

Module Praktikum Pemodelan Iklim

Agung Baruna Setiawan Noor

1/10/23

Daftar Isi

Pendahuluan	1
1 <i>Dynamical Downscaling: Model Weather Research Forecasting (WRF)</i>	3
1.1 Pendahuluan	3
1.2 Dasar-dasar Pemrograman Bash	6
1.3 Prosedur Praktikum: Instalasi WRF	9
1.3.1 Menjalankan <i>Windows Subsystem Linux</i> (WSL) di Windows 10/11	9
1.3.2 Sebelum Mulai	10
1.3.3 Data dan Package Pendukung	11
1.3.4 Instalasi Software Compiler	13
1.3.5 Instalasi Package	14
1.3.6 Instalasi WRF	19
1.3.7 Instalasi WRF Pre-Processing (WPS)	21
1.4 Prosedur Praktikum: Menjalankan Simulasi WRF-ARW	22
1.4.1 Program WPS	22

Pendahuluan

Tentang pemodelan iklim

1 *Dynamical Downscaling*: Model Weather Research Forecasting (WRF)

1.1 Pendahuluan

Global Climate Model (GCM) adalah alat utama dan paling komprehensif yang digunakan dalam mensimulasikan kondisi iklim pada masa lalu maupun masa depan. GCM memiliki kemampuan dalam melakukan simulasi variabilitas iklim, sifat-sifat fisis, serta kimia di bumi dengan perhitungan secara matematis yang menggambarkan proses, interaksi, dan timbal balik pada atmosfer, lautan, dan biotik. Kelemahan dalam GCM adalah ketidakmampuan menangkap kejadian-kejadian iklim pada skala regional maupun lokal karena memiliki resolusi spasial yang terlalu kasar, yaitu sekitar >100 km. Metode *downscaling* di dalam ilmu iklim umum digunakan pada kajian hidrologi [7], pertanian [1], dan sistem perkotaan [12]. Sebagai contoh pada kajian hidrologi, teknik *downscaling* digunakan untuk pemodelan debit sungai dan banjir [6]. Metode *downscaling* adalah cara mendapatkan informasi lebih spesifik dengan resolusi tinggi. Kata *downscaling* biasanya merujuk pada peningkatan resolusi spasial maupun temporal. Terdapat dua cara dalam melakukan metode ini, yaitu statistik dan dinamik. Di dalam ilmu iklim, metode ini umum digunakan pada GCM. Wilby dan Wigley [14] mengelompokkan teknik *downscaling* menjadi 4 kategori, yaitu

1. Regresi

Metode regresi merupakan metode *downscaling* paling awal yang telah digunakan pada kajian perubahan iklim. Hal ini dapat dibuktikan dari penelitian oleh Kim pada tahun 1984 [4]. Pendekatan ini secara umum membangun hubungan linier atau non-linier antara parameter titik lokasi dengan prediktor variabel dari resolusi kasar. Contoh dari metode ini adalah regresi linier sederhana, regresi linier berganda, Artificial Neural Network (ANN), regresi komponen utama (Principle Component Regression/PCR), dan lain sebagainya. Sudah banyak penelitian yang menerapkan metode ini untuk kajian perubahan iklim [5, 3, 2, 10].

2. Pola cuaca

Metode ini dibangun dari hubungan statistik dari variabel cuaca di stasiun observasi atau rata-rata area dengan klasifikasi cuaca tertentu yang dapat diturunkan secara obyektif maupun subyektif. Metode ini secara obyektif dapat meliputi komponen utama, Canonical Correlation Analyses (CCA), aturan Fuzzy, dan Neural Networks. Contoh prosedur pengelompokkan pola cuaca, yaitu European Grosswetterlagen dan British Isles Lamb Weather Types.

3. Stokastik

Model WGEN [9] merupakan contoh dari pendekatan ini. Model WGEN dapat membangkitkan data curah hujan harian yang diperoleh dari peluang kejadian hujan (hujan dan tidak hujan) dengan menggunakan rantai Markov order satu. Model ini telah digunakan dalam kajian perubahan iklim

1 Dynamical Downscaling: Model Weather Research Forecasting (WRF)

dan analisis dampak. Model stokastik yang telah diperoleh dari data observasi deret waktu dapat divalidasi dengan GCM dan perlu dikalibrasi terlebih dahulu.

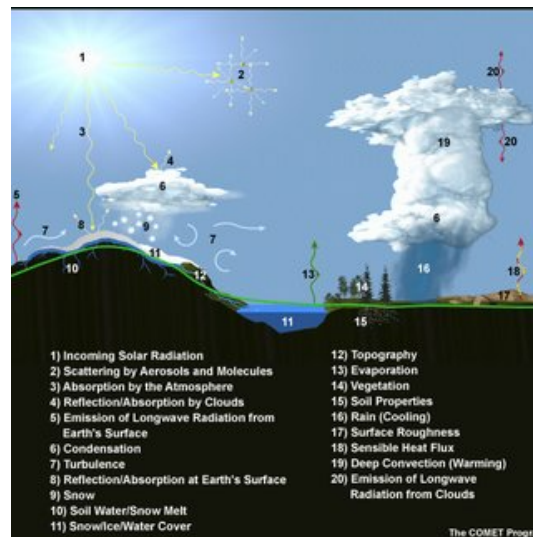
4. *Limited-area climate models* (LAM)

Metode terakhir untuk melakukan *downscaling* terhadap GCM adalah dengan menyematkan model iklim dengan area terbatas. Sebenarnya, LAM pada saat ini dapat diistilahkan sebagai *Regional Climate Model* (RCM). RCM memiliki resolusi spasial kurang dari 100 km. RCM memerlukan sumber daya komputer yang hampir sama dengan menjalankan GCM. RCM memiliki kemampuan dalam mensimulasikan proses-proses atmosfer pada skala menengah, seperti curah hujan orografis dan konveksi awan atau skala tinggi, seperti turbulensi. Contoh dari RCM adalah Weather Research Forecasting (WRF) [11].

Teknik *dynamical downscaling* dapat menjelaskan proses-proses fisika (hukum termodinamika, hukum kekekalan energi, hukum gerak) untuk setiap skala piksel. Teknik ini membutuhkan kondisi batas menggunakan data GCM dan perlu menentukan pemilihan lokasi. Teknik ini merujuk pada penggunaan RCM untuk meningkatkan skala spasial dan temporal. Model iklim regional meliputi komponen dinamik, fisik, maupun kimia. Komponen dinamik atmosfer memperhitungkan komponen fisika atmosfer yang mencakup proses-proses fisik, seperti radiasi gelombang panjang dan pendek, presipitasi, dan proses pertukaran energi di permukaan bumi atau laut. Proses pada skala sub-piksel dimodelkan oleh berbagai skema parameterisasi yang tentunya dapat berasal dari perhitungan matematika (integral atau diferensial) serta statistik.

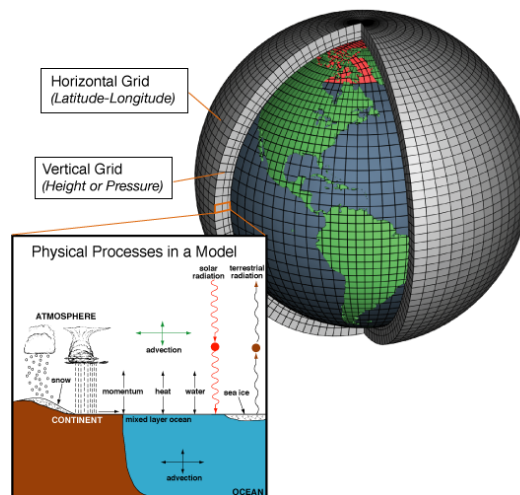
WRF merupakan salah satu teknik *dynamical downscaling*. Penggunaan model WRF semakin berkembang saat ini dengan tujuan riset dan operasional. WRF memiliki spesifikasi dalam berbagai aplikasi prediksi di dalam sistem bumi, seperti kimia atmosfer, hidrologi, kebakaran hutan, siklon, dan iklim regional. Sebanyak lebih dari 36.000 pengguna WRF tersebar di 162 negara, termasuk Indonesia yang telah menggunakan WRF untuk kebutuhan operasional [8]. Ada dua jenis model WRF berdasarkan penyelesaian persamaan aliran fluida atmosfer, yaitu *Advanced Research WRF* (ARW) dan *Nonhydrostatic Mesoscale Model* (NMM). WRF-ARW dikembangkan oleh National Centre of Atmosphere Research (NCAR), sedangkan WRF-NMM dikembangkan oleh National Centre of Environmental Prediction (NCEP) [11]. Secara umum, WRF mampu melakukan simulasi beberapa komponen *Numerical Weather Prediction* (NWP) Gambar 1.1. Berdasarkan aplikasi tertentu, WRF memiliki beberapa turunan model, seperti WRF-Chem (kimia atmosfer), WRF-Hydro (hidrologi), dan WRF-Fire (kebakaran hutan dan lahan). Di dalam praktikum ini, Anda hanya perlu memahami cara instalasi dan simulasi WRF-ARW.

WRF diimplementasikan ke dalam bahasa pemrograman komputer. Jika Anda melihat repositori github [WRF](#), Jenis bahasa pemrograman yang paling banyak digunakan adalah Fortran. Untuk perhitungan fisik, kimia, dan matematis diketik dalam bahasa Fortran. Model WRF dapat dijalankan pada personal komputer hingga super komputer. Sebenarnya, Anda dapat menjalankan WRF dengan 1 prosesor saja. Akan tetapi, waktu proses simulasi mungkin akan lama akibat dari resolusi spasial dan temporal yang tinggi, juga cakupan pemilihan wilayah simulasi. Proses perhitungan model dinamik maupun fisik akan lebih cepat jika menggunakan banyak prosesor atau yang bisa disebut dengan **komputasi paralel**. Kerangka kerja perangkat lunak WRF mendukung komputasi paralel yang efisien pada berbagai platform komputasi. Model atmosfer membawa kumpulan komputasi yang sama di setiap grid vertikal maupun horizontal Gambar 1.2. Komputer melakukan perhitungan fisik atmosfer untuk setiap grid secara paralel. Kita mungkin telah mengenal jenis prosesor yang tersedia saat ini, seperti Intel dan AMD. Jenis prosesor yang mereka buat dapat mempengaruhi kecepatan proses perhitungan. Untuk perhitungan paralel, Anda



Gambar 1.1: Beberapa parameter dalam *Numerical Weather Prediction* [13]

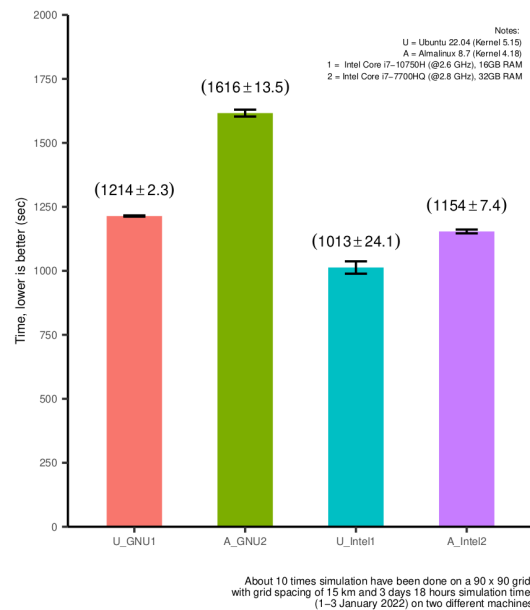
dapat menggunakan tipe prosesor desktop, mobile (prosesor di laptop), maupun server, tetapi juga perlu memperhatikan banyaknya *core* maupun frekuensi yang digunakan.



Gambar 1.2: Ilustrasi Model Iklim

Terkait dengan bahasa pemrograman yang digunakan di dalam WRF, yaitu bahasa Fortran dan C, kode skrip terlebih dahulu harus dikompilasi dengan program Compiler. Compiler ini bertujuan mengubah bahasa dari kode yang diketik menjadi bahasa mesin. Ada berbagai macam program Compiler yang tersedia secara gratis, salah satunya adalah [GNU Compiler Collection \(gcc\)](#). Selain GNU, perusahaan seperti Intel (icc, ifort, ...), AMD (aocc), maupun NVIDIA (pgi) juga memiliki program Compiler yang dapat digunakan secara gratis serta mendukung komputasi paralel. Di dalam modul praktikum ini, Anda dapat memilih salah satu dari dua Compiler yang akan dijelaskan, yaitu GCC atau Intel. Perbedaan terhadap jenis Compiler ini dapat mempengaruhi waktu simulasi pada satu jenis prosesor yang sama

Gambar 1.3.



Gambar 1.3: Perbedaan waktu simulasi WRF pada tipe Compiler, Distro, dan Prosesor yang digunakan

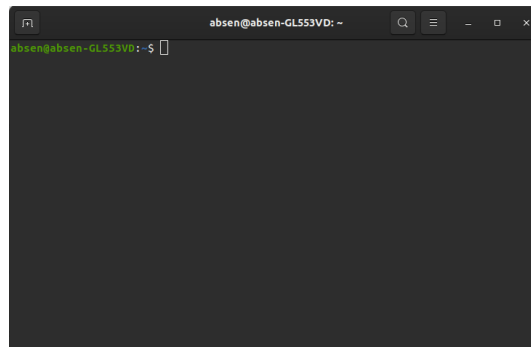
1.2 Dasar-dasar Pemrograman Bash

Sebagai salah satu tool scripting populer pada UNIX, Bash sangatlah berguna bagi para user Linux atau SysAdmin. Nama Bash merupakan akronim dari *Bourne Again Shell*. Sebagian besar model iklim, Bash digunakan untuk menjalankan instalasi dan simulasi. Pengguna model-model iklim disarankan mempelajari dasar-dasar pemrograman ini agar memahami berbagai perintah dari cara kerja instalasi dan simulasi model tersebut, biasanya terdapat file bernama **README**. File ini berisi mengenai cara instalasi, simulasi, informasi file, dan berbagai aplikasi tambahan untuk menjalankan model iklim tersebut.

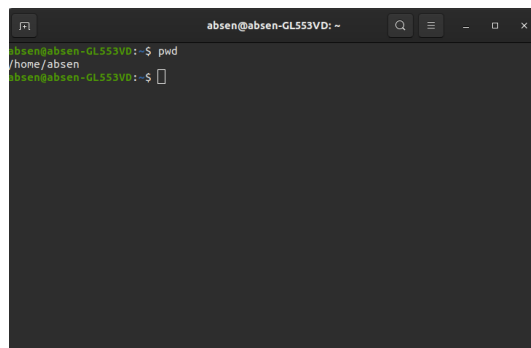
Bash merupakan shell default dari sistem operasi Linux. Anda bisa menjalankan shell lain, seperti ksh (Korn Shell), zsh, dan csh (C shell). Untuk menjalankan Bash, Anda bisa menekan Ctrl+Alt+T atau carilah aplikasi Terminal. Khusus Windows 10, Anda dapat mencari aplikasi “Ubuntu” atau “wsl.exe”. Tampilan Bash seperti pada Gambar 2. Tulisan **absenabsen-GL553VD** menunjukkan nama user dan tanda `~` berarti lokasi folder saat ini.

Jika Anda mengetik perintah `pwd` pada Bash, hasilnya adalah seperti di bawah ini atau bisa dilihat pada Gambar 1.5.

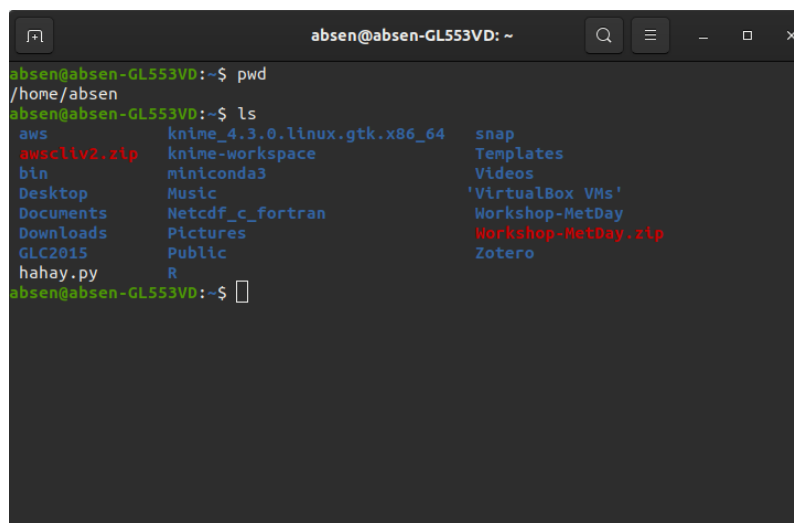
Perintah dasar lainnya yang sering digunakan oleh pengguna Linux adalah `ls` atau `ll` (Gambar 1.6). Perintah ini berfungsi untuk melihat nama folder dan file yang berada di direktori pada lokasi saat ini. Untuk berpindah lokasi folder, Anda dapat mengetik perintah `cd` dan pilih folder yang ingin dibuka, contohnya `cd Documents/` atau `cd Documents` (Gambar 1.7). Anda dapat kembali ke folder sebelumnya dengan mengetik perintah `cd ..`



Gambar 1.4: Bash pada Ubuntu

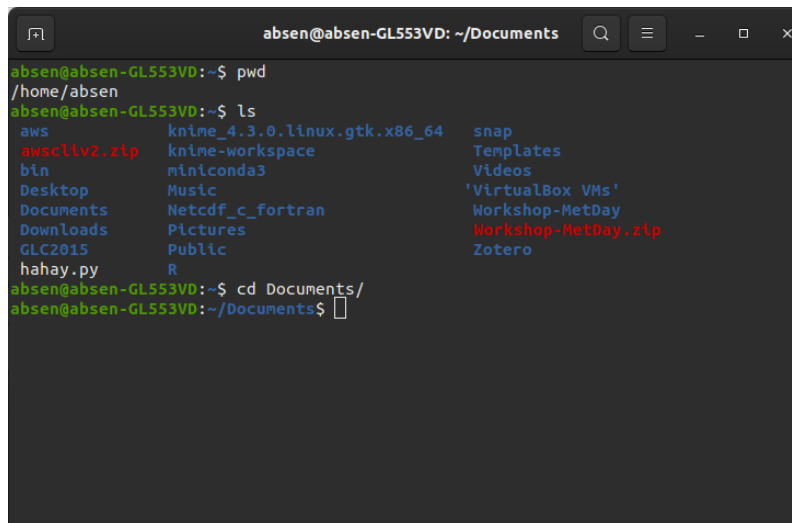


Gambar 1.5: Perintah pwd pada terminal Bash



Gambar 1.6: Perintah ls pada terminal Bash

1 Dynamical Downscaling: *Model Weather Research Forecasting (WRF)*

A screenshot of a terminal window titled 'absen@absen-GL553VD: ~/Documents'. The terminal shows the following commands and output:
absen@absen-GL553VD:~\$ pwd
/home/absen
absen@absen-GL553VD:~\$ ls
aws knime_4.3.0.linux.gtk.x86_64 snap
awscli_v2.zip knime-workspace Templates
bin miniconda3 Videos
Desktop Music 'VirtualBox VMs'
Documents Netcdf_c_fortran Workshop-MetDay
Downloads Pictures Workshop-MetDay.zip
GLC2015 Public Zotero
hahay.py R
absen@absen-GL553VD:~\$ cd Documents/
absen@absen-GL553VD:~/Documents\$

Gambar 1.7: Perintah `cd` pada terminal Bash

Anda dapat membuat folder baru dengan perintah `mkdir`, memindahkan folder atau file dengan `mv`, menghapus file dengan `rm`, menghapus folder dengan `rmdir`, membuat file baru dengan `touch`, dan menyalin folder atau file dengan `cp`. Contoh penggunaan beberapa perintah tersebut dapat dilihat sebagai berikut.

- Misalkan kita ingin membuat folder “Tes-folder”

```
mkdir Tes-folder
```

Anda juga dapat membuat lebih dari 1 folder, misalnya “Tes-folder-1” dan “Tes-folder-2”

```
mkdir Tes-folder-1 Tes-folder-2
```

Untuk memastikan ketiga folder tersebut telah dibuat, ketik perintah `ls`

```
ls
```

- Misalkan kita ingin membuat file “tes-file” di dalam folder “Tes-folder”

```
cd Tes-folder  
touch tes-file  
ls
```

Kemudian, file “tes-file” kita pindahkan ke direktori sebelumnya dan ganti namanya dengan “tes-file-pindah”

```
mv tes-file ../tes-file-pindah
```

Kembali ke folder sebelumnya

```
cd ..
```

Ketik perintah `ls` untuk memastikan file “tes-file” telah dipindahkan ke direktori sebelumnya dengan berubah nama menjadi “tes-file-pindah”

```
ls
```

- File “tes-file-pindah” dihapus menggunakan perintah `rm`

```
rm tes-file-pindah  
ls
```

1.3 Prosedur Praktikum: Instalasi WRF

Kami menyarankan untuk menggunakan sistem operasi Linux dengan Distro Ubuntu. Jika Anda menggunakan Windows 10/11, Anda dapat memasang Windows Subsystem Linux (WSL) dan pasang Distro Ubuntu. Saat kami menguji WRF di Ubuntu, proses instalasi serta simulasi tidak mengalami masalah. Anda dipersilahkan menggunakan distro yang lain, seperti Fedora, CentOS, Almalinux, atau Manjaro, tetapi kami tidak dapat menjamin keberhasilan instalasi dan simulasi pada distro tersebut. Untuk pengguna MacOS, Anda dapat menggunakan Virtual Machine (mis. Virtual Box, VMWare, QEMU) atau Docker.

1.3.1 Menjalankan *Windows Subsystem Linux* (WSL) di Windows 10/11

Untuk menjalankan WRF, Anda memerlukan sistem operasi berbasis Linux dengan distribusi yang tersedia saat ini. Pada modul ini, distro Ubuntu yang dipilih untuk simulasi WRF. Bagi Anda pengguna Windows 10/11, WSL dapat digunakan. Selain WSL, Anda juga dapat menggunakan Cygwin. WSL dapat dijalankan pada Windows 10/11 dan Windows Server 2019 dengan versi minimum 1803. Saat ini, WSL versi 2 (WSL-2) telah tersedia yang dapat berjalan pada Windows 10 versi 1903 ke atas. Kami merekomendasikan Anda untuk memasang WSL-2 daripada WSL-1 karena prosesnya lebih cepat. Untuk mengaktifkan WSL, Anda dapat mengikuti beberapa langkah-langkah berikut ini.

1. Unduh WSL-2 pada [halaman ini](#) dan Install.
2. Pergi ke menu Control Panel → Program and Features
3. Di sebelah kiri, klik Turn Windows Features On or Off

1 Dynamical Downscaling: *Model Weather Research Forecasting (WRF)*

4. Scroll ke paling bawah. Kemudian, aktifkan tanda centang pada **Windows Subsystem for Linux** dan **Virtual Machine Platform**
5. Tunggu proses *update* sampai selesai, kemudian klik **Restart Now** (pastikan simpan data-data pekerjaan dan tutup semua aplikasi)
6. Setelah proses restart selesai, carilah aplikasi dan unduh Ubuntu pada Microsoft Store
7. Buka aplikasi Ubuntu yang telah terunduh dan tunggu konfigurasi selesai
8. Masukkan Username dan Password (**Catatan:** kami sarankan sama dengan user dan pass Windows 10, tapi boleh beda. Hasil ketikan password **tidak** muncul di terminal)
9. Ketikkan pada terminal

```
sudo apt update
```

10. Anda juga dapat membuka terminal Ubuntu pada terminal Windows Power Shell dengan mengetik `wsl` atau `wsl.exe`

1.3.2 Sebelum Mulai

Anda perlu mencoba dasar pemrograman Bash sebelum memulai mengunduh data, memasang beberapa package, sampai menjalankan simulasi WRF. Silahkan Anda ikuti langkah-langkah di bawah ini agar memudahkan dalam mencoba praktikum ini.

1. Buka terminal Bash

- Untuk Windows 10/11, buka aplikasi Windows Power Shell. Kemudian, ketikkan perintah seperti di bawah ini. Setelahnya, akan muncul terminal Bash.

```
wsl
```

- Untuk Ubuntu atau disto Linux lainnya, carilah program **Terminal** atau bisa menggunakan shortcut **Ctrl+Alt+T**
2. Saat Anda membuka terminal, pastikan lokasi folder/direktori saat ini adalah `/home/<user_name>`, di mana `user_name` adalah nama user pada laptop/komputer Anda masing-masing. Perhatikan kembali Gambar 1.5 bahwa untuk melihat lokasi direktori Anda sekarang bisa mengetik perintah `pwd` pada terminal atau dengan melihat simbol `~` yang terletak di sebelah kiri `$`.
 3. Buat folder kerja dengan nama `WRF-Model` untuk menampung data-data, package, serta source code WRF. Perintah pada terminal Bash adalah sebagai berikut.

```
mkdir WRF-Model
```

4. Kemudian, bukalah folder `WRF-Model` dengan perintah

```
cd WRF-Model
```

Sekarang, Anda berada di folder **WRF-Model** (Perhatikan ~ berubah menjadi ~/WRF-Model)

5. Di dalam **WRF-Model**, buatlah folder **data** guna untuk meletakkan data masukan WRF (data statik dan data cuaca).

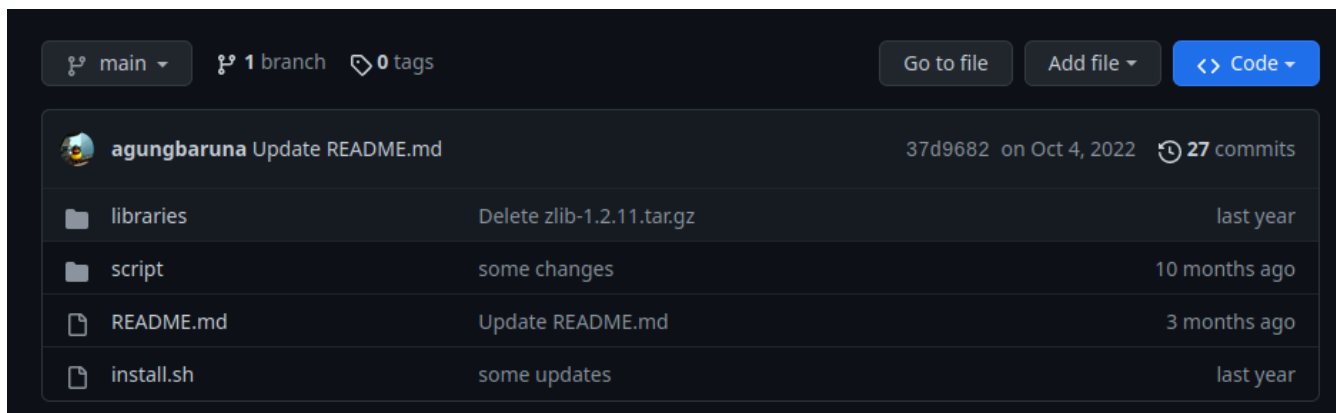
Langkah-langkah di atas masih berlanjut pada subbab selanjutnya.

1.3.3 Data dan Package Pendukung

Perangkat Lunak

Untuk memasang WRF, Anda perlu menyiapkan perangkat lunak pendukung serta data contoh untuk mensimulasikan WRF. Perangkat lunak tersebut dapat diunduh melalui halaman [Github ini](#). Untuk mengunduh source code, pilih <> **Code** → **Download ZIP** (Gambar 1.8). Anda dapat mengunduh secara manual atau menggunakan perintah `git clone` pada terminal.

```
sudo apt -y install git #Install program git jika belum ada
git clone https://www.github.com/agungbaruna/pyWRF-install
```



Gambar 1.8: Unduh source code

Setelah software pendukung telah diunduh, unduh source code WPS (WRF Pre-Processing) dan WRF pada halaman [Github NCAR](#). Source code WRF berisi algoritma perhitungan fisik dan dinamik atmosfer, sedangkan source code WPS berisi algoritma untuk persiapan data masukan atmosfer dari GCM dan pemilihan lokasi.

- WRF Pre-Processing (WPS): <https://www.github.com/wrf-model/WPS>
- Model WRF: www.github.com/wrf-model/WRF

Data

Data-data masukan untuk WRF telah tersedia dan unduh pada halaman web <https://s.id/wrf-data>. Kami menyarankan untuk menggunakan Wi-Fi karena ukuran data cukup besar. Data yang telah diunduh Anda pindahkan ke folder `data` yang berada di dalam `WRF-Model`.

1. Global Forecast System (GFS)

Untuk data masukan yang digunakan berasal dari NOAA yang bernama Global Forecasts System (GFS). GFS memiliki resolusi spasial 0.25° (~ 25 km), 0.50° (~ 50 km), dan 1.00° (~ 100 km) dengan temporal per 6 jam. GFS memiliki produk data prakiraan maupun analisis/histori cuaca secara global. Anda dapat mengunduh data ini pada salah satu halaman web berikut.

- AWS S3 Bucket: <https://noaa-gfs-bdp-pds.s3.amazonaws.com>
- Research Data Archive (RDA) NCAR: <https://rda.ucar.edu/datasets/ds084.1>
- NCEP Central Operations: <https://nomads.ncep.noaa.gov/>

Data GFS yang digunakan dalam praktikum ini memiliki waktu 1-3 Januari 2022 pada pukul 00:00, 06:00, 12:00, dan 18:00 UTC dengan resolusi spasial 1.00° yang telah diunduh pada halaman web AWS S3 Bucket. Produk GFS yang digunakan adalah analisis/histori.

2. ERA5

Selain GFS, Anda dapat menggunakan data masukan dari institusi lain, seperti ECMWF pada produk ERA5. ERA5 merupakan data reanalisis sehingga hanya memiliki produk histori. Anda dapat mengunduhnya melalui Climate Data Store (CDS) pada halaman <https://cds.climate.copernicus.eu>. ERA5 memiliki resolusi spasial sebesar 0.25° dengan temporal per 1 jam. Data ERA5 memiliki dua tipe, yaitu data permukaan tanah (*Single Levels*) dan atmosfer untuk setiap ketinggian (*Pressure Levels*). Anda diharuskan mengunduh dua tipe data ini dengan variabel yang dipilih adalah sebagai berikut.

- ERA5 hourly data on Pressure Levels:
 - geopotential
 - relative humidity
 - specific humidity
 - temperature
 - u-component wind
 - v-component wind
- ERA5 hourly data on Single Levels:
 - 10m u-component of wind
 - 10m v-component of wind
 - 2m dewpoint temperature
 - 2m temperature
 - land sea mask
 - mean sea level pressure

- sea ice cover
- sea surface temperature
- skin temperature
- snow depth
- soil temperature level 1
- soil temperature level 2
- soil temperature level 3
- soil temperature level 4
- surface_pressure
- volumetric soil water layer 1
- volumetric soil water layer 2
- volumetric soil water layer 3
- volumetric soil water layer 4

Anda tidak diharuskan mengunduh semua jam karena CDS membatasi banyaknya permintaan data dari pengguna sehingga Anda tidak dapat mengunduh semua data sekaligus. Data ERA5 yang akan digunakan pada praktikum ini memiliki waktu yang sama dengan GFS.

3. Data Statik WPS

Data statik ini wajib diunduh untuk menjalankan WRF. Data ini berisi seperti tipe permukaan lahan, nilai Leaf Area Index (LAI), tipe tanah, dan elevasi permukaan. Anda dapat mengunduhnya di https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/src/wps_files/geog_high_res_mandatory.tar.gz. File dari data tersebut berukuran 2 GB dan setelah diekstrak dapat mencapai 30 GB. Data ini sudah tersedia di dalam link <https://s.id/wrf-data>. Untuk mengekstrak file ini, gunakan perintah berikut

```
cd data
gunzip geog_high_res_mandatory.tar.gz
tar -xf geog_high_res_mandatory.tar
cd .. # Kembali ke folder WRF-Model
```

Setelah itu, folder WPS_GEOG akan muncul di dalam folder data/

1.3.4 Instalasi Software Compiler

Instalasi ini meliputi cara melakukan kompilasi dengan dua Compiler berbeda, yaitu GNU dan Intel. Anda dipersilahkan memilih salah satu langkah. Proses kompilasi untuk semua package yang telah terunduh tidak dapat dilakukan pada Compiler yang berbeda.

1. GNU

Sebelum Anda memasuki tahapan instalasi package yang terdapat dalam folder `pyWRF-install`, pasang terlebih dahulu package dependencies dengan perintah di bawah ini.

1 Dynamical Downscaling: Model Weather Research Forecasting (WRF)

```
sudo apt -y update && sudo apt -y upgrade
sudo apt -y install gfortran gcc make m4 csh
```

2. Intel

Berbeda dengan GNU, tipe Compiler Intel memang agak rumit untuk memasangnya. Namun, Compiler ini sebenarnya lebih efisien dalam hal kecepatan saat mensimulasikan WRF. Kami sudah membandingkan waktu simulasi dengan Compiler tipe ini lebih cepat dibandingkan dengan GNU Gambar 1.3.

Anda dapat memperoleh software ini di halaman resmi [Intel](#). Kami sudah menyediakan software tersebut di dalam halaman web [s.id/wrf-intel-compiler](#). Terdapat tiga file instalasi Compiler, yaitu Fortran, C, dan MPI (untuk komputasi paralel). Jumlah ukuran tiga file tersebut cukup besar, sekitar 2,5 GB. Letakkan ketiga file ini di dalam folder WRF-Model. Perhatikan langkah-langkah berikut ini untuk memasang ketiga file tersebut.

```
# 0. Package pendukung
sudo apt -y install make m4 csh
# 1. C Compiler
bash l_dpccpp-cpp-compiler_p_2023.0.0.25393_offline.sh -a -s --eula accept
# 2. Fortran Compiler
bash l_fortran-compiler_p_2023.0.0.25394_offline.sh -a -s --eula accept
# 3. MPI
bash l_mpi_oneapi_p_2021.8.0.25329_offline.sh -a -s --eula accept
```

Lokasi folder hasil instalasi terdapat di `~/intel`. Secara default, perintah untuk memanggil program Compiler belum diatur. Untungnya, Intel menyediakan skrip untuk memanggil semua program Compiler secara default, yaitu terdapat di dalam `~/intel/oneapi/setvars.sh`. Perintah untuk memanggil skrip `setvars.sh` adalah sebagai berikut.

```
source ~/intel/oneapi/setvars.sh
```

1.3.5 Instalasi Package

Instalasi beberapa package meliputi zlib, libpng, jasper, hdf5, netcdf-c, dan netcdf-fortran. Perlu diperhatikan dan lihat pada terminal bahwa Anda berada di folder `~/WRF-Model`. Masukkan beberapa perintah **ENVIRONMENT VARIABLE** di bawah ini. Langkah ini wajib dilakukan pada saat melakukan instalasi package dan juga WRF. Pendefinisian **ENVIRONMENT VARIABLE** ini berlaku untuk GNU maupun Intel.

```
export ODIR=$HOME/WRF-Model
export PATH=$ODIR/bin:$PATH
```

```
export LD_LIBRARY_PATH=$ODIR/lib:$LD_LIBRARY_PATH
export LDFLAGS=-L$ODIR/lib
export CPPFLAGS=-I$ODIR/include
export NETCDF=$ODIR
export HDF5=$ODIR
export JASPERLIB=$ODIR/lib
export JASPERINC=$ODIR/include
```

1. GNU

Berikut ini langkah-langkah memasang package pada Compiler **GNU**. Buka terlebih dahulu folder `pyWRF-install/libraries` dengan mengetik perintah `cd pyWRF-install/libraries`.

1. zlib

```
# 0. Buka folder libraries
cd $ODIR/pyWRF-install/libraries
# 1. Extract
tar -xf zlib-1.2.13.tar.gz
# 2. Buka folder hasil ekstrak
cd zlib-1.2.13
# 3. Konfigurasi
CC=gcc ./configure --prefix=$ODIR
# 4. Instalasi
make check install
```

2. libpng

```
# 0. Buka folder libraries
cd $ODIR/pyWRF-install/libraries
# 1. Extract
tar -xf libpng-1.6.37.tar.gz
# 2. Buka folder hasil ekstrak
cd libpng-1.6.37
# 3. Konfigurasi
CC=gcc ./configure --prefix=$ODIR
# 4. Instalasi
make check install
```

3. jasper

1 Dynamical Downscaling: Model Weather Research Forecasting (WRF)

```
# 0. Buka folder libraries
cd $ODIR/pyWRF-install/libraries
# 1. Extract
tar -xf jasper-1.900.1.tar.gz
# 2. Buka folder hasil ekstrak
cd jasper-1.900.1
# 3. Konfigurasi
CC=gcc ./configure --prefix=$ODIR
# 4. Instalasi
make check install
```

4. openMPI

Jika Anda tidak berencana menjalankan WRF dengan 1 prosesor, Anda dapat melewati langkah ini. Akan tetapi, kami menyarankan untuk memasang program ini untuk mempersingkat waktu dalam mensimulasikan WRF.

```
# 0. Buka folder libraries
cd $ODIR/pyWRF-install/libraries
# 1. Extract
tar -xf openmpi-4.1.4.tar.gz
# 2. Buka folder hasil ekstrak
cd openmpi-4.1.4
# 3. Konfigurasi
CC=gcc FC=gfortran ./configure --prefix=$ODIR
# 4. Instalasi
make check install
```

5. hdf5

```
# 0. Buka folder libraries
cd $ODIR/pyWRF-install/libraries
# 1. Extract
tar -xf hdf5-1.12.0.tar.gz
# 2. Buka folder hasil ekstrak
cd hdf5-1.12.0
# 3. Konfigurasi
CC=gcc FC=gfortran ./configure --prefix=$ODIR --with-default-api-version=v18
↪ --enable-fortran
# 4. Instalasi
make
make install
```

6. netcdf-c

```
# 0. Buka folder libraries
cd $ODIR/pyWRF-install/libraries
# 1. Extract
tar -xf netcdf-c-4.7.4.tar.gz
# 2. Buka folder hasil ekstrak
cd netcdf-c-4.7.4
# 3. Konfigurasi
CC=gcc ./configure --prefix=$ODIR --disable-dap
# 4. Instalasi
make
make install
```

7. netcdf-fortran

```
# 0. Buka folder libraries
cd $ODIR/pyWRF-install/libraries
# 1. Extract
tar -xf netcdf-fortran-4.5.3.tar.gz
# 2. Buka folder hasil ekstrak
cd netcdf-fortran-4.5.3
# 3. Konfigurasi
CC=gcc FC=gfortran ./configure --prefix=$ODIR
# 4. Instalasi
make
make install
```

2. Intel

Berikut ini langkah-langkah memasang package pada Compiler **Intel**. Buka terlebih dahulu folder `pyWRF-install/libraries` dengan mengetik perintah `cd pyWRF-install/libraries`. Untuk proses instalasi menggunakan Intel, sama saja dengan GNU. Hanya saja, perbedaannya adalah definisi dari variabel `CC` maupun `FC`. Untuk Intel, variabel `CC=icc` dan `FC=ifort`. Jangan lupa untuk mengaktifkan **ENVIRONMENT VARIABLE** dari Intel dengan mengetik perintah.

```
source ~/intel/oneapi/setvars.sh
```

1. zlib

```
# 0. Buka folder libraries
cd $ODIR/pyWRF-install/libraries
# 1. Extract
tar -xf zlib-1.2.13.tar.gz
```

1 Dynamical Downscaling: *Model Weather Research Forecasting (WRF)*

```
# 2. Buka folder hasil ekstrak
cd zlib-1.2.13
# 3. Konfigurasi
CC=icc CFLAGS='-diag-disable=10441' ./configure --prefix=$ODIR
# 4. Instalasi
make check install
```

2. libpng

```
# 0. Buka folder libraries
cd $ODIR/pyWRF-install/libraries
# 1. Extract
tar -xf libpng-1.6.37.tar.gz
# 2. Buka folder hasil ekstrak
cd libpng-1.6.37
# 3. Konfigurasi
CC=icc CFLAGS='-diag-disable=10441' ./configure --prefix=$ODIR
# 4. Instalasi
make check install
```

3. jasper

```
# 0. Buka folder libraries
cd $ODIR/pyWRF-install/libraries
# 1. Extract
tar -xf jasper-1.900.1.tar.gz
# 2. Buka folder hasil ekstrak
cd jasper-1.900.1
# 3. Konfigurasi
CC=icc CFLAGS='-diag-disable=10441' ./configure --prefix=$ODIR
# 4. Instalasi
make check install
```

4. hdf5

```
# 0. Buka folder libraries
cd $ODIR/pyWRF-install/libraries
# 1. Extract
tar -xf hdf5-1.12.0.tar.gz
# 2. Buka folder hasil ekstrak
cd hdf5-1.12.0
# 3. Konfigurasi
```

```
CC=icc FC=ifort CFLAGS='-diag-disable=10441' ./configure --prefix=$ODIR
↪ --with-default-api-version=v18 --enable-fortran
# 4. Instalasi
make
make install
```

5. netcdf-c

```
# 0. Buka folder libraries
cd $ODIR/pyWRF-install/libraries
# 1. Extract
tar -xf netcdf-c-4.7.4.tar.gz
# 2. Buka folder hasil ekstrak
cd netcdf-c-4.7.4
# 3. Konfigurasi
CC=icc CFLAGS='-diag-disable=10441' ./configure --prefix=$ODIR --disable-dap
# 4. Instalasi
make
make install
```

6. netcdf-fortran

```
# 0. Buka folder libraries
cd $ODIR/pyWRF-install/libraries
# 1. Extract
tar -xf netcdf-fortran-4.5.3.tar.gz
# 2. Buka folder hasil ekstrak
cd netcdf-fortran-4.5.3
# 3. Konfigurasi
CC=icc FC=ifort CFLAGS='-diag-disable=10441' ./configure --prefix=$ODIR
# 4. Instalasi
make
make install
```

1.3.6 Instalasi WRF

Proses instalasi WRF membutuhkan waktu agak lama, yaitu sekitar 30-60 menit. Tentunya, ini bergantung pada spesifikasi prosesor yang Anda gunakan, serta tipe Compiler. Ikuti langkah-langkah berikut.

1. Buka direktori WRF yang berada di dalam \$ODIR/WRF dengan perintah.

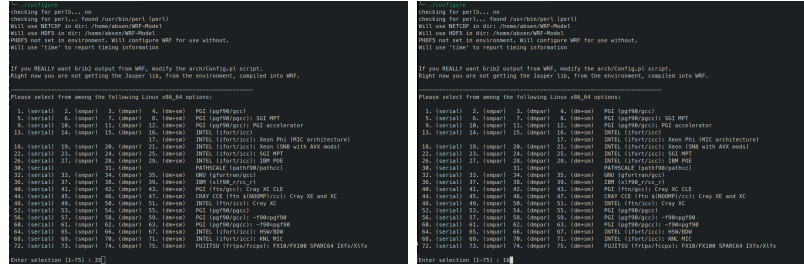
```
cd $ODIR/WRF
```

1 Dynamical Downscaling: Model Weather Research Forecasting (WRF)

2. Jalankan file `configure` dengan perintah.

```
./configure
```

Anda akan disajikan beberapa teks di dalamnya. Anda disuruh untuk memilih opsi Compiler. Tipe Compiler tersebut selain GNU dan Intel, ada pula IBM, PGI, Fujitsu, Pathscale, dan CRAY. Jika Anda menggunakan Compiler tipe GNU, ketikkan angka **35**. Untuk Intel, ketik angka **16**. Setelah



itu, tekan Enter.

3. Untuk melakukan instalasi, ketik perintah ini.

```
./compile em_real -j jumlah_prosesor
```

dimana `jumlah_prosesor` adalah jumlah dari prosesor pada laptop/komputer Anda yang akan digunakan untuk proses instalasi dan kompilasi kode-kode WRF. Proses kompilasi akan memakan waktu yang sangat lama apabila Anda hanya menggunakan 1 prosesor. Pastikan berbagai program pada komputer/laptop Anda yang saat ini sedang dibuka, seperti Google Chrome atau Spotify harap ditutup terlebih dahulu karena ini membantu proses instalasi lebih stabil.

4. Untuk Compiler Intel, setelah langkah ke-2 dijalankan, buka file `configure.wrf` dengan perintah.

```
nano configure.wrf
```

Kemudian, scroll ke bawah dengan menekan tombol \downarrow pada keyboard dan ubahlah isinya sesuai aturan pada tabel di bawah ini.

Tabel 1.1: Pengubahan variabel `DM_FC` dan `DM_CC`

Sebelum	Sesudah
<code>DM_FC = mpif90 -f90=\$(SFC)</code>	<code>DM_FC = mpiifort -f90=\$(SFC)</code>
<code>DM_CC = mpicc -cc=\$(SCC)</code>	<code>DM_CC = mpiicc -cc=\$(SCC)</code>

Setelah selesai diubah, keluar dari editor nano dengan menekan tombol **Ctrl + X**

Proses instalasi WRF berhasil dilakukan apabila terdapat file yang berekstensi `.exe`: `ndown.exe`, `tc.exe`, `real.exe`, dan `wrf.exe` di dalam folder `main`. Anda bisa melihatnya dengan perintah


```
ls main/*.exe
```

```
main/ndown.exe  main/real.exe  main/tc.exe  main/wrf.exe
```

1.3.7 Instalasi WRF Pre-Processing (WPS)

Program WPS digunakan untuk menyesuaikan data masukan dari berbagai sumber (ECMWF, GFS, NAM, ...) sebelum ke simulasi WRF. Terdapat 3 program utama: `geogrid.exe`, `ungrib.exe`, dan `metgrid.exe`. Berikut ini kegunaan dari ketiga program utama WPS.

- `geogrid.exe`: memilih lokasi yang akan dilakukan simulasi. Luaran program ini berupa file `geo_em*` yang berisi nilai-nilai dari variabel di dalam file hasil ekstrak `geog_high_res_mandatory.tar`
- `ungrib.exe`: mengubah file berformat `grib` menjadi `nc`, serta memungkinkan dapat melakukan interpolasi (waktu dan lokasi)
- `metgrid.exe`: menggabungkan

Proses instalasi WPS tidak membutuhkan waktu yang lama, sekitar 2-5 menit. Untuk melakukan instalasi WPS, ikuti langkah-langkah berikut ini.

1. Saat ini, Anda berada di folder `WRF`. Buka folder `WPS` dengan perintah

```
cd $ODIR/WPS
```

2. Jalankan file `configure` dengan perintah

```
./configure
```

Ketik angka **3** untuk GNU atau angka **19** untuk Intel.

3. Setelah selesai, di folder `WPS` akan muncul file `configure.wps`. Beberapa baris dari isi file tersebut ada yang perlu ditambahkan dan diganti dengan ketentuan ini.

- Untuk Intel, tambahkan `-liomp5` setelah `-lnetcdf` pada bagian variabel `WRF_LIB =`. Kemudian, ubah pula `DM_FC` dan `DM_CC` seperti pada Tabel 1.1.
- Untuk GNU, tambahkan `-fopenmp` setelah `-lnetcdf` pada bagian variabel `WRF_LIB =`

4. Setelah diganti, lakukan kompilasi dengan mengetik perintah

```
./compile
```

Proses instalasi berhasil apabila terdapat 3 file `.exe`: `geogrid.exe`, `ungrib.exe`, dan `metgrid.exe` di folder `WPS` yang berupa shortcut. Anda dapat menggunakan perintah

```
ls *.exe
```

```
geogrid.exe metgrid.exe ungrib.exe
```

1.4 Prosedur Praktikum: Menjalankan Simulasi WRF-ARW

Anda dapat melanjutkan ke tahapan ini apabila seluruh program telah berhasil terpasang. Bagi Anda yang belum berhasil, sabar :D dan ulangi kembali langkah-langkah di atas. Secara umum, diagram pada Gambar 1.9 menunjukkan proses menjalankan WRF dari tahapan memasukkan data hingga plot dan analisis akhir. Seperti yang telah dijelaskan pada subbab sebelumnya bahwa langkah awal dalam menjalankan WRF adalah menjalankan WPS terlebih dahulu. Anda perlu menyiapkan data masukan atmosfer maupun permukaan (data statik). Program `geogrid.exe` dijalankan pertama, kemudian diikuti dengan `ungrib.exe` dan terakhir `metgrid.exe`. Selanjutnya, Anda dapat melangkah ke program WRF, yaitu `real.exe` dan `wrf.exe`. Program `real.exe` digunakan sebagai pendefinisian kondisi awal dan kondisi batas berdasarkan informasi dari `namelist.input` yang berada dalam folder `test/em_real/`. Kemudian, Anda dapat menggunakan perangkat lunak apapun (mis. NCAR Comman Language (NCL), GrADS, R, Python, Matlab, ArcMAP, QGIS, ...) untuk menganalisis serta visualisasi luaran WRF.

Untuk data masukan, Anda juga dapat menggunakan data observasi, tetapi harus berupa grid. Namun, ini merupakan program yang berbeda dari WRF-ARW, yaitu WRFDA (WRF Data Assimilation). Selain itu, terdapat pula data masukan dari emisi kimia, seperti emisi biogenik dan antropogenik. Ini juga merupakan program yang berbeda dari WRF-ARW, yaitu WRF-Chem. Penjelasan mengenai WRFDA dan WRF-Chem tidak disampaikan di dalam praktikum ini.

Note

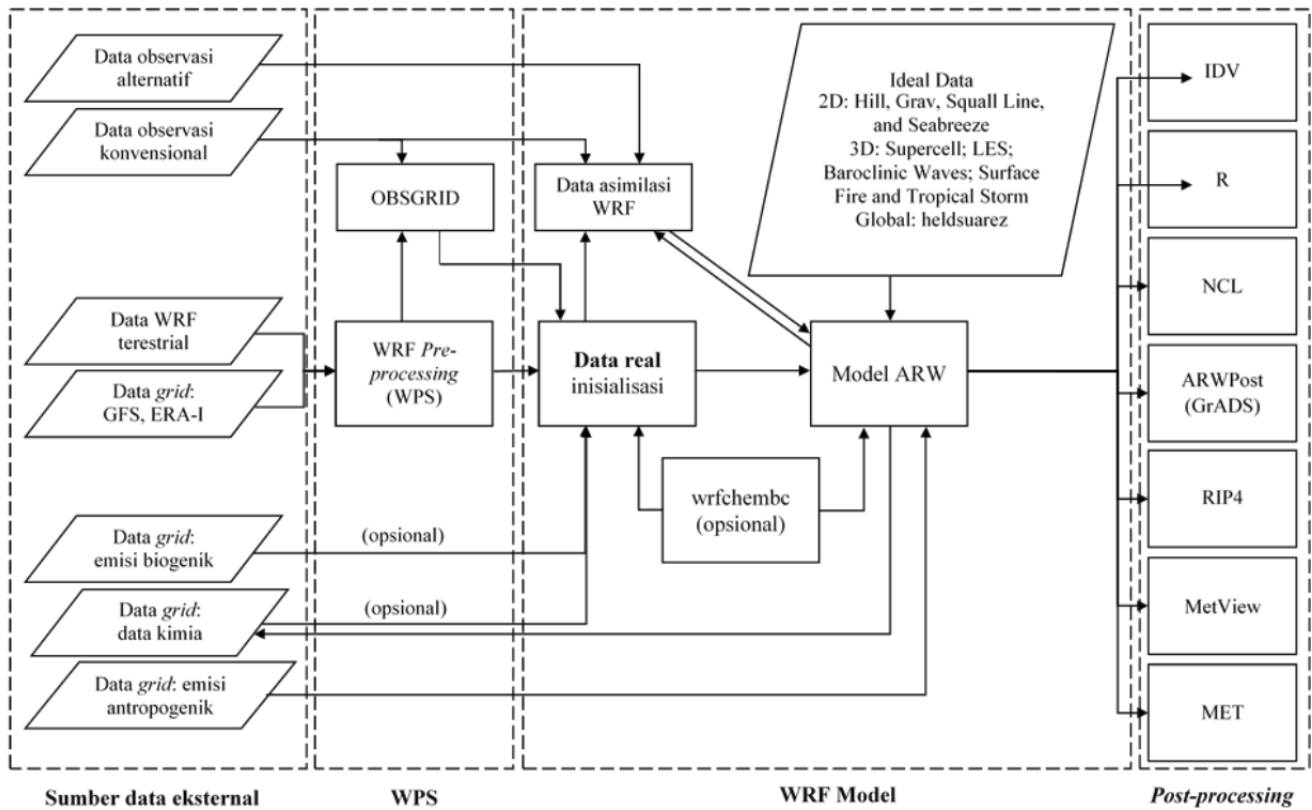
1.4.1 Program WPS

Untuk lebih mudah dalam memahami alur proses simulasi WRF pada modul ini, lokasi/domain yang dipilih untuk adalah Kota Surabaya dengan periode 1 - 3 Januari 2022 dengan data GFS dan ERA5. Interval waktu dari kedua data tersebut adalah 6 jam, yaitu pukul 00:00, 06:00, 12:00, dan 18:00 waktu Zulu (GMT+0). Langkah awal sebelum menjalankan WRF adalah menentukan lokasi dan waktu terlebih dahulu di dalam program WPS. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, WPS memiliki 3 program utama, yaitu `geogrid.exe`, `ungrib.exe`, dan `metgrid.exe`.

Sesuai dengan kelanjutan dari subbab sebelumnya mengenai instalasi WRF, Anda saat ini berada di dalam folder `WPS/`. Jika lupa, Anda bisa mengetikkan perintah ini.

```
cd $HOME/WRF-Model/WPS
```

1.4 Prosedur Praktikum: Menjalankan Simulasi WRF-ARW



Gambar 1.9: Diagram WRF

1 Dynamical Downscaling: Model Weather Research Forecasting (WRF)

Kemudian, Jika Anda menutup terminal bash atau mematikan laptop/komputer, definisikan kembali ENVIRONMENT VARIABLE seperti pada saat proses memasang WRF dan WPS, hanya LD_LIBRARY_PATH dan PATH.

```
export ODIR=$HOME/WRF-Model
export PATH=$ODIR/bin:$PATH
export LD_LIBRARY_PATH=$ODIR/lib:$LD_LIBRARY_PATH
```

Langkah-langkah menjalankan program WPS adalah sebagai berikut.

1. Buka file `namelist.wps`. Isi dari file tersebut pada saat awal kurang lebih seperti ini.

```
&share
wrf_core = 'ARW',
max_dom = 2,
start_date = '2019-09-04_12:00:00','2019-09-04_12:00:00',
end_date   = '2019-09-06_00:00:00','2019-09-04_12:00:00',
interval_seconds = 10800
/

&geogrid
parent_id      = 1, 1,
parent_grid_ratio = 1, 3,
i_parent_start  = 1, 53,
j_parent_start  = 1, 25,
e_we           = 150, 220,
e_sn           = 130, 214,
geog_data_res = 'default','default',
dx = 15000,
dy = 15000,
map_proj = 'lambert',
ref_lat  = 33.00,
ref_lon  = -79.00,
truelat1 = 30.0,
truelat2 = 60.0,
stand_lon = -79.0,
geog_data_path = '/glade/work/wrfhelp/WPS_GEOG/'
/

&ungrib
out_format = 'WPS',
prefix = 'FILE',
/

&metgrid
fg_name = 'FILE'
```

/

Terdapat berbagai macam parameter di dalam `&share`, `&geogrid`, `&ungrib`, dan `&metgrid`. Anda perlu mengubah beberapa parameter tersebut yang dapat disesuaikan dengan simulasi. Tapi, Anda harus memperhatikan aturan atau template yang telah diberikan di dalam panduan pengguna. Untuk lebih rincinya, Anda bisa lihat di [Panduan Pengguna WRF-ARW Bab 3](#).

Di dalam tahapan ini, Anda perlu mengubah parameter-parameter yang ada di dalam `&geogrid`. Pada contoh yang telah kami berikan, Anda perlu mengganti parameter `&geogrid` dan `&share`. File `namelist.wps` di atas berubah menjadi seperti ini. Penjelasan setiap variabel dapat dilihat pada Tabel 1.2

```
&share
  wrf_core = 'ARW',
  max_dom = 3,
  start_date = '2022-01-01_00:00:00', '2022-01-01_00:00:00', '2022-01-01_00:00:00',
  end_date   = '2022-01-03_18:00:00', '2022-01-03_18:00:00', '2022-01-03_18:00:00',
  interval_seconds = 21600,
  io_form_geogrid = 2,
/
```

```
&geogrid
  parent_id      = 1, 1, 1,
  parent_grid_ratio = 1, 3, 9,
  i_parent_start  = 1, 11, 15,
  j_parent_start  = 1, 11, 15,
  e_we           = 33, 40, 46,
  e_sn           = 33, 40, 46,
  geog_data_res = 'default', 'default', 'default',
  dx = 18000,
  dy = 18000,
  map_proj = 'mercator',
  ref_lat  = -7.328457529144323,
  ref_lon  = 112.7412453984603,
  truelat1 = -7.328457529144323,
  geog_data_path = '/home/absen/WRF-Model/data/WPS_GEOG/'
/
```

```
&ungrib
  out_format = 'WPS',
  prefix = 'FILE',
/
```

```
&metgrid
  fg_name = 'FILE'
  io_form_metgrid = 2,
/
```

Tabel 1.2: Informasi beberapa variabel di dalam `namelist.wps`

Variabel	Keterangan
<code>wrf_core</code>	Tipe penyelesaian WRF, ARW atau NMM
<code>max_dom</code>	Jumlah domain, semakin banyak domain maka semakin tinggi resolusi spasialnya
<code>start_date</code>	Waktu mulai simulasi sesuai dengan data masukan. Sesuai dengan jumlah domain. Format: YYYY-MM-DD_HH:mm:ss
<code>end_date</code>	Waktu akhir simulasi sesuai dengan data masukan. Sesuai dengan jumlah domain. Format: YYYY-MM-DD_HH:mm:ss
<code>interval_seconds</code>	Interval waktu dari data masukan (dalam detik)
<code>io_from_geogrid</code>	Tipe format file luaran <code>geogrid.exe</code> (1 = binary, 2 = netcdf, 3 = GRIB1)
<code>parent_id</code>	Untuk domain paling kasar, nilainya 1. Domain selanjutnya juga bernilai 1 yang menandakan bahwa subdomain merupakan bagian dari domain utamanya.
<code>parent_grid_ratio</code>	Rasio piksel dari dx dan dy pada domain ke-1. Domain paling kasar adalah 1 dan selanjutnya mengikuti rasio yang diinginkan.
<code>i_parent_start</code>	Nomor indeks acuan untuk koordinat X. Domain paling kasar bernilai 1, ditentukan dari kiri-bawah
<code>j_parent_start</code>	Nomor indeks acuan untuk koordinat Y. Domain paling kasar bernilai 1, ditentukan dari kiri-bawah
<code>e_we</code>	Jumlah grid/piksel dari barat ke timur mengikuti rumus <code>parent_grid_ratio * N + 1</code> , dengan $N > 0$
<code>e_sn</code>	Jumlah grid/piksel dari selatan ke utara mengikuti rumus <code>parent_grid_ratio * N + 1</code> , dengan $N > 0$
<code>geog_data_res</code>	Pemilihan resolusi spasial dari data statik
<code>dx</code>	Resolusi spasial pada koordinat X (dalam meter)
<code>dy</code>	Resolusi spasial pada koordinat Y (dalam meter)
<code>map_proj</code>	Sistem proyeksi peta (<code>mercator</code> , <code>lambert</code> , <code>polar</code> , <code>lat-lon</code>). Untuk simulasi di sekitar khatulistiwa, direkomendasikan menggunakan <code>mercator</code>
<code>ref_lat</code>	Koordinat lintang titik tengah acuan dari domain paling kasar
<code>ref_lon</code>	Koordinat bujur titik tengah acuan dari domain paling kasar
<code>truelat1</code>	Koordinat lintang sebenarnya. Dibutuhkan untuk sistem proyeksi <code>mercator</code> , <code>polar</code> , dan <code>lambert</code>
<code>geog_data_path</code>	Lokasi folder WPS_GEOG

2. `ungrib.exe`

3. `metgrid.exe`

Daftar Pustaka

- [1] Michael Glotter et al. “Evaluating the utility of dynamical downscaling in agricultural impacts projections”. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 111.24 (2014), pp. 8776–8781.
- [2] Aneesh Goly, Ramesh SV Teegavarapu, and Arpita Mondal. “Development and evaluation of statistical downscaling models for monthly precipitation”. In: *Earth Interactions* 18.18 (2014), pp. 1–28.
- [3] R Huth and J Kysely. “Constructing site-specific climate change scenarios on a monthly scale using statistical downscaling”. In: *Theoretical and Applied Climatology* 66.1 (2000), pp. 13–27.
- [4] JW Kim et al. “The statistical problem of climate inversion: Determination of the relationship between local and large-scale climate”. In: *Monthly weather review* 112.10 (1984), pp. 2069–2077.
- [5] HA Pahlavan et al. “Improvement of multiple linear regression method for statistical downscaling of monthly precipitation”. In: *International journal of environmental science and technology* 15.9 (2018), pp. 1897–1912.
- [6] C Piani, JO Haerter, and E Coppola. “Statistical bias correction for daily precipitation in regional climate models over Europe”. In: *Theoretical and Applied Climatology* 99.1-2 (2010), pp. 187–192.
- [7] C Piani et al. “Statistical bias correction of global simulated daily precipitation and temperature for the application of hydrological models”. In: *Journal of Hydrology* 395.3-4 (2010), pp. 199–215.
- [8] Jordan G. Powers et al. “The Weather Research and Forecasting Model: Overview, System Efforts, and Future Directions”. In: *Bulletin of the American Meteorological Society* 98.8 (2017), pp. 1717–1737. DOI: [10.1175/BAMS-D-15-00308.1](https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00308.1). eprint: <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00308.1>. URL: <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00308.1>.
- [9] Clarence W Richardson. “Stochastic simulation of daily precipitation, temperature, and solar radiation”. In: *Water resources research* 17.1 (1981), pp. 182–190.
- [10] DA Sachindra et al. “Statistical downscaling of general circulation model outputs to precipitation—part 1: calibration and validation”. In: *International Journal of Climatology* 34.11 (2014), pp. 3264–3281.
- [11] William C Skamarock et al. *A description of the advanced research WRF version 4*. Tech. rep. National Center For Atmospheric Research Boulder Co Mesoscale and Microscale ..., 2019.
- [12] Marek Smid and Ana Cristina Costa. “Climate projections and downscaling techniques: a discussion for impact studies in urban systems”. In: *International Journal of Urban Sciences* 22.3 (2018), pp. 277–307. DOI: [10.1080/12265934.2017.1409132](https://doi.org/10.1080/12265934.2017.1409132). eprint: <https://doi.org/10.1080/12265934.2017.1409132>. URL: <https://doi.org/10.1080/12265934.2017.1409132>.
- [13] T Sonkaew et al. “Finding the Optimum Microphysics and Convective Parameterization Schemes for the WRF Model for LPRU, Thailand”. In: ().

- [14] Robert L Wilby and Thomas ML Wigley. “Downscaling general circulation model output: a review of methods and limitations”. In: *Progress in physical geography* 21.4 (1997), pp. 530–548.