

**PREDIKSI CURAH HUJAN HARIAN PERIODE 2022-2100  
DI DAERAH ALIRAN SUNGAI KRUENG ACEH  
MENGUNAKAN METODE *STATISTICAL DOWNSCALING***

**TUGAS AKHIR**

**Diajukan Oleh:**

**MAULIDIANUR**

**NIM. 160702051**

**Mahasiswa Fakultas Sains dan Teknologi  
Program Studi Teknik Lingkungan**



**FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI  
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI AR-RANIRY  
BANDA ACEH  
2022 M/1443 H**

LEMBAR PERSETUJUAN TUGAS AKHIR

**PREDIKSI CURAH HUJAN HARIAN PERIODE 2022-2100 DI DAERAH  
ALIRAN SUNGAI KRUENG ACEH MENGGUNAKAN METODE  
STATISTICAL DOWNSCALING**

**TUGAS AKHIR**

Diajukan kepada Fakultas Sains dan Teknologi  
Universitas Islam Negeri Ar-Raniry Banda Aceh  
Sebagai Beban Studi Mem peroleh Gelar Sarjana dalam Ilmu Teknik Lingkungan

Oleh:

**MAULIDIANUR**

**NIM. 160702051**

**Mahasiswa Fakultas Sains dan Teknologi  
Program Studi Teknik Lingkungan**

Banda Aceh, 02 November 2021  
Telah Diperiksa dan Disetujui Oleh:

Pembimbing I,

Pembimbing II,

Dr. Abd Mujahid Hamdan, M. Sc  
NIP. 198912132014031002

Hendri Ahmadian, M.IIM  
NIP.198301042014031002

Mengetahui,  
Ketua Program Studi Teknik Lingkungan Fakultas Sains dan Teknologi  
UIN Ar-Raniry Banda Aceh



Husnawati Yahya, M.Sc.  
NIP. 198311092014032002

LEMBAR PENGESAHAN TUGAS AKHIR

**PREDIKSI CURAH HUJAN HARIAN PERIODE 2022-2100 DI DAERAH  
ALIRAN SUNGAI KRUENG ACEH MENGGUNAKAN METODE  
STATISTICAL DOWNSCALING**

**TUGAS AKHIR**

Telah diuji oleh Panitia Ujian Munaqasyah Tugas Akhir  
Fakultas Sains dan Teknologi UIN Ar-Raniry Banda Aceh dan Dinyatakan Lulus  
Serta diterima sebagai Salah Satu Beban Studi Program Sarjana (S-1)  
Dalam Ilmu Teknik Lingkungan

Pada Hari/ Tanggal: Selasa, 13 Januari 2022  
10 Jumadil Awal 1443 H

Panitia Ujian Munaqasyah Tugas Akhir:

Ketua,

Sekretaris,

Dr. Abd Mulahid Hamdan, M. Sc  
NIP. 198942132014031002

Hendri Ahmadian, M.IM  
NIP.198301042014031002

Penguji II

Penguji II,

Ahmad Iskandar, M.Sc  
NIP.198712042019031011

Mulyadi Abdul Wahid, M.Sc  
NIP. 198011152014031001

Mengetahui:

Dekan Fakultas Sains dan Teknologi  
Universitas Islam Negeri Ar-Raniry Banda Aceh

Dr. Ir. Muhammad Dirhamsyah, M.T., IPU  
NIP. 196210021988111001

## LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Maulidianur  
NIM : 160702051  
Program Studi : Teknik Lingkungan  
Fakultas : Sains dan Teknologi UIN Ar-Raniry Banda Aceh  
Judul Skripsi : Prediksi Harian Curah Hujan Periode 2022-2100 di Daerah Aliran Sungai Krueng Aceh Menggunakan Metode *Statistical Downscaling*

Dengan ini menyatakan bahwa dalam penulisan skripsi ini, saya:

1. Mengerjakan sendiri karya ini dan mampu bertanggung jawab atas karya ini;
2. Karya tulis ini adalah asli dan belum pernah diajukan untuk mendapatkan gelar akademik apapun, baik di Universitas Islam Negeri Ar-Raniry Banda Aceh maupun di perguruan tinggi lainnya;
3. Karya tulis ini adalah merupakan gagasan, rumusan dan penelitian saya sendiri, tanpa bantuan pihak lain kecuali arahan Dosen Pembimbing;
4. Tidak melakukan plagiasi terhadap naskah karya orang lain;
5. Tidak menggunakan karya orang lain tanpa menyebutkan sumber asli atau tanpa izin pemilik karya; dan
6. Tidak memanipulasi dan memalsukan data.

Bila kemudian hari ada tuntutan dari pihak lain atas karya saya, dan telah melalui pembuktian yang dapat dipertanggungjawabkan dan ternyata memang ditemukan bukti bahwa saya melanggar pernyataan ini, maka saya siap dikenai sanksi berdasarkan aturan yang berlaku di Fakultas Sains dan Teknologi UIN Ar-Raniry Banda Aceh.

Banda Aceh, 10 Januari 2022  
Yang Menyatakan,

  
535AKX345377170  
Maulidianur

## **ABSTRACT**

*Name* : Maulidianur  
*NIM* : 160702051  
*Departement* : *Environmental Engineering*  
*Title* : *Prediction of Daily Rainfall for the Period 2022-2100 in the Krueng Aceh River Basin Using the Statistical Downscaling Method*  
*Number of Pages* : 59  
*Advisor I* : Dr. Abd Mujahid Hamdan, M.Sc  
*Advisor II* : Hendri Ahmadian, M.I.M  
*Keywords* : *Rainfall, Climate Change, Statistical Downscaling, projection*

*Rainfall is the most dominant climatic element in characterizing climatic conditions in Indonesia, because rainfall in Indonesia has a high diversity and fluctuation compared to temperature. The process of forming rain is the most difficult process to simulate, so the estimation of climate models in Indonesia is still being developed. by utilizing global climate information, one of which can be obtained from the (Global Circulation Model) GCM. This study predicts changes in rainfall in the Krueng Aceh watershed during the period 2021-2100 using the CanESM2 climate model based on RCP2.6, RCP4.5 and RCP8.5 with the help of Statistical Downscaling Model (SDSM) software. Before doing the projection, first check the accuracy of the rainfall model with observation rainfall with the results of the selection of predictors for the R2 value at the four rainfall station locations showing a value of 0.9, indicating a good relationship between the model and the observed data. rain posts, namely Meteorological Station rainfall data, rainfall data, Climatology Station rainfall data, Cot Irie Post rainfall data and APR BD Krueng Aceh rainfall data using three RCP scenarios namely 2.6, 4.5 and 8.5 to project annual rainfall. 2021-2100 radiative forcing in the time range of 2025, 2050, 2075 and 2100. The results show that rainfall increases at the Climatology Station at RCP 2.6 in the range of 2075 with a rainfall height of 519 mm/day. And a decrease in rainfall occurred at two stations, namely APR BD Krueng Aceh and Cot Irie with the dry month occurring in May. These results will provide important scientific knowledge basic and practical information for water resources, planning and management in the Krueng Aceh watershed.*

## KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kehadirat Allah SWT yang telah melimpahkan Rahmat dan HidayahNya dan ucapan terima kasih kepada segenap keluarga tercinta yang telah banyak memberikan dorongan moral, semangat serta do'a sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul “Prediksi Harian Curah Hujan Periode 2022-2100 di Daerah Aliran Sungai Krueng Aceh Menggunakan Metode *Statistical Downscaling*”.

Tugas Akhir ini telah penulis susun dengan maksimal dan dengan bantuan dari berbagai pihak untuk memenuhi syarat mendapatkan gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Lingkungan Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Ar-Raniry Banda Aceh.

Dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini penulis banyak mendapatkan bantuan dari berbagai pihak dan terima kasih kepada Dosen Pembimbing yang dengan sabar membantu, membimbing dan mengarahkan dalam penyusunan Tugas Akhir ini. Selanjutnya penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Kepada Ayah Tercinta Pak Khaidir yang tanpa lelah mendukung dan memberi doa bagi penulis agar dapat menjalani kehidupan ini lebih baik lagi.
2. Dr. Eng. Nur Aida, M.Si., selaku Ketua Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Ar-Raniry.
3. Husnawati Yahya, M.Sc., selaku Sekretaris dan Koordinator Tugas Akhir Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Sains dan Teknologi.
4. T. Muhammad Ashari, M.Sc., selaku Penasehat Akademik.
5. Dr. Abd Mujahid Hamdan, M.Sc., selaku Pembimbing.
6. Hendri Ahmadian, S.T., M. Eng., selaku Pembimbing.
7. Seluruh dosen bapak/ibu di Program Studi Teknik Lingkungan dan karyawan di Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Ar-Raniry Banda Aceh.
8. Seluruh teman-teman seperjuangan Teknik Lingkungan angkatan 2016 yang telah memberi dukungan bagi penulis.

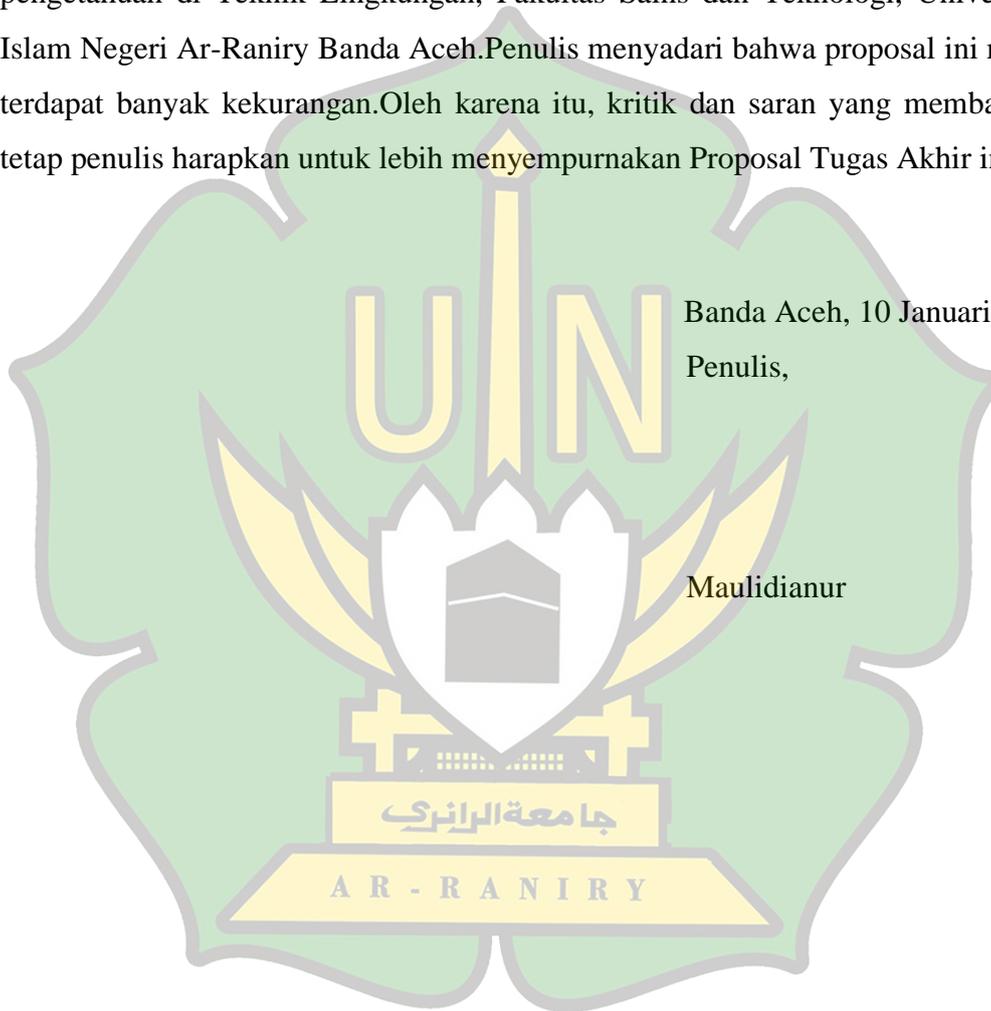
9. Semua pihak yang telah ikut berpartisipasi dan membantu dalam penyusunan.

Akhir kata, penulis berharap Allah SWT., berkenan membalas segala kebaikan dari semua pihak yang telah membantu. Semoga Proposal Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi berbagai pihak khususnya bagi perkembangan ilmu pengetahuan di Teknik Lingkungan, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Ar-Raniry Banda Aceh. Penulis menyadari bahwa proposal ini masih terdapat banyak kekurangan. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun tetap penulis harapkan untuk lebih menyempurnakan Proposal Tugas Akhir ini.

Banda Aceh, 10 Januari 2022

Penulis,

Maulidianur



## DAFTAR ISI

	<b>Halaman</b>
<b>LEMBAR PERSETUJUAN TUGAS AKHIR</b> .....	<b>i</b>
<b>LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR</b> .....	<b>ii</b>
<b>ABSTRAK</b> .....	<b>iii</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>iv</b>
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	<b>v</b>
<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>vii</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN</b> .....	<b>1</b>
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Rumusan Masalah.....	3
1.3. Tujuan Penelitian .....	4
1.4. Manfaat Penelitian .....	4
<b>BAB II TINJAUAN KEPUSTAKAAN</b> .....	<b>5</b>
2.1. Perubahan Iklim.....	5
2.2. Hidrologi Daerah Aliran Sungai.....	7
2.3. Pola Curah Hujan di Indonesia .....	8
2.4. Pemodelan dan Proyeksi Iklim .....	9
2.4.1. GCM ( <i>General Circulation Models</i> ).....	9
2.4.2. <i>Representative Concentration Pathway</i> (RCP) .....	10
2.4.3. <i>Downscaling</i> .....	11
2.4.4. SDSM ( <i>Statistical Downscaling Model</i> ) .....	15
<b>BAB III METODE PENELITIAN</b> .....	<b>18</b>
3.1. Jenis Penelitian .....	18
3.2. Lokasi Penelitian.....	18
3.3. Alat dan Data Penelitian .....	20
3.3.1. Alat .....	20
3.3.2. Data Penelitian.....	20
3.4. Prosedur Penelitian .....	21
3.4.1. Tinjauan Kepustakaan .....	22
3.4.2. Pengumpulan Data .....	223
3.4.3. SDSM ( <i>Statistical Downscaling Model</i> ) .....	24
3.4.4. Evaluasi Model.....	24
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN</b> .....	<b>26</b>
4.1. Pemilihan Variabel Prediktor Pada SDSM.....	26
4.2. Evaluasi Hasil <i>Downscaling</i> Model.....	27
4.3. Perbandingan Curah Hujan Stasiun dan Model.....	29
4.4. Hasil Proyeksi Perubahan Curah Hujan Berdasarkan RCP .....	32
4.4.1. Stasiun APR BD Krueng Aceh.....	32
4.4.2. Stasiun Cot Irie .....	35
4.4.3. Stasiun Meteorologi.....	37

4.5. Deskripsi Proyeksi Curah Hujan pada Daerah Aliran Sungai Krueng Aceh .....	41
<b>BAB V PENUTUP</b> .....	<b>43</b>
5.1. Kesimpulan .....	43
5.2. Saran .....	43
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	<b>44</b>
<b>RIWAYAT HIDUP PENULIS</b> .....	<b>53</b>



## DAFTAR GAMBAR

	<b>Halaman</b>
Gambar 2.1	Skematik setiap komponen pada sistem iklim dan potensi perubahannya ..... 6
Gambar 2.2	Tiga wilayah iklim Indonesia..... 8
Gambar 2.3	Global Circulation Models..... 10
Gambar 2.4	Diagram alir pembentukan skenario iklim..... 16
Gambar 3.1	Lokasi penelitian ..... 18
Gambar 3.2	Peta Prediksi Curah Hujan Harian Periode 2021-2100 di DAS Krueng Aceh dengan Metode Statistical Downscaling..... 19
Gambar 3.3	Bagan alir tahapan penelitian ..... 21
Gambar 4.1	Perbandingan hasil downscaling SDSM untuk rata-rata curah hujan harian yang diamati dan disimulasikan ..... 31
Gambar 4.2	Grafik Proyeksi Perubahan Curah Hujan RCP 2.6, 4.5 dan 8.5 tahun 2021-2100 di Stasiun APR BD Krueng Aceh..... 33
Gambar 4.3	Grafik Proyeksi Perubahan Curah Hujan RCP 2.6, 4.5 dan 8.5 tahun 2021-2100 di Stasiun Cot Irie ..... 36
Gambar 4.4	Grafik Proyeksi Perubahan Curah Hujan RCP 2.6, 4.5 dan 8.5 tahun 2021-2100 di Stasiun Meteorologi..... 38
Gambar 4.5	Grafik Proyeksi Perubahan Curah Hujan RCP 2.6, 4.5 dan 8.5 tahun 2021-2100 di Stasiun Klimatologi ..... 40

## DAFTAR TABEL

	<b>Halaman</b>
Tabel 2.1 Skenario RCP .....	11
Tabel 3.1 Data penelitian .....	20
Tabel 3.2 Daftar variabel predictor yang digunakan pada <i>downscaling</i> .....	23
Tabel 4.1 Pemilihan prediktor menggunakan korelasi parsial dari NCEP .	27
Tabel 4.2 Hasil evaluasi <i>downscaling</i> model.....	28



# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Aktivitas manusia telah mempengaruhi lingkungan selama berabad-abad dan memberikan dampak terhadap masalah lingkungan yang meluas sejak revolusi industri. Hal ini menjadi perhatian utama karena beberapa bukti dari studi mutakhir menjelaskan bahwa faktor antropogenik menjadi penyebab utama dalam pemanasan global secara signifikan, dimana dalam kurun waktu 50 tahun terakhir perkembangan industri terjadi sangat cepat (Surmaini dkk, 2015). Laporan Kajian IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) Ke-5 tahun 2014 atau disebut dengan *Assessment Reports 5* menyebutkan bahwa suhu bumi telah meningkat sekitar  $0,85^{\circ}\text{C}$  selama abad terakhir. Suhu global diperkirakan akan lebih tinggi  $1,8^{\circ}\text{C}$  hingga  $4^{\circ}\text{C}$  pada tahun 2100, dibandingkan rata-rata suhu pada 1980-1999. Pemanasan global (*global warming*) mengakibatkan variabilitas dan perubahan iklim yang akan memberikan dampak buruk untuk berbagai aspek kehidupan.

Perubahan iklim berdampak pada sumber daya air, kuantitas air, siklus hidrologi, kebutuhan air (Vera dkk, 2006) dan pola curah hujan (Rejekiningrum, 2014). Salah satu dampak dari perubahan iklim yaitu pola curah hujan. Perubahan pola curah hujan dapat mengakibatkan penggeseran awal musim yang mana musim kemarau akan berlangsung lebih lama dan musim hujan akan berlangsung dalam waktu singkat dengan kecenderungan intensitas curah hujan yang lebih tinggi dari curah hujan normal yang berdampak terhadap banjir dan tanah longsor (Runtuwunu dan Syahbuddin, 2007). Salah satu isu penting yang menyangkut hajat hidup orang banyak yang dibahas pada workshop yang didanai oleh Uni Eropa melalui proyek *Support to Indonesia's Climate Change Response-Technical Assistance Component (SICCR-TAC)* yaitu masalah ketersediaan air. Maka dalam hal ini kurangnya ketersediaan air ini dapat terjadi jika perubahan iklim berlangsung dalam jangka waktu panjang, sehingga menyebabkan perubahan pada pola curah hujan dan berujung hingga terjadinya perubahan pada aliran sungai dan tampungan air (Ferijal dan Jayanti, 2016).

Curah hujan merupakan unsur iklim yang paling dominan dalam mencirikan kondisi iklim di Indonesia, karena curah hujan di Indonesia memiliki keragaman dan fluktuasi yang tinggi dibandingkan suhu. Adanya hubungan antara siklus hidrologi dan sistem iklim dapat mengakibatkan setiap perubahan iklim akan mempengaruhi salah satu variabel hidrologi utama yaitu curah hujan. Pendugaan model iklim di Indonesia masih terus dikembangkan dengan memanfaatkan informasi iklim global, salah satunya dapat diperoleh dari (*Global Circulation Model*) GCM (Upa dkk, 2021). *Global Circulation Model* (GCM) adalah alat utama untuk memproyeksikan iklim yang merupakan model komputer yang secara matematis mewakili berbagai proses fisik sistem iklim global (Wigena, 2011). GCM dianggap sebagai sumber informasi paling andal yang menyediakan informasi perubahan iklim pada resolusi spasial kasar yaitu dari 100–500 kilometer. GCM tidak dapat secara langsung digunakan karena memiliki kekurangan dalam pemodelannya. Parameter penting untuk studi dampak hidrologi skala regional yaitu seperti curah hujan, topografi, infiltrasi, penguapan dan limpasan tidak terwakili dengan baik dalam GCM karena keterbatasan komputasi dan resolusi spasial yang kasar (Pervez dan Henerbry, 2014). Sehingga diperlukan metode yang dapat memberikan gambaran informasi kajian iklim dalam skala regional dari data GCM yang memiliki skala spasial kasar yang biasa disebut dengan metode *downscaling* (Karamouz dkk, 2010).

*Downscaling* adalah suatu metode untuk mendapatkan informasi tentang perubahan iklim atau iklim beresolusi tinggi dari model iklim global yang relatif kasar. Secara umum terdapat dua metode *downscaling* yang banyak digunakan untuk mengubah informasi skala kasar menjadi skala yang lebih halus yaitu *downscaling* dinamis (fisik) dan statistik (empiris). Metode *dynamical downscaling* dapat menghasilkan informasi skala regional 5 hingga 50 km, metode ini memungkinkannya merepresentasikan lanskap lokal dan kemungkinan proses atmosfer lokal dengan lebih baik. Namun, metode ini memerlukan biaya komputasi yang lebih tinggi dan sangat bergantung pada kondisi batas yang disediakan oleh GCM. *Statistical downscaling* bertujuan membangun hubungan antara variabel iklim skala besar (prediktor) dan cuaca lokal (prediktan).

Penggunaan metode *statistical downscaling* lebih sering digunakan dalam studi dampak hidrologi karena komputasi lebih murah dan mudah diterapkan (Chu dkk, 2010). Ada beberapa teknik yang tersedia untuk *statistical downscaling* yaitu model regresi berganda dan *stochastic weather generator* (Diyabalanage dkk, 2017). Metode yang lebih umum digunakan yaitu *statistical downscaling model* (SDSM) yang menggunakan penggabungan *transfer function* dan *stochastic weather generator* untuk proses *downscaling*. SDSM memperoleh hubungan statistik antara variat atmosfer skala besar (prediktor) dan variat meteorologi skala regional dari prediktor (Wilby dkk, 2004). Selain itu, SDSM memberikan kinerja yang lebih baik dalam menangkap karakteristik curah hujan dan maksimum atau suhu minimum (Hassan dkk, 2014) yang mana nantinya metode ini dapat memberikan gambaran perubahan curah hujan pada suatu DAS yang dalam hal ini yaitu DAS Krueng Aceh.

DAS Krueng Aceh merupakan salah satu DAS yang terletak di Provinsi Aceh. DAS Krueng Aceh membentang dari Kabupaten Aceh Besar hingga Kota Banda Aceh. DAS Krueng Aceh memiliki peran yang sangat penting sebagai sumber air bersih utama bagi penduduk Kota Banda Aeh dan Kabupaten Aceh Besar di Provinsi Aceh. Namun, ketersediaan airnya sudah mulai berkurang dikarenakan oleh beberapa faktor perubahan iklim, serta faktor-faktor lain seperti dampak dari *illegal logging*, *illegal mining*, serta penyalahgunaan lahan di bantaran sungai (Dinas Lingkungan Hidup dan kehutanan, 2018).

Berdasarkan paparan latar belakang di atas maka peneliti ingin melakukan penelitian untuk memprediksi curah hujan harian periode 2022-2100 berdasarkan data *output* GCM di Daerah Aliran Sungai Krueng Aceh menggunakan metode *statistical downscaling* sebagai langkah mitigasi dampak perubahan iklim, curah hujan pada DAS Krueng Aceh.

## **1.2. Rumusan Masalah**

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah bagaimana memprediksi curah hujan harian periode 2022-2100 berdasarkan data *output* GCM di Daerah Aliran Sungai Krueng Aceh menggunakan metode *statistical downscaling*?

### 1.3. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah untuk memprediksi curah hujan harian periode 2022-2100 berdasarkan data *output* GCM di Daerah Aliran Sungai Krueng Aceh menggunakan metode *statistical downscaling*.

### 1.4. Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini dapat memberi pengetahuan dan wawasan baru tentang prediksi curah hujan menggunakan metode *statistical downscaling* serta memberi pengetahuan dan informasi terkait perubahan iklim khususnya perubahan curah hujan pada DAS Krueng Aceh serta mitigasi dampak negatif terhadap perubahan iklim.



## BAB II

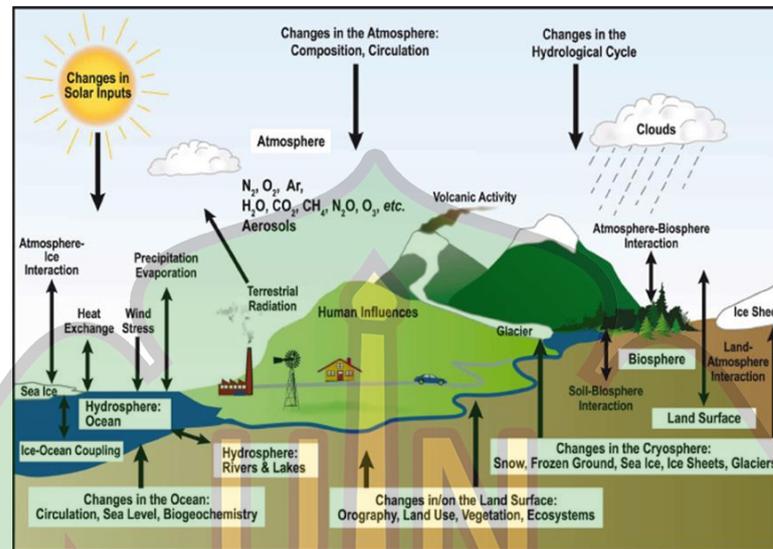
### TINJAUAN KEPUSTAKAAN

#### 2.1. Perubahan Iklim

Menurut Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 32 tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, perubahan iklim adalah berubahnya iklim yang diakibatkan langsung atau tidak langsung oleh aktivitas manusia sehingga menyebabkan perubahan komposisi atmosfer secara global dan selain itu juga berupa perubahan variabilitas iklim alamiah yang teramati pada kurun waktu yang dapat dibandingkan. Perubahan iklim disebut sebagai fenomena perubahan jangka panjang yang terus-menerus dan dapat dideteksi dalam kondisi iklim suatu lokasi. Perubahan berkaitan dengan perubahan sistem atmosfer yang telah mempercepat perubahan temporal dan spasial dalam siklus air serta memperburuk kekurangan air global dan regional (Milly dkk, 2005).

Perubahan iklim yang ditandai dengan kenaikan suhu dan kejadian ekstrem yang lebih sering terjadi seperti gelombang panas, hujan lebat, banjir, kekeringan mendadak, dan kekeringan terus-menerus. Perubahan pada kriosfer, terestrial global juga mengalami perubahan yang melibatkan mundurnya gletser dan degradasi permafrost, yang akan memengaruhi siklus air. Dampak lainnya yaitu dari aktivitas manusia juga mempengaruhi siklus air melalui emisi gas rumah kaca, serta melalui proyek konservasi air dan kegiatan konsumsi air. Pertumbuhan penduduk yang cepat dan peningkatan tingkat konsumsi telah memberikan tekanan yang belum pernah terjadi sebelumnya pada sumber daya air (Dosoogru dkk, 2020). Pada gambar 2.1 adalah sistem iklim di bumi yang menggambarkan interaksi kompleks antara atmosfer, biosfer, litosfer dan hidrosfer. Cuaca dan iklim memiliki hubungan sangat besar terhadap awan, yang merupakan bagian dari siklus hidrologi bumi, yang membawa air dari suatu wilayah ke wilayah lainnya. *Budget* energi bumi juga di dominasi oleh awan yang akan berpengaruh terhadap pertukaran energi panas matahari dalam atmosfer, biosfer, hidrosfer serta permukaan tanah. Awan memiliki dampak besar pada *budget* radiasi bumi, perubahan kecil pada awan pada distribusi awan dapat memberikan dampak

terhadap perubahan iklim, diantisipasi dalam gas rumah kaca, antropogenik aerosol, atau faktor-faktor lain yang terkait dengan perubahan global (Tjasyono, 2007).



**Gambar 2.1** Skematik setiap komponen pada sistem iklim dan potensi perubahannya (sumber: IPCC)

Laporan Kajian IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) tahun 2014 Ke-5 Assessment Reports 5 atau AR5 menyebutkan bahwa suhu bumi telah meningkat sekitar  $0,85^{\circ}\text{C}$  selama abad terakhir. Suhu global diperkirakan akan lebih tinggi  $1,8^{\circ}\text{C}$ –  $4^{\circ}\text{C}$  pada tahun 2100, dibandingkan rata-rata suhu pada 1980-1999. Gas rumah kaca yang dipancarkan sebagai akibat dari pertumbuhan manusia dan industri yang cepat telah ditemukan sebagai alasan paling menonjol di balik perubahan ini. Gas rumah kaca yang dipancarkan di atmosfer menghalangi radiasi gelombang panjang yang dipantulkan oleh permukaan bumi untuk melakukan perjalanan kembali ke ruang angkasa sehingga meningkatkan suhu di dekat dan di sekitar permukaan bumi. Diperkirakan bahwa bumi menerima lebih banyak energi dari matahari daripada yang dilepaskannya setidaknya sejak sekitar tahun 1970. Perubahan budget radiasi bumi mempengaruhi berbagai variabel atmosfer dan iklim.

## 2.2. Hidrologi Daerah Aliran Sungai

Sebagian besar permukaan bumi tertutupi oleh air sebanyak 70,9 % baik berupa perairan darat maupun perairan laut. Perairan darat adalah semua bentuk perairan yang terdapat di darat. Bentuk perairan yang terdapat di darat terdiri dari mata air, air yang mengalir di permukaan dan bergerak menuju ke daerah-daerah yang lebih rendah membentuk sungai, danau, telaga, rawa, dan lain-lain yang memiliki suatu pola aliran yang dinamakan Daerah Aliran Sungai (DAS) (Salsabila dan Nugraheni, 2020). Menurut Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 17 Tahun 2019 tentang Sumber Daya Air, Daerah Aliran Sungai (DAS) adalah suatu wilayah daratan yang merupakan satu kesatuan dengan sungai dan anak-anak sungainya, yang berfungsi menampung, menyimpan, dan mengalirkan air yang berasal dari curah hujan ke danau atau ke laut secara alamiah, yang batas di darat merupakan pemisah topografis dan batas di laut sampai dengan daerah perairan yang masih terpengaruh aktivitas daratan. Daerah Aliran Sungai (DAS) yang merupakan daerah tangkapan air yang menjadi salah satu bagian penting dalam mendukung ketersediaan air di suatu wilayah. Berbagai perubahan yang terjadi di DAS tersebut, baik tutupan lahan (*Land cover/LC*) maupun iklim, akan mempengaruhi perilaku debit pada pola musiman maupun tahunan (Wahyu dkk, 2010).

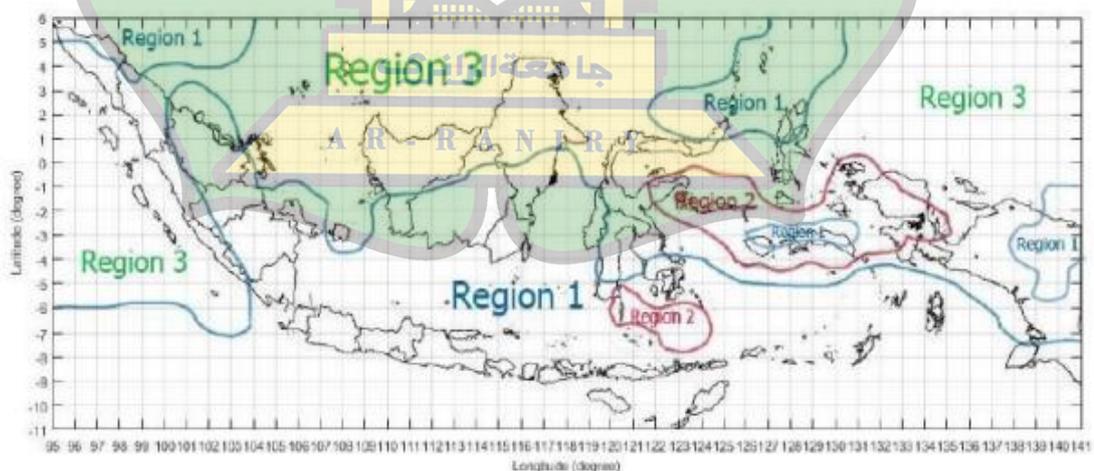
Hidrologi pada suatu DAS yaitu pertukaran air yang terintegrasi yang terjadi di semua wilayah yang menyumbang aliran ke koridor aliran (Letsinger et al., 2021). Pada bagian hulu DAS memiliki karakteristik yang mempunyai ciri-ciri dengan unsur utama seperti jenis tanah, tata guna lahan, topografi, kemiringan dan panjang lereng. Karakteristik biosfer DAS pada bagian hulu dalam merespon curah hujan dapat menjadi pengaruh besar terhadap besar kecilnya evapotranspirasi, infiltrasi, limpasan permukaan, kandungan air tanah dan aliran sungai. Terdapat beberapa faktor yang berperan untuk menentukan sistem hidrologi di atas seperti faktor tata guna lahan, kemiringan serta panjang lereng yang dapat direayasa oleh manusia. Sehingga perubahan tata guna lahan (seperti perubahan dari hutan menjadi lahan pertanian atau perubahan lahan lainnya),

pengaturan kemiringan dan kepanjangan lereng menjadi fokus dalam penataan sistem-sistem hidrologi.

Pengetahuan mengenai sistem hidrologi yang terjadi pada ekosistem DAS akan berguna bagi pengembangan sumber daya air dalam skala DAS. Peran vegetasi pada sistem hidrologi memiliki peran sangat penting, karena kemungkinan adanya campur tangan manusia terhadap unsur tersebut. Dalam hubungannya dengan air, vegetasi dapat merubah sifat fisika dan kimia tanah serta mempengaruhi permukaan tanah sehingga berdampak terhadap besar kecilnya aliran permukaan. Daerah aliran sungai merupakan suatu ekosistem, jika terdapat adanya masukan kedalam ekosistem maka dapat dievaluasi proses yang terjadi maupun dalam sistem hidrologi ini, peran vegetasi sangat penting artinya karena kemungkinan intervensi manusia terhadap unsur tersebut amat besar. Vegetasi dapat merubah sifat fisika dan kimia tanah dalam hubungannya dengan air, dapat mempengaruhi kondisi permukaan tanah dan dengan demikian mempengaruhi besar kecilnya aliran permukaan.

### 2.3. Pola Curah Hujan di Indonesia

Meurut Setiawan (2018) secara umum, pola iklim Indonesia terbagi menjadi tiga pola iklim utama dengan melihat pola curah hujan selama setahun. Adapun klasifikasi iklim Indonesia dapat dilihat pada Gambar 2.2.



**Gambar 2.2.** Tiga wilayah iklim Indonesia. Wilayah 1 (monsoon) tulisan berwarna biru, Wilayah 2 (anti monsoon/lokal) tulisan berwarna merah, Wilayah 3 (semi monsoon/ekuatorial) tulisan berwarna hijau (Setiawan, 2018).

a. Curah Hujan Pola Monsonal

Wilayah 1 memiliki perbedaan yang jelas antara periode musim hujan dan periode musim kemarau dengan plot curah hujan bulanan berbentuk huruf U dimana memiliki kecenderungan hujan pada bulan November sampai Maret dan kemarau pada bulan Maret sampai September (Setiawan, 2018). Berikutnya terjadi periode peralihan atau pancaroba. Pola curah hujan monsonal memiliki sifat unimodial atau satu puncak musim hujan. Tipe curah hujan ini biasanya terjadi pada daerah Sumatra bagian Selatan, Kalimantan Tengah, Kalimantan Selatan, Jawa, Nusa Tenggara, Bali dan Sebagian Papua (Tjasyono, 2004).

b. Curah Hujan Pola Lokal

Wilayah 2 memiliki pola curah hujan bulanan berkebalikan dengan monsoon yaitu berbentuk huruf U terbalik serta cenderung hujan pada bulan Mei sampai Juli (Setiawan, 2018). Pola lokal memiliki sifat unimodial (satu puncak musim hujan), namun bentuk pola curah hujan ini berbeda dengan tipe curah hujan Monsunal. Tipe curah hujan ini terjadi pada daerah Sulawesi, Maluku dan sebagian Papua (Tjasyono, 2004).

c. Curah Hujan Pola Ekuatorial

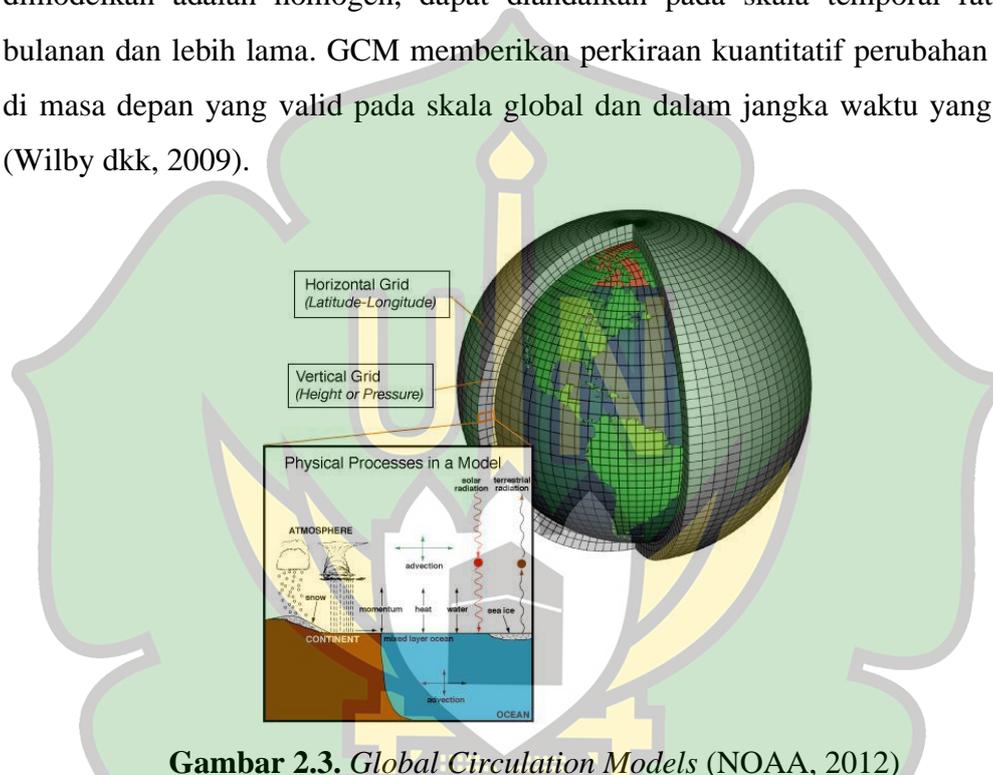
Wilayah 3 memiliki pola hujan bulanan dengan dua puncak yaitu berbentuk huruf M serta cenderung hujan pada bulan Oktober, November, Maret, April dan Mei (Setiawan, 2018). Pola ekuatorial memiliki sifat bimodial (dua puncak hujan) pada bulan maret dan oktober atau saat terjadi ekuinoks. Tipe curah hujan ini terjadi pada daerah pulau Sumatra bagian tengah, Sumatra bagian Utara serta Kalimantan bagian Utara (Tjasyono, 2004).

## 2.4. Pemodelan dan Proyeksi Iklim

### 2.4.1. GCM (*General Circulation Models*)

Model sirkulasi umum (GCM) adalah model yang penting digunakan dalam penilaian perubahan iklim. Model numerik digabungkan mewakili berbagai sistem bumi termasuk atmosfer, lautan, permukaan tanah. Dapat digunakan untuk studi perubahan iklim serta variabilitas yang digunakan untuk memahami iklim saat ini dan skenario iklim masa depan di bawah peningkatan konsentrasi gas rumah kaca (Fowler dkk., 2007). GCM terdiri dari banyak sel grid yang mewakili

area horizontal dan vertikal di permukaan bumi. Di setiap sel, GCM menghitung hal berikut: uap air dan awan, interaksi atmosfer, efek langsung dan tidak langsung aerosol pada radiasi, presipitasi, penyimpanan panas di tanah serta lautan, fluks panas permukaan dan kelembaban. Resolusi spasial GCM umumnya cukup kasar dengan ukuran grid sekitar 100-500 kilometer. Setiap sel grid yang dimodelkan adalah homogen, dapat diandalkan pada skala temporal rata-rata bulanan dan lebih lama. GCM memberikan perkiraan kuantitatif perubahan iklim di masa depan yang valid pada skala global dan dalam jangka waktu yang lama (Wilby dkk, 2009).



**Gambar 2.3.** *Global Circulation Models* (NOAA, 2012)

#### 2.4.2. *Representative Concentration Pathway (RCP)*

Gambaran kondisi iklim di masa mendatang dapat dilakukan dengan skenario (Kasihairani, 2014). Menurut IPCC, skenario bukanlah metode untuk memprediksi masa depan tapi untuk memahami lebih baik ketidakpastian dan gambaran alternatif tentang iklim masa depan untuk menjawab perubahan dari parameter-parameter emisi gas rumah kaca saat ini. Maka jumlah emisi gas rumah kaca di masa depan adalah variabel kunci yang saat ini digunakan para pakar untuk memproyeksi laju perubahan iklim. IPCC telah menyusun beberapa skenario iklim untuk mengetahui proyeksi iklim global dan regional hingga tahun 2100. Skenario iklim merupakan representasi logis mengenai perkembangan masa depan yang koheren dan konsisten terhadap asumsi gas rumah kaca yang akan

datang. IPCC sejauh ini telah mengeluarkan 5 laporan penilaian (*Assignment Report*). Dalam laporan penilaian kelima, IPCC menggunakan skenario yang disebut dengan *Representative Concentration Pathways* (RCP) yang menggambarkan *radiative forcing* yang akan diterima oleh bumi. Menurut Mufti dkk (2017) *Radiative forcing* (RF) adalah ukuran perubahan bersih dalam keseimbangan energi dari sistem bumi dalam menanggapi beberapa gangguan eksternal dalam satuan watt per meter persegi ( $\text{Wm}^{-2}$ ). Selengkapnya dapat dilihat dalam Tabel 2.1.

**Tabel 2.1.** Skenario RCP (Sumber Moss dkk, 2010)

Nama	<i>Radiative forcing</i>	Konsentrasi (ppm)	<i>Pathway</i>
RCP 8.5	>8.5 $\text{W/m}^2$ pada 2100	Setara dengan $\text{CO}_2 >1370$ pada 2100	Meningkat
RCP 4.5	~4.5 $\text{W/m}^2$ stabil setelah 2100	Setara dengan $\text{CO}_2 \sim 650$ stabil setelah 2100	Stabil tanpa melampaui
RCP 2.6	Mencapai ~3 $\text{W/m}^2$ sebelum 2100 dan kemudian turun	Mencapai ~490 setara dengan $\text{CO}_2$ sebelum 2100 dan kemudian turun	Mencapai nilai tertinggi kemudian menurun

#### 2.4.3. Downscaling

Pada GCM tidak menjelaskan heterogenitas skala halus dari variabilitas dan perubahan iklim karena memiliki resolusi kasar. Banyak fitur lanskap seperti pegunungan, badan air, infrastruktur, karakteristik tutupan lahan dan komponen sistem iklim seperti awan konvektif memiliki skala yang jauh lebih halus dari 100–500 kilometer. Heterogenitas tersebut penting untuk yang membutuhkan informasi tentang dampak potensial pada produksi tanaman, hidrologi, distribusi spesies pada skala 10-50 kilometer (Pervez dan Henerbry, 2014). Sehingga diperlukan suatu metode yang dapat mengatasi kekurangan dari GCM ini.

Penanganan kesenjangan antara resolusi model iklim dan proses skala regional yang merupakan masalah bagi penilai dampak perubahan iklim termasuk

penerapan skenario perubahan iklim model hidrologi, komunitas iklim melakukan pengembangan teknik yang dikenal sebagai *downscaling*. Penurunan informasi iklim skala halus didasarkan pada asumsi bahwa iklim lokal dikondisikan oleh interaksi antara karakteristik atmosfer skala besar (sirkulasi, suhu, kelembaban, dll.) dan fitur lokal (badan air, pegunungan, sifat permukaan tanah dll.). Dimungkinkan untuk memodelkan interaksi ini dan membangun hubungan antara iklim lokal saat ini dan kondisi atmosfer melalui proses *downscaling*.

*Downscaling* dapat dilakukan pada aspek spasial dan temporal dari proyeksi iklim. Spasial *downscaling* mengacu pada metode yang digunakan untuk mendapatkan informasi iklim spasial dengan resolusi yang lebih baik dari output GCM dengan resolusi yang kasar, misalnya output GCM sel grid 500 km ke resolusi 20 km, atau bahkan lokasi tertentu. *Downscaling* temporal mengacu pada penurunan informasi temporal skala halus dari output GCM temporal skala kasar (misalnya, urutan curah hujan harian dari jumlah curah hujan bulanan atau musiman). Kedua pendekatan yang dirinci di bawah ini dapat digunakan untuk menurunkan skala keluaran GCM bulanan menjadi informasi pada suatu lokasi (Trzaska dan Schnarr, 2014). Terdapat dua cara utama untuk menggabungkan informasi tentang kondisi lokal dengan proyeksi iklim skala besar yaitu, *dynamical downscaling* dan *statistical downscaling*.

a. *Dynamical downscaling*

*Dynamical downscaling* mengacu pada penggunaan RCM yang digerakkan oleh GCM untuk mensimulasikan iklim regional. RCM mirip dengan GCM tetapi memiliki resolusi lebih tinggi dan informasi regional tambahan, yang memungkinkannya merepresentasikan lanskap lokal dan kemungkinan proses atmosfer lokal dengan lebih baik. Model global mensimulasikan respons sirkulasi global terhadap perubahan komposisi atmosfer melalui sejumlah besar proses, tetapi beberapa di antaranya perlu didekati karena resolusi model yang kasar. Resolusi 25–50 km pada RCM mampu menangkap beberapa proses berskala lebih kecil tersebut secara lebih realistis. Bidang atmosfer (misalnya, tekanan permukaan, angin, suhu dan kelembaban) yang disimulasikan oleh GCM dimasukkan ke dalam batas vertikal dan horizontal RCM. Data spesifik lokal dan

persamaan berbasis fisika kemudian digunakan untuk memproses informasi ini dan memperoleh keluaran iklim regional. Keuntungan utama RCM adalah kemampuannya untuk memodelkan proses atmosfer dan perubahan tutupan lahan secara eksplisit (Gebrechorkos dkk, 2019).

Meskipun demikian pada RCM masih terdapat kekurangan dalam pengaplikasiannya karena sel grid lebih kecil sehingga banyak informasi permukaan serta proses yang dimasukkan dalam RCM membutuhkan komputasi dan memerlukan waktu untuk proyeksi (Wilby dkk, 2009). RCM juga kesulitan dalam mensimulasikan curah hujan konvektif secara akurat, yang menjadi perhatian utama daerah tropis. Sebagian besar RCM juga tidak secara akurat mensimulasikan curah hujan ekstrem bias sistematis yang dapat memburuk saat resolusi meningkat. Koreksi bias statistik sering kali perlu dilakukan agar lebih cocok dengan keluaran model dengan pengamatan (Brown dkk, 2008).

b. *Statistical downscaling*

*Statistical downscaling* melibatkan pembentukan hubungan empiris (antara pengamatan atmosfer skala-besar secara historis dan karakteristik iklim lokal). Selanjutnya hubungan ditentukan dan divalidasi. Kondisi atmosfer skala besar di masa depan yang diproyeksikan oleh GCM digunakan untuk memprediksi karakteristik iklim lokal di masa depan. Dengan kata lain, output GCM skala besar digunakan sebagai prediktor. Didalam *downscaling* yang menjadi prediktor adalah variabel iklim skala besar yang digunakan untuk mendapatkan variabel atau prediktor lokal. Penurunan skala statistik mencakup kelompok metode yang heterogen yang bervariasi dalam kecanggihan dan penerapannya.

Pada metode *statistical downscaling*, GCM merupakan data yang disediakan dalam bentuk *grid*, untuk menentukan domain *grid* yang sesuai merupakan hal penting agar menghasilkan prediksi curah hujan yang akurat. Pada model *statistical downscaling* memberikan hasil prediksi deret waktu yang panjang untuk mempelajari dampak iklim. Persamaan umum untuk model *statistical downscaling* adalah sebagai berikut (Stroch dkk, 2000).

$$Y(txl) = f(X(txg)) \quad (2.1)$$

Keterangan:

- $Y(tx1)$  = Peubah-peubah iklim lokal (curah hujan lokal)  
 $X(txg)$  = Peubah-peubah parameter (iklim hasil GCM)  
 $t$  = Banyaknya waktu (seperti: bulanan ta harian)  
 $g$  = Banyaknya *grid* GCM

Metode *statistical downscaling* dapat diklasifikasikan ke dalam kategori yang berbeda (Wilby dan Dawson, 2007) yaitu:

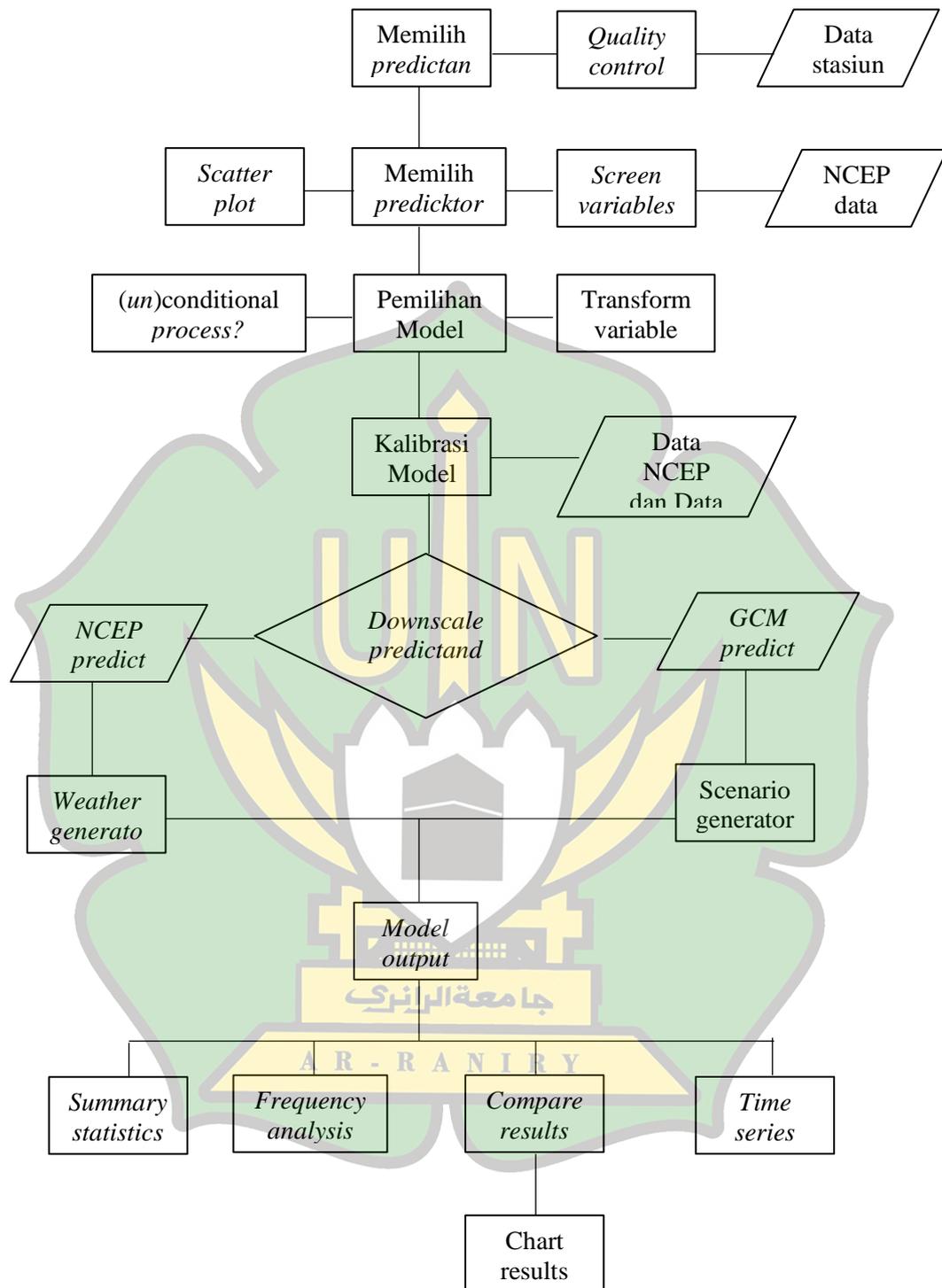
1. *Weather typing*  
*Weather typing* melibatkan pengelompokan data meteorologi lokal dengan pola sirkulasi atmosfer. Konsep skenario perubahan iklim yaitu dari distribusi data yang diamati (bergantung pada pola sirkulasi yang dihasilkan oleh GCM) dengan menghasilkan urutan sintesis pola cuaca. Penurunan pola cuaca didasarkan pada hubungan antara iklim dalam skala besar dan cuaca pada skala lokal.
2. *Stochastic weather generators*  
 Melibatkan modifikasi parameter *weather generator* konvensional seperti WGEN dan LARS-WG. Model WGEN mensimulasikan kejadian presipitasi menggunakan dua keadaan yaitu rantai Markov orde pertama merupakan jumlah presipitasi pada hari-hari basah menggunakan distribusi gamma dan komponen suhu serta radiasi menggunakan autoregresi trivariat orde pertama yang bergantung pada presipitasi. Skenario perubahan iklim dihasilkan secara stokastik menggunakan set parameter yang direvisi yang sesuai dengan output dari GCM. Keuntungan utama dari teknik ini adalah dapat mereproduksi banyak statistik iklim yang diamati dan telah digunakan secara luas, terutama untuk penilaian dampak pertanian. Selain itu, generator cuaca stokastik memungkinkan produksi skenario-skenario besar yang efisien untuk analisis risiko.
3. *Transfer functions*  
*Transfer functions* bergantung pada hubungan empiris antara prediktan skala lokal dan prediktor skala regional. Kelebihan *downscaling transfer*

*functions* adalah aplikasi yang relatif mudah dalam penggunaan hubungan skala yang dapat diamati.

#### **2.4.4. SDSM (*Statistical Downscaling Model*)**

*Statistical Downscaling Model* (SDSM) merupakan perangkat lunak dikembangkan oleh (Wilby dkk, 2002) yang mana telah dikodekan ke perangkat lunak 4.2 yang dapat membuat pekerjaan dalam penggunaan lebih cepat dan mudah. Panduan pengguna SDSM 4.2 menunjukkan bahwa total panjang data untuk kalibrasi dan validasi harus melebihi 30 tahun. Hal ini dianggap akan mampu mewakili kondisi iklim yang sebenarnya termasuk peristiwa iklim ini. SDSM membagi penurunan skala statistic series cuaca harian dalam lima proses yaitu pertama yaitu adanya penyaringan variabel predictor, kedua kalibrasi model, ketiga sintesis terhadap data yang diamati, kemudian yang keempat generasi dari skenario perubahan iklim dan yang terakhir adanya pengujian diagnostik dan statistik analisis (Jin Huang dkk., 2011).

SDSM ini digunakan untuk menghasilkan skenario iklim lokal di masa depan dengan parameter seperti curah hujan dan suhu yang dapat digunakan untuk menilai dampak perubahan iklim. Model ini memiliki hubungan empiris antara data prediksi dan observasi dan prediktor NCEP dijabarkan dengan menggunakan pendekatan regresi dan stokastik. Proses pemodelan SDSM ini diperlukan dua jenis deret waktu: deret waktu yang diamati dan deret waktu prediktor (Huang et al., 2011). Dataset pertama terdiri dari daerah yang diprediksi seperti suhu dan curah hujan dan dataset kedua merupakan prediktor dari model iklim skala global. Selengkapnya dapat dilihat pada Gambar 2.4 di bawah.



**Gambar 2.4.** Diagram alir pembentukan skenario iklim

Adapun tujuh langkah utama dalam mengaplikasikan SDSM (Wilby dan Dawson, 2007) yaitu:

1. **Kontrol kualitas dan transformasi data**  
Data yang hilang atau tidak lengkap akan dilakukan pemeriksaan kontrol kualitas pada SDSM untuk identifikasi kesalahan data sebelum kalibrasi model.
2. *Screening of downscaling predictor variables*  
Pemilihan prediktor *downscaling* yang sesuai untuk menentukan karakter skenario iklim.
3. **Kalibrasi Model**  
Menentukan prediksi yang ditentukan dengan variabel prediktor dan menghitung parameter persamaan regresi berganda melalui algoritma optimasi.
4. *Weather generator*  
*Weather Generator* menghasilkan rangkaian waktu sintesis dari curah hujan dan prediktor atmosfer yang diamati.
5. **Analisis Data**  
Untuk pemeriksaan skenario yang telah dilakukan *downscaling*.
6. **Analisis grafis**  
Terdapat tiga opsi untuk analisis grafis disediakan oleh SDSM yaitu analisis frekuensi (memplot statistik nilai ekstrim dari file data yang dipilih), membandingkan hasil (memplot statistik harian untuk menentukan file input yang diperlukan) dan analisis deret waktu.
7. *Scenario generation*  
Menghasilkan rangkaian waktu sintesis dari curah hujan yang diberikan variabel prediktor atmosfer yang tersedia dalam model iklim skenario iklim dalam klimatologi.

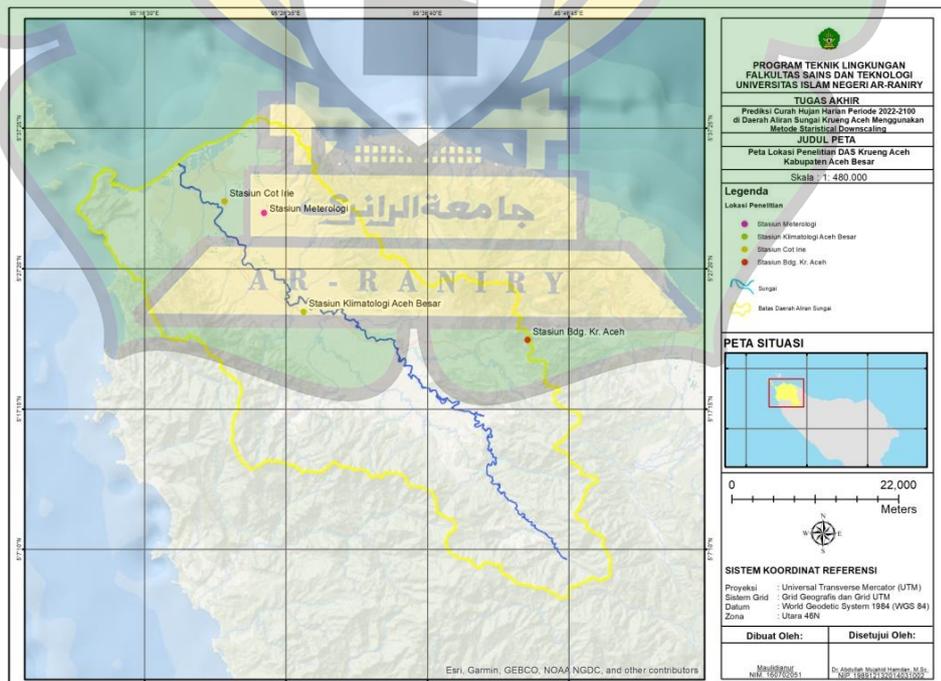
## BAB III METODE PENELITIAN

### 3.1. Jenis Penelitian

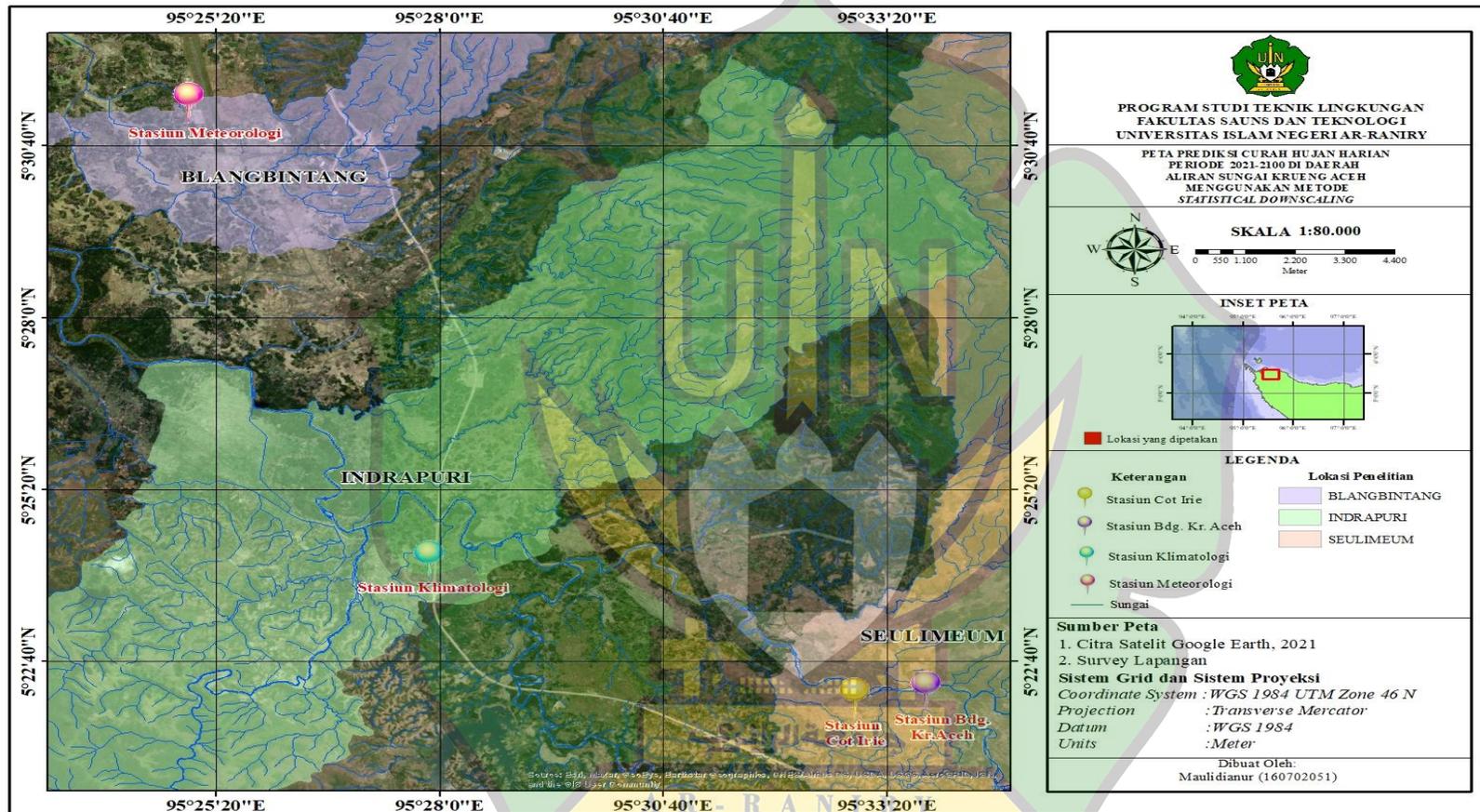
Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah pemodelan. Pemodelan dilakukan dengan menggunakan metode studi literatur dan komputasi dengan metode numerik sebagai pendekatan penelitian. Studi literatur dilakukan untuk mempelajari pemodelan dengan *software* SDSM 4.2 (*Statistical Downscaling Model*).

### 3.2. Lokasi Penelitian

Lokasi yang penelitian adalah DAS Krueng Aceh yang secara administratif terletak di Kota Banda Aceh dan Kabupaten Aceh Besar. DAS Krueng Aceh memiliki luas 1.780 km<sup>2</sup> dengan sungai utama Krueng Aceh sepanjang kira-kira 113 km (Gambar 3.1). Berdasarkan letak geografisnya DAS Krueng Aceh berada pada posisi 5°5' 40'' Lintang Utara (LU) dan 95,15° 95' 40'' Bujur Timur (BT). DAS Krueng Aceh memiliki fisiografi datar, bergelombang, berbukit dan bergunung yang secara umum berada di Kabupaten Aceh Besar.



**Gambar 3.1. Peta Lokasi Penelitian**



**Gambar 3.2.** Peta Prediksi Curah Hujan Harian Periode 2021-2100 di DAS Krueng Aceh dengan Metode Statistical Downscaling  
(Sumber: pengolahan penulis melalui software Arcgis)

### 3.3. Alat dan Data Penelitian

#### 3.3.1. Alat

Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah seperangkat komputer dengan Operating System berbasis Windows dengan software SDSM 4.2 (*Statistical Downscaling Model*) yang diunduh dari <http://www.sdsm.org.uk>.

#### 3.3.2. Data Penelitian

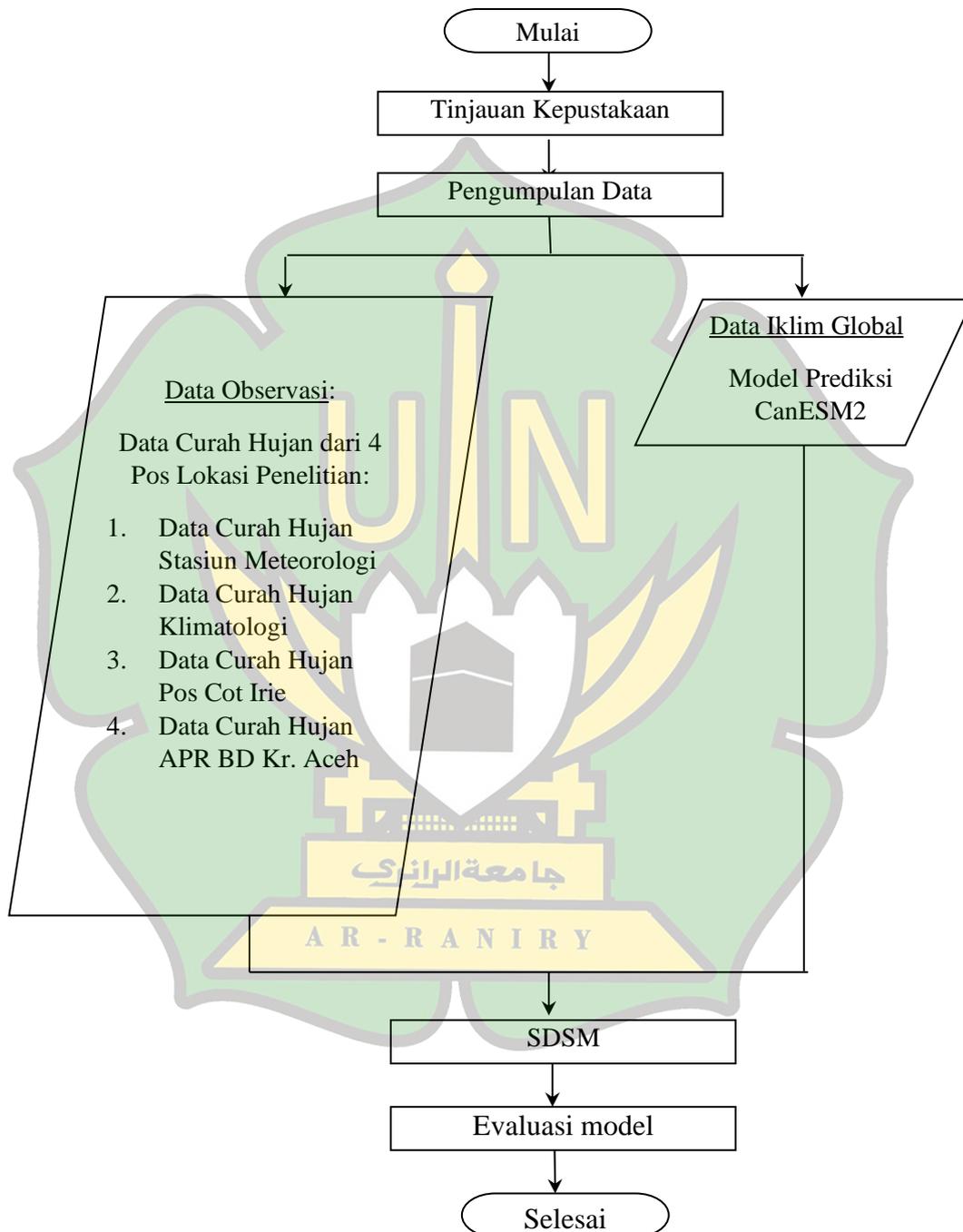
Dalam penelitian ini melakukan penelitian perubahan iklim pada daerah observasi yaitu dari 4 titik pos curah hujan dan melakukan *statistical downscaling* pada hasil yang diperoleh dari informasi iklim global GCM (*Global Circulation Model*). Daftar data dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 3.1 di bawah.

**Tabel 3.1.** Data Penelitian

	<b>Data</b>	<b>Format Data</b>	<b>Sumber</b>
<b>Data Observasi</b>	Data Curah Hujan Meteorologi	.xls	Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG)
	Data Curah Hujan Klimatologi	.xls	Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG)
	Data Curah Hujan Pos Cot Irie	.xls	Balai Wilayah Sungai Sumatera I (BWSS-I)
	Data Curah Hujan APR BD Kr. Aceh	.xls	Balai Wilayah Sungai Sumatera I (BWSS-I)
<b>Data Iklim Global</b>	Model Prediksi CanESM2	.dat	<a href="https://climate-scenarios.canada.ca/?page=pred-canesm2">https://climate-scenarios.canada.ca/?page=pred-canesm2</a>

### 3.4. Prosedur Penelitian

Prosedur-prosedur yang akan dikerjakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3.3.



**Gambar 3.3.** Bagan alir tahapan penelitian

### 3.4.1. Tinjauan Kepustakaan

Tinjauan kepustakaan merupakan langkah pertama yang dilakukan dalam penelitian. Tinjauan kepustakaan dilakukan dengan mengkaji berbagai literatur untuk memperoleh materi dan teori yang mendukung sebagai panduan dasar penelitian dan sebagai rujukan untuk memperkuat argumentasi yang ada. Sumber literatur yang digunakan sebagai tinjauan kepustakaan dapat berupa buku, jurnal, artikel ilmiah, dokumen atau arsip yang relevan dengan objek yang ingin diteliti.

### 3.4.2. Pengumpulan Data

Penelitian ini menggunakan dua jenis yaitu data curah hujan daerah observasi dan data curah hujan global. Data curah hujan daerah observasi sebanyak 4 titik pos hujan yaitu: data curah hujan Stasiun Meterologi, data curah hujan Stasiun Klimatologi, data curah hujan Pos Cot Irie dan data curah hujan APR BD Kr. Aceh. Data tersebut diperoleh dari Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) dan Balai Wilayah Sungai Sumatera I (BWSS-I).

Data iklim global (GCM) diperoleh dari *website* <https://climate-scenarios.canada.ca/?page=pred-canesm2>. Data GCM dalam penelitian ini menggunakan model *Canadian Earth System Model (CanESM2)* generasi kedua diterapkan untuk memprediksi variabel iklim masa depan. Model iklim global ini merupakan gabungan generasi keempat yang dikembangkan oleh *Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis (CCCma)* dari *Environment Canada*. Dalam proses *downscaling* presipitasi, penting untuk rangkaian predictor variabel yang menggambarkan sirkulasi, stabilitas, ketebalan dan kandungan kelembaban. Predictor digunakan untuk kalibrasi dan validasi model. Predictor adalah variabel skala besar yang disimpan pada arsip GCM. Predictor harus secara konseptual dan logis dengan prediktan yang diamati. Selain itu, harus ada korelasi yang konsisten dan kuat antara predictor dan prediktan untuk membantu pemodelan realistik oleh GCM.

Terdapat sebanyak 26 predictor (lihat Tabel 2) dari National Centers for Environmental Prediction (NCEP) digunakan untuk kalibrasi model dan National Center for Atmospheric Research (NCAR) dataset analisis ulang CanESM2. Predictor NCEP (1961–2005) digunakan untuk kalibrasi model dan predictor

CanESM2 (1961–2100) digunakan sebagai validasi model serta menghasilkan iklim masa depan. Disediakan dengan resolusi spasial yang sama dari  $2.8125^\circ$  (270 Km), masing- masing dengan garis lintang dan garis bujur yang seragam. Keempat stasiun curah hujan tersedia dalam satu kotak GCM (Box\_35X\_34Y) dalam proses *downscaling*. Sementara prediktor yang diturunkan CanESM2 tersedia di bawah skenario tiga *Representative Concentration Pathways* (RCPs) 2.6, 4.5, 8.5 yang ditujukan untuk memproyeksikan skenario iklim masa depan (2006–2100) dari gangguan antropogenik yang dimulai dari skenario emisi rendah yang ditandai dengan adanya mitigasi aktif dari manusia (RCP 2.6), skenario emisi sedang yang dimaknakan dengan adanya upaya manusia untuk mengurangi emisi gas rumah kaca (RCP 4.5), skenario emisi tinggi yang ditandai adanya upaya manusia untuk mengurangi emisi gas rumah kaca (RCP 8.5) (Siabi dkk., 2021). RCP mengasumsikan bahwa distribusi konsentrasi rangkaian lengkap gas rumah kaca (GRK), aerosol, aktif secara kimia gas dan penggunaan lahan/tutupan lahan meluas hingga 2100 (Moss dkk, 2008). Angka setiap RCP 2.6, 4.5 dan 8.5 memiliki satuan  $W/m^2$  yang mana nilai ini mengacu pada nilai gaya radiasi yang digunakan untuk mengklasifikasikan tingkat rendah, sedang dan tinggi (Meinshausen dkk, 2011).

**Tabel 3.2.** Daftar variabel prediktor yang digunakan pada *downscaling*

No.	Long-name	Short name
1	Mean sea level pressure	Mslp
2	Surface airflow strength	p1_f
3	Surface zonal velocity	p1_u
4	Surface meridional velocity	p1_v
5	Surface vorticity	p1_z
6	Surface Wind Direction	p1th
7	Surface divergence	p1zh
8	500 hPa airflow strength	p5_f
9	500 hPa zonal velocity	p5_u
10	500 hPa meridional velocity	p5_v
11	500 hPa vorticity	p5_z

12	<i>500 hPa geopotential height</i>	p500
13	<i>500 hPa Wind Direction</i>	p5th
14	<i>500 hPa divergence</i>	p5zh
15	<i>850 hPa airflow strength</i>	p8_f
16	<i>850 hPa zonal velocity</i>	p8_u
17	<i>850 hPa meridional velocity</i>	p8_v
18	<i>850 hPa vorticity</i>	p8_z
19	<i>850 hPa geopotential height</i>	p850
20	<i>850 hPa Wind Direction</i>	p8th
21	<i>850 hPa divergence</i>	p8zh
22	<i>Precipitation</i>	prcp
23	<i>Specific humidity at 500</i>	hPa
24	<i>Specific humidity at 850</i>	hPa
25	<i>Surface specific humidity</i>	shum
26	<i>Mean temperature at 2 m</i>	temp

### 3.4.3. SDSM (Statistical Downscaling Model)

*Downscaling* data iklim global ke tingkat lokal dilakukan oleh SDSM perangkat lunak yang diunduh secara gratis dari <http://www.sdsm.org.uk>. Digunakan untuk mengembangkan hubungan kuantitatif antara GCM skala besar (prediktor) dan variabel *predictand* lokal (misalnya curah hujan dan suhu), yang diamati dari data stasiun meteorologi berdasarkan pendekatan regresi dan stokastik. Variabel *predictand* yang digunakan dalam penelitian ini adalah curah hujan.

### 3.4.4. Evaluasi Model

Pada SDSM terdapat beberapa metode perbandingan statistik dan grafis (parameter umum dan kondisional) tersedia untuk membandingkan model dan data yang diamati. Metode statistik generik meliputi mean, maksimum, varians dan rentang ekstrim, sedangkan metode kondisional meliputi persentase dan standar deviasi periode basah dan kering. Dalam penelitian ini, selain metode statistik model, metode evaluasi model yang paling banyak digunakan yaitu

koefisien determinasi ( $R^2$ ), Persen bias ( $P_{bias}$ ), dan Root Mean Square Error (RMSE).  $R^2$  (Persamaan 1) digunakan untuk menunjukkan kesesuaian data model dibandingkan dengan data observasi. Nilai  $R^2$  berkisar dari 0 hingga 1 dan 1 menunjukkan kesesuaian sempurna antara data model dengan data yang diamati.  $P_{bias}$  (Persamaan 2) menunjukkan kecenderungan keluaran model lebih kecil atau lebih besar dari data yang diamati. Semakin kecil nilai  $P_{bias}$  (misalnya 0,0), semakin akurat modelnya. Di sisi lain, RMSE (Persamaan 3) adalah merupakan indikator yang menunjukkan standar deviasi model dalam menghasilkan data yang diamati. Nilai RMSE yang lebih kecil menunjukkan model yang paling akurat (Gebrechorkos dkk, 2019).

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (3.1)$$

$$P_{bias} = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - Y_i)}{\sum_{i=1}^N X_i} \times 100\% \quad (3.2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - Y_i)^2}{N}} \quad (3.3)$$

Dengan  $X_i$  dan  $Y_i$  adalah data yang diamati dan model masing-masing, dari peristiwa ke- $i$  dalam jumlah  $N$  peristiwa, dan  $\bar{X}$  dan  $\bar{Y}$  adalah rata-rata dari data yang diamati dan model.

## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1. Pemilihan Variabel Prediktor Pada SDSM

Pemilihan variabel prediktor pada SDSM untuk mengidentifikasi hubungan empiris antara prediktor (data iklim global) dan *prediktands* pada skala lokal (curah hujan daerah observasi). Terdapat 26 variabel prediktor skala besar (gambar 3.2) yang mewakili kondisi iklim saat ini terdapat dalam NCEP. Pemilihan prediktor skala besar dari model yang paling relevan berdasarkan menggunakan varians, analisis korelasi, korelasi parsial dan plot sebar (Khan dkk, 2006). Statistik korelasi dan nilai P digunakan untuk menjelaskan kekuatan hubungan antara prediktor dan *prediktands*. Nilai korelasi yang lebih besar mewakili derajat asosiasi yang lebih tinggi dan nilai P yang lebih kecil menggambarkan peluang yang lebih baik hubungan antar variabel. Namun, jika nilai P tinggi menandakan bahwa hubungan antara prediktor-*predictands* terjadi secara kebetulan. Berdasarkan korelasi parsial dan nilai-P, rangkaian variabel prediktor terbaik dipilih. Model persamaan menunjukkan bahwa data observasi dan data model GCM mempunyai hubungan korelasi yang signifikan ( $p\text{-value} < 0.05$ ) dengan tingkat kepercayaan 95%. Sehingga model yang diperoleh dapat digunakan untuk proyeksi. Data proyeksi nantinya dibandingkan dengan data observasi untuk mengetahui sejauh mana perubahan yang terjadi.

Prediktor ini digunakan sebagai indeks dalam menentukan nilai prediksi penurunan curah hujan. Prioritas Penurunan curah hujan diberikan pada rangkaian prediktor yang berisi variabel yang menggambarkan sirkulasi, stabilitas, ketebalan dan kandungan kelembaban (Siabi dkk., 2021). Hasil evaluasi variabel prediktor sangat bergantung pada keakuratan data curah hujan dan lama periode pencatatan curah hujan di lokasi yang digunakan. Sehingga banyaknya jumlah data dalam melakukan *downscaling*, akan menghasilkan evaluasi variabel prediktor semakin akurat dan prediksi curah hujannya akan semakin mendekati kondisi nyatanya. Pada penelitian ini data curah hujan harian yang digunakan dari tahun 1991-2020.

Hasil dari pemilihan variabel prediktor yang diidentifikasi untuk menurunkan curah hujan dari semua stasiun yang digunakan dalam penelitian ini

adalah *vortisitas*, *500 hPa geopotential height*, *mean temperature at 2 m*, *divergence* dan *near Surface Specific Humidity*. Sedangkan frekuensi penggunaan tertinggi dalam percobaan ini yaitu pada variabel prediktor *vorticity* ditunjukkan dengan nilai 0,074 di stasiun Meteorologi. Hasil ini diperoleh dari analisis korelasi dan korelasi parsial antara curah hujan harian dan 26 variabel individu atmosfer NCEP di stasiun yang berbeda yang menunjukkan adanya perbedaan. Secara umum, korelasi antara variabel prediktor tidak menghasilkan nilai yang maksimum (tinggi atau mendekati nilai 1) dalam hal curah hujan harian. Data NCEP ini seharusnya diinterpolasi untuk menyesuaikan resolusinya namun data perubahannya dapat diunduh langsung dari internet (Jin Huang dkk., 2011). Oleh karena itu, variabel prediktor yang telah diidentifikasi untuk menurunkan curah hujan ada lima variabel prediktor (Tabel 4.1) yang mana menunjukkan nilai korelasi yang lebih tinggi antara beberapa variabel prediktor lainnya. Variabel prediktor terpilih inilah nantinya yang akan digunakan untuk memvalidasi model serta menghasilkan proyeksi masa depan (Siabi dkk., 2021).

**Tabel 4.1.** Hasil pemilihan prediktor menggunakan korelasi parsial dari 26 variabel individu atmosfer NCEP

Stasiun Curah Hujan	Prediktor	Korelasi parsial	P value
Stasiun Klimatologi	<i>Vorticity</i>	0.067	0.0000
	<i>500 hPa geopotential height</i>	-0.083	0.0000
	<i>Mean temperature at 2 m</i>	-0.086	0.0000
Stasiun Meteorologi	<i>Vorticity</i>	0.074	0.0000
	<i>500 hPa geopotential height</i>	0.065	0.0000
	<i>Divergence</i>	0.052	0.0000
	<i>Near Surface Specific Humidity</i>	0.069	0.0000
Stasiun APR BD Krueng Aceh	<i>Mean temperature at 2 m</i>	-0.076	0.0000
Stasiun Cot Irie	<i>Vorticity</i>	0.069	0.0000
	<i>Mean temperature at 2 m</i>	-0.073	0.0000

#### 4.2 Evaluasi Hasil Downscaling Model

Setelah ditentukan variabel prediktor, kemudian dilakukan evaluasi lebih lanjut keakurasiannya (Siabi dkk., 2021) dan menentukan kinerja dari hasil

*downscaling model* dengan menggunakan metode perbandingan statistik dan grafis (parameter umum dan kondisional) yang tersedia untuk membandingkan hasil model dan data curah hujan pada daerah yang diamati. Penelitian ini menggunakan metode statistik berupa Pbias,  $R^2$  dan RMSE. Selengkapnya dapat dilihat pada Tabel 4.2 di bawah.

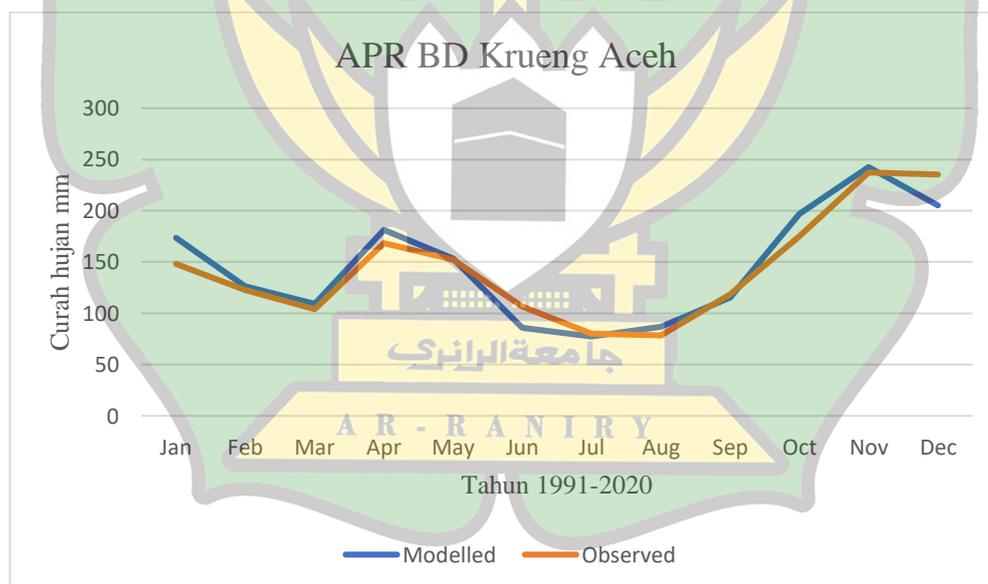
**Tabel 4.2.** Hasil Evaluasi *downscaling model*

Stasiun	$R^2$	Pbias	RMSE
Stasiun Klimatologi	0.969872014	96.70286	39.09438
Stasiun Meteorologi	0.996314638	17.45072	7.470483
Stasiun APR BD Krueng Aceh	0.95660404	1.543614	4.413239
Stasiun Cot Irie	0.990881453	8.696574	6.008654

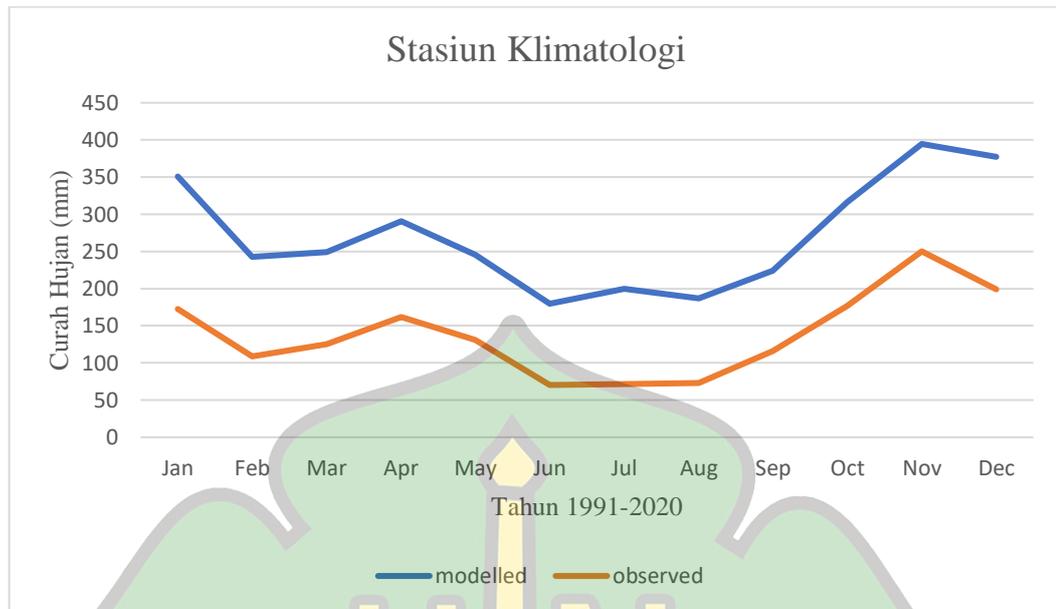
Berdasarkan Tabel 4.2 di atas dapat dilihat hasil yang diperoleh dari evaluasi SDSM pada uji koefisien determinasi menunjukkan nilai dengan rata-rata dari keempat stasiun mendekati 1, maka dalam hal ini terdapat kesesuaian terhadap data model dan data yang diamati atau dengan kata lain dapat dikatakan bahwa model ini mampu memprediksi data yang diamati tanpa adanya perbedaan yang berarti. Pbias dari keempat stasiun tersebut menunjukkan nilai pada rentang 1.543614 sampai 96.70286 dimana dalam SDSM lebih besar perkiraannya (melebihi) dari data yang diamati, karena seharusnya Pbias akan lebih akurat ketika nilai mendekati 0. Sedangkan hasil uji RMSE pada keempat stasiun, standar deviasi model dalam mensimulasikan data yang diamati memiliki rentang nilai yang berkisar 4,413239 sampai 39,09438 di keempat stasiun. Nilai hasil uji RMSE ini menunjukkan adanya perbedaan antara nilai yang diamati dengan yang disimulasikan. Hal ini dikarenakan nilai RMSE 0 yang dapat mewakili kecocokan yang sempurna antar data. Sehingga, berdasarkan hasil uji  $R^2$ , Pbias dan RMSE dalam evaluasi ini menunjukkan kinerja SDSM yang tidak memuaskan dalam mensimulasikan curah hujan (Getachew dan Manjunatha, 2021).

### 4.3 Perbandingan Curah Hujan Stasiun dan Model

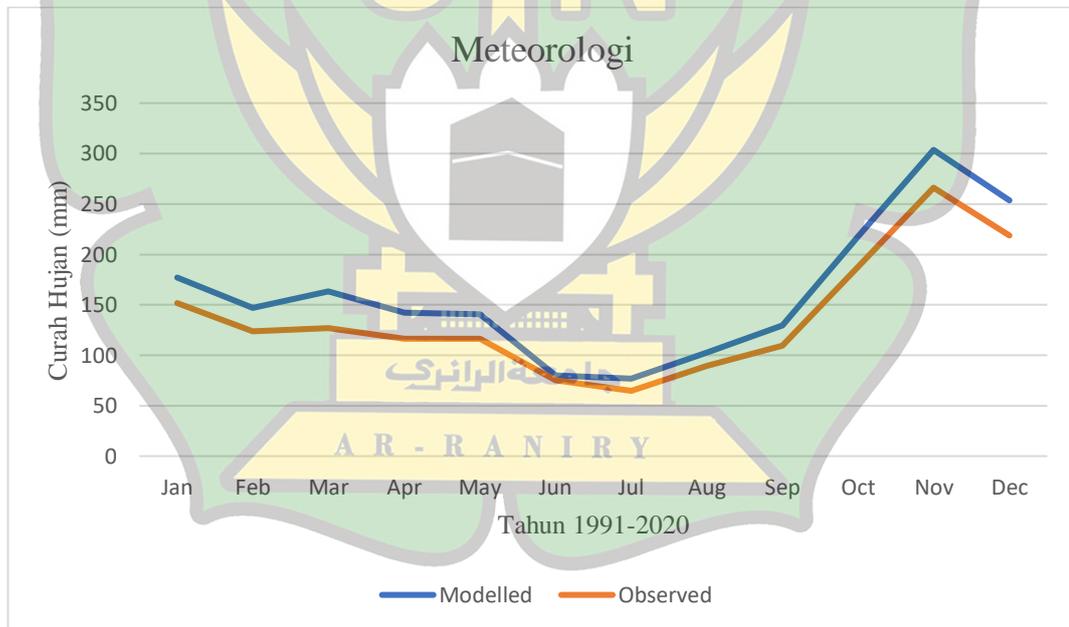
Grafik perbandingan antara data curah hujan pada empat stasiun dengan model yang telah dilakukan *downscaling* menggunakan model CanESM2 dapat dilihat pada Gambar 4.1 a sampai d di bawah. Rata-rata bulanan curah hujan harian menunjukkan hasil yang baik pada stasiun APR BD Krueng Aceh yang mana memiliki selisih terendah yaitu sebesar 2 mm untuk periode 30 tahun sedangkan stasiun lain memiliki perbedaan tertinggi yaitu 133,5 mm per hari untuk periode 30 tahun yang telah disimulasikan. Selain itu, saat evaluasi *downscaling* model untuk mengetahui lebih lanjut keakurasian model, pada stasiun APR BD Krueng Aceh mendapati nilai Pbias dan RMSE yang paling kecil (mendekati 0) dari pada ketiga stasiun lainnya, sehingga kondisi ini yang membuat selisih perbedaan curah hujan yang ada pada model dan data yang diamati tidak besar selisihnya.



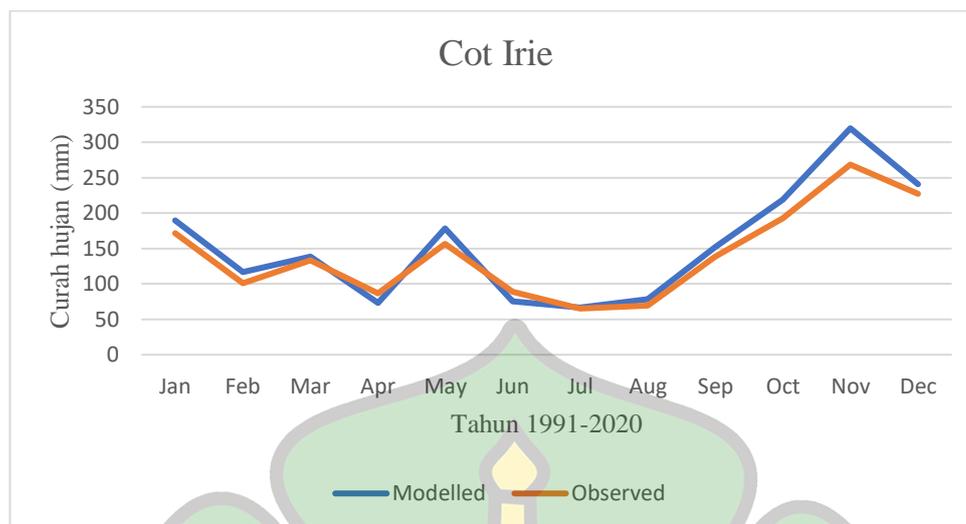
a)



b)



c)



d)

**Gambar 4.1.** Perbandingan hasil *downscaling* SDSM untuk rata-rata curah hujan harian yang diamati dan disimulasikan

Lain halnya dengan yang terjadi pada stasiun Klimatologi (Gambar 4.1.b). Korelasi antara data curah hujan stasiun Klimatologi dan model menunjukkan hubungan yang kurang kuat jika dibandingkan dengan ketiga stasiun lainnya. Hal ini dapat disebabkan karena pada saat evaluasi *downscaling* dilakukan, tepatnya uji nilai Pbias dan RMSE pada stasiun Klimatologi menunjukkan nilai yang paling tinggi (berkali lipat) (Tabel 4.2) dibandingkan stasiun APR BD Krueng Aceh, Meteorologi dan Cot Irie. Sehingga, kondisi ini yang menyebabkan *downscaling model* yang disimulasikan lebih besar perkiraannya (melebihi) dari data awal. Dengan kata lain, SDSM yang telah disimulasikan tidak baik untuk penurunan hujan selama periode kalibrasi dan validasi di stasiun Klimatologi.

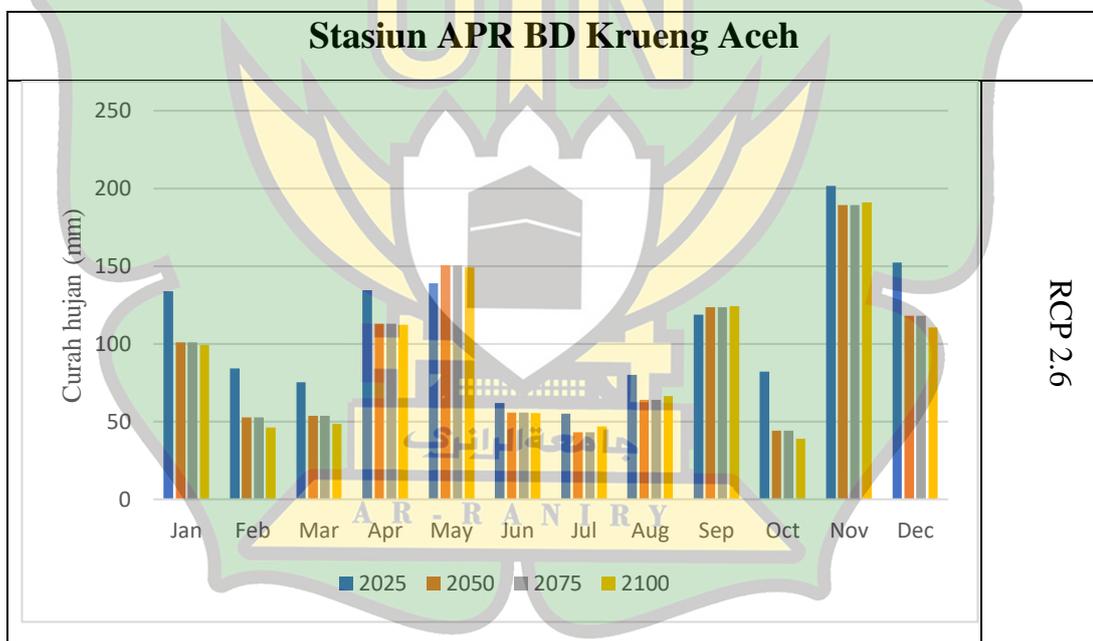
Seperti halnya yang terjadi pada penelitian yang dilakukan oleh Getachew dan Manjunatha (2021) yang berjudul “Proyeksi dan Tren perubahan Iklim yang Disimulasikan dari Model CMIP5 untuk Sub Cekungan Danau Tana, Lembah Atas Sungai Nil Biru, Ethiopia”, dikatakan bahwa saat dilakukan evaluasi *downscaling* nilai RMSE di semua stasiun melebihi angka 0, sehingga *downscaling* tidak dilakukan dengan baik untuk penurunan curah hujan dibandingkan suhu. Hal inilah yang membuat grafik perbandingan curah hujan harian pada stasiun Klimatologi terlihat berbeda dari ketiga stasiun lainnya dan

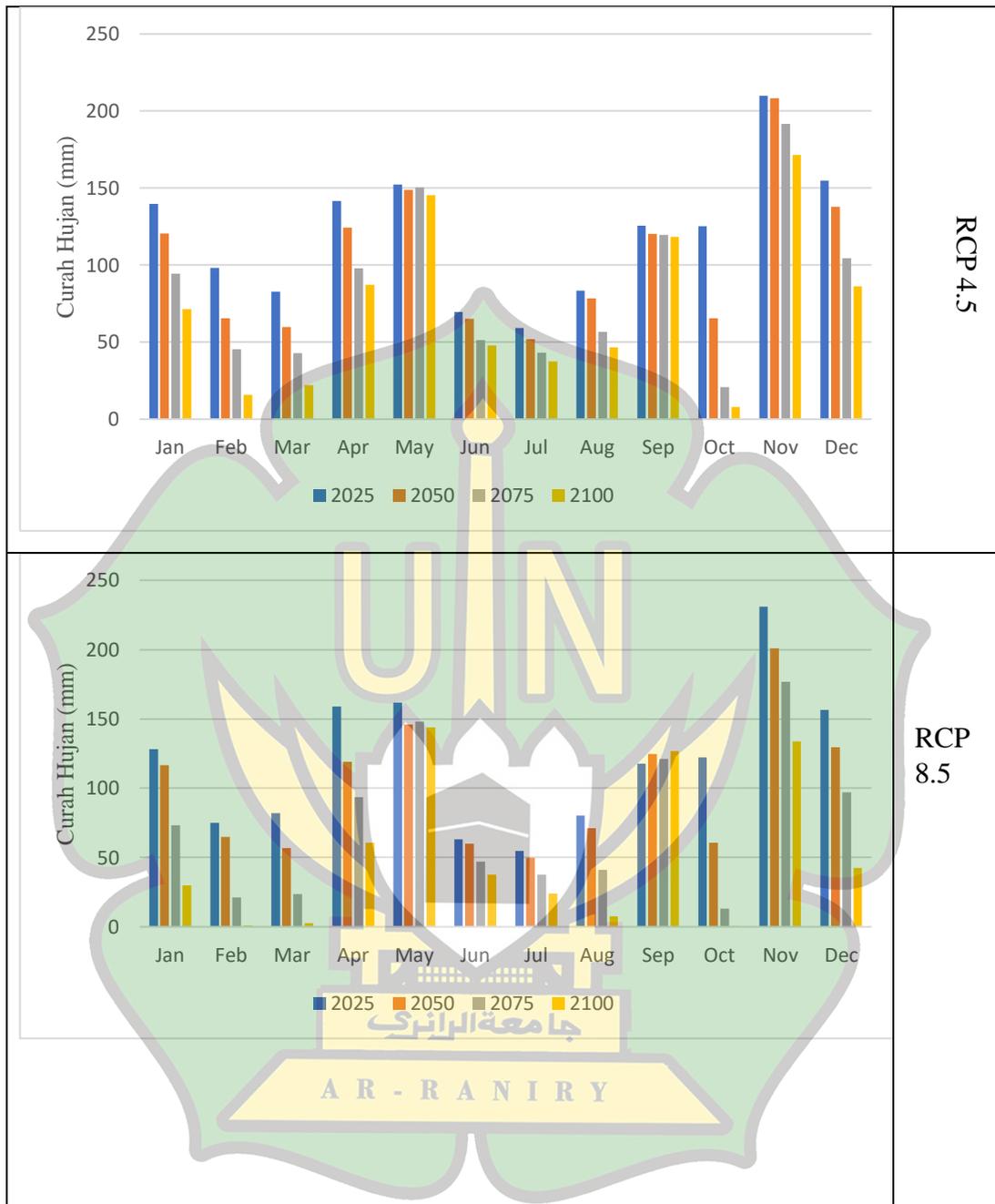
berimbang terhadap selisih rata-rata curah hujan harian yang tinggi di daerah observasi dan data yang ada pada model.

#### 4.4 Hasil Proyeksi Perubahan Curah Hujan Berdasarkan RCP

Penelitian ini menggunakan model *Canadian Earth System Model* (CanESM2) generasi kedua yang diterapkan untuk memprediksi perubahan curah hujan untuk periode 2021-2100 dari data skenario RCP 2.6, RCP 4.5 dan RCP 8.5 periode 2021 sampai 2100, sehingga diperoleh proyeksi curah hujan tahun 2021-2100 menggunakan aplikasi *Statistical Downscaling Model* (SDSM4.2). Data curah hujan lokasi penelitian di DAS Krueng Aceh terdapat empat stasiun curah hujan yaitu stasiun curah hujan APR BD Krueng Aceh, Stasiun Cot Irie, Stasiun Klimatologi dan Stasiun Meteorologi.

##### 4.4.1 Stasiun APR BD Krueng Aceh





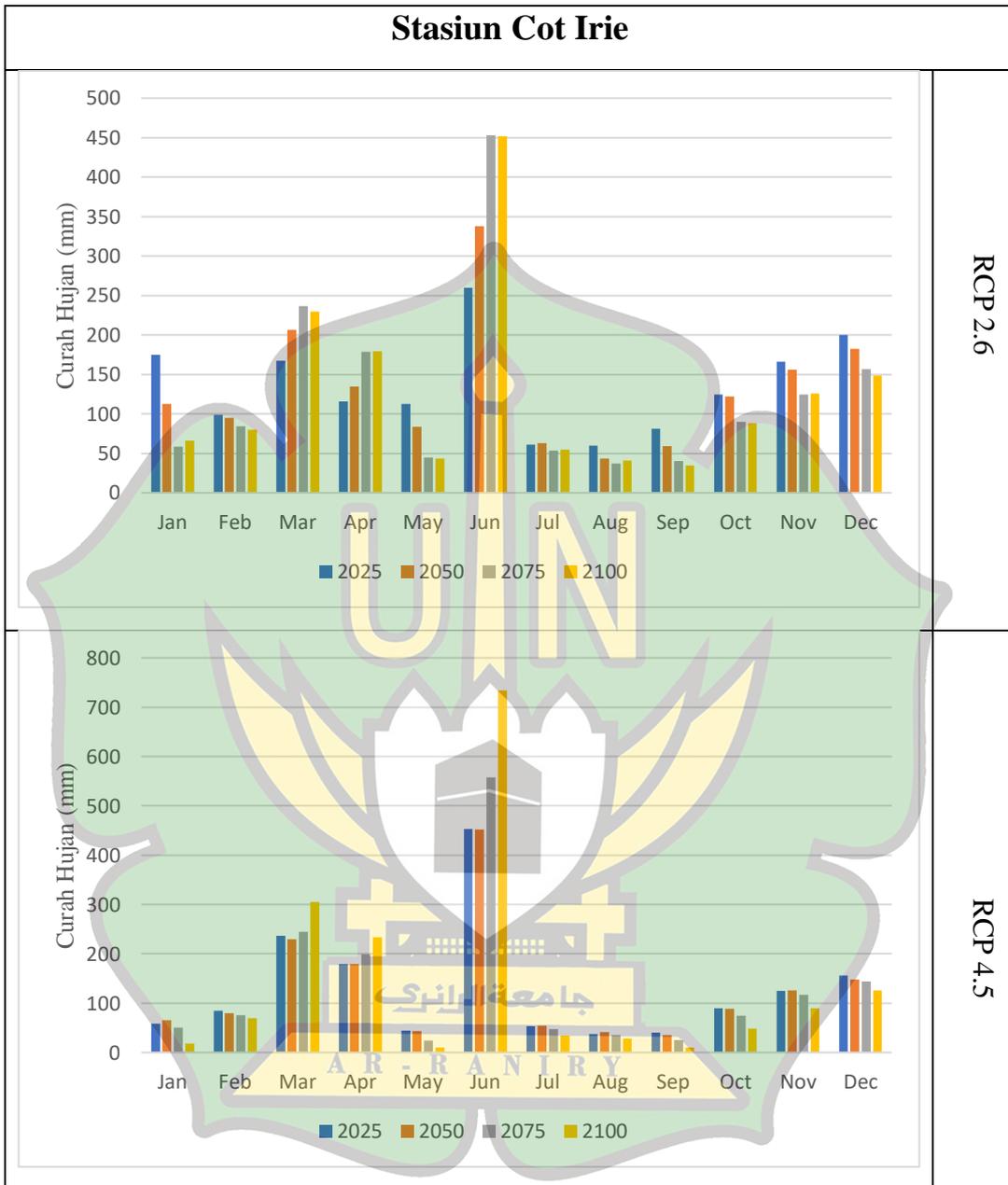
**Gambar 4.2.** Grafik Proyeksi Perubahan Curah Hujan RCP 2.6, 4.5 dan 8.5 tahun 2021-2100 di Stasiun APR BD Krueng Aceh

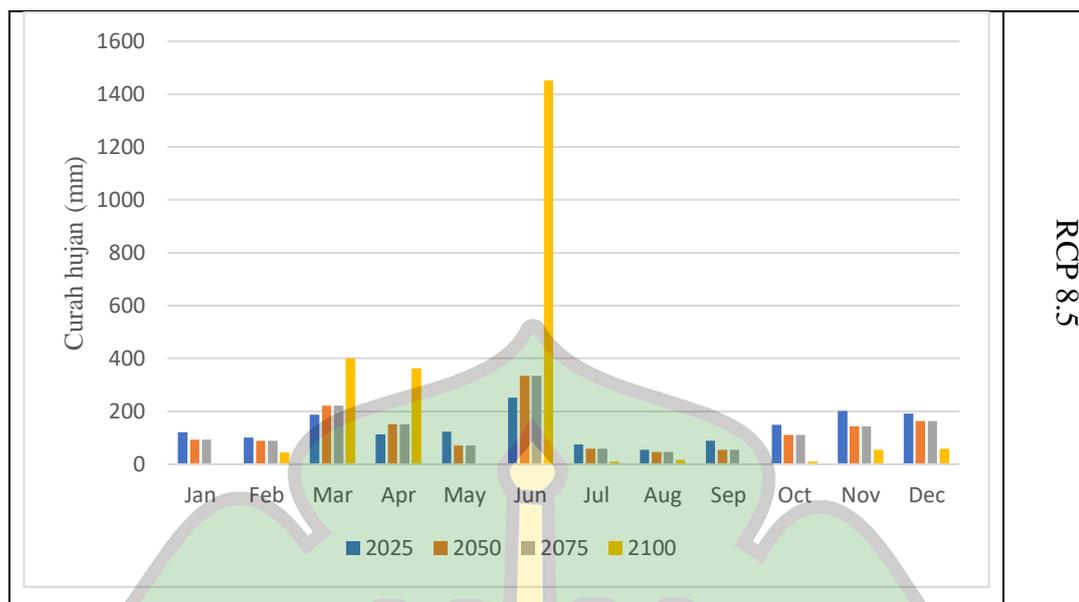
Proyeksi curah hujan di Stasiun APR BD Krueng Aceh pada RCP 2.6, 4.5 dan 8.5 tidak menunjukkan pola peningkatan atau penurunan yang konsisten di setiap periode waktu. Berdasarkan Gambar 4.2 Proyeksi perubahan curah hujan rentang waktu 2025 cenderung menurun pada RCP 2.6 dengan nilai 0.1 mm/hari, penurunan curah hujan dengan nilai 0.23 mm/hari pada kurun waktu 2050 dan

2075 serta 0.32 mm/hari pada kurun waktu 2100. Sedangkan pada skenario RCP 4.5 curah hujan cenderung turun dengan 0.07 mm/hari pada kurun waktu 2025, pada kurun waktu 2050 penurunan curah hujan yaitu 0.2 mm/hari, sedangkan penurunan dengan nilai 0.57 mm/hari pada kurun waktu 2075 dan 1.01 mm/hari pada tahun 2075, 30.6 mm/hari pada rentang tahun 2100. Proyeksi perubahan curah hujan pada skenario RCP 8.5 cenderung turun sebanyak 0.1 mm/hari pada kurun waktu 2025, pada kurun waktu 2050 menurun sebanyak mm/hari, pada kurun waktu 2075 penurunan terjadi sebanyak 1.01 mm/hari di perkirakan penurunan tertinggi pada stasiun APR BD Krueng Aceh yaitu 30.6 mm/hari direntang tahun 2100. Curah hujan cenderung menurun pada bulan Februari, Maret dan Oktober. Curah hujan cenderung meningkat pada bulan November, Desember dan Januari, dengan nilai tertinggi rentang waktu 2025 pada RCP 2.6, 4.5 dan 8.5 yaitu dengan rata-rata 214.1 mm/hari.

Berdasarkan Gambar 4.2 di atas dapat diketahui bahwa proyeksi curah hujan pada Stasiun APR BD Krueng Aceh yang telah dilakukan dengan menggunakan skenario RCP 2.6, 4.5, 8.5 untuk periode 2021 sampai dengan 2100 memperlihatkan terjadinya pola curah hujan monsonal. Hal ini dikarenakan kecendrungan hujan akan meningkat terjadi pada bulan November sampai dengan Januari. Pada grafik juga dapat dilihat bahwa, rata-rata semakin bertambahnya tahun, curah hujan yang terjadi juga mengalami tren penurunan. Ini terlihat dengan rata-rata dari ketiga skenario RCP, curah hujan yang tertinggi terjadi pada tahun 2025 dan akan menurun pada tahun 2100. Curah hujan tertinggi ini tepatnya berada pada RCP 8.5 yaitu senilai 320 mm/hari, sehingga skenario proyeksi iklim yang telah dilakukan ini diduga pada tahun 2025 akan terjadinya suatu emisi yang tinggi dan yang diiringi dengan tidak adanya upaya dari masyarakat dalam mengurangi dampak dari emisi gas rumah kaca yang akan terjadi. Oleh karena itu, perlu adanya upaya agar sesuai hasil proyeksi iklim masa depan yang telah dilakukan dari tahun 2021-2100 ini tidak mengalami pergeseran yang dapat menyebabkan berubahnya pola curah hujan yang seharusnya.

4.4.2 Stasiun Cot Irie





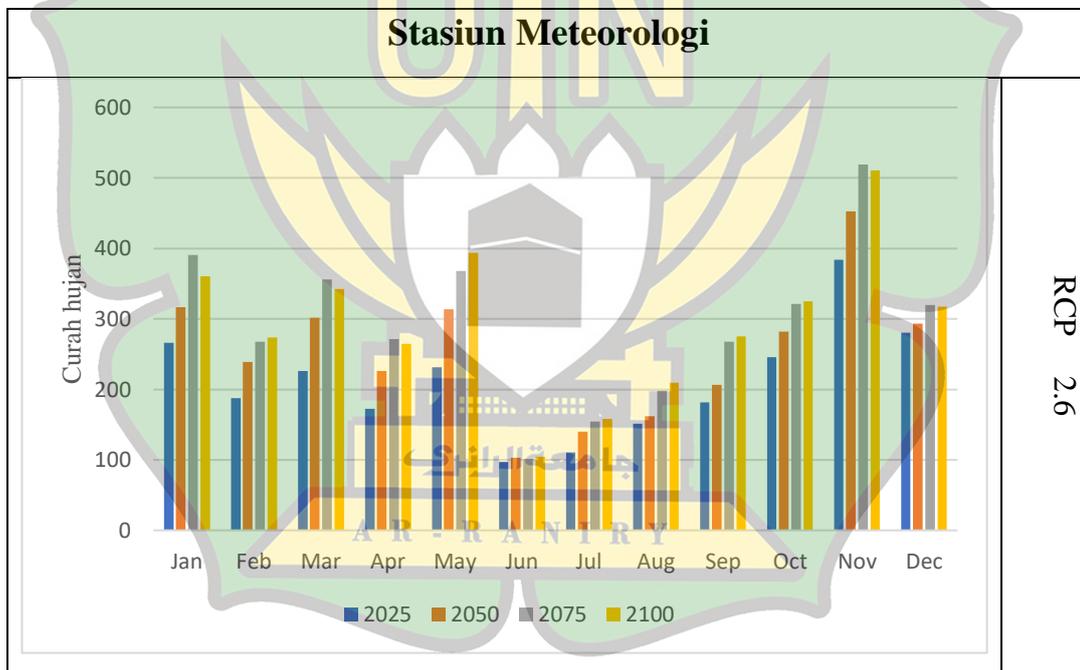
**Gambar 4.3.** Grafik Proyeksi Perubahan Curah Hujan RCP 2.6, 4.5 dan 8.5 tahun 2021-2100 di Stasiun Cot Irie

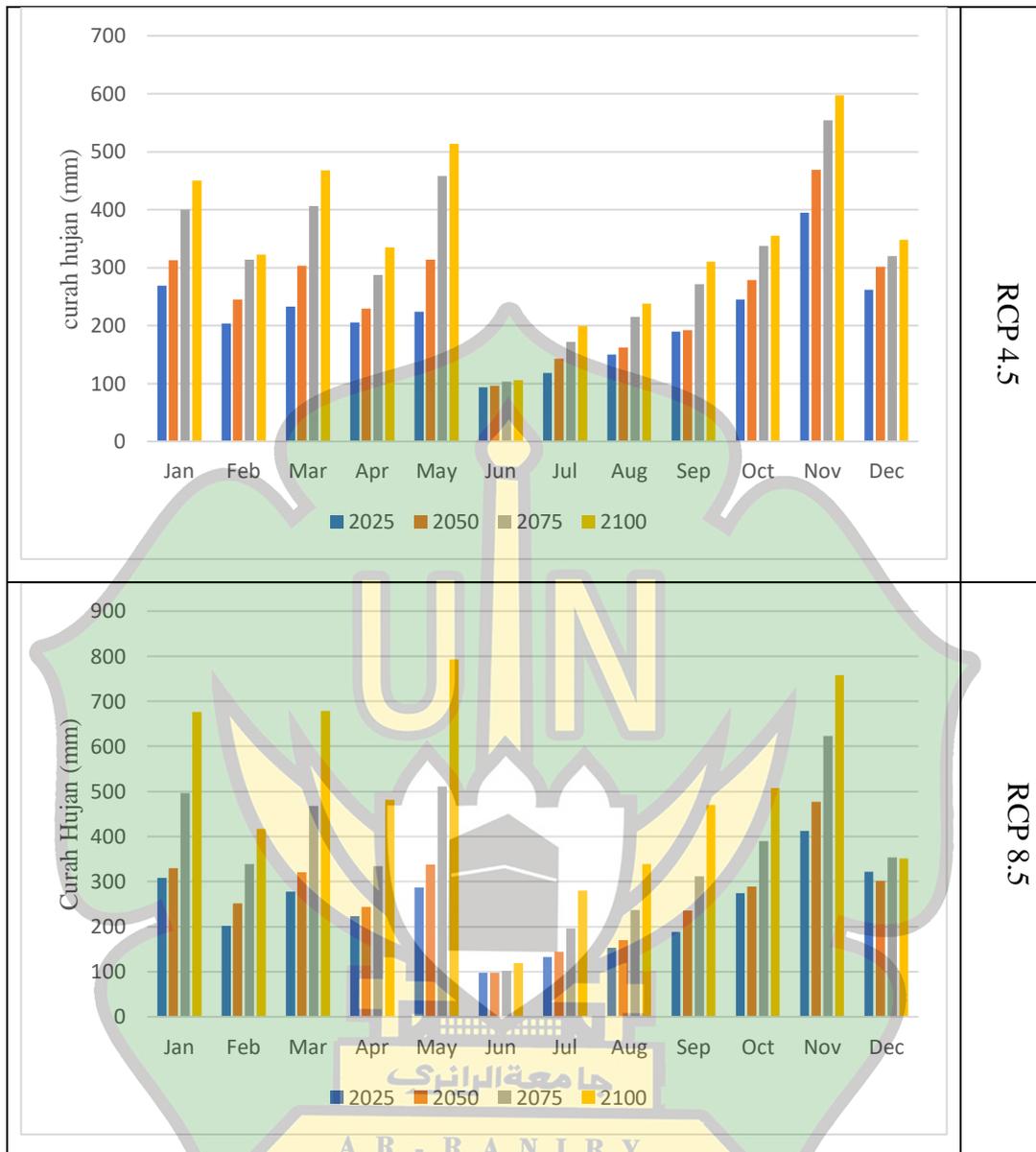
Berdasarkan Gambar 4.3. Proyeksi perubahan curah hujan pada RCP 2.6, 4.5 dan 8.5 di rentang waktu 2025 cenderung menurun pada RCP 2.6 dengan curah hujan harian rata-rata cenderung menurun 0.1 mm/hari pada kurun waktu 2025, pada rentang waktu 2050 yaitu 0.3 mm/hari dan penurunan curah hujan 0.1 mm/hari pada rentang waktu 2075 dan 2100. Sedangkan pada skenario RCP 4.5 curah hujan cenderung turun 0.17 mm/hari pada rentang waktu 2025, pada rentang waktu 2050 dan 2075 penurunan sebesar 0.37 mm/hari, pada rentang tahun 2100 sebesar 7.26 mm/hari. Sedangkan pada skenario RCP 8.5 curah hujan cenderung turun 0.8 mm/hari pada 2025, pada tahun 2050 dan 2075 sebesar 0.45 mm/hari, pada rentang tahun 2100 nilai 78.6 mm/hari. Penurunan nilai curah hujan terkecil terjadi rata-rata pada bulan Mei dan September pada setiap RCP. Hujan tertinggi terjadi pada bulan Juni dengan jumlah terbesar 452 mm/hari rentang waktu 2075 pada RCP 2.6 dan 1.420 mm/hari pada rentang tahun 2100 di RCP 8.5.

Berdasarkan hasil proyeksi iklim masa depan yang telah dilakukan pada stasiun Cot Irie tahun 2021-2100 memperlihatkan bahwa terjadinya penurunan variasi hujan, namun rekuensinya mengalami peningkatan. Hal ini dapat dilihat dari nilai curah hujan yang dihasilkan yakni 1.420 mm/hari rentang tahun 2100

pada bulan juni di RCP 8.5. Terlihat adanya perubahan pola dari curah hujan yang seharusnya sebelah utara sampai dengan timur Aceh ini memiliki tipe curah hujan monsonal (Mufti dkk., 2017) yang mana seharusnya curah hujan akan terjadi minimum pada bulan juni, juli dan agustus (Setiawan, 2018). Sehingga dapat diketahui bahwa, telah terjadi perubahan curah hujan pada stasiun Cot Irie di masa yang akan datang. Oleh karena itu, diprediksi mulai dari tahun 2075 sampai dengan 2100, akan adanya kenaikan suhu yang ekstrim (emisi tinggi) di permukaan bumi khususnya di wilayah Aceh sehingga diperlukan upaya masyarakat dalam mengurangi efek rumah kaca dikemudian hari yang akan terjadi agar tidak terjadi pergeseran pola curah hujan yang dapat membuat frekuensi maupun intensitas hujan ikut berubah.

#### 4.4.3 Stasiun Meteorologi



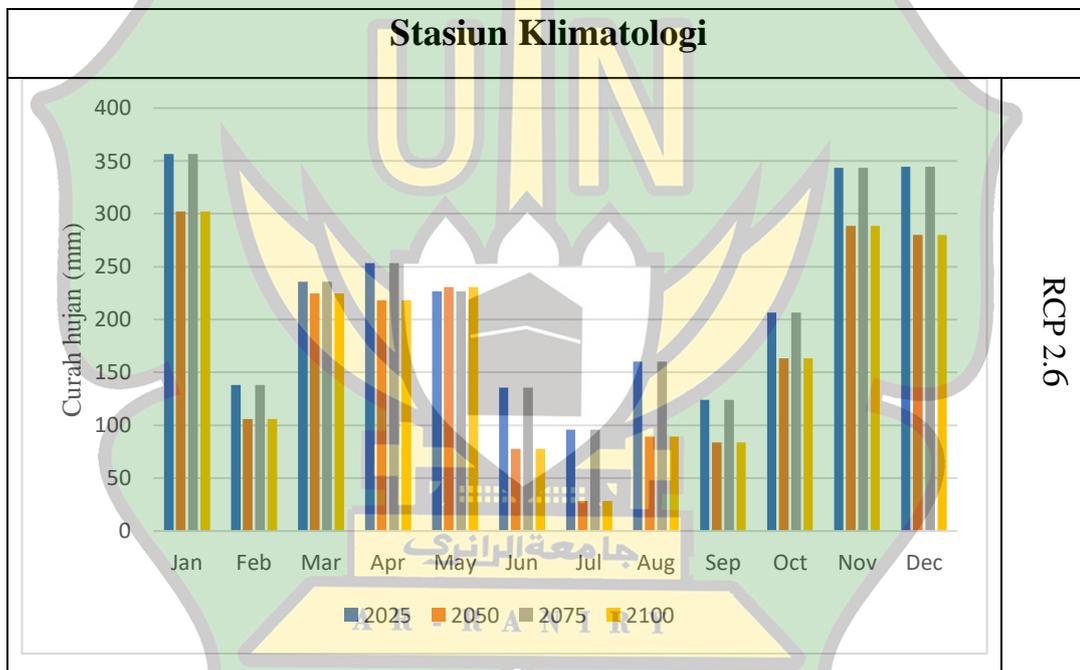


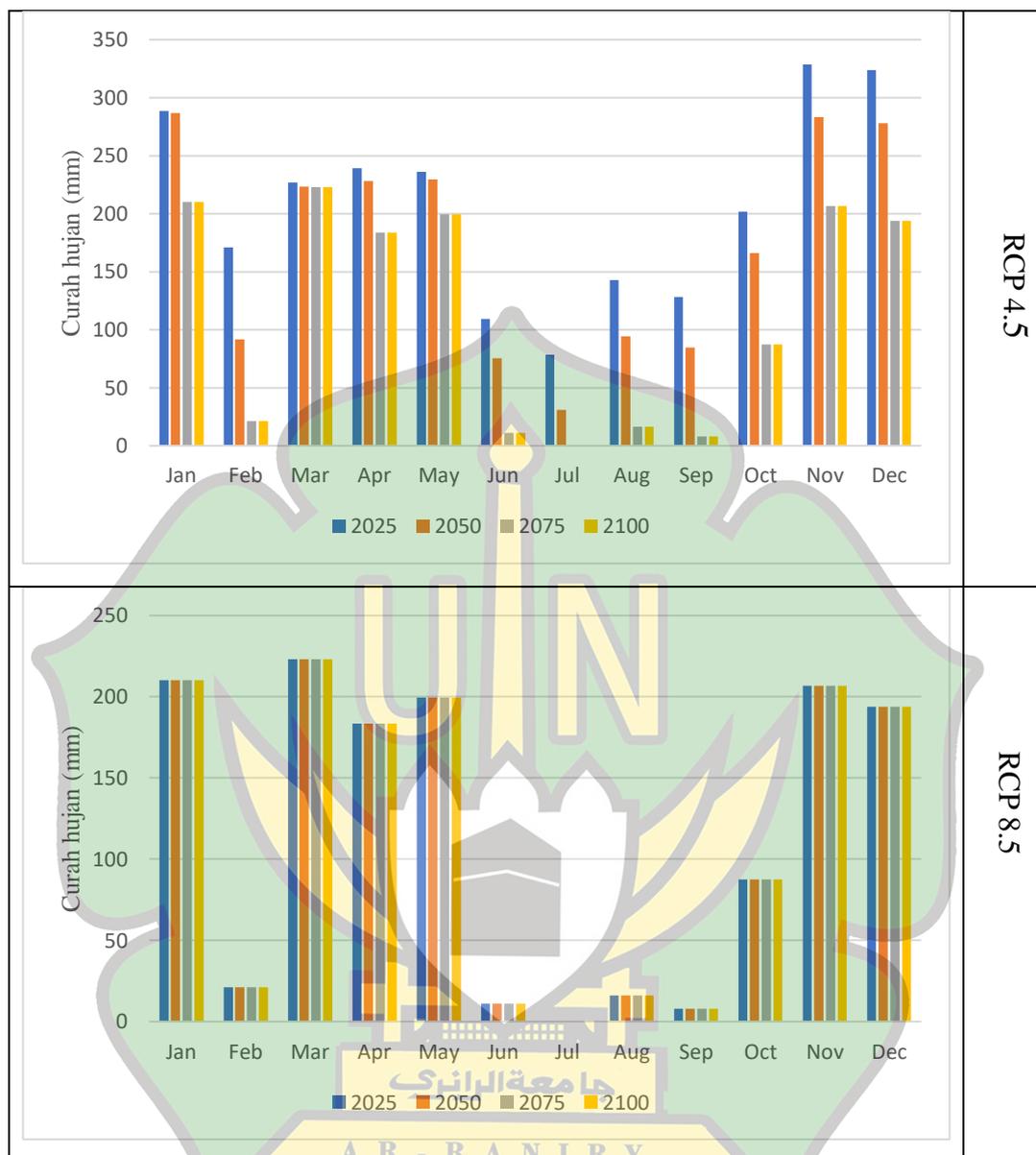
**Gambar 4.4.** Grafik Proyeksi Perubahan Curah Hujan RCP 2.6, 4.5 dan 8.5 tahun 2021-2100 di Stasiun Meteorologi

Berdasarkan Gambar 4.4. Proyeksi perubahan curah hujan di Stasiun Meteorologi pada RCP 2.6, 4.5 dan 8.5 pola curah hujan cenderung meningkat. Hasil proyeksi curah hujan yang dilakukan sesuai dengan pola curah hujan yang semestinya terjadi, yaitu pola curah hujan monsonal yang mana kecenderungan hujan akan terjadi pada bulan November sampai dengan Maret (Setiawan, 2018). Hal ini sesuai dengan grafik yang ada pada Gambar 4.4, terlihat di setiap skenario RCP 2.6, 4.5, 8.5, curah hujan tertinggi terjadi dalam bulan November-Maret. Namun, yang dapat dilihat pada grafik, rata-rata intensitas curah hujan tertinggi

terjadi dalam rentang tahun 2100 dengan nilai curah hujan tertinggi terjadi pada skenario RCP 8.5 yaitu 792 mm/hari, dalam hal ini dapat diketahui akan terjadi peningkatan curah hujan yang terjadi dari rentang tahun 2025 sampai dengan 2100 yang disinyalir bahwa akan terjadi peningkatan pada emisi di masa yang akan datang, sehingga menyebabkan intensitas hujan tinggi, yang mana musim hujan akan terjadi lebih lama dibandingkan musim kemarau. Hal ini dapat memberikan dampak buruk khususnya bagi wilayah Aceh umumnya dan DAS Krueng Aceh khususnya, sehingga diperlukan upaya masyarakat dalam mengurangi emisi gas rumah kaca.

#### 4.4.4 Stasiun Klimatologi





**Gambar 4.5.** Grafik Proyeksi Perubahan Curah Hujan RCP 2.6, 4.5 dan 8.5 tahun 2021-2100 di Stasiun Klimatologi

Berdasarkan Gambar 4.5. Proyeksi perubahan curah hujan pada RCP 2.6, 4.5 dan 8.5 pola curah hujan cenderung meningkat. Peningkatan intensitas curah hujan terjadi pada bulan November, Desember, Januari dan Maret dengan nilai tertinggi pada RCP 2.6 di rentang tahun 2025 yaitu 356 mm/hari. Penurunan curah hujan terjadi di bulan Juli pada RCP 4.5 dan RCP 8.5 dengan nilai 0.08 mm/hari direntang waktu 2025-2075. Hasil proyeksi perubahan curah hujan yang telah dilakukan menunjukkan kesesuaian dengan pola curah hujan wilayah Aceh sendiri

yaitu monsoonal dengan kecenderungan hujan terjadi pada akhir bulan menuju awal bulan. Namun, dapat dilihat pada grafik pada RCP 2.6, 4.5, 8.5 yang ada pada Gambar 4.5, nilai curah hujan setiap bulannya mengalami fluktuatif (naik-turun) pada rentang tahun 2025 sampai dengan tahun 2100, yang mana kenaikan nilai curah hujannya juga sangat bervariasi.

Kondisi ini dapat menyebabkan curah hujan dapat terjadi dengan lebat dalam periode waktu yang lebih pendek namun dengan intensitas hujan yang turun menjadi lebih tinggi. Maka, hasil proyeksi perubahan curah hujan di masa yang akan datang dengan menggunakan skenario RCP 2.6, 4.5, 8.5 pada stasiun Klimatologi memperlihatkan bahwa, pada rentang tahun 2025 sampai dengan 2100, akan terjadi hujan dengan intensitasnya yang berfluktuatif. Hal ini dapat diduga berhubungan dengan adanya gejala pemanasan global yang terjadi yang dapat meningkatkan gas-gas rumah kaca yang ada di atmosfer, sehingga berdampak terhadap curah hujan yang akan terjadi di masa yang akan datang. Sehingga, dari skenario ini dapat diketahui bahwa diperlukannya, upaya bagi masyarakat untuk ikut mengurangi dampak dari efek rumah kaca di kemudian hari.

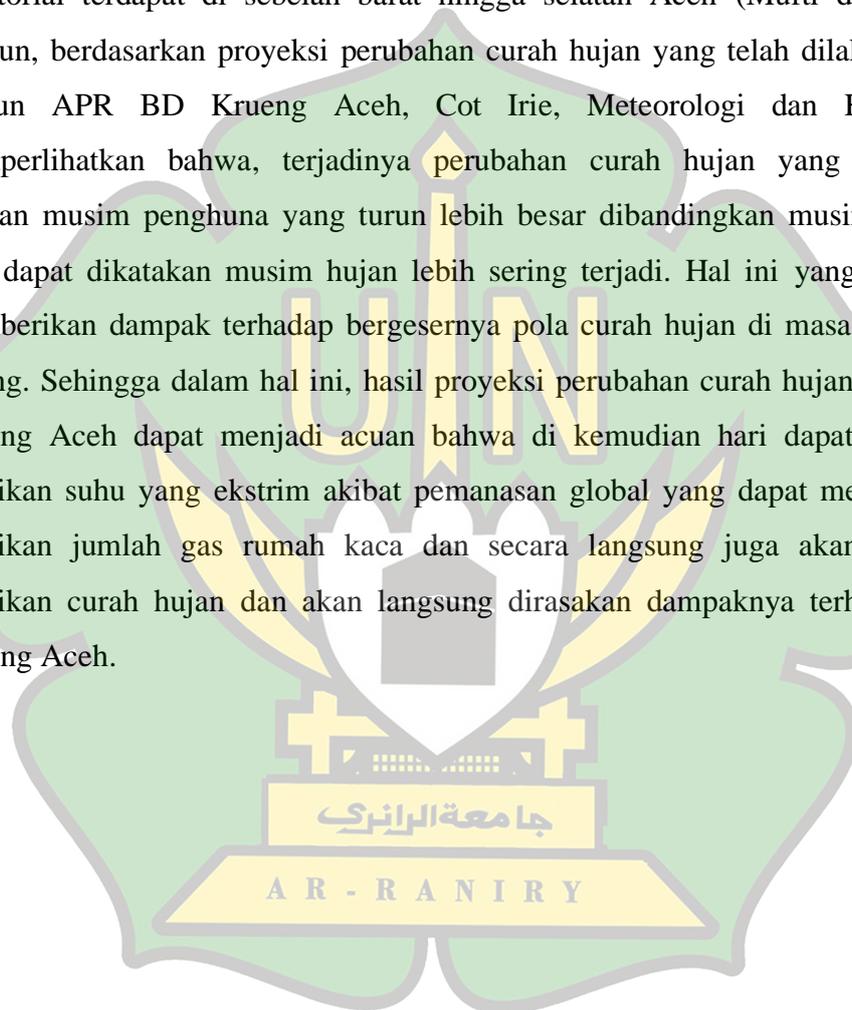
#### **4.5 Deskripsi Proyeksi Curah Hujan pada Daerah Aliran Sungai Krueng**

##### **Aceh**

Proyeksi curah hujan di DAS Krueng Aceh menunjukkan adanya perubahan curah hujan. Secara umum, proyeksi total curah hujan berdasarkan model CanESM2 menunjukkan terjadi peningkatan curah hujan terutama pada bulan-bulan musim hujan dan penurunan curah hujan pada bulan-bulan musim kemarau. Secara umum, curah hujan tahunan *baseline* (tahun 1991 – 2021) berkisar antara 140,37 mm, proyeksi curah hujan periode masa depan (tahun 2021 – 2100) berdasarkan model CanESM2 memproyeksikan pada tiga skenario RCP yaitu 2.6, 4.5 dan 8.5 untuk memproyeksikan curah hujan tahun 2021-2100 berdasarkan *radiative forcing* di rentang waktu 2025, 2050, 2075 dan 2100, hasilnya menunjukkan curah hujan mengalami peningkatan pada Stasiun Klimatologi pada RCP 2.6 di rentang tahun 2075 dengan tinggi curah hujan yaitu

519 mm/hari. Serta penurunan curah hujan terjadi pada dua stasiun yaitu APR BD Krueng Aceh dan Cot Irie dengan bulan kering terjadi pada bulan Mei.

Secara klimatologi, wilayah Aceh umumnya memiliki dua jenis pola curah hujan yaitu monsoonal dan ekuatorial yang mana pola curah hujan monsoonal terdapat di sebelah utara hingga timur Aceh sedangkan pola curah hujan ekuatorial terdapat di sebelah barat hingga selatan Aceh (Mufti dkk., 2017). Namun, berdasarkan proyeksi perubahan curah hujan yang telah dilakukan pada stasiun APR BD Krueng Aceh, Cot Irie, Meteorologi dan Klimatologi memperlihatkan bahwa, terjadinya perubahan curah hujan yang dibuktikan dengan musim penghujan yang turun lebih besar dibandingkan musim kemarau atau dapat dikatakan musim hujan lebih sering terjadi. Hal ini yang juga akan memberikan dampak terhadap bergesernya pola curah hujan di masa yang akan datang. Sehingga dalam hal ini, hasil proyeksi perubahan curah hujan pada DAS Krueng Aceh dapat menjadi acuan bahwa di kemudian hari dapat terjadinya kenaikan suhu yang ekstrim akibat pemanasan global yang dapat menyebabkan kenaikan jumlah gas rumah kaca dan secara langsung juga akan membuat kenaikan curah hujan dan akan langsung dirasakan dampaknya terhadap DAS Krueng Aceh.



## **BAB V**

### **PENUTUP**

#### **5.1. Kesimpulan**

Adapun kesimpulan yang dapat diambil dari tugas akhir dari perkiraan perubahan curah hujan pada Daerah Aliran Sungai Krueng Aceh adalah Metode *statistical downscaling* (SDSM) digunakan untuk menurunkan skala variabel iklim masa depan di DAS Krueng Aceh dalam tiga skenario perubahan iklim yang diproyeksikan oleh CanEMS2. Hasil evaluasi data curah hujan daerah observasi (1991-2020) dan data NCEP. Hasil pemilihan prediktor, nilai  $R^2$  pada keempat lokasi stasiun curah hujan menunjukkan nilai 0.9 Menunjukkan hubungan yang baik antara model dengan data yang diamati. Pada penggunaan tiga skenario RCP yaitu 2.6, 4.5 dan 8.5 untuk memproyeksikan curah hujan tahun 2021-2100 berdasarkan *radiative forcing* di rentang waktu 2025, 2050, 2075 dan 2100. Hasil menunjukkan curah hujan meningkat pada Stasiun Klimatologi pada RCP 2.6 di rentang tahun 2075 dengan tinggi hujan yaitu 519 mm/hari. Serta penurunan curah hujan terjadi pada dua stasiun yaitu APR BD Krueng Aceh dan Cot Irie dengan bulan kering terjadi pada bulan Mei. Sehingga Hasil ini akan memberikan pengetahuan ilmiah yang penting informasi dasar dan praktis untuk sumber daya air, perencanaan dan pengelolaan di DAS Krueng Aceh.

#### **5.2. Saran**

Adapun saran yang diberikan untuk untuk tugas akhir yaitu melakukan penelitian lanjutan untuk melihat dampak perubahan iklim terhadap parameter hidrologi seperti erosi, banjir dan lainnya.

## DAFTAR PUSTAKA

- Aldrian, E., & Dwi Susanto, R. (2003). Identification of three dominant rainfall regions within Indonesia and their relationship to sea surface temperature. *International Journal of Climatology*, 23(12), 1435–1452.
- Brown, C., Greene, A., Block, P., dan Giannini, A. (2008). Review of Downscaling Methodologies, 1–31.
- Chu, J. T., Xia, J., Xu, C. Y., dan Singh, V. P. (2010). Statistical downscaling of daily mean temperature, pan evaporation and precipitation for climate change scenarios in Haihe River, China. *Theoretical and Applied Climatology*, 99(1–2), 149–161.
- Dinas Lingkungan Hidup dan Kehutanan. (2018). The invisible web. Online at <http://dlhk.acehprov.go.id/2018/04/pengelolaan-das-krueng-aceh-dibahas-oleh-para-pemangku-kepentingan/>
- Diyabalanage, S., Samarakoon, K. K., Adikari, S. B., & Hewawasam, T. (2017). Impact of soil and water conservation measures on soil erosion rate and sediment yields in a tropical watershed in the Central Highlands of Sri Lanka. *Applied Geography*, 79, 103–114.
- Ferijal, T., & Jayanti, D. S. (2016). Dampak Perubahan Iklim Terhadap Debit Andalan Sungai Krueng Aceh. *Rona Teknik Pertanian*, 9(1), 50–61.
- Fowler, H. J., Blenkinsop, S., & Tebaldi, C. (2007). Linking climate change modelling to impacts studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling. *International Journal of Climatology*, 27, 1547–1578
- Gebrechorkos, S. H., Bernhofer, C., & Hülsmann, S. (2019). Impacts of projected change in climate on water balance in basins of East Africa. *Science of the Total Environment*, 682, 160–170.
- Gebrechorkos, S. H., Hülsmann, S., & Bernhofer, C. (2019). Statistically downscaled climate dataset for East Africa. *Scientific Data*, 6(1), 2–9.
- Getachew, B., & Manjunatha, B.R.(2021). Climate Change Projections and Trends Simulated From The CMIP5 Models for The Lake Tana Sub-Basin, The Upper Blue Nile (Abay) River Basin, Ethiopia. *Environmental*

*challenges*, 5.

- Hassan, Z., Shamsudin, S., & Harun, S. (2014). Application of SDSM and LARS-WG for simulating and downscaling of rainfall and temperature. *Theoretical and Applied Climatology*, 116(1–2), 243–257.
- Huang, J., dkk. (2011). Estimation of Future Precipitation Change in The Yangtze River Basin bu Using Statistical Downscaling Method. *Stock Environ Res Risk Assess*, 25, 781-792.
- IPCC. (2014). Climate Change 2014 Synthesis Report Summary Chapter for Policymakers.
- Karamouz, M., Nazif, S., & Fallahi, M. (2010). Rainfall downscaling using statistical downscaling model and canonical correlation analysis: A case study. *World Environmental and Water Resources Congress 2010: Challenges of Change - Proceedings of the World Environmental and Water Resources Congress 2010*, 4579–4587.
- Letsinger, S. L., Balberg, A., Hanna, E., & Hiatt, E. K. (2021). Geohydrology: Watershed Hydrology. In *Encyclopedia of Geology* (2nd ed., Vol. 2). Elsevier Inc
- Meinshausen, M., dkk. (2011). The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. *Climatic Change*, 109(1), 213–241.
- Milly, P. C. D., Dunne, K. A., & Vecchia, A. V. (2005). Global pattern of trends in streamflow and water availability in a changing climate. *Nature*, 438(7066), 347–350
- Moss, R., dkk. (2008). Towards New Scenarios for Analysis of Emissions, Climate Change, Impacts, and Response Strategies : IPCC Expert Meeting Report : 19-21 September, 2007, Noordwijkerhout, the Netherlands. In *Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva*.
- Mufti, F., Ismail, N., & Umar, M.(2017). Trend Analysis of Extreme Rainfall From 1982-2013 and Projection from 2014-2050 in Banda Aceh and Meulaboh. *Jurnal Natural*, 12(02).
- NOAA. (2012). *Climate model. Top Tens: Breakthroughs*.
- Pervez, M. S., & Henebry, G. M. (2014). Projections of the Ganges-Brahmaputra

- precipitation-Downscaled from GCM predictors. *Journal of Hydrology*, 517, 120–134.
- Rejekiningrum, P. (2014). Dampak Perubahan Iklim Terhadap Sumberdaya Air: Identifikasi, Simulasi, Dan Rencana Aksi. *Jurnal Sumberdaya Lahan*, 8(1).
- Runtunuwu, E., & Syahbuddin, H. (2007). Perubahan Pola Curah Hujan dan Dampaknya Terhadap Periode Masa Tanam persoalan global yang melibatkan banyak negara dan Latitude perubahan pola hujan yang mengakibatkan pergeseran waktu singkat dengan kecenderungan intensitas beberapa Organisme Pengganggu. *Jurnal Tanah Dan Iklim*, 26, 1–12.
- Salsabila, A., & Nugraheni, I. L. 2020. *Pengantar Hidrologi*. CV. Anugrah Utama Raharja.
- Setiawan, D.(2018). *Pengelompokan Zona Musim di Indonesia Berdasarkan Data Curah Hujan Menggunakan Time Series Based Clustering*. Thesis. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh November.
- Siabi, E.K., dkk. (2021). Statistical Downscaling of Global Circulation Models to Assess Future Climate Changes in The Black Volta Basin of Ghana. *Environmental Challenges*, 5.
- Storch, H., Von, & W, Z. F. (2000). Statistical Analysis in Climate Research. *International Journal of Climatology*, 20, 811–812.
- Surmaini, E., Runtunuwu, E., & Las, I. (2015). Upaya sektor Pertanian dalam Menghadapi Perubahan Iklim. *Upaya Sektor Pertanian Dalam Menghadapi Perubahan Iklim*, 30 (1), 1–7.
- Tjasyono, B. (2004). *Klimatologi Umum*. Penerbit ITB.
- Trzaska, S., & Schnarr, E. (2014). A review of downscaling methods for climate change projections. *United States Agency for International Development by Tetra Tech ARD, September*, 1–42.
- Undang-Undang Republik Indonesia. (2009). *Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 32 tahun 2009 Tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup*

Undang-Undang RI No 17 Tahun 2019 Tentang Sumber Daya air.

Upa, D. S., Sahriman, S., & Thamrin, S. A. (2021). Pemodelan Statistical Downscaling dengan Regresi Modifikasi Jackknife Ridge Dummy Berbasis K-means untuk Pendugaan Curah Hujan. *Journal of Statistics and Its Application*, 2(1), 19–28.

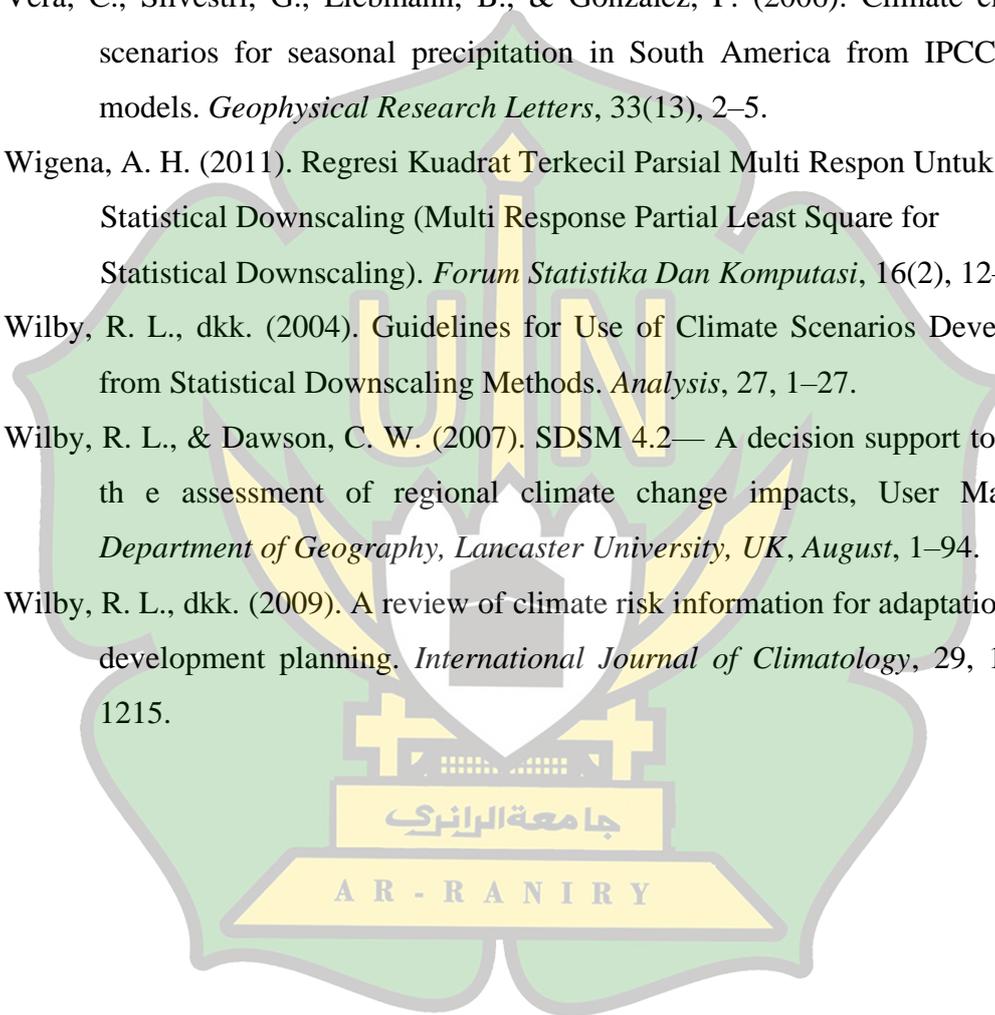
Vera, C., Silvestri, G., Liebmann, B., & González, P. (2006). Climate change scenarios for seasonal precipitation in South America from IPCC-AR4 models. *Geophysical Research Letters*, 33(13), 2–5.

Wigena, A. H. (2011). Regresi Kuadrat Terkecil Parsial Multi Respon Untuk Statistical Downscaling (Multi Response Partial Least Square for Statistical Downscaling). *Forum Statistika Dan Komputasi*, 16(2), 12–15.

Wilby, R. L., dkk. (2004). Guidelines for Use of Climate Scenarios Developed from Statistical Downscaling Methods. *Analysis*, 27, 1–27.

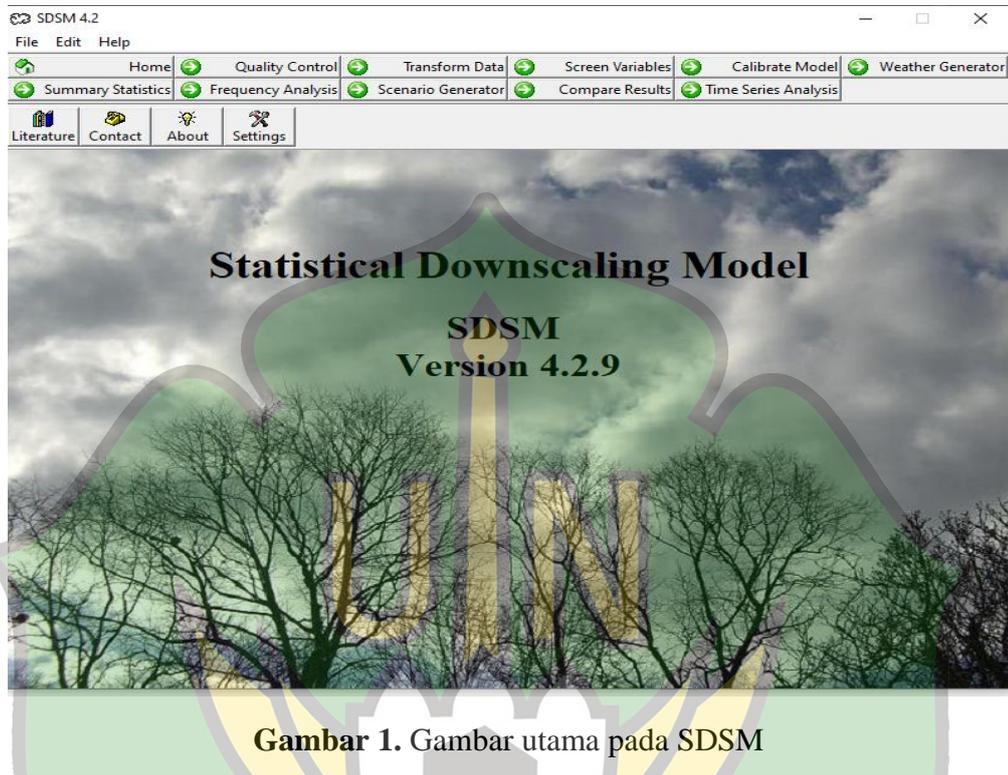
Wilby, R. L., & Dawson, C. W. (2007). SDSM 4.2— A decision support tool for the assessment of regional climate change impacts, User Manual. *Department of Geography, Lancaster University, UK, August*, 1–94.

Wilby, R. L., dkk. (2009). A review of climate risk information for adaptation and development planning. *International Journal of Climatology*, 29, 1193–1215.

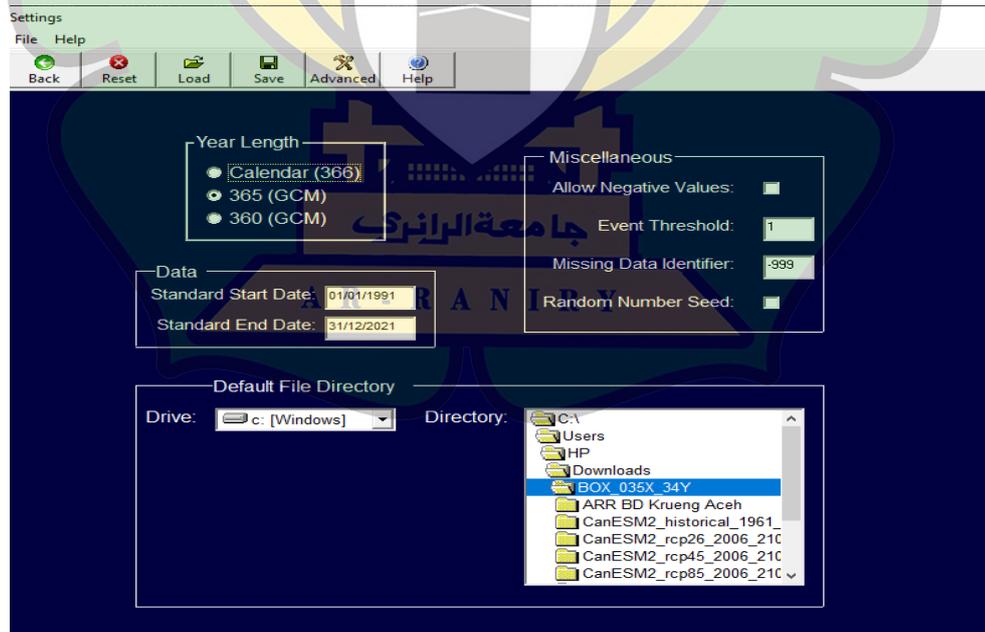


## LAMPIRAN

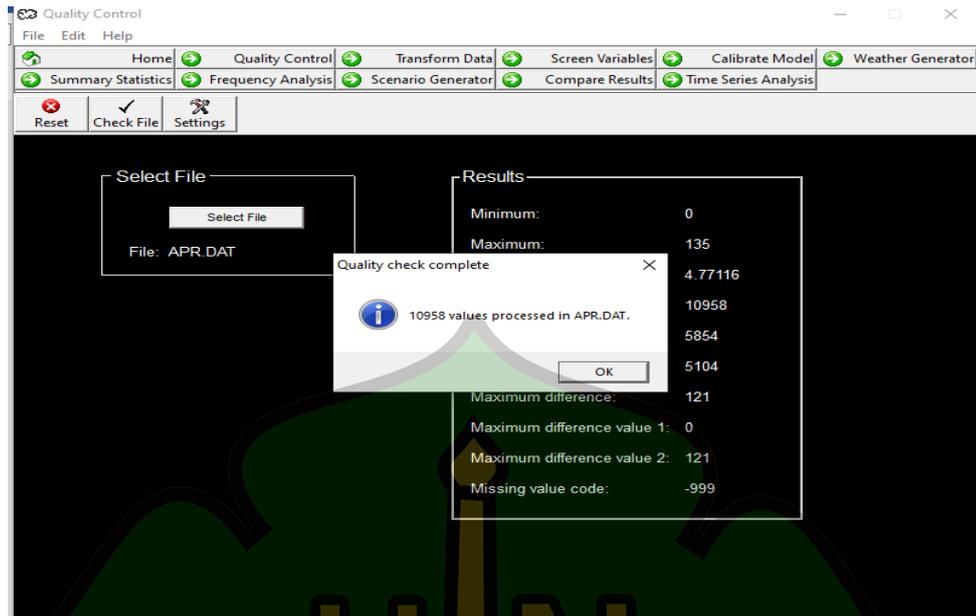
### Lampiran 1. *Statistical Downscaling 4.2*



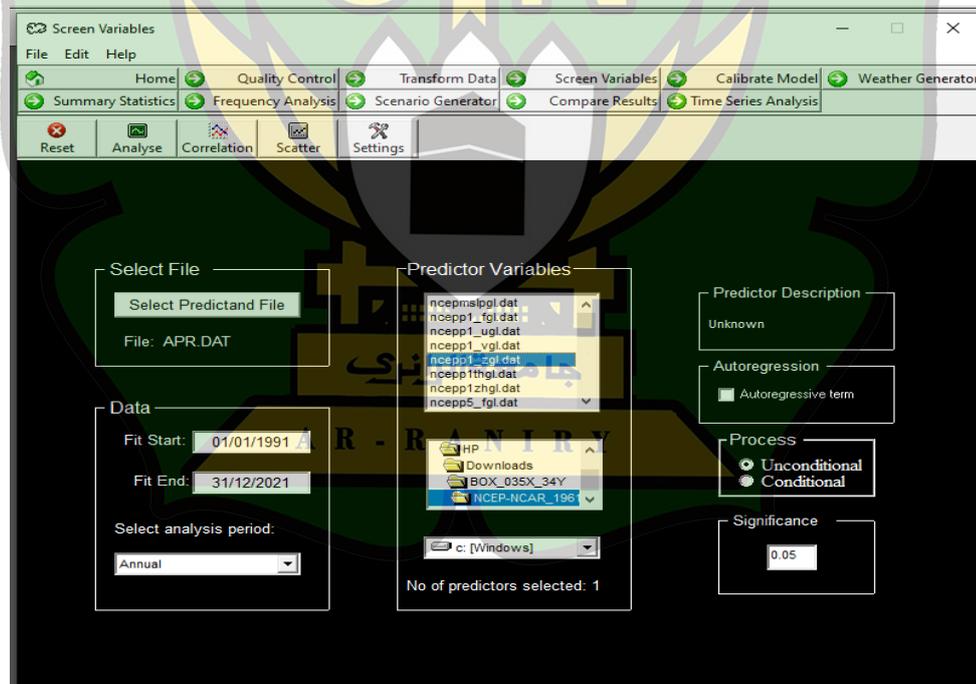
Gambar 1. Gambar utama pada SDSM



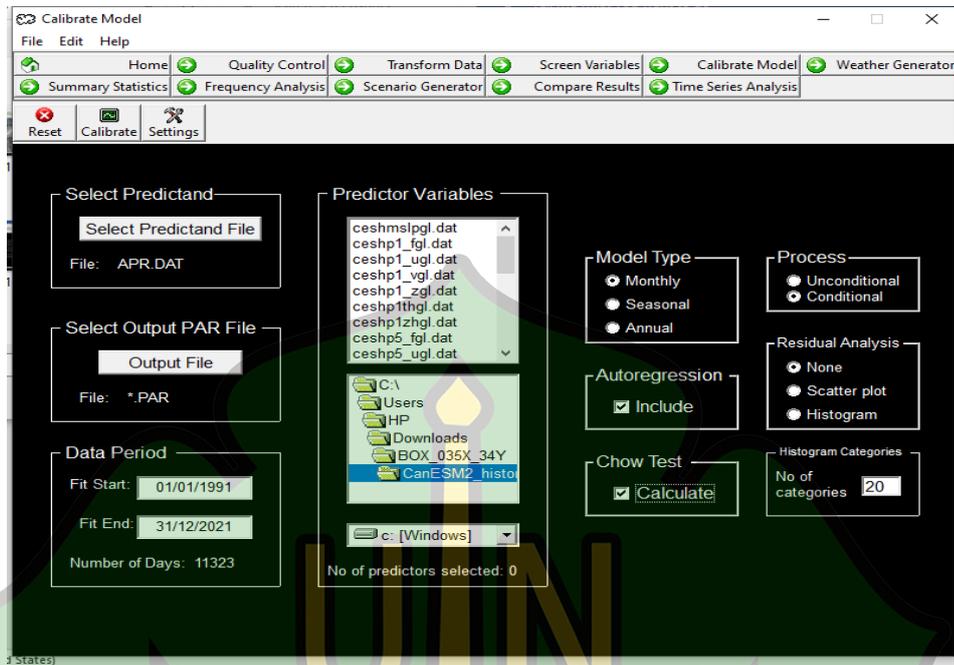
Gambar 2. Layar Pengaturan



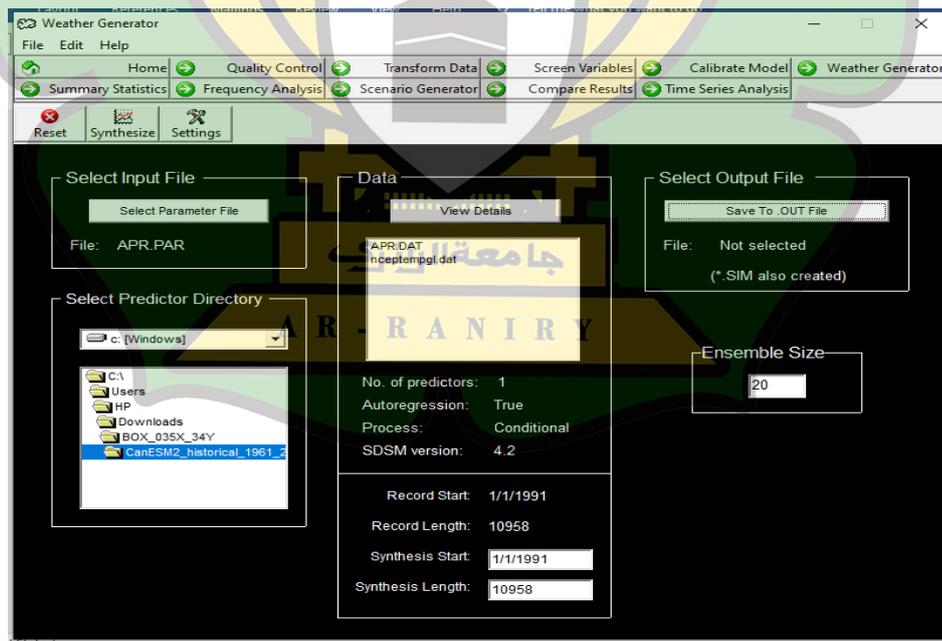
Gambar 3. *Quality control* dan hasil



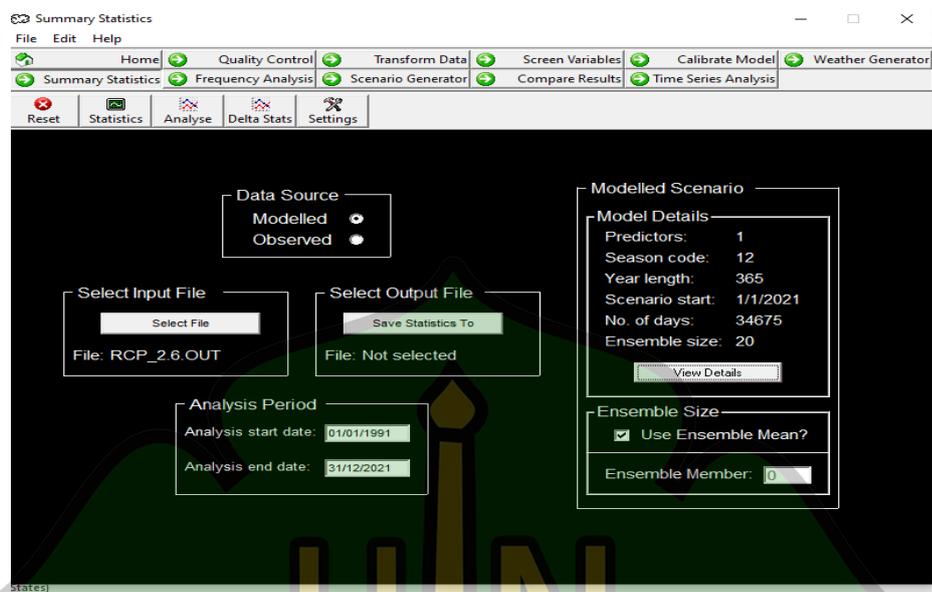
Gambar 4. Pemilihan Variabel



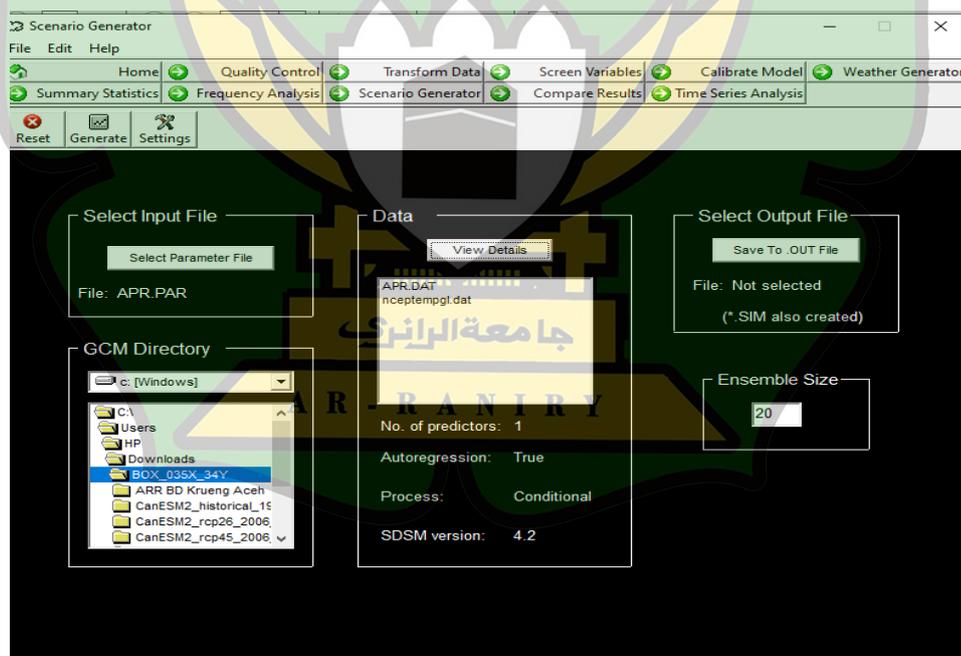
Gambar 5. Kalibrasi Model



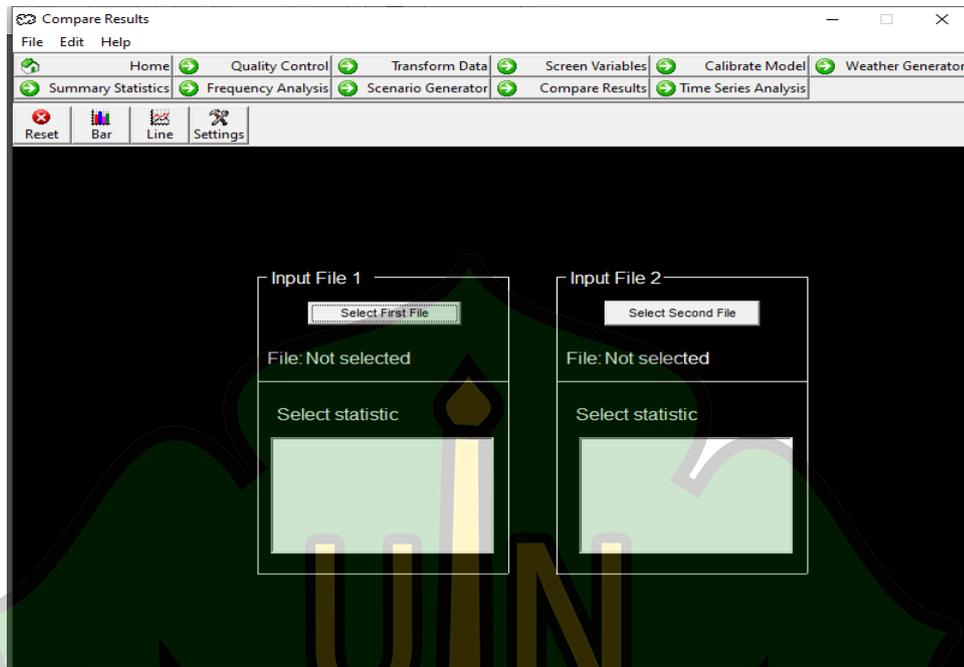
Gambar 6. Weather Generator



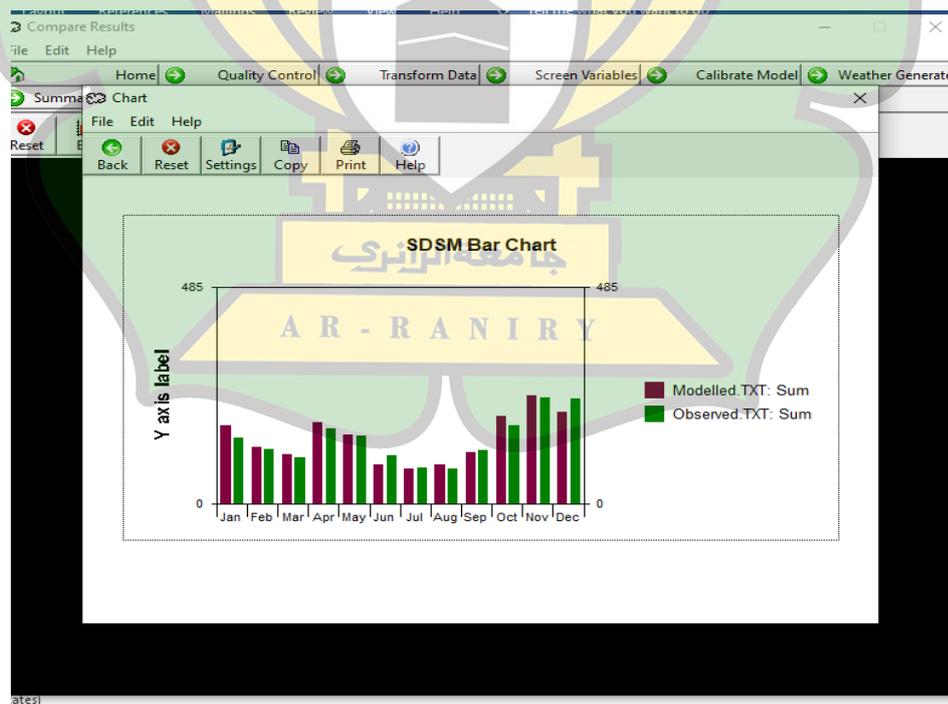
Gambar 7. Summary Statistic



Gambar 8. Scenario Generation



Gambar 9. Membandingkan Hasil



Gambar 10. Hasil Grafik Perbandingan *Modelled* dan *Observed*