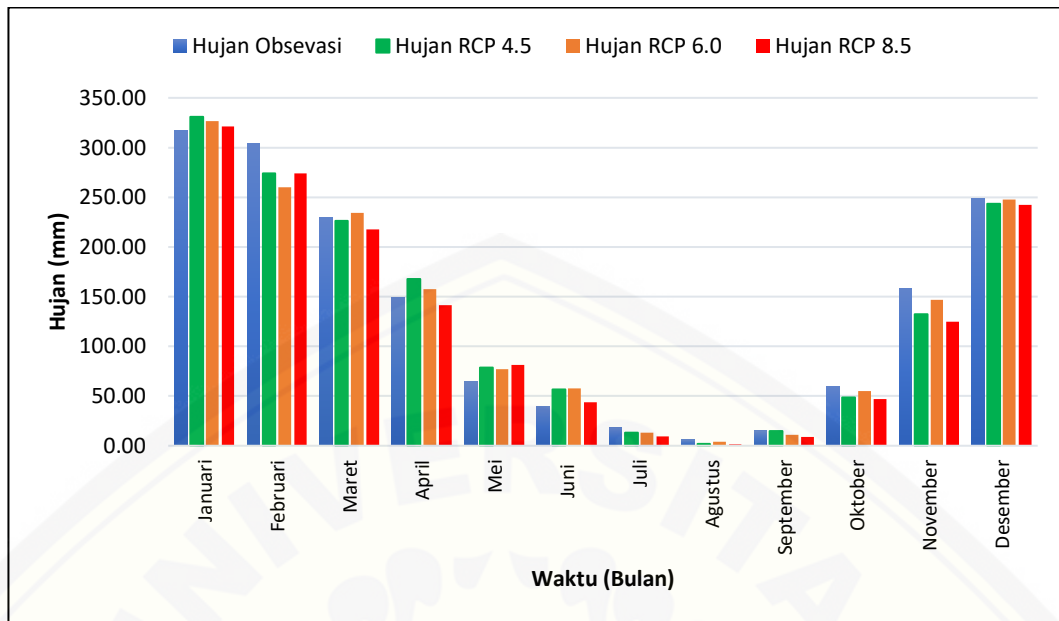
Fungsi aktivasi yang dipertimbangkan diantaranya: fungsi linier (purelin), fungsi non-linier (log-sigmoid dan tan-sigmoid). Pemilihan fungsi aktivasi dari lapisan *input* ke lapisan tersembunyi (*hidden layer*) dan ke lapisan *output* serta

jumlah optimal unit di lapisan tersembunyi didasarkan pada nilai MSE (Mean Square Error) terendah. Hasil running JST menunjukkan bahwa arsitektur JST optimal dicapai dengan tiga puluh unit neuron lapisan tersembunyi dengan fungsi aktivasi tansig dilapisan tersembunyi dan purelin di lapisan *output*. Perbaikan (*update*) bobot menggunakan metode Levenberg-Marquadt. Uji keandalan hasil *downscaling* curah hujan bulanan (secara temporal) dari tahun 2006 sampai 2018 dapat dilihat pada Tabel 4.6.

Tabel 4.6 Uji keandalan hasil *downscaling* CSIRO Mk 3.6.0

Tahap	CSIRO Mk 3.6.0					
	RCP 4.5		RCP 6.0		RCP 8.5	
	R	RMSE	R	RMSE	R	RMSE
<i>Training</i>	0,88	61,71	0,87	61,40	0,89	60,91
Validasi	0,93	70,60	0,96	52,89	0,96	38,51
<i>Testing</i>	0,98	28,63	0,81	67,21	0,88	57,83

Uji keandalan hasil *downscaling* JST terhadap data sirkulasi atmosfer CSIRO Mk 3.6.0 menunjukkan korelasi yang sangat baik terhadap data hujan observasi rerata. Hal ini dapat dilihat dari hasil model pada tahap *training*, validasi, dan *testing* pada masing-masing skenario perubahan iklim. Pada skenario RCP 4.5, koefisien korelasi pada tahap *training* adalah 0,88089. Koefisien korelasi pada tahap validasi adalah 0,93575. Koefisien korelasi pada tahap *testing* adalah 0,98563. Prediksi hujan model RCP 4.5 terbesar adalah 1017 mm. Pada skenario RCP 6.0, koefisien korelasi pada tahap *training* adalah 0,87998. Koefisien korelasi pada tahap validasi adalah 0,96831. Koefisien korelasi pada tahap *testing* adalah 0,81978. Prediksi hujan model RCP 6.0 terbesar adalah 699 mm. Pada skenario RCP 8.5, koefisien korelasi pada tahap *training* adalah 0,89208. Koefisien korelasi pada tahap validasi adalah 0,96517. Prediksi hujan model RCP 8.5 terbesar adalah 563 mm. Koefisien korelasi pada tahap *testing* adalah 0,88945. Plot hujan bulanan observasi dan hasil *downscaling* CSIRO Mk 3.6.0 pada tiap skenario dapat dilihat pada Gambar 4.8. Hasil dan running model *downscaling* hujan pada tiga skenario perubahan iklim dapat dilihat pada **Lampiran 60 s/d 62** dan **Lampiran 64 s/d 66**.



Gambar 4.4 Plot hujan bulanan observasi dan hasil *downscaling* CSIRO

### 4.3 Pemodelan Debit dengan SWAT

#### 4.3.1 Pemodelan Debit dengan Hujan Observasi

Dalam pemodelan hujan aliran menggunakan SWAT, pengelolaan database merupakan kunci pertama dan utama agar pemodelan dapat berjalan. Jenis-jenis database DAS Sampean Baru yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 3.2. Masing-masing jenis database DAS Sampean Baru memiliki pengklasifikasian sendiri yang dapat dilihat pada Tabel 4.7 s/d 4.9. Sedangkan peta sebaran klasifikasi tiap database dapat dilihat pada **Lampiran 63 s/d 66**. Data hujan yang digunakan adalah data hujan harian observasi rerata wilayah. Database yang telah terbentuk kemudian dibangkitkan dalam pemodelan di *software* SWAT sebagaimana telah dijelaskan pada subbab 3.3.3.3.

Tabel 4.7 Kemiringan Lereng

No	Kemiringan Lereng	Kelas
1	0-8%	Datar
2	8-15%	Landai
3	15-25%	Agak Curam
4	25-40%	Curam
5	> 40%	Sangat Curam

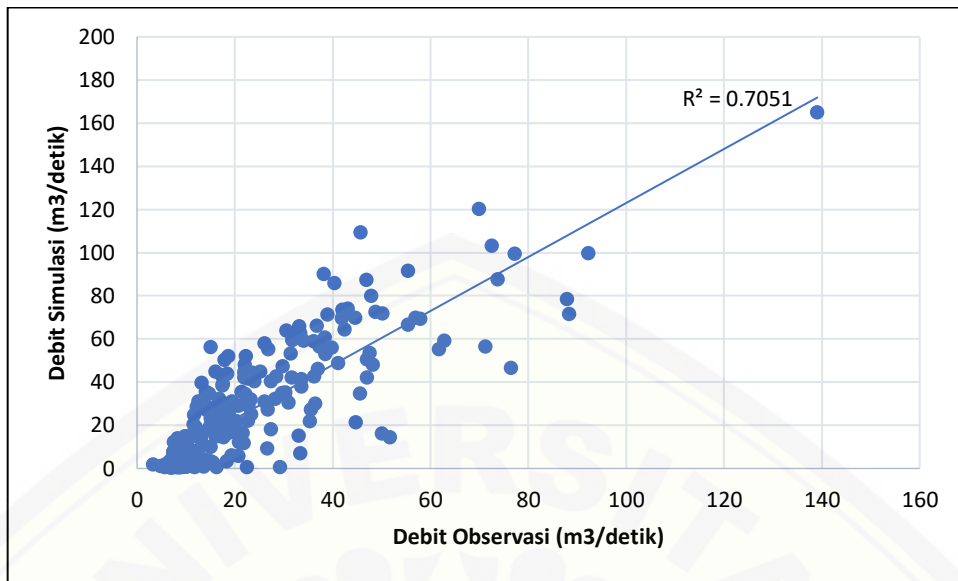
Tabel 4.8 Jenis Tata Guna Lahan

No	Tata Guna Lahan	Kode SWAT	Simbol
1	Perkebunan	Orchard	ORCD
2	Tanah Terbuka	Oak	OAK
3	Persawahan	Rice	RICE
4	Permukiman	Residential	URBN
5	Padang Rumput	Pasture	PAST
6	Hutan Lahan Kering Sekunder	Forest-Mixed	FRST
7	Pertanian Lahan Kering	Agriculture Land Generic	AGRL
8	Hutan Tanaman	Forest-Evergreen	FRSE
9	Tubuh Air	Water	WATR

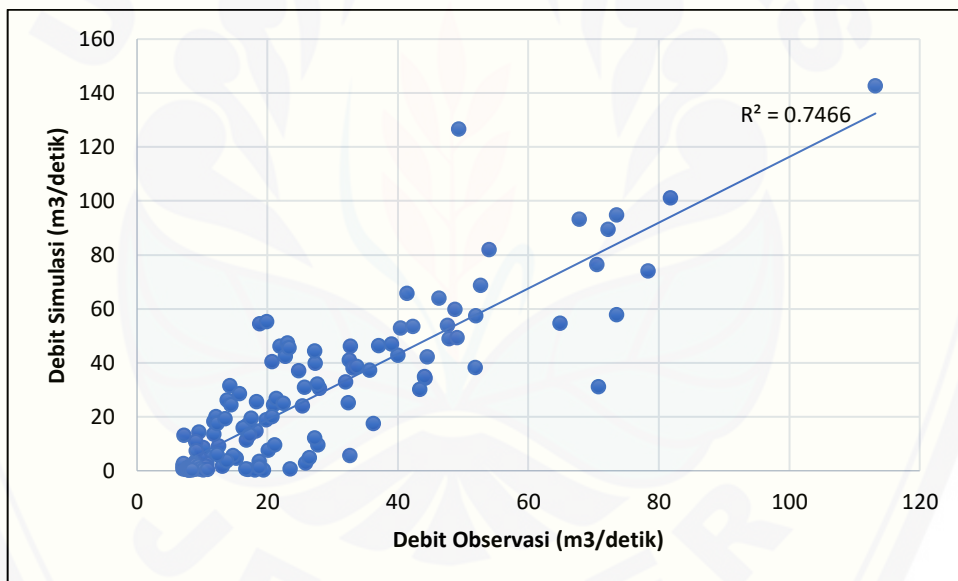
Tabel 4.9 Jenis Tanah

No	Jenis Tanah	Kode SWAT
1	Vertic Luvisols	Lv5-3b-4538
2	Vitric Andosols	Tv38-1bc-4580
3	Ochric Andosols	To25-2b-4576
4	Mollic Andosols	Tm23-2c-4573
5	Eutric Regosols	Re82-1bc-4570

Setelah proses *running* model, SWAT akan menghasilkan kondisi awal debit model (sebelum kalibrasi dan validasi) pada titik outlet Bendungan Sampean Baru. Hasil uji keandalan debit model pada tahun 1988-2007 menunjukkan nilai  $R^2$  adalah 0,7051 dan nilai NSE adalah 0,2437. sedangkan, hasil uji keandalan debit model pada tahun 2008-2018 menunjukkan nilai  $R^2$  adalah 0,7466 dan nilai NSE adalah 0,4480. Debit model terbesar adalah 164,8 m<sup>3</sup>/detik. Grafik  $R^2$  dapat dilihat pada Gambar 4.5 s/d 4.6. Hidrograf debit-hujan rerata observasi dapat dilihat pada **Lampiran 67**.



Gambar 4.5 Uji keandalan debit simulasi awal tahun 1988-2007

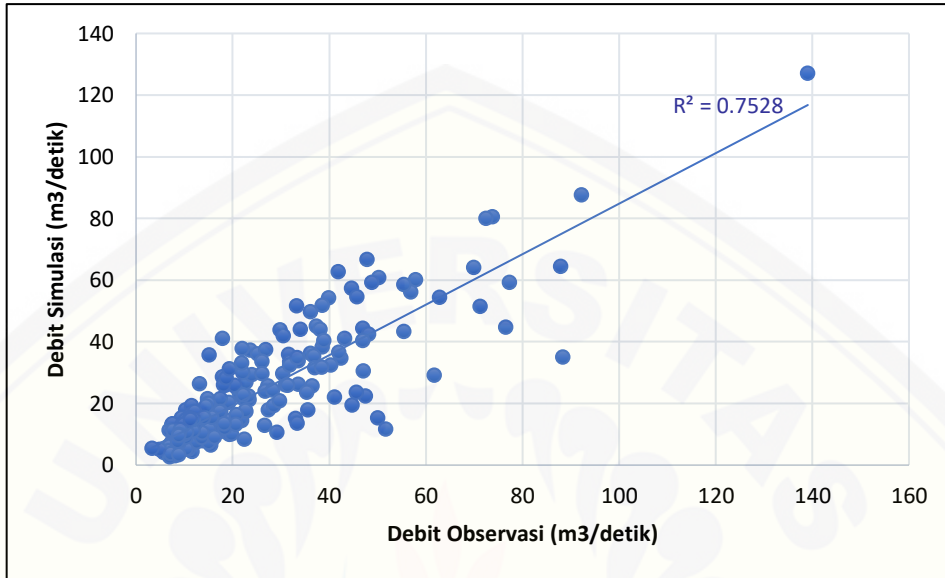


Gambar 4.6 Uji keandalan debit simulasi awal tahun 2008-2018

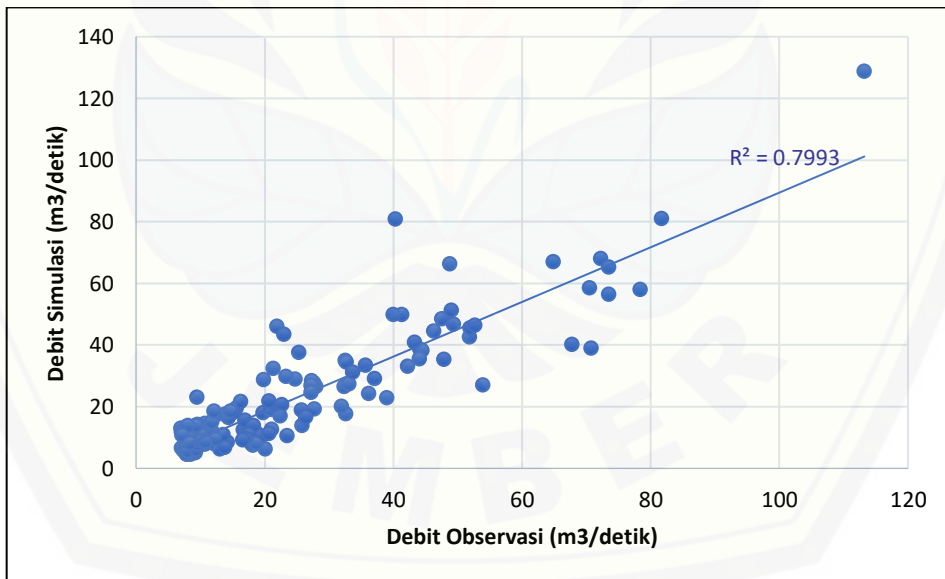
### 4.3.2 Kalibrasi dan Validasi Model

Pada tahapan ini, tahun yang digunakan pada proses kalibrasi adalah tahun 1988 sampai 2007, sedangkan proses validasi adalah tahun 2008 sampai 2018. Hasil proses kalibrasi menunjukkan peningkatan nilai uji keandalan  $R^2$  dan NSE sebesar 0,7528 dan 0,7422. Hasil proses validasi juga menunjukkan peningkatan nilai uji

keandalan  $R^2$  dan NSE sebesar 0,7993 dan 0,7782. Debit simulasi model terbesar adalah 128,7 m<sup>3</sup>/detik. Grafik  $R^2$  dapat dilihat pada Gambar 4.7 s/d 4.8. Hidrograf debit simulasi dapat dilihat pada **Lampiran 68**.



Gambar 4.7 Uji keandalan debit simulasi tahun 1988-2007 terkalibrasi

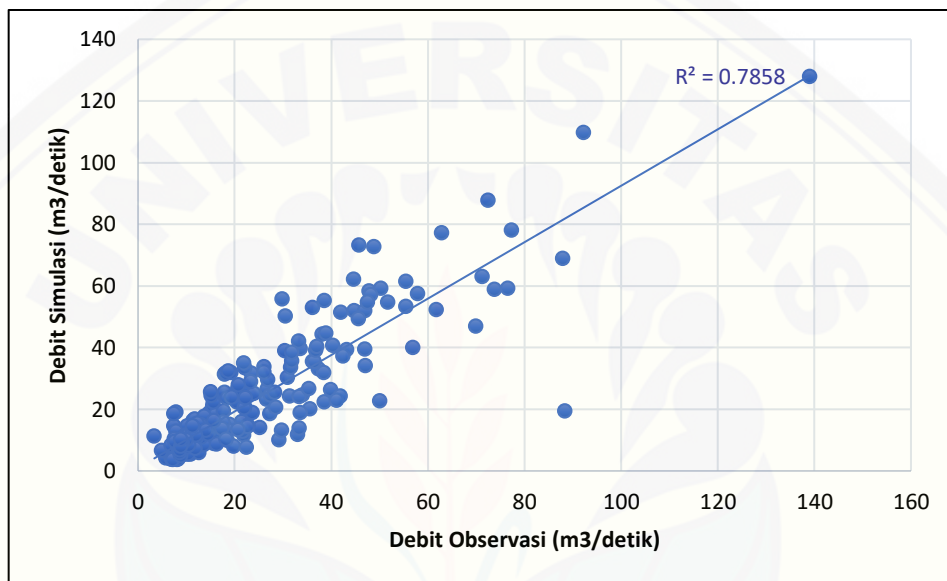


Gambar 4.8 Uji keandalan debit simulasi tahun 2008-2018 tervalidasi

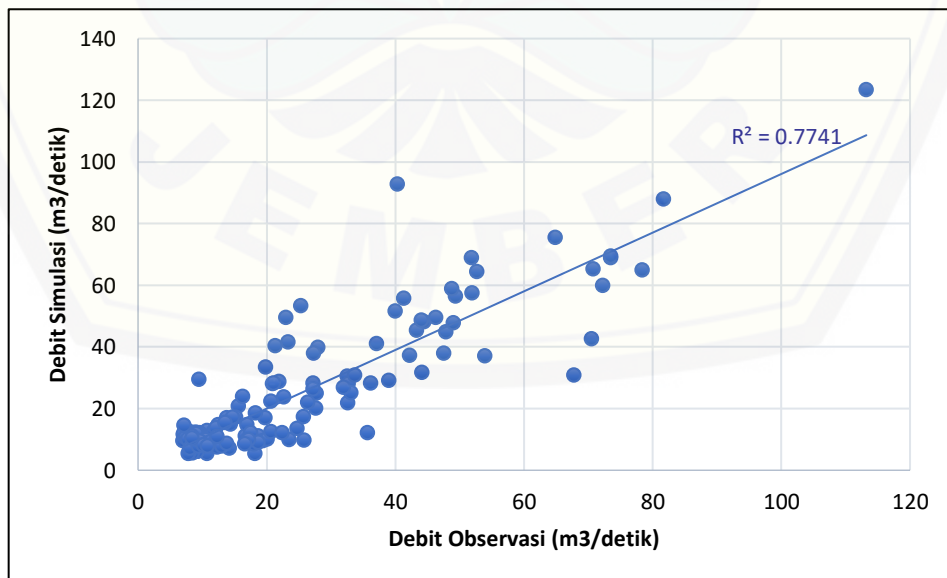
### 4.3.3 Pemodelan Debit dengan Hujan NCEP/NCAR *Re-Analysis 2*

Setelah model SWAT telah dikalibrasi dan validasi, selanjutnya adalah

menggunakan data masukkan hujan harian NCEP/NCAR hasil dari proses *downscaling* untuk diproses kembali pada *software* SWAT tanpa mengubah database yang lain. Hasil uji keandalan debit model tahun 1988-2007 menunjukkan nilai  $R^2$  adalah 0,7858 dan nilai NSE adalah 0,7620. Hasil uji keandalan debit model tahun 2008-2018 menunjukkan nilai  $R^2$  adalah 0,7741 dan nilai NSE adalah 0,7333. Debit model terbesar adalah 127,9 m<sup>3</sup>/detik. Grafik  $R^2$  dapat dilihat pada Gambar 4.9 s/d 4.10. Hidrograf debit-hujan NCEP/NCAR dapat dilihat pada **Lampiran 69**.



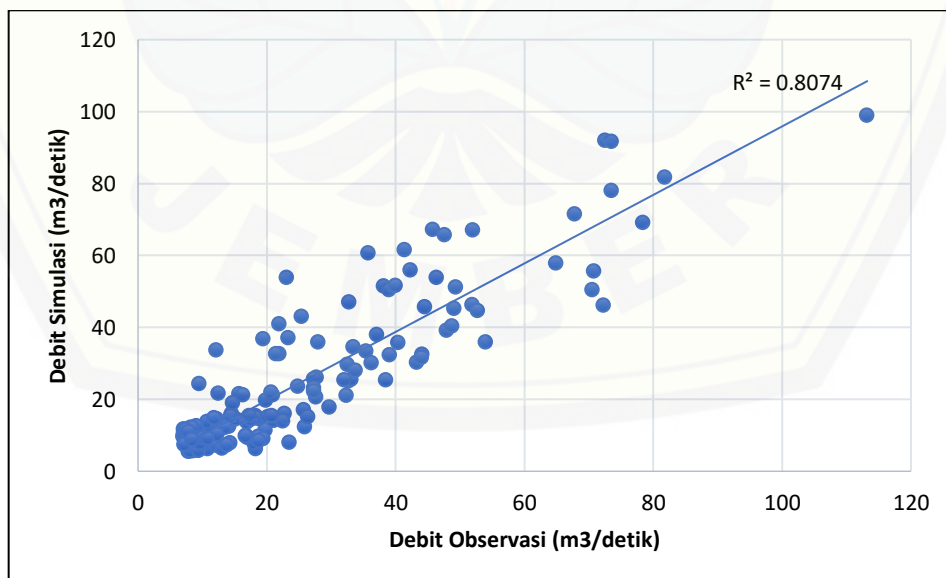
Gambar 4.9 Uji keandalan debit-hujan NCEP/NCAR tahun 1988-2007



Gambar 4.10 Uji keandalan debit-hujan NCEP/NCAR tahun 2008-2018

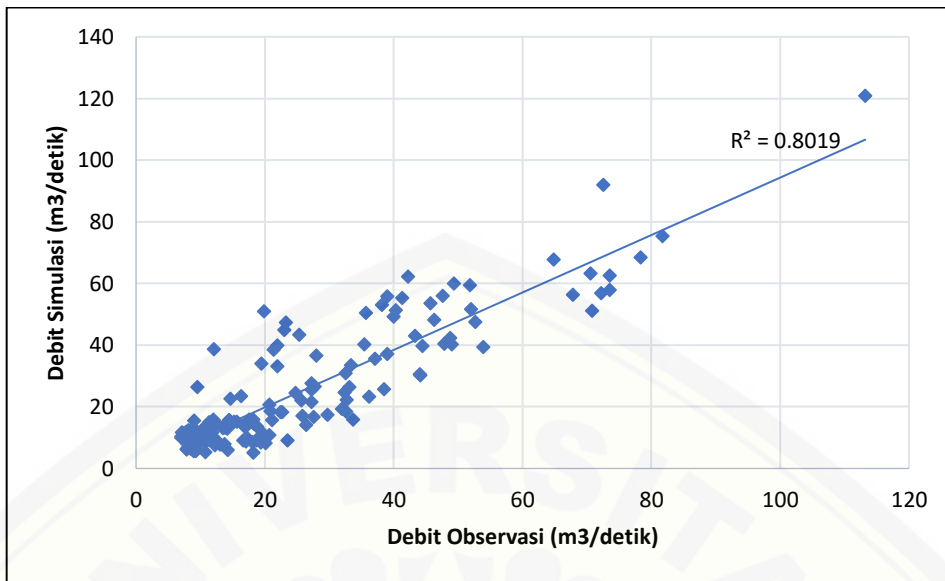
#### 4.3.4 Pemodelan Debit dengan Hujan CSIRO Mk 3.6.0

Pemodelan debit selanjutnya adalah dengan menggunakan data masukan hujan harian CSIRO Mk 3.6.0 hasil proses *downscaling* pada berbagai skenario perubahan iklim untuk diproses kembali pada *software* SWAT. Pemodelan debit dibagi menjadi 3 jenis model berdasarkan skenario perubahan iklim yaitu model debit-hujan RCP 4.5, model debit-hujan RCP 6.0, dan model debit-hujan RCP 8.5. Pemodelan debit juga dibagi menjadi 2 periode waktu yaitu periode waktu 1 (2006-2018) dan periode waktu 2 (2019-2050). Pemodelan debit periode waktu 1 dilakukan terlebih dahulu, sehingga dapat diketahui keandalan model tersebut. Hasil uji keandalan model debit-hujan RCP 4.5 pada periode waktu 1 menunjukkan nilai  $R^2$  adalah 0,8074 dan nilai NSE adalah 0,7806. Prediksi debit model RCP 4.5 terbesar adalah 98,96 m<sup>3</sup>/detik. Hasil uji keandalan model debit-hujan RCP 6.0 pada periode waktu 1 menunjukkan nilai  $R^2$  adalah 0,8019 dan nilai NSE adalah 0,7802. Prediksi debit model RCP 6.0 terbesar adalah 120,9 m<sup>3</sup>/detik. Hasil uji keandalan model debit-hujan RCP 8.5 pada periode waktu 1 menunjukkan nilai  $R^2$  adalah 0,8068 dan nilai NSE adalah 0,7872. Prediksi debit model RCP 8.5 terbesar adalah 106,4 m<sup>3</sup>/detik. Grafik  $R^2$  dapat dilihat pada Gambar 4.11 s/d 4.13. Hidrograf debit-hujan CSIRO Mk 3.6.0 tahun 2006-2018 dapat dilihat pada **Lampiran 70 s/d 72**.

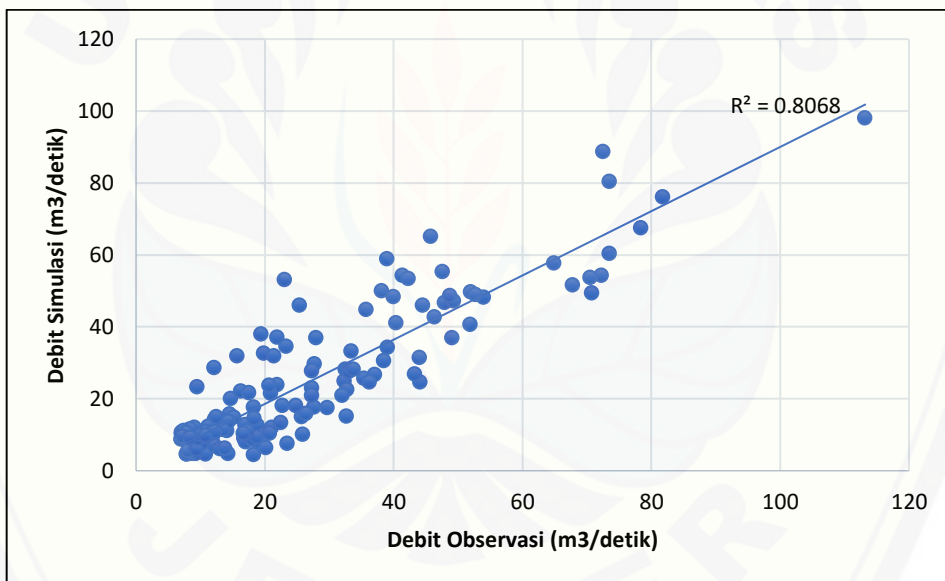


Gambar 4.11 Uji keandalan debit-hujan RCP 4.5 tahun 2006-2018





Gambar 4.12 Uji keandalan debit-hujan RCP 6.0 tahun 2006-2018



Gambar 4.13 Uji keandalan debit-hujan RCP 8.5 tahun 2006-2018

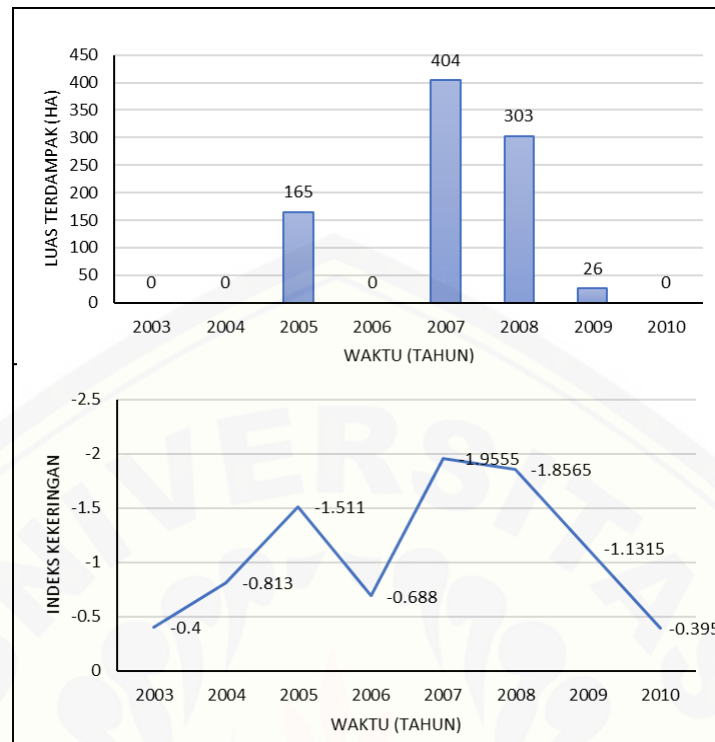
Pemodelan debit periode waktu 2 dilakukan untuk mendapatkan hasil prediksi debit tahun 2019-2050. Hasil prediksi debit pada Bendungan Sampean Baru menunjukkan debit maksimal secara berturut-turut pada RCP 4.5, RCP 6.0, dan RCP 8.5 adalah 216,3 m<sup>3</sup>/detik; 214,9 m<sup>3</sup>/detik; dan 119,8 m<sup>3</sup>/detik. Hidrograf debit-hujan CSIRO Mk 3.6.0 tahun 2019-2050 dapat dilihat pada **Lampiran 73 s/d 75**.

#### 4.4 Pemodelan Kekeringan Hidrologis SRI

##### 4.4.1 Pemodelan Kekeringan Historis

Pemodelan kekeringan historis ini didasarkan pada data luaran model debit-hujan NCEP/NCAR *Re-Analysis* 2. Plot hasil analisis kekeringan menggunakan indeks kekeringan SRI dengan skala waktu defisit hujan selama 6 bulan (SRI-6) ditunjukkan pada **Lampiran 76**. Kekeringan SRI-6 yang terjadi pada tahun 1992, 1994, 1996, 2015, dan 2018 dikategorikan sebagai kekeringan ekstrim atau amat sangat kering ( $SRI < -2$ ). Untuk mengetahui kesesuaian indeks kekeringan SRI-6 dengan kondisi sebenarnya dilapangan, maka diperlukan pembandingan berupa data luas tanaman padi yang terdampak kekeringan dan data distribusi air bersih. Data luas tanaman padi terdampak kekeringan dengan periode tahun 2003-2010, didapatkan dari Dinas Pertanian Tanggul, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.14. Pada data tersebut tercatat luas tanaman padi terdampak kekeringan, yaitu 165 Ha (2005), 404 Ha (2007), dan 393 (2008). Hasil perhitungan kekeringan SRI-6 menunjukkan nilai indeks -1,5105 (2005); -1,9555 (2007); dan -1,8565 (2008). Dalam penelitiannya (Halik dan Anwar, 2017), terdapat hubungan antara tingkat keparahan kekeringan dengan dampak kekeringan yang terjadi di lahan pertanian padi.

Daftar daerah yang terdampak kekeringan, sehingga membutuhkan distribusi air bersih dapat dilihat pada Tabel 4.10. Data tersebut menunjukkan bahwa pada tahun 2018 di Bondowoso terdapat 4 kecamatan (Wringin, Pakem, Botolinggo, dan Kelabang) dan 7 desa (Banyuputih, Jatisari, Wringin, Patemon, Gayam, Botolinggo, dan Karangsengon). Berdasarkan pemetaan kekeringan SRI-6 tahun 2018, hasil menunjukkan bahwa desa Karangsengon, Botolinggo, dan Gayam tergolong daerah dengan tingkat kekeringan adalah sangat kering, sedangkan desa Jatisari, Banyuputih, Wringin, dan Patemon tergolong daerah dengan tingkat kekeringan adalah amat sangat kering. Peta kekeringan SRI-6 pada tahun 2018 dapat dilihat pada **Lampiran 80**.



Gambar 4.14 Luas Tanaman Padi Terdampak Kekeringan

Tabel 4.10 Data distribusi air bersih Kab. Bondowoso tahun 2018

No	Alamat		Volume (Liter)
	Kecamatan	Desa	
1	Wringin	Banyuputih	105,000
		Jatisari	45,000
2	Pakem	Wringin	85,000
		Patemon	40,000
3	Botolinggo	Gayam	215,000
		Botolinggo	120,000
4	Klabang	Karangsengon	15,000
<b>Total</b>			<b>625,000</b>

#### 4.4.2 Pemodelan Kekeringan Prediksi

Prediksi kekeringan akibat perubahan iklim dimasa yang akan datang, dilakukan dengan menggunakan data masukan berupa hasil model debit periode 2 dengan skenario peningkatan emisi gas rumah kaca khususnya CO<sub>2</sub>. Hasil prediksi indeks kekeringan SRI -6 untuk periode 2019 sampai 2050 pada berbagai skenario perubahan iklim dapat dilihat pada **Lampiran 77 s/d 79**. Kekeringan pada skenario

perubahan iklim RCP 4.5 menunjukkan bahwa indeks kekeringan tertinggi yaitu -1,6465 terdapat pada tahun 2035. Indeks tersebut menunjukkan pada kategori sangat kering. Kekeringan pada skenario perubahan iklim RCP 6.0 menunjukkan bahwa indeks kekeringan tertinggi yaitu -2.006 terdapat pada tahun 2028. Indeks tersebut menunjukkan pada kategori amat sangat kering. Kekeringan pada skenario perubahan iklim RCP 8.5 menunjukkan bahwa indeks kekeringan tertinggi yaitu -2.7245 terdapat pada tahun 2031. Indeks tersebut menunjukkan pada kategori amat sangat kering. Pada RCP 8.5, kekeringan dengan kategori amat sangat kering juga terjadi pada tahun 2028, 2046, dan 2047 dengan indeks kekeringan yaitu -2,061; -2,172; dan -2,3865.

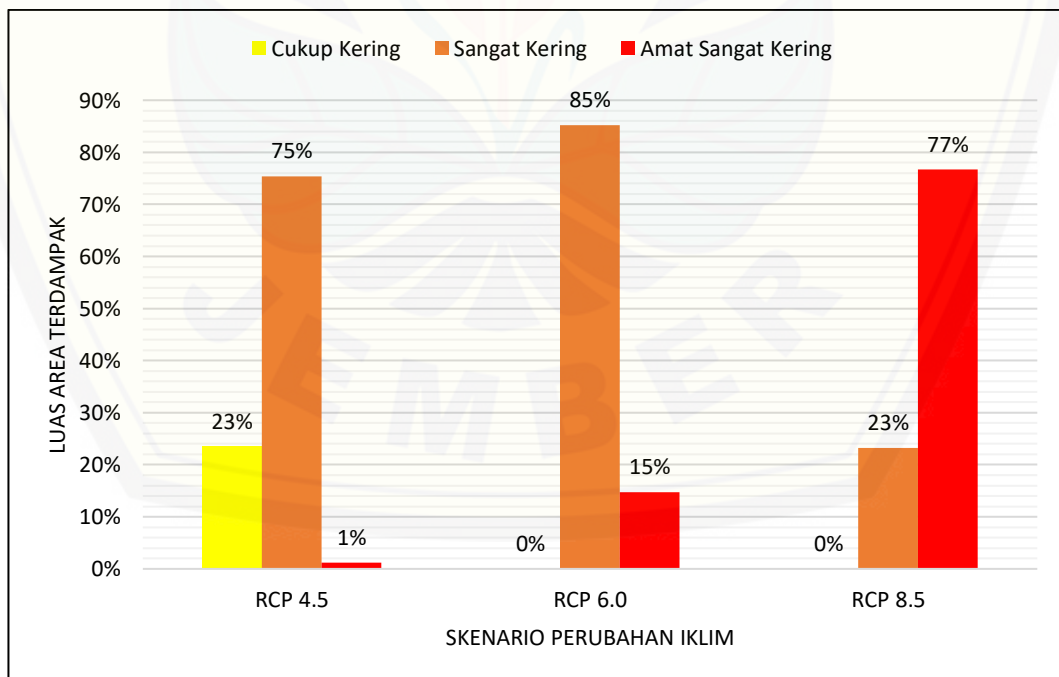
#### 4.4.3 Pemetaan Kekeringan Prediksi

Prediksi kekeringan akibat perubahan iklim dimasa yang akan datang, kemudian dipetakan secara spasial dan temporal untuk mengetahui sebaran tingkat kekeringan yang akan terjadi di DAS Sampean Baru. Pemetaan kekeringan prediksi dapat dilihat pada **Lampiran 81 s/d 99**.

Meningkatnya GRK pada tiap skenario perubahan iklim berpengaruh pada sebaran kategori kekeringan. Hal ini dapat diamati pada grafik kekeringan tahun 2028 masing-masing skenario perubahan iklim Gambar 4.16. Pada grafik tersebut, kekeringan dengan kategori amat sangat kering mengalami peningkatan sebesar 15% dan 77% pada RCP 6.0 dan RCP 8.5. Pada RCP 4.5, kekeringan dengan kategori amat sangat kering terjadi pada 2 kecamatan, yaitu kecamatan Tegalampel dan Klabang. Pada RCP 6.0, kekeringan dengan kategori amat sangat kering terjadi pada 9 kecamatan, yaitu kecamatan Wringin, Tegalampel, Klabang, Sukosari, Tlogosari, Sumberjambe, Pujer, Maesan, dan Grujugan. Pada RCP 8.5, kekeringan dengan kategori amat sangat kering terjadi pada 15 kecamatan, yaitu kecamatan Pakem, Curahdami, Wringin, Tegalampel, Klabang, Prajekan, Cerme, Tapen, Sukosari, Tlogosari, Sumberjambe, Pujer, Tamanan, Maesan, dan Grujugan.

Seiring dengan meningkatnya persentase kategori kekeringan ekstrim pada masing-masing skenario perubahan iklim, otoritas terkait perlu mempersiapkan strategi adaptasi dalam menghadapi bencana kekeringan di masa depan. Dari sektor

agrikultur, beberapa upaya adaptasi dapat dilakukan seperti meningkatkan ketahanan tanaman terhadap kekeringan dan hama melalui pengembangan jenis-jenis baru tanaman, menyediakan jaring-jaring pengaman ekonomi bagi petani untuk memastikan keberlangsungan sektor agrikultur melalui asuransi bagi petani, meningkatkan atau mengelola produksi tanaman dengan melakukan penyesuaian pola tata tanam antara palawija dengan padi. Dari sektor pengelolaan sumber air, beberapa upaya adaptasi dapat dilakukan, diantaranya melakukan pendataan yang baik terhadap parameter-parameter hidrologis seperti data hujan dan data debit karena data yang lengkap akan menunjang hasil yang baik untuk penelitian-penelitian terkait DAS Sampean Baru selanjutnya, memaksimalkan perawatan terhadap bendung-bendung di DAS Sampean Baru, sehingga proses distribusi air ke sawah berlangsung lancar, menambah jumlah sumur artesis pada desa yang termasuk kategori ekstrim, membuat sistem peringatan dini terhadap bencana kekeringan, membuat batasan-batasan terkait berbagai penggunaan lahan dan pemanfaatan kawasan DAS.



Gambar 4.16 Persentase sebaran keparahan kekeringan tahun 2028

## BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN

### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pembahasan dapat dikemukakan beberapa kesimpulan sebagai berikut.

1. Hasil prediksi perubahan curah hujan akibat skenario perubahan iklim berdasarkan data GCM CSIRO 3.6.0 AR-5 menunjukkan bahwa terjadi penurunan hujan maksimum pada masing-masing RCP. Kenaikan temperatur yang diskenariokan pada masing-masing RCP turut mempengaruhi perubahan intensitas hujan. Hasil prediksi hujan maksimum secara berturut-turut pada RCP 4.5, RCP 6.0, dan RCP 8.5 adalah 1017 mm; 699 mm; dan 563 mm.
2. Menurunnya intensitas hujan pada tiap skenario perubahan iklim turut mempengaruhi kondisi debit pada DAS Sampean Baru di masa depan. Hasil prediksi debit pada Bendungan Sampean Baru menunjukkan terjadi penurunan debit maksimum secara berturut-turut pada RCP 4.5, RCP 6.0, dan RCP 8.5 adalah 216,3 m<sup>3</sup>/detik; 214,9 m<sup>3</sup>/detik; dan 119,8 m<sup>3</sup>/detik.
3. Pemetaan spasio temporal kekeringan prediksi tiap skenario perubahan iklim menunjukkan bahwa terjadi peningkatan luasan ancaman kekeringan. Hal ini dapat diamati pada kekeringan tahun 2028, dimana kekeringan dengan kategori amat sangat kering mengalami peningkatan sebesar 15% dan 77% pada RCP 6.0 dan RCP 8.5 sedangkan kekeringan dengan kategori cukup kering mengalami penurunan. Hal ini menunjukkan bahwa perubahan iklim global memberikan pengaruh terhadap luasan dan intensitas bencana kekeringan.

## 5.2 Saran

Berdasarkan hasil asesmen dampak perubahan iklim terhadap bencana kekeringan di DAS Sampean Baru berbasis data GCM, saran yang dapat diberikan sebagai berikut:

1. Perlu adanya penyesuaian mengenai karakteristik DAS di lapangan guna meningkatkan uji keandalan model baik model debit maupun asesmen kekeringan, seperti pengambilan sampel tanah di lapangan guna mengetahui karakteristik tanah, pemetaan tata guna lahan terkini, penggunaan data DEM jenis lain yang memiliki tingkat resolusi yang lebih tinggi sehingga didapatkan model sungai yang mendekati sungai lapangan, dsb.
2. Dampak perubahan iklim terhadap bencana kekeringan yang akan datang perlu juga dikaji menggunakan model DD (*dynamic downscaling*). Model DD menghasilkan luaran dengan resolusi yang lebih baik dibandingkan dengan luaran GCM yang berskala global.
3. Asesmen dampak perubahan iklim terhadap bencana kekeringan berbasis data GCM perlu juga dikaji menggunakan data GCM jenis lainnya sehingga dapat dibandingkan mana yang lebih sesuai dengan kondisi kekeringan masa depan di DAS Sampean Baru.

**DAFTAR PUSTAKA**

- Abbaspour, K. C., E. Rouholahnejad, S. Vaghefi, R. Srinivasan, H. Yang, dan B. Kløve. 2015. A continental-scale hydrology and water quality model for europe: calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale swat model. *Journal of Hydrology*. 524:733–752.
- Abdulrazzak, M., A. Elfeki, A. Kamis, M. Kassab, A. Chaabani, dan K. Noor. 2019. Flash flood risk assessment in urban arid environment : case study of taibah and islamic universities' campuses, medina, kingdom of saudi arabia. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*. 10(1):780–796.
- Agmalaro, M. A. 2011. Pemodelan Statistical Downscaling Data GCM Menggunakan Support Vector Regression Untuk Memprediksi Curah Hujan Bulanan Indramayu. Institut Pertanian Bogor.
- Almeida, R. A., S. B. Pereira, dan D. B. F. Pinto. 2018. Calibration and validation of the swat hydrological model for the mucuri river basin swat-cup. *Journal of the Brazilian Association of Agricultural Engineering*. 4430:55–63.
- Anderson, T. R., E. Hawkins, dan P. D. Jones. 2016. CO<sub>2</sub>, the greenhouse effect and global warming : from the pioneering work of arrhenius and callendar to today's earth system models. *Endeavour*. 40(3):178–187.
- ARCC. 2014. *A Review Of Downscaling Methods For Climate Change Projections*. US Agency International Development.
- Asyeifa, V. R. 2017. Pemodelan Statistical Downscaling Dengan Projection Pursuit Regression Untuk Meramalkan Curah Hujan Bulanan Di Sentra Produksi Padi Jawa Timur. Institut Teknologi Surabaya.
- Batanghari, D. A. S., U. Handoko, R. Boer, E. Aldrian, dan D. Dasanto. 2018. Persepsi kerentanan bahaya banjir dan kekeringan akibat perubahan iklim di das batanghari. *LIMNOTEK Perairan Darat Tropis Di Indonesia*. 25(2):110–124.
- Bayissa, Y., U. Blue, N. Basin, S. Maskey, T. T. Id, dan S. J. Van Andel. 2018. Comparison of the performance of six drought indices in characterizing



- historical drought for the upper blue Nile basin, Ethiopia. *Geosciences*. 8(81):1–26.
- Belayneh, A., J. Adamowski, B. Khalil, dan B. Ozga-zielinski. 2014. Long-term SPI drought forecasting in the Awash river basin in Ethiopia using wavelet neural network and wavelet support vector regression models. *Journal of Hydrology*. 508:418–429.
- Berliana, S. dan S. Sutikno. 2007. Kajian dampak pemanasan global terhadap pola curah hujan Indonesia dengan menggunakan statistik downscaling. *Statistika*. 7(2):5–12.
- BMKG. 2020. *Peta Prakiraan Curah Hujan Dasarian III Desember 2020 Indonesia*
- BNPB. 2010. *Peta Ancaman Kekeringan*
- Bordi, I., K. Fraedrich, M. Petitta, dan A. Sutera. 2006. Large-scale assessment of drought variability based on NCEP/NCAR and ERA-40 re-analyses. *Water Resources Management*. 20:899–915.
- BPBD Bondowoso. 2018. *Data Distribusi Air Bersih Kabupaten Bondowoso*
- Buono, A., A. Kurniawan, dan A. Faqih. 2012. Peramalan awal musim hujan menggunakan jaringan syaraf tiruan backpropagation Levenberg-Marquardt. *Seminar Nasional Aplikasi Teknologi Informasi*. 2012:15–16.
- Campozano, L., D. Tenelanda, E. Sanchez, E. Samaniego, dan J. Feyen. 2016. Comparison of statistical downscaling methods for monthly total precipitation: case study for the Paute river basin in southern Ecuador. *Advances in Meteorology*. 2016
- Chakravarti, A., N. Joshi, dan H. Panjiar. 2015. Rainfall runoff analysis using artificial neural network. *Indian Journal of Science and Technology*. 8
- Chandwani, V., N. K. Gupta, R. Nagar, V. Agrawal, dan A. S. Jethoo. 2016. Artificial neural networks aided conceptual stage design of water harvesting structures. *Perspectives in Science*. 8:151–155.
- Chen, H., C. Xu, dan S. Guo. 2012. Comparison and evaluation of multiple GCMs, statistical downscaling and hydrological models in the study of climate change impacts on runoff. *Journal of Hydrology*. 434–435:36–45.

- Chen, J., F. P. Brissette, dan R. Leconte. 2011. Uncertainty of downscaling method in quantifying the impact of climate change on hydrology. *Journal of Hydrology*. 401(3–4):190–202.
- Chowdhury, R., M. M. A. Mohamed, dan A. Murad. 2016. Variability of extreme hydro-climate parameters in the north-eastern region of united arab emirates. *Procedia Engineering*. 154:639–644.
- Cordeiro, M. R. C., G. Lelyk, R. Kröbel, G. Legesse, dan M. Faramarzi. 2018. Deriving a dataset for agriculturally relevant soils from the soil landscapes of canada (slc) database for use in soil and water assessment tool (swat) simulations. *Earth System Science Data*. 10:1673–1686.
- Core Writing Team, R. K. Pachauri, dan M. L.A. 2015. Climate change 2014 synthesis report. contribution of working groups i, ii and iii to the fifth assessment report. 151.
- Debbarma, S., R. Education, P. Choudhury, P. Roy, dan R. Kumar. 2019. Analysis of precipitation variability using memory based artificial neural networks. *International Journal of Applied Metaheuristic Computing*. 10(1):29–42.
- Demuth, H. B. dan M. H. Raelle. 2009. *Neural Network Toolbox User's Guide for Use with Matlab*
- Djuniardi, F. 2012. Analisis Debit Aliran Sungai DAS Saba Dengan Menggunakan MW-SWAT. IPB.
- Emiyati. 2012. Hydrologic Response Unit (HRU) Dan Debit Aliran Daerah Aliran Ci Rasea. Universitas Indonesia.
- Falah, W. 2015. *Menggambar Peta Dengan ArcGIS 10.1: Tutorial ArcGIS 10.1 Untuk Pemula*. Kendari: ANDI OFFSET.
- Firdaus, G., O. Haridjaja, D. Tarigan, D. Ilmu, S. Lahan, F. Pertanian, J. Meranti, dan K. Ipb. 2014. Analisis respon hidrologi terhadap penerapan teknik konservasi tanah di sub das lengkung menggunakan model swat. *Tanah Lingkungan*. 16:16–23.
- Hadisusanto, N. 2010. *Aplikasi Hidrologi*. Malang: Jogja Mediautama.
- Halik, G. dan N. Anwar. 2017. *Prediksi Kekeringan Berbasis Data Luaran GCM*.

Surabaya: ITS Press.

- Halik, G., S. Wahyuni, dan A. Maududie. 2010. Dampak perubahan tata guna lahan terhadap respon hidrograf banjir di daerah aliran sungai sampean baru. *Konfrensi Nasional Teknik Sipil 4*. 4:2–3.
- Halwatura, D. dan M. M. M. Najim. 2013. Environmental modelling & software application of the hec-hms model for runoff simulation in a tropical catchment. *Environmental Modelling and Software*. 46:155–162.
- Hatmoko, W., R. W. Triweko, dan I. K. Hadihardaja. 2016. Monitoring and prediction of hydrological drought using a drought early warning system in pemali-comal river basin, indonesia. (June)
- Hidayati, I. N. 2015. Pengaruh perubahan iklim terhadap produksi pertanian dan strategi adaptasi pada lahan rawan kekeringan. *Jurnal Ekonomi Dan Studi Pembangunan*. 16:42–52.
- IPCC. 2007. *Climate Change 2007: Synthesis Report, Intergovernmental Panel on Climate Change. Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- IPCC. 2014. Climate change 2014: synthesis report - summary chapter for policymakers. *Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (Eds.)]*. 31.
- Jadmiko, S. D. dan D. Murdiyarso. 2017. Koreksi bias luaran model iklim regional untuk analisis kekeringan bias correction of regional climate model outputs for drought analysis. *Jurnal Tanah Dan Iklim*. 41:25–36.
- Jumarwanto, A., R. Hartanto, dan D. Prastiyanto. 2009. Aplikasi jaringan saraf tiruan backpropagation untuk memprediksi penyakit tht di rumah sakit mardi rahayu kodus. *Jurnal Teknik Elektro Vol.1 No.1*. 1(1):11–21.
- Kehutanan, D. *Surat Keputusan Menteri Kehutanan No. 107/Kpts-II/2003 Tentang Pengelolaan Taman Hutan Raya*. 2003. Indonesia: Salinan Biro Hukum dan Organisasi.
- Komputer, W. 2015. *Menguasai ArcGIS 10 Untuk Pemula*. Semarang: ANDI OFFSET.
- Krenker, A., J. Bešter, dan A. Kos. 2011. *Introduction to the Artificial Neural*

- Networks*. Dalam Artificial Neural Network-Methodological Advances and Biomedical Applications. Editor K. Suzuki. Rijeka: InTech.
- Le, R., M. Katurji, dan P. Zawar-reza. 2018. Comparison of statistical and dynamical downscaling results from the wrf model. *Environmental Modelling & Software Journal*. 100:67–73.
- Le Treut, H., U. R. Somerville, Y. Cubasch, C. Ding, A. Mauritzen, T. Mokssit, Peterson, dan M. Prather. 2007. *Historical Overview of Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- Leipner, E. dan O. Topbaev. 2015. What Is a Watershed? [https://www.geo.fu-berlin.de/en/v/iwm-network/learning\\_content/introduction\\_iwm/definition-watershed/index.html](https://www.geo.fu-berlin.de/en/v/iwm-network/learning_content/introduction_iwm/definition-watershed/index.html)
- Maskey, S. dan P. Trambauer. 2015. *Wind, Heat Waves, and Droughts*. Dalam Hydro-Meteorological Hazards, Risks, and Disasters. Amsterdam: Elsevier B.V.
- McKee, B., Doesken, R.J., Kleist, J. 1993a. *The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales*
- McKee, B., Doesken, R.J., Kleist, J. 1993b. The relationship of drought frequency and duration to time scales. *8th Confrence on Applied Climatology*. 179–184.
- Mechoso, C. R., A. Arakawa, dan L. Angeles. 2015. *General Circulation Models*. Edisi Second Edition. Elsevier. *Encyclopedia of Atmospheric Sciences 2nd Edition*.
- Mekonnen, D. F. dan M. Disse. 2018. Analyzing the future climate change of upper blue Nile river basin using statistical downscaling techniques. *Hydrologic and Earth System Science*. 22:2391–2408.
- Meresa, H. K., M. Osuch, dan R. Romanowicz. 2016. Hydro-meteorological drought projections into the 21-st century for selected polish catchments
- Moss, R. H., J. A. Edmonds, K. A. Hibbard, M. R. Manning, S. K. Rose, D. P. Van Vuuren, T. R. Carter, S. Emori, M. Kainuma, T. Kram, G. A. Meehl, J. F. B. Mitchell, N. Nakicenovic, K. Riahi, S. J. Smith, R. J. Stouffer, A. M. Thomson, J. P. Weyant, dan T. J. Wilbanks. 2010. The next generation of

- scenarios for climate change research and assessment. *Nature*. 463:747–756.
- Nurdiansyah, L., G. Fmipa, J. Meranti, W. Lv, K. Ipb, dan D. Bogor. 2018. Prakiraan awal musim di kabupaten kapuas menggunakan luaran model iklim global forecasting season onsets in kapuas district based on global climate model outputs. 32(1):1–10.
- Pagano, T. C. dan S. Sorooshian. 2014. Hydrologic cycle. *The Earth System: Physical and Chemical Dimensions of Global Environmental Change*. 1:450–464.
- Patil, V. K., V. R. Saraf, O. V Karad, S. B. Ghodke, D. K. Gore, dan S. S. Dhekale. 2019. Simulation of rainfall runoff process using hec-hms model for upper godavari basin maharashtra , india. *European Journal of Engineering Research and Science*. 4(4):102–107.
- Perlman, H., USGS, dan J. Evans. 2019. The Natural Water Cycle. <https://www.usgs.gov/media/images/natural-water-cycle-0>
- Prahasta, E. 2002. *Konsep-Konsep Dasar Sistem Informasi Geografis*. Bandung: Informatika.
- Raziei, T., I. Bordi, L. S. Pereira, dan A. Sutera. 2010. Space-time variability of hydrological drought and wetness in iran using ncep / ncar and gpcc datasets. *Hydrologic and Earth System Science*. (iv):1919–1930.
- Rentuwu, E. dan H. Syahbuddin. 2007. Perubahan pola curah hujan dan dampaknya terhadap periode masa tanam persoalan global yang melibatkan banyak negara dan latitude perubahan pola hujan yang mengakibatkan pergeser- waktu singkat dengan kecenderungan intensitas beberapa organisme pengganggu. *Jurnal Tanah Dan Iklim*. 26:1–12.
- Retalis, A., F. Tymvios, D. Katsanos, dan S. Michaelides. 2017. Downscaling chirps precipitation data : an artificial neural network modelling approach network modelling approach. *International Journal of Remote Sensing*. 38(13):3943–3959.
- Risley, J. C. 2019. *Using the Precipitation-Runoff Modeling System to Predict Seasonal Water Availability in the Upper Klamath River Basin , Oregon and California Scientific Investigations Report 2019 – 5044*. Oregon and

California

- Rogelj, J., M. Meinshausen, dan R. Knutti. 2012. Global warming under old and new scenarios using ipcc climate sensitivity range estimates. *Nature Climate Change*. 2(4):248–253.
- Safri, A. dan A. Ulfiana. 2019. Prediksi curah hujan bulanan menggunakan metode statistical downscaling di pulau jawa dengan pemilihan prediktor berdasarkan transpor uap air. *Jurnal Geografi*. 11
- Salimi, A. H., J. M. Samakosh, E. Sharifi, R. M. Hassanvand, A. Noori, dan H. von Rautenkranz. 2019. Optimized artificial neural networks-based methods for statistical downscaling of gridded. *MDPI Water*
- Setiawan, H. 2017. Analisis Pengaruh Penggunaan Lahan Terhadap Erosi Dan Sedimentasi DAS Way Seputih Hulu Menggunakan Model SWAT. Universitas Lampung.
- Setyorini, R. 2019. Regionalisasi Hujan Aliran DAS Rawatamtu Dan DAS Keloposawit Menggunakan Model Soil and Water Assessment Tools (SWAT). Universitas Jember.
- Shahbazi, A. R. N., B. Zahraie, A. Sedghi, dan M. Nasser. 2011. Seasonal meteorological drought prediction using support vector machine. *World Applied Science Journal*. 13:1387–1397.
- Shamir, E., E. Halper, T. Modrick, K. P. Georgakakos, H. Chang, T. M. Lahmers, dan C. Castro. 2019. Statistical and dynamical downscaling impact on projected hydrologic assessment in arid environment : a case study from bill williams river basin and alamo lake , arizona. *Journal of Hydrology X*. 10(2):13.
- Sharma, T., H. Vittal, S. Chhabra, dan K. Salvi. 2017. Understanding the cascade of gcm and downscaling uncertainties in hydro-climatic projections over india. *International Journal of Climatology*
- Shukla, S. dan A. W. Wood. 2008. Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought. *Geophysical Research Letter*. 35:1–7.
- Siang, J. J. 2005. *Jaringan Saraf Tiruan Dan Pemrogramannya Menggunakan MATLAB*. Edisi Edisi 1. Yogyakarta: ANDI OFFSET.

- Soemarto, C. 1995. *Hidrologi Teknik*. Jakarta: Gramedia Pustaka.
- Surmaini, E. dan E. Runtuwuu. 2010. Upaya sektor pertanian dalam menghadapi perubahan iklim. *Jurnal Litbang Pertanian*. 30(1):1–7.
- Susilokarti, D., S. S. Arif, S. Susanto, L. Sutiarto, J. Rm, H. No, P. Minggu, J. Selatan, J. T. Pertanian, F. T. Pertanian, dan U. G. Mada. 2015. Identifikasi perubahan iklim berdasarkan data curah hujan di wilayah selatan jatiluhur kabupaten subang, jawa barat. *Agritech*. 35(1):98–105.
- Taiwo, A. I., S. O. Folorunso, dan Z. O. Ogunwobi. 2018. Forecast performance of univariate time series and artificial neural network model. *Journal of Engineering and Technology*. 12(2):67–71.
- Tardif, S. 2018. Investigation Of The Relative Effects Of Development And Impervious Surface On Two Watersheds In Connecticut Using PRMS. University of Connecticut.
- Teng, F., W. Huang, dan I. Ginis. 2017. Hydrological modeling of storm runoff and snowmelt in taunton river basin by applications of hec-hms and prms models. *Natural Hazards*
- Tsanis, D. D. A. I. K. 2016. Comparison of multiple linear regression and artificial neural network models for downscaling trmm precipitation products using modis data. *Environmental Earth Sciences*. 75:1077.
- Widodo, A. P., E. A. Sarwoko, dan Z. Firdaus. 2017. Akurasi model prediksi metode backpropagation menggunakan kombinasi hidden neuron dengan alpha. *Jurnal Matematika*. 20, No. 2:79–84.
- Wilby, R. L. 2002. Sdsm — a decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. *Environmental Modelling & Software Journal*. 17:147–159.
- Wilby, R. L., C. Res, C. W. Dawson, C. Murphy, P. O. Connor, dan E. Hawkins. 2014. The statistical downscaling model – decision centric ( sdsm-dc ): conceptual basis and applications. *Climate Research*. 61:259–276.
- Wilhite, D. A. 2000. *Chapter 1 Drought as a Natural Hazard : Concepts and Definitions*. Nebraska: Drought Mitigation Center Faculty Publications.
- Windarto, J., U. Diponegoro, dan H. Pawitan. 2012. Model prediksi tinggi muka

air sungai kali garang semarang dengan jaringan syaraf tiruan. *Teknik*. 29(3)  
Zuma, D. S., K. Murtilaksono, dan Y. Suharnoto. 2017. Analisis curah hujan dan debit model swat dengan metode moving average di das ciliwung hulu. *Jurnal Pengelolaan Sumberdaya Alam Dan Lingkungan*. 7(2):98–106.

