

Modul Praktikum Pemodelan Iklim

Dr. Akhmad Faqih, S.Si.
Perdinan, S.Si., M.Nat.Res.Econ., Ph.D.
Agung Baruna Setiawan Noor, S.Si., M.Si.

2023

Daftar Isi

	1
1	3
1.1	3
1.2	8
1.3	11
1.3.1	11
1.3.2	12
1.3.3	15
1.3.4	16
1.3.5	18
1.3.6	19
1.3.7	24
1.3.8	26
1.4	28
1.4.1	29
1.4.2	35
1.5	43
1.5.1	43
1.5.2	49
1.5.3	53
1.5.4	56
1.5.5	58
2	63
2.1	63
2.2	63
2.3	64

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 keadaan iklim pada masa lalu, masa sekarang, 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 kasar, sekitar >100 km. Ketidakmampuan GCM dalam menjelaskan keadaan iklim secara regional maupun lokal disebabkan oleh keterbatasan sumber daya komputer. Akan tetapi seiring dengan berkembangnya teknologi komputasi, beberapa instansi seperti Met Office Hadley Center, National Center for Atmospheric Research (NCAR), dan European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) telah mengembangkan GCM yang mampu menjelaskan fenomena-fenomena cuaca pada skala regional dengan sumber daya komputer yang sangat tinggi. Contohnya, model prakiraan cuaca dari ECMWF, yaitu Integrated Forecasts System (IFS) memiliki resolusi spasial sekitar 9 km. Apakah dengan berkembangnya GCM yang sudah bisa menjelaskan fenomena regional telah menggantikan Regional Climate Model (RCM)? Tentu saja tidak. Peran RCM masih penting dalam proses *downscaling* resolusi spasial maupun temporal sampai pada skala lokal maupun mikro (mis. turbulensi).

Metode *downscaling* adalah cara mendapatkan informasi lebih spesifik dengan resolusi tinggi, baik spasial maupun temporal. Metode *downscaling* di dalam ilmu iklim umum digunakan pada kajian hidrologi [11], pertanian [3], dan iklim perkotaan [16]. Sebagai contoh pada kajian hidrologi, teknik *downscaling* digunakan untuk pemodelan debit sungai dan banjir [10]. Terdapat dua cara dalam melakukan metode ini, yaitu statistik dan dinamik. Wilby dan Wigley [19] 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 [7]. 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 [9, 6, 4, 14].

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

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 [13] merupakan contoh dari pendekatan ini. Model ini memiliki kemampuan dalam membangkitkan data curah hujan harian berdasarkan peluang kejadian hujan (hujan dan tidak hujan) dengan rantai Markov order satu. Model ini telah digunakan dalam kajian perubahan iklim 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) [15].

Teknik *dynamical downscaling* dapat menjalankan simulasi berbagai 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 spesifik. 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.

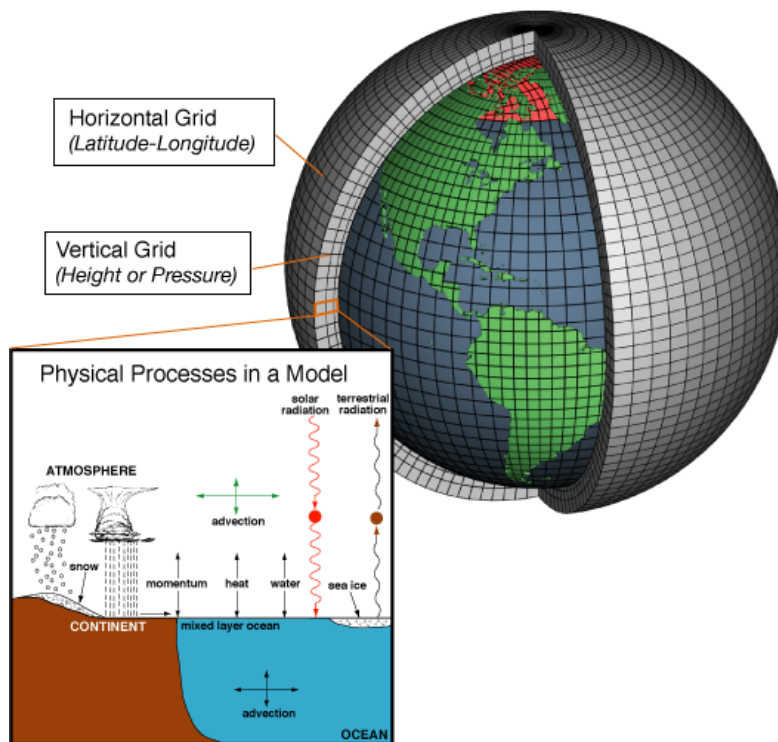
WRF merupakan salah satu teknik *dynamical downscaling*. Penggunaan model WRF semakin berkembang saat ini dengan tujuan riset dan operasional. WRF memiliki spesifikasi dalam berbagai aplikasi prediksi di dalam sistem bumi, seperti kimia atmosfer, hidrologi, kebakaran hutan, siklon, dan iklim regional. Selain pada skala regional, WRF telah mampu menjalankan simulasi fenomena cuaca mikro cukup akurat, seperti turbulensi [18] [20] [2]. Sebanyak lebih dari 36.000 pengguna WRF tersebar di 162 negara, termasuk Indonesia yang telah menggunakan WRF untuk kebutuhan operasional [12]. 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) [15]. 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).



Gambar 1.1: Proses secara umum perlu diparameterisasi di dalam model iklim [17]

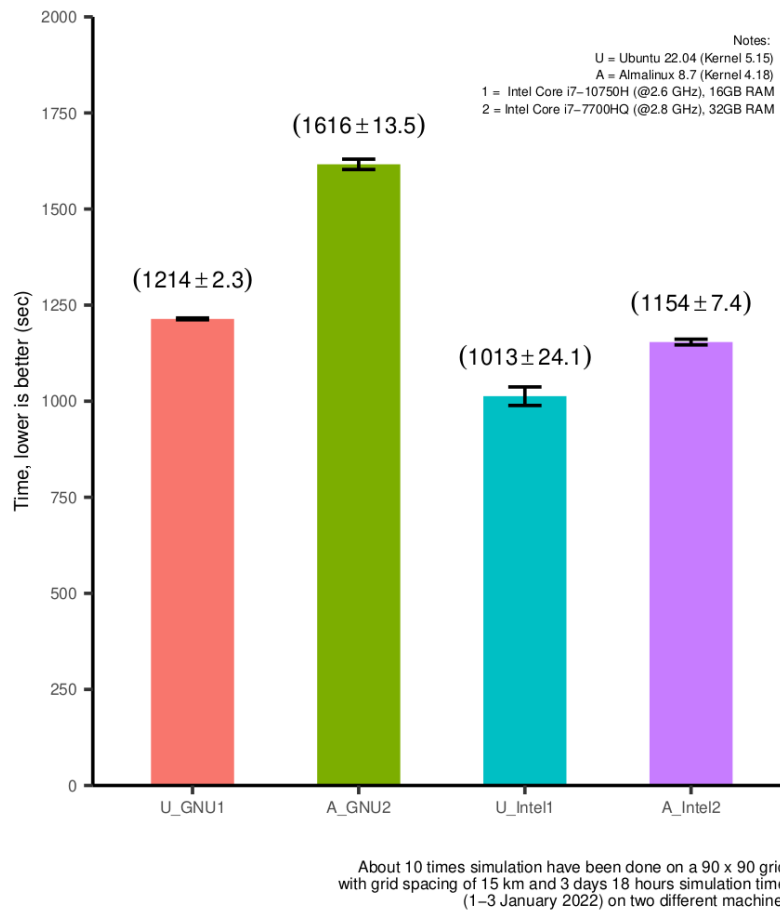
1 Dynamical Downscaling: Model Weather Research Forecasting (WRF)

WRF diimplementasikan dalam bahasa pemrograman komputer. Jika Anda melihat repositori github [WRF](#), jenis bahasa pemrograman yang paling banyak digunakan adalah Fortran yang berisikan perhitungan fisik dan kimia. 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 lama akibat dari resolusi spasial dan temporal yang tinggi, juga cakupan pemilihan wilayah simulasi. Proses perhitungan model dinamik maupun fisik akan lebih cepat apabila memakai 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 piksel vertikal maupun horizontal Gambar 1.2. 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 dapat menggunakan tipe prosesor desktop, mobile (prosesor di laptop), maupun server, tetapi juga perlu memperhatikan banyaknya *core* maupun frekuensi yang tertera pada setiap tipe prosesor.



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, AMD, maupun NVIDIA 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 GNU atau Intel. Perbedaan terhadap jenis Compiler ini dapat mempengaruhi waktu simulasi pada satu jenis prosesor yang sama Gambar 1.3.

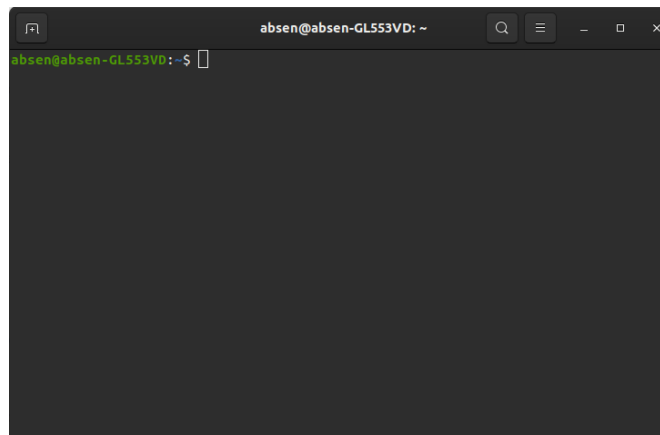


Gambar 1.3: Perbedaan waktu simulasi WRF pada tipe Compiler, Distro, dan Prosesor yang digunakan

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 dalam menjalankan 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 terminal shell umum pada 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 1.4. Tulisan `absen@absen-GL553VD` menunjukkan nama user dan tanda `~` berarti menunjukkan lokasi folder saat ini.



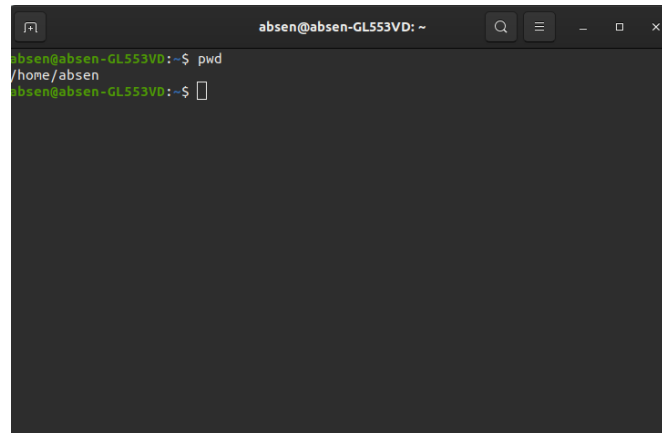
Gambar 1.4: Bash pada Ubuntu

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 ..`

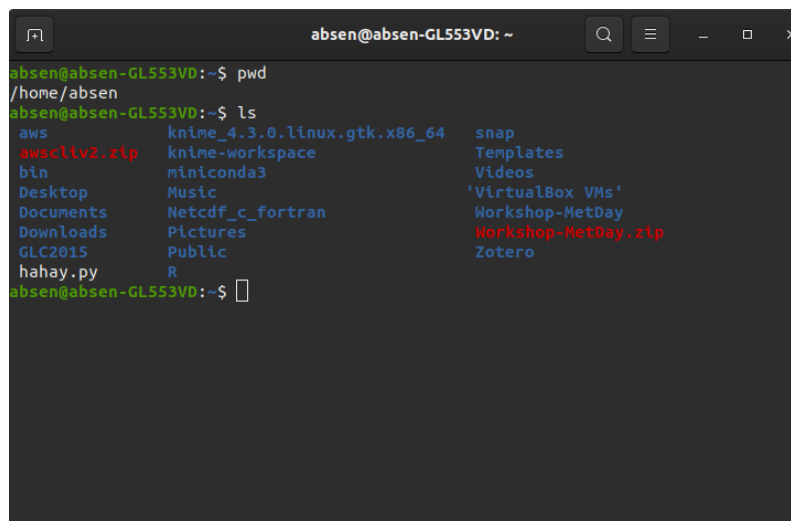
Anda dapat membuat folder baru dengan perintah `mkdir`, memindahkan folder atau file dengan `mv`, menghapus file dengan `rm`, menghapus folder dengan `rmdir`, membuat file baru dengan `touch`, dan menyalin folder atau file dengan `cp`. Contoh penggunaan beberapa perintah tersebut dapat dilihat sebagai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

- Misalkan kita ingin membuat folder **Tes-folder**



```
absen@absen-GL553VD: ~  
absen@absen-GL553VD:~$ pwd  
/home/absen  
absen@absen-GL553VD:~$
```

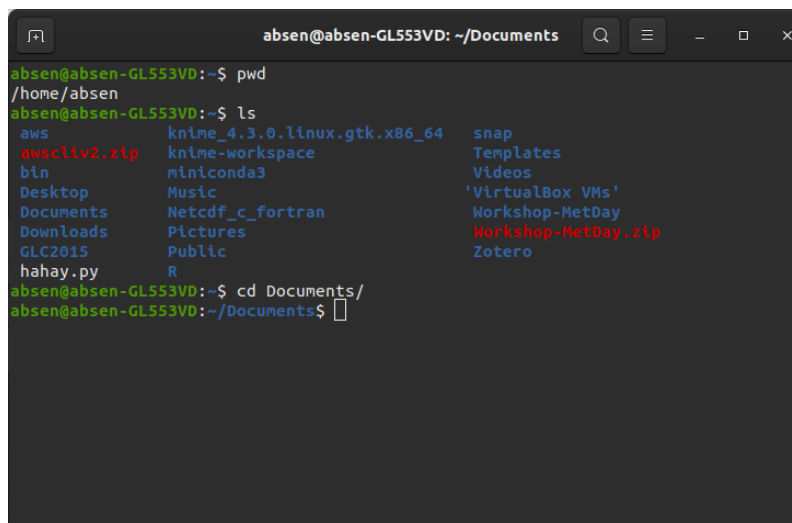
Gambar 1.5: Perintah pwd pada terminal Bash



```
absen@absen-GL553VD: ~  
absen@absen-GL553VD:~$ pwd  
/home/absen  
absen@absen-GL553VD:~$ ls  
aws          knime_4.3.0.linux.gtk.x86_64  snap  
awscliiv2.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:~$
```

Gambar 1.6: Perintah ls pada terminal Bash

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



```
absen@absen-GL553VD: ~/Documents
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

```
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 Instalasi WSL, Software Pengolahan Data, dan Model WRF

Kami menyarankan untuk menggunakan sistem operasi Linux dengan Distro Ubuntu versi 20.04 LTS. Jika Anda menggunakan Windows 10/11, Anda dapat memasang Windows Subsystem Linux (WSL) yang berisikan 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 for 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 dipilih untuk simulasi WRF. WSL dapat digunakan bagi pengguna Windows 10/11. 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 berikut ini.

1. Unduh WSL-2 pada [halaman ini](#) dan Install.
2. Buka menu Control Panel dan cari Program and Features
3. Klik Turn Windows Features On or Off
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

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

8. Masukkan Username dan Password (**Catatan:** kami sarankan sama dengan user dan pass Windows 10/11, tetapi 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 PowerShell atau Command Prompt dengan mengetik `wsl` atau `wsl.exe`

Selain WSL, Anda juga dapat menggunakan [Cygwin](#) atau [MinGW](#), hanya saja Anda perlu memilih beberapa package tertentu yang akan digunakan dan tentu cara ini sangat rumit.

1.3.2 Instalasi Software Pengolahan Data

NCAR Command Language (NCL) dan Python

[NCL](#) merupakan bahasa pemrograman interpreter yang dikembangkan oleh National Centre of Atmospheric Research (NCAR) dan memiliki kegunaan dalam proses analisis dan visualisasi data-data cuaca dan iklim. Aplikasi NCL dibutuhkan untuk memvisualisasikan lokasi kajian sebelum disimulasikan. Pengembang WRF telah menyediakan skrip NCL untuk memudahkan dalam ketepatan pemilihan lokasi sesuai dengan keinginan pengguna. [Python](#) merupakan bahasa pemrograman general yang memiliki banyak kegunaan, khususnya dalam analisis dan visualisasi data-data dengan tambahan modul (*packages*). Dalam menuliskan kode Python, Anda dapat menggunakan teks editor yang umum digunakan seperti [Jupyter Notebook](#). Untuk modul yang akan dipakai dalam praktikum ini adalah `wrf-python`. Langkah-langkah pemasangan NCL dan Python sebagai berikut.

1. Untuk memasang NCL, Anda harus mengunduh aplikasi Miniconda untuk Linux pada website https://repo.anaconda.com/miniconda/Miniconda3-py39_22.11.1-1-Linux-x86_64.sh dengan perintah pada terminal Bash sebagai berikut.

```
wget  
↪ https://repo.anaconda.com/miniconda/Miniconda3-py39_22.11.1-1-Linux-x86_64.sh
```

Anda tidak dapat menggunakan NCL pada sistem operasi Windows, kecuali Anda memiliki Windows Subsystem Linux (WSL).

2. Kemudian, lakukan pemasangan Miniconda dengan perintah di bawah ini.

```
bash Miniconda3-py39_22.11.1-1-Linux-x86_64.sh
```

3. Selanjutnya tekan ENTER. Terminal akan menampilkan *End-User License Agreement* (EULA), tekan ENTER atau SPACE sampai muncul perintah seperti di bawah ini.

1.3 Instalasi WSL, Software Pengolahan Data, dan Model WRF

```
Do you accept the license terms? [yes|no]  
[no] >>>
```

4. Kemudian, ketikkan **yes** untuk melanjutkan proses instalasi dan tekan ENTER. Secara otomatis, Python sebenarnya telah terpasang di dalam Miniconda.
5. Tutup terminal Anda dan buka kembali. Perhatikan pada tulisan (**base**) di paling kiri nama user. Jika tulisan tersebut sudah muncul, proses pemasangan Miniconda telah berhasil.
6. Selanjutnya, lakukan pemasangan package **mamba** dengan perintah.

```
conda install mamba -n base -c conda-forge
```

i Note

Package **mamba** memungkinkan dapat mempercepat pengunduhan dan pemasangan package-package di dalam Miniconda.

7. Lakukan proses pembuatan *environment* dengan nama **ncl** dan pemasangan NCL beserta package lainnya dengan perintah.

```
conda create -n ncl  
conda activate ncl  
mamba install -c conda-forge jupyter notebook xarray netcdf4 scipy pyngl  
↪ pynio matplotlib cartopy wrf-python ncl
```

8. Saat Anda ingin memulai menggunakan program NCL, aktifkan terlebih dahulu *environment* **ncl** dengan perintah di bawah ini. Kemudian, tulisan (**base**) menjadi (**ncl**) yang menandakan bahwa *environment* telah berhasil diaktifkan.

```
conda activate ncl
```

9. Untuk membuka **Jupyter Notebook**, gunakan perintah ini. Aplikasi akan muncul pada browser bawaan Anda (Google Chrome, Microsoft Edge, atau Safari).

```
jupyter notebook
```

Untuk menutup Jupyter Notebook, Anda dapat menekan tombol CTRL+C pada terminal.

10. Untuk keluar dari *environment* **ncl**, ketikkan perintah berikut.

```
conda deactivate
```

i Note

Environment `ncl` akan terus dipakai, mulai dari pemasangan WRF hingga analisis dan visualisasi luaran WRF. NCAR telah mengembangkan `wrf-python` secara khusus untuk analisis dan visualisasi luaran WRF.

R dan RStudio

Sama seperti Python dan NCL, R merupakan bahasa pemrograman interpreter, namun dibuat secara khusus untuk analisis dan visualisasi data-data statistik. Beberapa package R telah dikembangkan untuk memudahkan proses analisis data-data cuaca dan iklim, seperti `ncdf4`, `raster`, dan `metR`. **RStudio** umum digunakan dalam mengetik bahasa pemrograman R secara interaktif. Untuk mengunduh R dan RStudio Desktop, Anda dapat menggunakan halaman website di bawah ini sesuai dengan sistem operasi yang Anda gunakan. **Bagi pengguna Windows**, Anda diharuskan mengunduh aplikasi **Rtools** dalam memudahkan pemasangan dan kompilasi beberapa package tertentu. Ketiga package yang telah disebutkan tadi memerlukan Rtools saat proses pemasangan.

- R
 - Windows 10/11: <https://cran.r-project.org/bin/windows/base/R-4.2.2-win.exe>
 - MacOS (Intel): <https://cran.r-project.org/bin/macosx/base/R-4.2.2.pkg>
 - MacOS (ARM, M1/M2): <https://cran.r-project.org/bin/macosx/big-sur-arm64/base/R-4.2.2-arm64.pkg>
 - Ubuntu: ikuti perintah dan langkah-langkah di <https://cran.r-project.org/bin/linux/ubuntu>
- RStudio
 - Windows 10/11: <https://download1.rstudio.org/electron/windows/RStudio-2022.12.0-353.exe>
 - MacOS (Intel/ARM): <https://download1.rstudio.org/electron/macos/RStudio-2022.12.0-353.dmg>
 - Ubuntu 22.04 LTS: <https://download1.rstudio.org/electron/jammy/amd64/rstudio-2022.12.0-353-amd64.deb>

1.3.2.1 Julia

Bahasa pemrograman ini relatif baru dibandingkan dengan Python dan R. Sama seperti keduanya, Julia merupakan bahasa pemrograman interpreter dan tersedia gratis. Hanya saja, developer Julia mengatakan bahwa bahasa ini memiliki kecepatan eksekusi lebih singkat dibandingkan dengan Python maupun R. Anda dapat mengunduh Julia di julialang.org sesuai dengan sistem operasi yang Anda miliki. Untuk membaca data netcdf dari WRF, Anda dapat menggunakan package `NetCDF.jl`. Anda perlu memasang package tersebut pada terminal interaktif Julia. Untuk menuliskan skrip Julia, Anda dapat memanfaatkan **Jupyter Notebook** dan tentunya memerlukan package `IJulia.jl`. Berikut ini adalah langkah-langkahnya.

1. Buka terminal interaktif Julia (julia) dan ketikkan perintah berikut untuk memasang package `NetCDF.jl` dan `IJulia.jl`.

```
using Pkg
Pkg.add("NetCDF")
Pkg.add("IJulia")
```

2. Setelah berhasil memasang package, Anda dapat menuliskan skrip Julia pada Jupyter Notebook. Untuk membuka Jupyter Notebook, ketikkan perintah berikut pada terminal interaktif Julia.

```
using IJulia
notebook()
```

Skrip tersebut akan mengeksekusi instalasi miniconda di dalam Julia dengan disertai **Jupyter Notebook**. Jika instalasi berhasil, **Jupyter Notebook** akan terbuka di browser Anda (Google Chrome, Microsoft Edge, atau Safari). Untuk menutup Jupyter Notebook, Anda dapat menekan tombol **CTRL+C** pada terminal interaktif Julia.

1.3.3 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.

```
ws1
```

- 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
```

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

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).

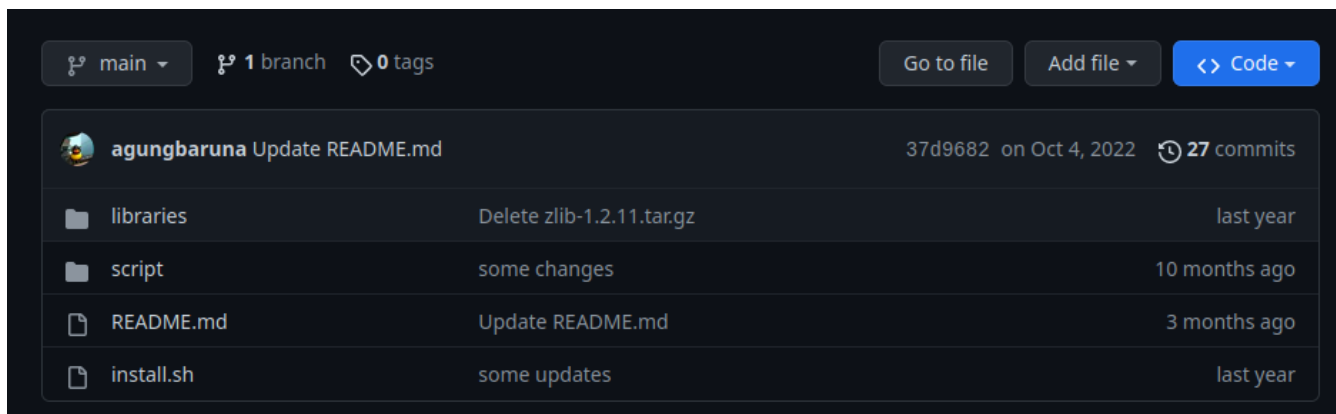
Langkah-langkah di atas masih berlanjut pada subbab selanjutnya.

1.3.4 Data dan Software Pendukung

Software Pendukung

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 berisikan algoritma perhitungan fisik dan dinamik atmosfer, sedangkan WPS berisikan algoritma persiapan data masukan atmosfer dari GCM dan pemilihan lokasi dan waktu.

- 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/historis.

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 historis. 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		

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

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/**

1.3.5 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.

```
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](https://www.intel.com). 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

1.3 Instalasi WSL, Software Pengolahan Data, dan Model WRF

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 `$HOME/intel`. Perintah untuk memanggil program Compiler Intel belum menjadi **ENVIRONMENT VARIABLE**. Untungnya, Intel menyediakan skrip untuk memanggil semua program Compiler secara default, yaitu terdapat di dalam `$HOME/intel/oneapi/setvars.sh`. Ketika memanggil skrip tersebut, **ENVIRONMENT VARIABLE** milik Miniconda secara otomatis dinonaktifkan (tulisan `<base>` hilang). Perintah untuk memanggil skrip `setvars.sh` adalah sebagai berikut.

```
source $HOME/intel/oneapi/setvars.sh
```

1.3.6 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 dengan perintah `export`.

```
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
```

Langkah ini wajib dilakukan pada saat melakukan instalasi package, WRF, dan WPS. Pendefinisian **ENVIRONMENT VARIABLE** ini berlaku untuk GNU maupun Intel.

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

```
# 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
```

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

```
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 $ODIR/pyWRF-install/libraries
# 1. Extract
tar -xf zlib-1.2.13.tar.gz
# 2. Buka folder hasil ekstrak
cd zlib-1.2.13
# 3. Konfigurasi
CC=icc CFLAGS='-diag-disable=10441' ./configure --prefix=$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 Dynamical Downscaling: *Model Weather Research Forecasting (WRF)*

```
# 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
```

1.3.7 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
```

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.

1.3 Instalasi WSL, Software Pengolahan Data, dan Model WRF

```
./configure
checking for perl5... no
checking for perl... found /usr/bin/perl (perl)
Will use NETCDF in dir: /home/absen/WRF-Model
Will use HDF5 in dir: /home/absen/WRF-Model
PHDF5 not set in environment. Will configure WRF for use without.
Will use 'time' to report timing information

If you REALLY want Grib2 output from WRF, modify the arch/Config.pl script.
Right now you are not getting the Jasper lib, from the environment, compiled into WRF.

-----
Please select from among the following Linux x86_64 options:

1. (serial) 2. (smpar) 3. (dmpar) 4. (dm=sm) PGI (pgf90/gcc)
5. (serial) 6. (smpar) 7. (dmpar) 8. (dm=sm) PGI (pgf90/pgcc): SGI MPT
9. (serial) 10. (smpar) 11. (dmpar) 12. (dm=sm) PGI (pgf90/pgcc): PGI accelerator
13. (serial) 14. (smpar) 15. (dmpar) 16. (dm=sm) INTEL (ifort/icc)
17. (dm=sm) INTEL (ifort/icc): Xeon Phi (MIC architecture)
18. (serial) 19. (smpar) 20. (dmpar) 21. (dm=sm) INTEL (ifort/icc): Xeon (SNB with AVX mods)
22. (serial) 23. (smpar) 24. (dmpar) 25. (dm=sm) INTEL (ifort/icc): SGI MPT
26. (serial) 27. (smpar) 28. (dmpar) 29. (dm=sm) INTEL (ifort/icc): IBM POE
30. (serial) 31. (dmpar) PATHSCALE (pathf90/pathcc)
32. (serial) 33. (smpar) 34. (dmpar) 35. (dm=sm) GNU (gfortran/gcc)
36. (serial) 37. (smpar) 38. (dmpar) 39. (dm=sm) IBM (xlfort_r/cc_r)
40. (serial) 41. (smpar) 42. (dmpar) 43. (dm=sm) PGI (ftn/gcc): Cray XC CLE
44. (serial) 45. (smpar) 46. (dmpar) 47. (dm=sm) CRAY CCE (ftn $(NOOMP)/cc): Cray XE and XC
48. (serial) 49. (smpar) 50. (dmpar) 51. (dm=sm) INTEL (ftn/icc): Cray XC
52. (serial) 53. (smpar) 54. (dmpar) 55. (dm=sm) PGI (pgf90/pgcc)
56. (serial) 57. (smpar) 58. (dmpar) 59. (dm=sm) PGI (pgf90/gcc): -f90=pgf90
60. (serial) 61. (smpar) 62. (dmpar) 63. (dm=sm) PGI (pgf90/pgcc): -f90=pgf90
64. (serial) 65. (smpar) 66. (dmpar) 67. (dm=sm) INTEL (ifort/icc): HSW/BDW
68. (serial) 69. (smpar) 70. (dmpar) 71. (dm=sm) INTEL (ifort/icc): KNL MIC
72. (serial) 73. (smpar) 74. (dmpar) 75. (dm=sm) FUJITSU (frtpr/fccpx): FX10/FX100 SPARC64 IXfx/Xlfx

Enter selection [1-75] : 35
```

Gambar 1.9: Konfigurasi WRF dengan Compiler GNU

```
./configure
checking for perl5... no
checking for perl... found /usr/bin/perl (perl)
Will use NETCDF in dir: /home/absen/WRF-Model
Will use HDF5 in dir: /home/absen/WRF-Model
PHDF5 not set in environment. Will configure WRF for use without.
Will use 'time' to report timing information

If you REALLY want Grib2 output from WRF, modify the arch/Config.pl script.
Right now you are not getting the Jasper lib, from the environment, compiled into WRF.

-----
Please select from among the following Linux x86_64 options:

1. (serial) 2. (smpar) 3. (dmpar) 4. (dm=sm) PGI (pgf90/gcc)
5. (serial) 6. (smpar) 7. (dmpar) 8. (dm=sm) PGI (pgf90/pgcc): SGI MPT
9. (serial) 10. (smpar) 11. (dmpar) 12. (dm=sm) PGI (pgf90/pgcc): PGI accelerator
13. (serial) 14. (smpar) 15. (dmpar) 16. (dm=sm) INTEL (ifort/icc)
17. (dm=sm) INTEL (ifort/icc): Xeon Phi (MIC architecture)
18. (serial) 19. (smpar) 20. (dmpar) 21. (dm=sm) INTEL (ifort/icc): Xeon (SNB with AVX mods)
22. (serial) 23. (smpar) 24. (dmpar) 25. (dm=sm) INTEL (ifort/icc): SGI MPT
26. (serial) 27. (smpar) 28. (dmpar) 29. (dm=sm) INTEL (ifort/icc): IBM POE
30. (serial) 31. (dmpar) PATHSCALE (pathf90/pathcc)
32. (serial) 33. (smpar) 34. (dmpar) 35. (dm=sm) GNU (gfortran/gcc)
36. (serial) 37. (smpar) 38. (dmpar) 39. (dm=sm) IBM (xlfort_r/cc_r)
40. (serial) 41. (smpar) 42. (dmpar) 43. (dm=sm) PGI (ftn/gcc): Cray XC CLE
44. (serial) 45. (smpar) 46. (dmpar) 47. (dm=sm) CRAY CCE (ftn $(NOOMP)/cc): Cray XE and XC
48. (serial) 49. (smpar) 50. (dmpar) 51. (dm=sm) INTEL (ftn/icc): Cray XC
52. (serial) 53. (smpar) 54. (dmpar) 55. (dm=sm) PGI (pgf90/pgcc)
56. (serial) 57. (smpar) 58. (dmpar) 59. (dm=sm) PGI (pgf90/gcc): -f90=pgf90
60. (serial) 61. (smpar) 62. (dmpar) 63. (dm=sm) PGI (pgf90/pgcc): -f90=pgf90
64. (serial) 65. (smpar) 66. (dmpar) 67. (dm=sm) INTEL (ifort/icc): HSW/BDW
68. (serial) 69. (smpar) 70. (dmpar) 71. (dm=sm) INTEL (ifort/icc): KNL MIC
72. (serial) 73. (smpar) 74. (dmpar) 75. (dm=sm) FUJITSU (frtpr/fccpx): FX10/FX100 SPARC64 IXfx/Xlfx

Enter selection [1-75] : 10
```

Gambar 1.10: Konfigurasi WRF dengan Compiler GNU

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

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 ↓ pada keyboard dan ubahlah isinya sesuai aturan pada tabel di bawah ini.

Tabel 1.3: 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
```

1.3.8 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`

1.3 Instalasi WSL, Software Pengolahan Data, dan Model WRF

- **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 *flags -liomp5* setelah *-lnetcdf* pada bagian variabel **WRF_LIB =**. Kemudian, ubah pula **DM_FC** dan **DM_CC** seperti pada Tabel 1.3.
- Untuk GNU, tambahkan *flags -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

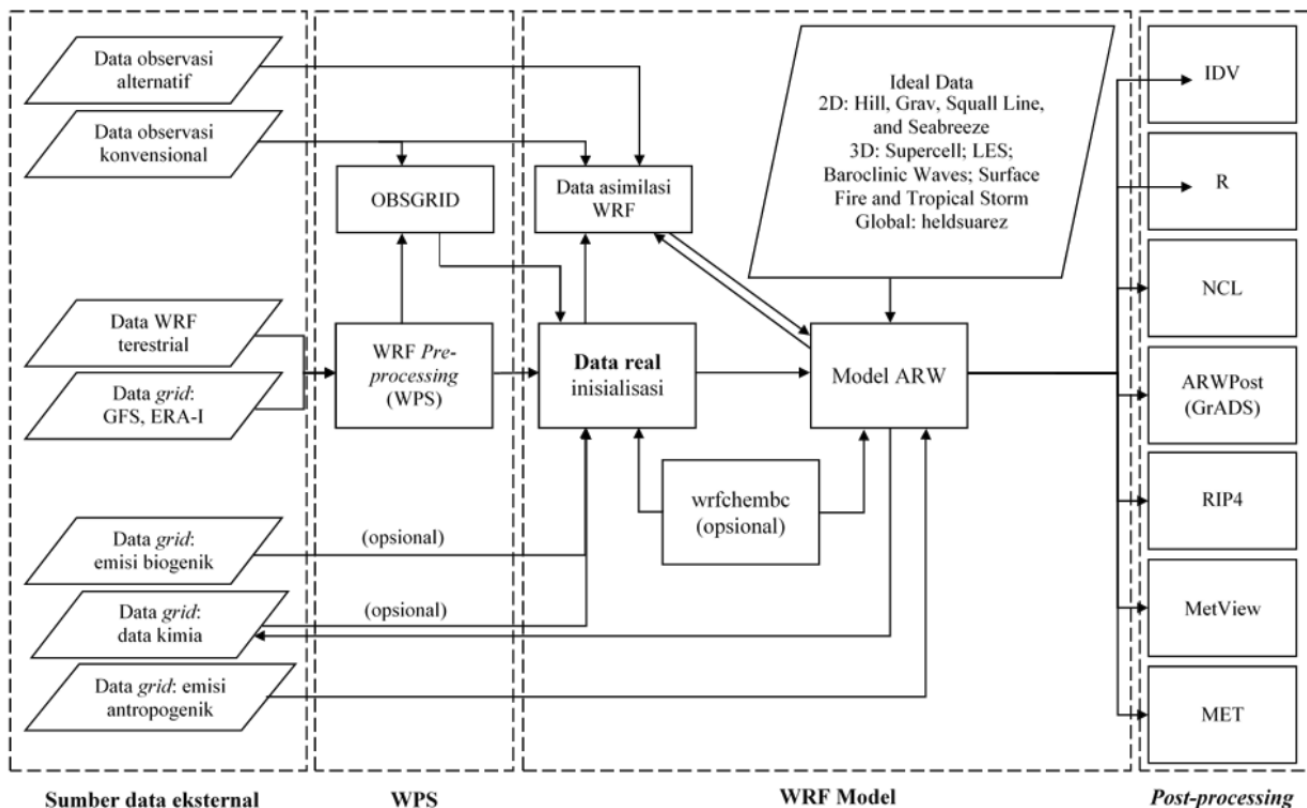
```
ls *.exe
```

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

1.4 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 1.11 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 Command Language (NCL), GrADS, R, Python, Julia, Matlab, ArcMAP, atau 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. Akan tetapi, program ini merupakan turunan WRF-ARW, yaitu WRF-Chem. Penjelasan mengenai WRFDA dan WRF-Chem tidak disampaikan di dalam praktikum ini.



Gambar 1.11: Diagram WRF

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 kembali perintah ini.

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

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.

1.4.1.1 Penentuan Lokasi dan Waktu Simulasi

Isi dari file `namelist.wps` pada saat awal instalasi 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',
```

1 Dynamical Downscaling: Model Weather Research Forecasting (WRF)

```
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`. Anda dapat mengubah file ini dengan membukanya menggunakan aplikasi apa saja (mis. Notepad, VS Code, Notepad++) atau dapat langsung dibuka di terminal dengan perintah `nano namelist.wps`. Pada contoh yang telah kami berikan, Anda perlu mengganti parameter pada bagian `&share` dan `&geogrid`. Penjelasan setiap variabel dapat dilihat pada Tabel 1.4. File yang telah berubah menjadi seperti di bawan ini.

```
&share  
wrf_core = 'ARW',  
max_dom = 3,  
start_year  = 2022, 2022, 2022,  
start_month = 01,   01,   01,  
start_day   = 01,   01,   01,  
start_hour  = 00,   00,   00,  
end_year    = 2022, 2022, 2022,  
end_month   = 01,   01,   01,  
end_day     = 03,   03,   03,  
end_hour    = 18,   18,   18,  
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  = -7.328,
  ref_lon  = 112.741,
  truelat1 = -7.328,
  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 1.4: 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. Format: YYYY-MM-DD_HH:mm:ss
<code>end_date</code>	Waktu akhir simulasi sesuai dengan data masukan. 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.

Variabel	Keterangan
<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

Pada parameter `start_date` dan `end_date`, Anda bisa menggunakan parameter lain dengan membagi masing-masing format tahun (`start_year`; `end_year`), bulan (`start_month`; `end_month`), tanggal (`start_day`; `end_day`), dan jam (`start_hour`; `end_hour`).

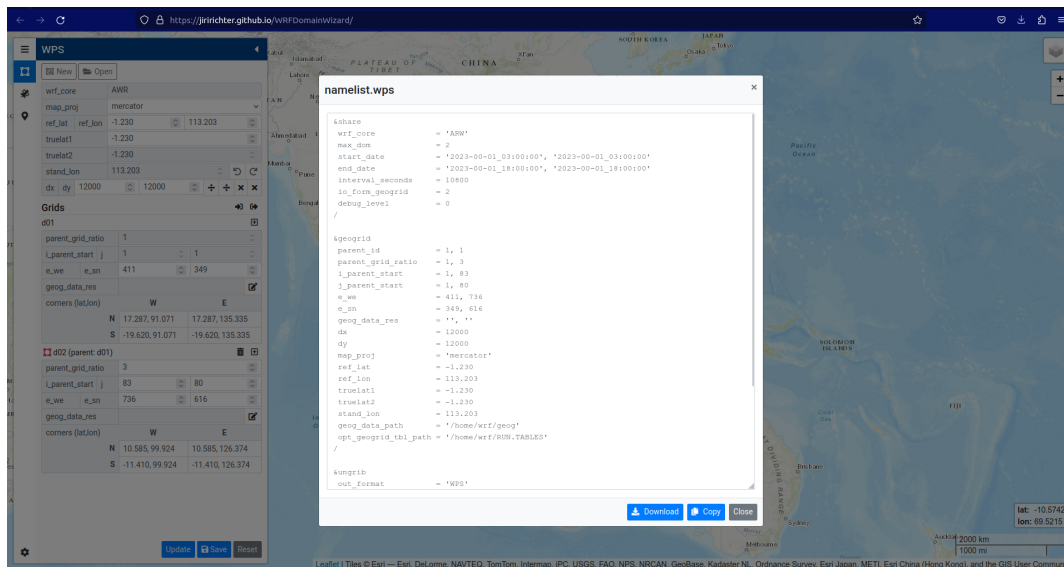
Berkaitan dengan skala resolusi spasial pada simulasi yang akan dijalankan dengan pemilihan lokasi di Kota Surabaya, skala tertingginya adalah 2 km. Anda perhatikan parameter `parent_grid_ratio`. Nilai 1, 3, dan 9 secara berturut-turut merupakan rasio terhadap `dx` atau `dy` untuk setiap domain. Nilai 1 berarti untuk domain terluar dengan skala $1/1 * 18000 = 18000$ meter, sedangkan nilai 3 untuk domain ke-2 dengan skala $1/3 * 18000 = 6000$ meter.

Pada bagian `&geogrid`, penentuan lokasi kajian ini cukup rumit. Anda bisa menggunakan halaman Github <https://jiririchter.github.io/WRFDomainWizard> untuk membuat file `namelist.wps` sesuai dengan lokasi yang Anda inginkan, setidaknya Anda dapat menyalin teks pada bagian `&geogrid` Gambar 1.12.

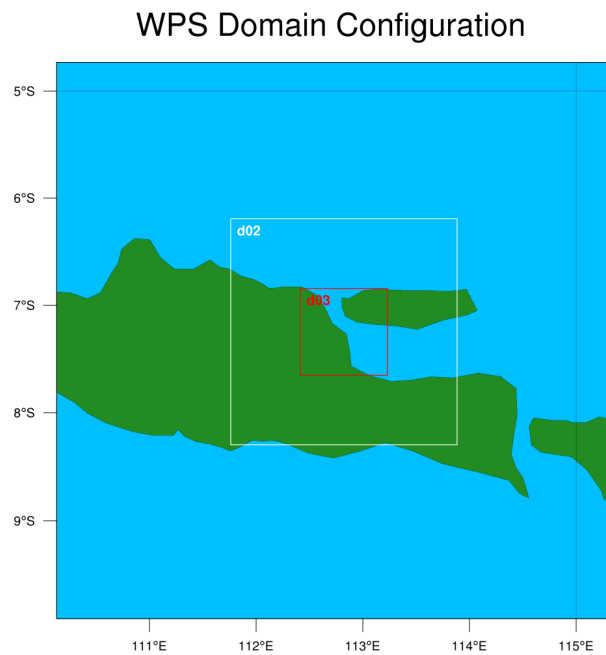
Untuk memverifikasi kesesuaian pemilihan lokasi yang telah dibuat, Anda dapat menggunakan skrip `plotgrids_new.ncl` di dalam folder `util/`. Bukalah file tersebut. Cari dan ubahlah variabel `type = x11` menjadi `type = png` untuk mengatur luaran file dalam bentuk gambar (format `.png`). Untuk menjalankan skrip ini, aktifkan terlebih dahulu `environment.ncl` dengan perintah `source activate ncl` atau `conda activate ncl`. Kemudian, jalankan perintah berikut ini. File `.png` akan muncul di dalam folder `WPS/` dengan nama `wps_show_dom.png`. Hasilnya seperti Gambar 1.13

```
cd $HOME/WRF-Model/WPS
ncl util/plotgrids_new.ncl
```

1.4 Menjalankan Simulasi WRF-ARW



Gambar 1.12: WRF Domain Wizard oleh [Jiririchter](#)



Gambar 1.13: Konfigurasi domain WRF

1.4.1.2 Menjalankan Program `geogrid.exe`

Selanjutnya, Anda dapat menjalankan program `geogrid.exe` dengan perintah di bawah ini. Hasilnya, terdapat 3 file dengan nama `geo_em.d0x.nc` (x = nomor domain; 1, 2, 3) karena pengaturan `max_dom = 3`.

```
./geogrid.exe
```

```
ls geo_em*
```

```
geo_em.d01.nc  geo_em.d02.nc  geo_em.d03.nc
```

1.4.1.3 Menyambungkan File Data Masukan dan Tabel Variabel

WPS menyediakan program `link_grib.csh` untuk menyambungkan file data masukan ke dalam folder `WPS/` dengan membuat shortcut yang bernama `GRIBFILE.*` (`GRIBFILE.AAA`, `GRIBFILE.AAB`, ...). Perintahnya sebagai berikut.

```
./link_grib.csh $ODIR/data/GFS/*
```

Kemudian, buatlah shortcut dengan nama `Vtable` di dalam folder `WPS/` dari file yang berada di dalam folder `ungrib/Variable_Tables`. Untuk data `GFS`, nama file tersebut adalah `Vtable.GFS`, sedangkan `ERA5` adalah `Vtable.ERA-Interim.pl`. Perintahnya sebagai berikut.

```
ln -sf ungrib/Variable_Tables/Vtable.GFS Vtable # GFS
ln -sf ungrib/Variable_Tables/Vtable.ERA-Interim.pl Vtable # ERA5
```

1.4.1.4 Menjalankan Program `ungrib.exe`

Setelah menyambungkan data masukan serta tabel variabel, jalankan program `ungrib.exe` dengan perintah berikut.

```
./ungrib.exe
```

Luaran dari program ini adalah file dengan nama `FILE:*` yang memiliki format `.nc` (netcdf).

1.4.1.5 Menjalankan Program `metgrid.exe`

Jalankan program `metgrid.exe` dengan perintah berikut.

```
./metgrid.exe
```

Luaran dari program ini adalah file dengan nama `met_em*` yang memiliki format `.nc`. File-file ini nanti yang akan dipindahkan menuju folder `WRF/test/em_real` atau Anda dapat juga membuat shortcut. Perintahnya sebagai berikut.

```
mv met_em* $ODIR/WRF/test/em_real
# atau
ln -sf met_em* $ODIR/WRF/test/em_real
```

1.4.2 Program WRF

Pada bagian ini, program WRF yang digunakan hanya 2: `real.exe` dan `wrf.exe`. Sebelum itu, Anda diharuskan mengubah beberapa parameter pada file `namelist.input` seperti di dalam file `namelist.wps`. Parameter di dalam `namelist.input` sangat banyak karena terdapat bagian pemilihan lokasi dan waktu (d disesuaikan dengan `namelist.wps`), pemilihan skema parameter fisik, dan parameter dinamik. Anda dapat membaca lebih lanjut di [Panduan Pengguna WRF Bab 5](#).

1.4.2.1 Mengubah isi `namelist.input`

Saat ini Anda masih berada di folder `WPS/`. Buka terlebih dahulu folder `em_real` dengan perintah

```
cd $ODIR/WRF/test/em_real
```

Di dalam folder `em_real`, terdapat 4 program, yaitu `real.exe`, `ndown.exe`, `tc.exe`, dan `wrf.exe`. Nilai `max_dom` pada `namelist.wps` adalah 3. Jika pemilihan lokasi Anda memiliki >1 domain, WRF akan melakukan proses simulasi sampai pada domain tertinggi atau disebut dengan *nesting*. Proses ini juga dibagi lagi menjadi 2, yaitu *nesting* dua arah dan satu arah. Untuk *nesting* satu arah, program yang digunakan bisa atau tanpa dengan program `ndown.exe`. Penggunaan *nesting* satu arah biasanya pengguna hanya tertarik pada analisis domain tertinggi. Penggunaan `ndown.exe` juga sering digunakan pada turunan WRF, yaitu WRF-Chem jika terdapat >1 domain karena sampai modul ini dibuat, belum ada pembaruan terkait algoritma *downscaling* pada WRF-Chem dengan *nesting* dua arah.

Bukalah file `namelist.input` dengan cara sama seperti Anda membuka `namelist.wps`. Ketika pertama kali dibuka, file `namelist.input` seperti di bawah ini. Anda juga dapat melihat beberapa contoh/template lain (mis. `namelist.input.4km`, `namelist.input.chem`, `namelist.input.volc`, ...) sesuai dengan kebutuhan tertentu.

```
&time_control
run_days           = 0,
run_hours          = 36,
run_minutes        = 0,
```

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

```

run_seconds           = 0,
start_year            = 2019, 2019,
start_month           = 09, 09,
start_day             = 04, 04,
start_hour            = 12, 12,
end_year              = 2019, 2019,
end_month             = 09, 09,
end_day              = 06, 06,
end_hour              = 00, 00,
interval_seconds      = 10800
input_from_file       = .true., .true.,
history_interval      = 60, 60,
frames_per_outfile    = 1, 1,
restart               = .false.,
restart_interval       = 7200,
io_form_history        = 2
io_form_restart        = 2
io_form_input          = 2
io_form_boundary       = 2
/

```

```

&domains
time_step             = 90,
time_step_fract_num   = 0,
time_step_fract_den   = 1,
max_dom               = 2,
e_we                  = 150, 220,
e_sn                   = 130, 214,
e_vert                = 45, 45,
dzstretch_s           = 1.1
p_top_requested        = 5000,
num_metgrid_levels    = 34,
num_metgrid_soil_levels = 4,
dx                    = 15000,
dy                    = 15000,
grid_id               = 1, 2,
parent_id              = 0, 1,
i_parent_start         = 1, 53,
j_parent_start         = 1, 25,
parent_grid_ratio      = 1, 3,
parent_time_step_ratio = 1, 3,
feedback              = 1,
smooth_option          = 0
/

```

```

&physics

```



```

physics_suite           = 'CONUS'
mp_physics              = -1,    -1,
cu_physics              = -1,    -1,
ra_lw_physics           = -1,    -1,
ra_sw_physics           = -1,    -1,
bl_pbl_physics          = -1,    -1,
sf_sfclay_physics       = -1,    -1,
sf_surface_physics      = -1,    -1,
radt                    = 15,    15,
bldt                    = 0,      0,
cudt                    = 0,      0,
icloud                  = 1,
num_land_cat            = 21,
sf_urban_physics        = 0,      0,
fractional_seaice       = 1,
/

&fdda
/

&dynamics
hybrid_opt              = 2,
w_damping               = 0,
diff_opt                = 2,      2,
km_opt                  = 4,      4,
diff_6th_opt            = 0,      0,
diff_6th_factor         = 0.12,   0.12,
base_temp               = 290.
damp_opt                = 3,
zdamp                   = 5000.,   5000.,
dampcoef                = 0.2,     0.2,
khdif                   = 0,        0,
kvdif                   = 0,        0,
non_hydrostatic         = .true.,   .true.,
moist_adv_opt           = 1,        1,
scalar_adv_opt          = 1,        1,
gwd_opt                 = 1,        0,
/

&bdy_control
spec_bdy_width          = 5,
specified                = .true.
/

&grib2
/

```

```
&namelist_quilt  
nio_tasks_per_group = 0,  
nio_groups = 1,  
/
```

Pada file ini, samakan beberapa parameter seperti di file `namelist.wps`. Perhatikan Tabel 1.5. Anda cukup mencari parameter yang sama antara `namelist.wps` dengan `namelist.input`, tetapi tidak semuanya ada di dalam `namelist.input`. Untuk parameter lainnya, seperti `parent_time_step_ratio`, `time_step`, `history_interval`, `frame_per_outfile`, dan seterusnya, Anda dapat membacanya lebih banyak di [Panduan Pengguna WRF Bab 5](#) atau bisa dilihat pada file `README.namelist` di dalam folder `test/em_real` untuk setiap penjelasan singkat berbagai parameter.

Bagian `&time_control` berfungsi sebagai pengaturan waktu simulasi serta luaran yang akan dihasilkan. Sebagai informasi, file luaran WRF berformat NetCDF (.nc) dengan nama `wrfout_<domain>_<yyyy>-<mm>-<dd>_<HH>:<MM>:<SS>`, dimana

- domain: identitas domain (d01, d02, ...)
- yyyy: tahun, dengan format 4 digit
- mm: bulan, dengan format 2 digit
- dd: tanggal, dengan format 2 digit
- HH: jam, dengan format 2 digit
- MM: menit, dengan format 2 digit
- SS: detik, dengan format 2 digit

Pada parameter `run_days`, `run_hours`, `run_minutes`, dan `run_seconds`, ini dapat dihitung dari selisih waktu akhir simulasi dengan awal simulasi. Pada simulasi yang akan dicoba dalam modul ini, yaitu 1 Januari 2022 pukul 00:00 UTC hingga 3 Januari 2022 18:00 UTC, nilai dari `run_days` dan `run_hours` secara berturut-turut adalah 2 dan 18. Anda juga dapat mengatur `run_days` ini menjadi 0 setelah dikonversi menjadi jam (2 hari = 48 jam) dan tambahkan ke `run_hours`, yaitu menjadi 66. Parameter `history_interval` digunakan untuk meletakkan nilai pada file luaran WRF dalam format .nc dengan waktu tertentu (dalam menit). Misalkan diatur ke 60, berarti hasil perhitungan dari berbagai algoritma WRF dimasukkan ke file setiap 60 menit sekali. Anda bebas mengatur angka pada parameter ini. Dampaknya, ukuran file akan semakin besar jika Anda mengatur nilainya kecil. Tentu ini tidak akan menjadi masalah apabila ruang kosong penyimpanan internal/eksternal Anda masih banyak. Banyaknya file luaran dapat pula diatur jumlahnya, yaitu di dalam parameter `frames_per_outfile`. Jika parameter diatur pada `frames_per_outfile = 1`, `history_interval = 60`, dan `run_hours = 66`, berarti file luaran yang akan dibuat dan disimpan ke dalam penyimpanan adalah sebanyak 66 file. Agar lebih efektif saat akan melakukan analisis, kami menyarankan untuk mengatur `frames_per_outfile = 1000`.

Kemudian untuk bagian `&domains`, digunakan untuk mengatur kondisi dari domain agar dapat sesuai dengan data masukan (banyak grid horizontal dan vertikal, posisi, rasio grid, tipe interpolasi). Pada parameter `feedback`, Anda dapat mengatur tipe *nesting* dua arah (1) atau satu arah (0). Parameter `num_metgrid_levels` dan `num_metgrid_soil_levels` harus diatur sesuai dengan yang ada di dalam salah satu file `met_em*`. Untuk melihatnya, gunakan perintah di bawah ini. Nilai kedua parameter `num_metgrid_levels` dapat berbeda sesuai dengan data masukan yang digunakan. Sebagai contoh, GFS memiliki `num_metgrid_levels = 34`, sedangkan ERA5 `num_metgrid_levels = 38`.

```
ncdump -h met_em.d01.2022-01-01_00:00:00.nc | grep num_metgrid_levels      # = 34
ncdump -h met_em.d01.2022-01-01_00:00:00.nc | grep NUM_METGRID_SOIL_LEVELS # = 4
```

Di dalam bagian `&physics`, terdapat berbagai skema parameterisasi dalam penyelesaian perhitungan pembentukan awan, skemar radiasi, lapisan perbatas, serta proses-proses di permukaan tanah. Pada parameter `physics_suite`, Anda bisa mengaturnya ke `TROPICAL` karena wilayah yang ingin disimulasikan berada di daerah tropis. Ketika Anda mendefinisikan `physics_suite = 'TROPICAL'`, Anda tidak perlu lagi menambahkan angka pada parameter di bawah ini.

- `mp_physics` = 6: WSM6
- `cu_physics` = 16: New-Tiedke
- `ra_lw_physics` = 4: Rapid Radiative Model Transformation for GCM (RRTMG)
- `ra_sw_physics` = 4: Rapid Radiative Model Transformation for GCM
- `bl_pbl_physics` = 1: Yonsei University
- `sf_sfclay_physics` = 91: MM5 Monin-Obukhov
- `sf_surface_physics` = 2: Noah Land Surface Model

Anda hanya perlu menambahkan nilai -1 pada parameter-parameter tersebut, tentu saja sesuai dengan banyaknya domain. Anda juga dapat menghilangkan parameter `physics_suite` dan mengganti parameter `mp_physics`, `cu_physics`, `sf_surface_physics`, `sf_sfclay_physics`, `ra_lw_physics`, `ra_sw_physics`, dan `bl_pbl_physics` ke opsi lain yang ada di dalam [Panduan Pengguna WRF Bab 5](#). Anda harus berhati-hati dan memperhatikan pemilihan skema parameterisasi karena terdapat parameter yang harus ditambahkan di dalam bagian `&physics`, menambahkan bagian lain, atau kombinasi antar skema. Sebagai contoh untuk `sf_surface_physics = 4` (*Noah-MP Land Surface Model*), perlu menambahkan bagian `&noah_mp`; Ketika `cu_physics = 14` (*Scale-aware SAS*), perlu menambahkan parameter `shcu_physics = 4`; Parameter `bl_pbl_physics = 2` (*Mellor-Yamada-Janjic, MYJ*) nilai dari parameter `sf_sfclay_physics = 2` (*Eta Model*). Untuk pengaturan nilai-nilai di dalam `&physics`, Anda harus menambahkannya sebanyak jumlah domain. Anda juga dapat menonaktifkan skema parameterisasi tertentu dengan mengubahnya ke 0, misalnya pada `cu_physics` untuk domain <10 km.

Tabel 1.5: Informasi sebagian variabel di dalam `namelist.input` yang perlu disesuaikan dengan `namelist.wps`

Parameter di <code>namelist.wps</code>	Parameter di <code>namelist.input</code>
<code>start_year = 2022, 2022, 2022,</code>	<code>start_year = 2022, 2022, 2022,</code>
<code>start_month = 01, 01, 01,</code>	<code>start_month = 01, 01, 01,</code>
<code>start_day = 01, 01, 01,</code>	<code>start_day = 01, 01, 01,</code>
<code>start_hour = 00, 00, 00,</code>	<code>start_hour = 00, 00, 00,</code>
<code>end_year = 2022, 2022, 2022,</code>	<code>end_year = 2022, 2022, 2022,</code>
<code>end_month = 01, 01, 01,</code>	<code>end_month = 01, 01, 01,</code>
<code>end_day = 03, 03, 03,</code>	<code>end_day = 03, 03, 03,</code>
<code>end_hour = 18, 18, 18,</code>	<code>end_hour = 18, 18, 18,</code>
-	<code>run_days = 2,</code>
-	<code>run_hour = 18,</code>

Parameter di <code>namelist.wps</code>	Parameter di <code>namelist.input</code>
<code>max_dom = 3,</code>	<code>max_dom = 3,</code>
<code>interval_seconds = 21600,</code>	<code>interval_seconds = 21600,</code>
<code>parent_id = 1, 1, 1,</code>	<code>parent_id = 1, 1, 1,</code>
<code>parent_grid_ratio = 1,</code>	<code>parent_grid_ratio = 1, 3, 9,</code>
<code>3, 9,</code>	
<code>dx = 15000,</code>	<code>dx = 15000,</code>
<code>dy = 15000,</code>	<code>dy = 15000,</code>
<code>i_parent_start = 1, 11,</code>	<code>i_parent_start = 1, 11, 15,</code>
<code>15,</code>	
<code>j_parent_start = 1, 11,</code>	<code>j_parent_start = 1, 11, 15,</code>
<code>15,</code>	
<code>e_we = 33, 40, 46,</code>	<code>e_we = 33, 40, 46,</code>
<code>e_sn = 33, 40, 46,</code>	<code>e_sn = 33, 40, 46,</code>
<code>-</code>	<code>parent_time_step_ratio = 1, 3, 9, (sama dengan</code>
	<code>parent_grid_ratio)</code>
<code>-</code>	<code>time_step = 90, dengan rumus $6 * dx$ (dalam km)</code>

Isi file `namelist.input` yang telah diubah sepenuhnya menjadi seperti ini.

```

&time_control
  run_days              = 2,
  run_hours             = 18,
  run_minutes           = 0,
  run_seconds           = 0,
  start_year            = 2022, 2022, 2022,
  start_month           = 01, 01, 01,
  start_day             = 01, 01, 01,
  start_hour            = 00, 00, 00,
  end_year              = 2022, 2022, 2022,
  end_month             = 01, 01, 01,
  end_day               = 03, 03, 03,
  end_hour              = 18, 18, 18,
  interval_seconds       = 21600,
  input_from_file        = .true., .true., .true.,
  history_interval       = 60, 60, 60,
  frames_per_outfile     = 1000, 1000, 1000,
  restart                = .false.,
  restart_interval       = 7200,
  io_form_history        = 2
  io_form_restart       = 2
  io_form_input          = 2
  io_form_boundary       = 2
/

```

```

&domains
time_step                = 90,
time_step_fract_num      = 0,
time_step_fract_den      = 1,
max_dom                  = 3,
e_we                     = 33,    40,  46,
e_sn                     = 33,    40,  46,
e_vert                   = 44,    44,  44,
dzstretch_s              = 1.1
p_top_requested          = 5000,
use_surface              = .false.,
sfcp_to_sfcp            = .true.,
num_metgrid_levels       = 34,
num_metgrid_soil_levels  = 4,
dx                       = 18000,
dy                       = 18000,
grid_id                  = 1,      2,   3,
parent_id                = 1,      1,   1,
i_parent_start           = 1,      11, 15,
j_parent_start           = 1,      11, 15,
parent_grid_ratio         = 1,      3,   9,
parent_time_step_ratio   = 1,      3,   9,
feedback                 = 1,
smooth_option            = 0
/

&physics
physics_suite            = 'TROPICAL'
mp_physics                = -1,     -1,  -1,
cu_physics                = -1,      0,   0,
ra_lw_physics             = -1,     -1,  -1,
ra_sw_physics             = -1,     -1,  -1,
bl_pbl_physics            = -1,     -1,  -1,
sf_sfclay_physics         = -1,     -1,  -1,
sf_surface_physics        = -1,     -1,  -1,
radt                      = 18,     18,  18,
bldt                      = 0,      0,   0,
cudt                      = 0,      0,   0,
icloud                    = 1,
num_land_cat              = 21,
sf_urban_physics          = 0,      0,   0,
fractional_seaice         = 1,
/

&fdda

```

```
/

&dynamics
hybrid_opt          = 2,
w_damping           = 0,
diff_opt            = 2,      2,   2,
km_opt              = 4,      4,   4,
diff_6th_opt        = 0,      0,   0,
diff_6th_factor     = 0.12,   0.12, 0.12,
base_temp           = 290.
damp_opt            = 3,
zdamp               = 5000., 5000., 5000.,
dampcoef            = 0.2,    0.2,   0.2,
khdif               = 0,      0,   0,
kvdif               = 0,      0,   0,
non_hydrostatic     = .true., .true., .true.,
moist_adv_opt        = 1,      1,   1,
scalar_adv_opt       = 1,      1,   1,
gwd_opt             = 1,      0,   0,
/

&bdy_control
spec_bdy_width      = 5,
specified            = .true.
/

&grib2
/

&namelist_quilt
nio_tasks_per_group = 0,
nio_groups = 1,
/
```

1.4.2.2 Menjalankan program `real.exe` dan `wrf.exe`

Program `real.exe` mengeluarkan file-file dalam format `.nc`, yaitu `wrfbdy_d01` dan `wrfinput_<domain>`. Perintah menjalankan program ini adalah sebagai berikut.

```
./real.exe
```

Untuk melihat respon dari program ini, Anda dapat melihat file `rs1.error.0000` dengan perintah

```
tail rsl.error.0000 -n 1
```

Jika respon yang diberikan terdapat kalimat `real_em: SUCCESS COMPLETE REAL_EM INIT`, Anda bisa melanjutkan ke tahapan `wrf.exe`.

```
./wrf.exe
```

Simulasi WRF dari program `wrf.exe` telah berhasil selesai apabila terdapat kalimat `wrf: SUCCESS COMPLETE WRF` pada baris terakhir `rsl.error.0000` dan terdapat file `wrfout_d0*`. Untuk simulasi ini, terdapat 3 file `wrfout_d0*`: `wrfout_d01_2022-01-01_00:00:00`, `wrfout_d02_2022-01-01_00:00:00`, dan `wrfout_d03_2022-01-01_00:00:00`. Sejatinya, file-file tersebut berformat `*.nc` walaupun tidak tertera pada nama file. File `wrfout_d0*` memiliki interval waktu per 1 jam, dari pukul 00:00 UTC 1 Januari - 18:00 UTC 3 Januari 2022. Langkah selanjutnya, Anda dapat menganalisis luaran WRF dengan aplikasi apapun yang Anda bisa, selama mendukung format `*.nc`. Hanya saja, Anda perlu mengubah bentuk dan nama variabel WRF untuk disesuaikan dengan *CF-Convention* dengan program NCL yang telah disediakan di https://sundowner.colorado.edu/wrfout_to_cf/wrfout_to_cf.ncl.

1.5 Visualisasi Luaran WRF

Terdapat 3 file luaran WRF yang telah Anda jalankan dengan masing-masing memiliki resolusi spasial yang berbeda, yaitu 18 km, 6 km, dan 2 km dengan pemilihan lokasi titik tengah longitude dan latitude di Kota Surabaya. Selanjutnya, Anda dapat melihat hasil dari simulasi tersebut dengan berbagai macam perangkat lunak. Pada modul ini, kami menampilkan hasil simulasi dengan menggunakan aplikasi NCL, QGIS, Python, R, dan Julia.

1.5.1 Python

Untuk mengetikkan kode Python. Anda dapat menggunakan kode editor **Jupyter Notebook** atau aplikasi lainnya, seperti Visual Studio Code, Notepad++, atau Atom. Untuk langkah-langkah di bawah ini, kami lebih menjelaskan cara penulisan kode Python pada **Jupyter Notebook**. Kode editor ini dapat digunakan pada aplikasi Browser default Anda, misalnya Google Chrome, Mozilla Firefox, atau Microsoft Edge. Kami menyarankan Anda untuk menggunakan **Jupyter Notebook** agar hasil kode langsung bisa ditampilkan sehingga respons dari setiap sel yang berisikan kode-kode dapat diketahui langsung. Ikuti langkah-langkah berikut ini untuk membuka **Jupyter Notebook**.

1. Bukalah terminal Bash Anda. Saat ini, Anda berada di direktori `$HOME` atau `~`.
2. Bukalah direktori `WRF-Model` dengan mengetik perintah

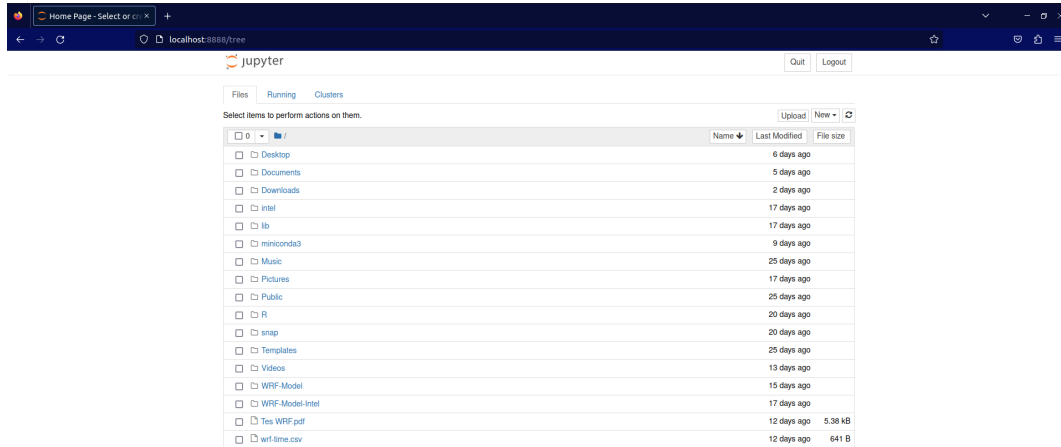
```
cd WRF-Model
```

3. Aktifkan terlebih dahulu *Environment* `ncl` dengan perintah `conda activate ncl`.

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

4. Ketikkan perintah berikut ini untuk memulai pengetikan kode Python. Browser default Anda akan terbuka dengan menampilkan kode editor **Jupyter Notebook** (Gambar 1.14)

jupyter notebook



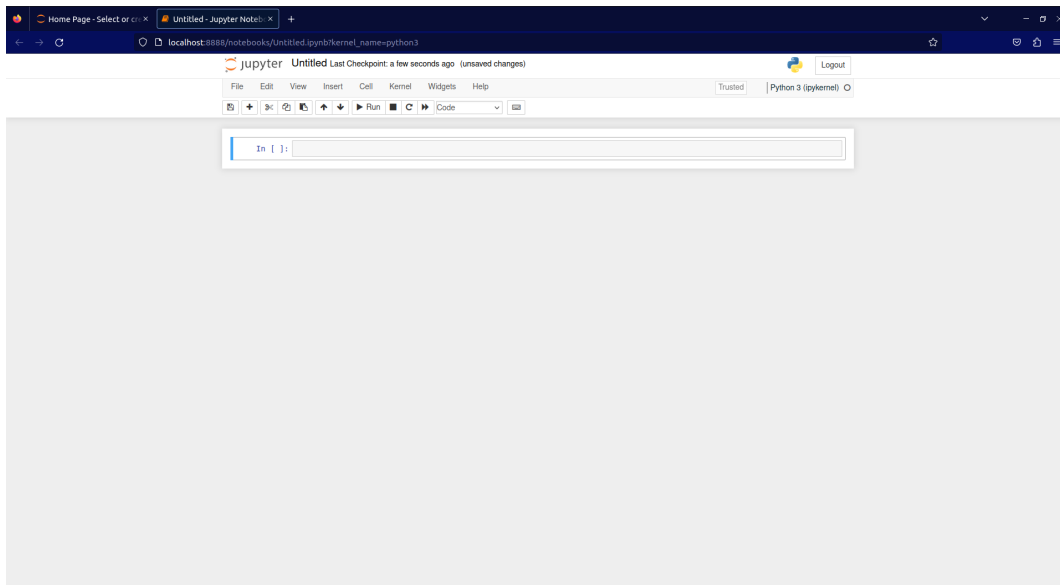
Gambar 1.14: Tampilan Jupyter Notebook

5. Klik **New** dan pilih **Python 3 (ipykernel)**. Tampilan awal **Jupyter Notebook** seperti pada Gambar 1.15
6. Anda dapat langsung mendapatkan hasil dari kode yang ditulis pada sel (lihat In [1]) (Gambar 1.16)

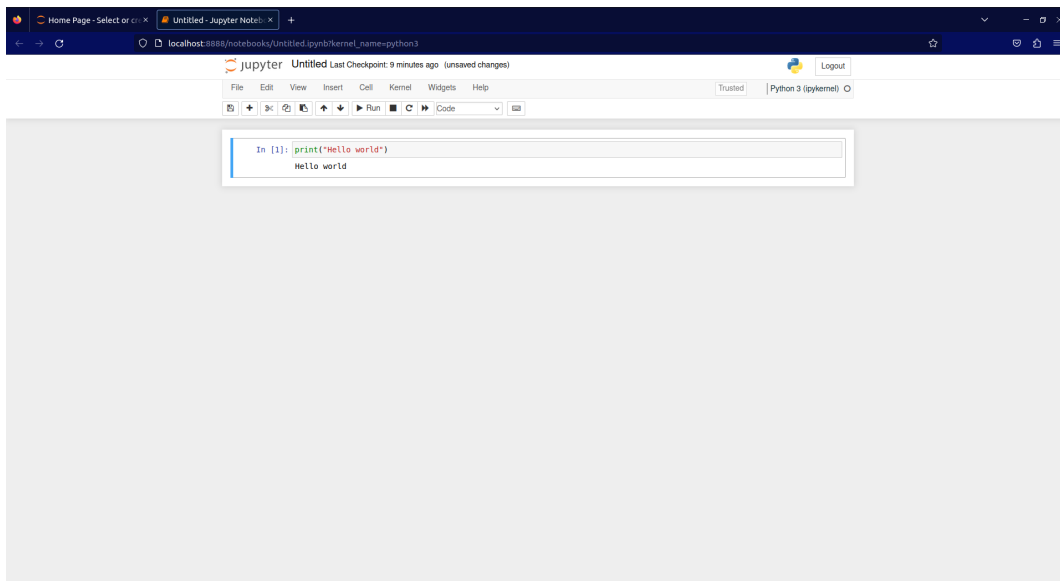
Untuk pengolahan data WRF di Python, kami menggunakan package **wrf-python** [8]. Package ini dikembangkan oleh NCAR yang dikhususkan untuk *Post-Processing* luaran WRF. Package ini mendukung pembacaan file, perhitungan interpolasi, serta visualisasi WRF. Perhatikan langkah-langkah berikut cara penggunaannya mulai dari pembacaan file hingga pembuatan grafik. Package berikut ini dibutuhkan untuk melakukan langkah-langkah tersebut.

```
from netCDF4 import Dataset
import wrf
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from matplotlib.cm import get_cmap
import cartopy.crs as crs
from cartopy.feature import NaturalEarthFeature
```


1.5 Visualisasi Luaran WRF



Gambar 1.15: Tampilan awal Jupyter Notebook



Gambar 1.16: Tampilan interaktif Jupyter Notebook

1 Dynamical Downscaling: Model Weather Research Forecasting (WRF)

1. Buka salah satu file `wrfout_d0*`, misalnya `wrfout_d03_2022-01-01_00:00:00` dan cetak variabel tersebut, misalkan variabel T2 (*Air Temperature at 2m*: suhu udara 2 meter dari permukaan tanah). Isinya adalah beberapa metadata. Anda dapat mengetahui variabel-variabel di dalamnya dengan menambahkan metode `.variables`. Anda dapat melihat penjelasan variabel-variabel pada panduan pengguna WRF-ARW.

```
# Lokasi folder luaran WRF
wrf_path = '/home/absen/WRF-Model/WRF/test/em_real'
# Membuka file wrfout
wrf_d03 = Dataset(f"{wrf_path}/wrfout_d03_2022-01-01_00:00:00")
# Melihat variabel
wrf_d03.variables
```

2. Anda dapat mengambil variabel dengan fungsi `wrf.getvar()` dengan menyertakan argumen dari nama variabel WRF. Untuk mengambil T2, gunakan perintah di bawah ini. Perhatikan hasil yang diperoleh merupakan tipe `xarray.DataArray` dan metode `wrf.ALL_TIMES` pada argumen `timeidx` berguna untuk mengambil seluruh waktu, mulai dari awal hingga akhir simulasi. Anda dapat mengambil salah satu waktu dengan mencantumkan angka bulat (mis. 0, 1, 2, ...).

```
wrf_t2 = wrf.getvar(wrf_d03, "T2", timeidx=wrf.ALL_TIMES)
```

3. Untuk mendapatkan nilai koordinat latitude dan longitude dari variabel T2, Anda dapat memakai fungsi `wrf.latlon_coords()`. Pastikan dalam satu baris terdapat 2 variabel.

```
lats, lons = wrf.latlon_coords(wrf_t2)
```

4. Untuk mendapatkan waktu, Anda dapat memanggil *Coordinates Time* yang telah tersedia di dalam `wrf_t2`.

```
wrf_time = wrf_t2.Time
```

5. Anda juga dapat mengekstrak beberapa variabel yang tidak tersedia di dalam WRF, tentunya terbatas, seperti resultan kecepatan angin (`wspd`), arah angin (`wdir`), *Convective Available Potential Energy* (CAPE; `cape3d_only/mcape`), atau kelembapan relatif (`rh2`). Anda dapat membaca lebih lanjut di <https://wrf-python.readthedocs.io/en/latest/diagnostics.html>.
6. Variabel curah hujan tidak ada di dalam WRF. Anda harus mengekstrak dan menjumlahkan variabel `RAIN` (*Accumulated Total Cumulus Precipitation*) dan `RAINNC` (*Accumulated Total Grid Scale Cumulus Precipitation*), maka diperoleh akumulasi curah hujan dari awal sampai akhir waktu simulasi. Anda perlu mengurangi curah hujan dari waktu ke t dengan $t - 1$ dengan memanfaatkan program perulangan (*looping*).

```

# Ekstrak RAINC dan RAINNC
rainc = wrf.getvar(wrf_d03, "RAIN" , timeidx = wrf.ALL_TIMES)
rainnc = wrf.getvar(wrf_d03, "RAINNC", timeidx = wrf.ALL_TIMES)

# Menghitung Curah hujan akumulasi
rain = rainc + rainnc
rain_diff = rain.copy() # Metode .copy() agar var rain tidak ikut berubah

# Lakukan perulangan
length = len(wrf_time.values)
for i in range(1, length):
    rain_diff[i, :, :] = rain[i, :, :] - rain[i-1, :, :]

# Copy Attribute (dari RAINC atau RAINNC)
rain_diff.attrs = rainc.attrs
# Tambahkan deskripsi
rain_diff.attrs["description"] = "Total Rainfall"
# Menghapus variabel rain untuk mengoptimalkan memori
del rain

```

Setelah berhasil mengekstrak variabel dari langkah sebelumnya, langkah-langkah berikut ini adalah pembuatan grafik spasial dari variabel T2. Untuk membuatnya, Anda membutuhkan tambahan package `matplotlib` dan `cartopy`.

1. Anda telah mendefinisikan lokasi (variabel `lats` dan `lons`) pada langkah sebelumnya. Kedua variabel tersebut digunakan dalam membuat grafik spasial.
2. Variabel suhu udara yang telah diekstrak pada langkah sebelumnya memiliki waktu dari awal hingga akhir simulasi. Anda hanya dapat memilih salah satu waktu dalam 1 grafik. Anda juga dapat membuat grafik untuk masing-masing waktu dalam satu grafik dalam bentuk *panel plot*. Untuk membuat grafik pada waktu tertentu, Anda perlu memilih waktu dan mengetahui letak indeksinya.

```

time      = "2022-01-02 13:00:00"
time      = np.array([time], dtype='datetime64[ns]')
time_idx  = np.where(wrf_time.values == time)[0]
time_idx  = int(time_idx)

```

3. Sebagai contoh skrip di bawah ini untuk membuat grafik spasial hanya satu waktu.

```

# Mengambil informasi sistem proyeksi peta (dalam data ini adalah mercator)
cart_proj = wrf.get_cartopy(wrf_t2, timeidx=time_idx)

# Membuat dan mengatur ukuran grafik
fig = plt.figure(figsize=(12, 10))

```

1 Dynamical Downscaling: Model Weather Research Forecasting (WRF)

```
# Mengatur sistem proyeksi sesuai metadata WRF
ax = plt.axes(projection=cart_proj)

# Menambahkan garis pantai. Sumber data: www.naturalearthdata.com
ax.coastlines(linewidth=0.8)

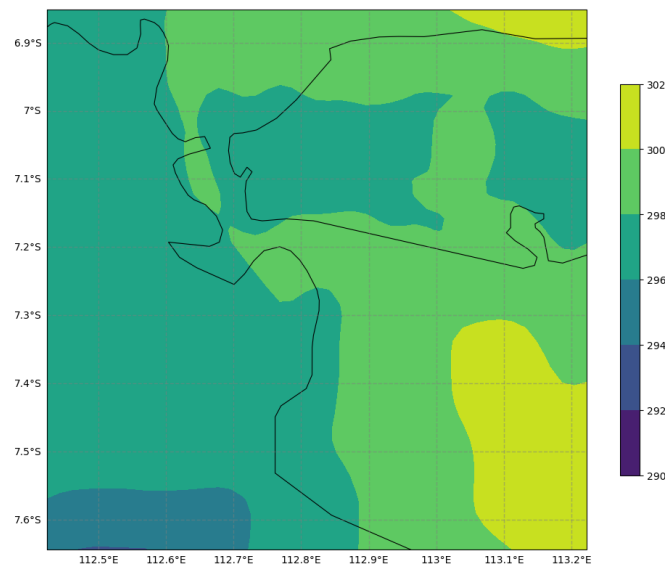
# Menambahkan garis lintang dan bujur
gl = ax.gridlines(draw_labels=True, linewidth=1, color='gray', alpha=0.5,
                 linestyle='--')
gl.top_labels = False # Menghilangkan label bujur di atas
gl.right_labels = False # Menghilangkan label lintang di kanan

# Mengatur nilai untuk skala legenda
lvl = np.arange(290, 304, 2)

# Menambahkan garis kontur terisi
plt.contourf(lons, lats, smooth_t2[time_idx, :, :],
             levels=lvl,
             transform=crs.PlateCarree(),
             cmap='viridis')

# Menambahkan legenda warna
plt.colorbar(ax=ax, shrink=0.7)

# Menampilkan grafik
plt.show()
```



Gambar 1.17: Grafik suhu udara 2-meter di atas permukaan tanah pada 2022-01-02 13:00:00 UTC

Selain spasial, Anda dapat pula menampilkan grafik seri waktu untuk titik koordinat atau rata-rata grid tertentu.

1. Tentukan titik koordinat yang akan dibuat grafik seri waktu

```
lats_sel = -7.271372797667375
lons_sel = 112.73417496409039
```

2. Untuk menentukan indeks dari titik koordinat yang telah didefinisikan tersebut, gunakan fungsi `wrf.ll_to_xy()`. Nilai yang dikeluarkan adalah indeks dari lokasi terdekat.

```
latlon_idx = wrf.ll_to_xy(wrf_d03, lats_sel, lons_sel)
wrf_t2_sel = wrf_t2[:, latlon_idx[1], latlon_idx[0]]
```

3. Lakukan plot seri waktu

```
# Mengatur ukuran grafik
fig = plt.figure(figsize=(12, 5))
ax = plt.axes()

# Plot -> x: waktu, y: suhu udara (K)
ax.plot(wrf_time, wrf_t2_sel.values)

# Mengatur label dan judul
ax.set_xlabel('Waktu')
ax.set_ylabel('Suhu udara 2m (K)')
ax.set_title(f'Suhu udara di {lats_sel}$^\circ$, {lons_sel}$^\circ$')

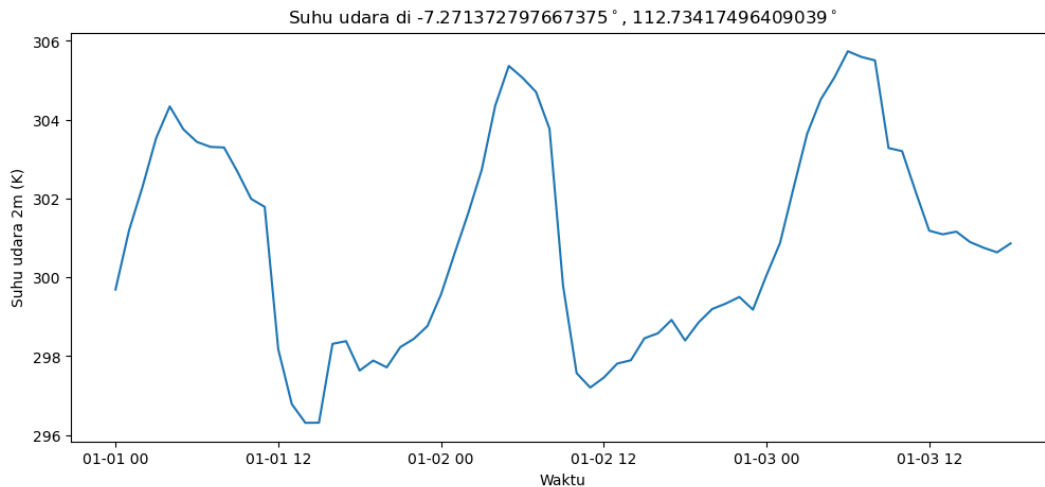
# Tampilkan grafik
plt.show()
```

1.5.2 R

Anda dapat menggunakan RStudio untuk menuliskan skrip R. RStudio mendukung penulisan skrip R maupun bahasa lainnya, seperti Markdown, C++, dan Python. Sebenarnya, Anda dapat menuliskan skrip Python pada RStudio dengan bantuan package `reticulate`. Untuk mengolah data WRF di R, Anda perlu memasang package `ncdf4` dan `raster` terlebih dahulu. Untuk kebutuhan plot seri waktu, kami menggunakan package `tidyverse`.

1. Sebelum memulai pengetikan kode R, buatlah file skrip R dengan memilih menu **File > New File > R Script**.
2. Di console R pada RStudio, gunakan perintah berikut untuk memasang `ncdf4` dan `raster`.

1 Dynamical Downscaling: Model Weather Research Forecasting (WRF)



Gambar 1.18: Grafik seri waktu suhu udara 2-meter di atas permukaan tanah

```
install.packages(c('ncdf4', 'raster'))
```

Anda juga dapat menggunakan menu pada RStudio: **Tools > Install Packaages**. Kemudian, ketik “ncdf4, raster” (tanpa tanda petik) pada bagian *Packages (separate multiple with space or comma)*. Setelah itu, klik *Install*.

3. Kami telah menyediakan fungsi skrip R untuk membuka file luaran WRF. Pada teks editor di RStudio, masukkan perintah berikut untuk mengimpor package `ncdf4` dan `raster` beserta skrip `wrf-raster.R`.

```
library(ncdf4)
library(raster)
library(tidyverse)
source('wrf-raster.R')
```

Anda dapat menjalankan ketiga baris kode tersebut dengan memblok seluruh baris atau arahkan kursor pada akhir kode kemudian tekan tombol **CTRL + ENTER**.

4. Saat Anda menjalankan `source('wrf-raster.R')`, muncul Functions dengan nama `wrf.raster` pada jendela **Environment** di RStudio (letak jendela di sebelah kanan atas).
5. Untuk menggunakan fungsi `wrf.raster()`, Anda hanya membutuhkan argumen `wrf.file` (nama folder `wrfout_*`) dan `var.name` (nama variabel di dalam `wrfout_*`). Nilai kembalian setelah menjalankan fungsi ini berbentuk `RasterBrick`. Argumen `nlev` dapat dicantumkan dengan angka bilangan bulat (1, 2, 3, ...) khusus untuk variabel yang memiliki variasi terhadap ketinggian dan kedalaman, seperti suhu udara atau suhu tanah. Variabel lain yang tidak tercantum seperti curah hujan, sudah tersedia di dalam fungsi ini (`var.name = rain`).
6. Sebagai contoh mengambil variabel curah hujan.

```
rain <- wrf.raster(wrf.file =
  ↪ '/home/absen/WRF-Model/WRF/test/em_real/wrfout_d01_2022-01-01_00:00:00',
  ↪ var.name = 'rain')
rain
```

```
class      : RasterBrick
dimensions : 32, 32, 1024, 67 (nrow, ncol, ncell, nlayers)
resolution : 0.1581326, 0.1567945 (x, y)
extent     : 110.2099, 115.2701, -9.821663, -4.804237 (xmin, xmax, ymin, ymax)
crs       : +proj=longlat +datum=WGS84 +no_defs
source     : memory
names      : layer.1, layer.2, layer.3, layer.4, layer.5, layer.6, ...
min values : 0, 0, 0, 0, 0, 0, ...
max values : 0.000000, 2.944275, 2.439148, 6.013021, 14.848666, 47.531946, ...
time      : 2022-01-01 00:00:00, 2022-01-03 18:00:00 (min, max)
```

Pada respons melalui console R, terdapat berbagai informasi seperti `dimensions`, `resolution`, `crs`, serta `time`. Anda dapat mudah memahami isi dari file `wrfout_d01*` tersebut.

- Anda bisa langsung membuat grafik spasial dengan perintah 1 baris ini dan ditampilkan pada Gambar 1.19. Cukup sederhana.

```
plot(rain)
```

- Untuk membuat grafik seri waktu pada lokasi tertentu, Anda dapat menggunakan fungsi `extract()` dan `plot()`

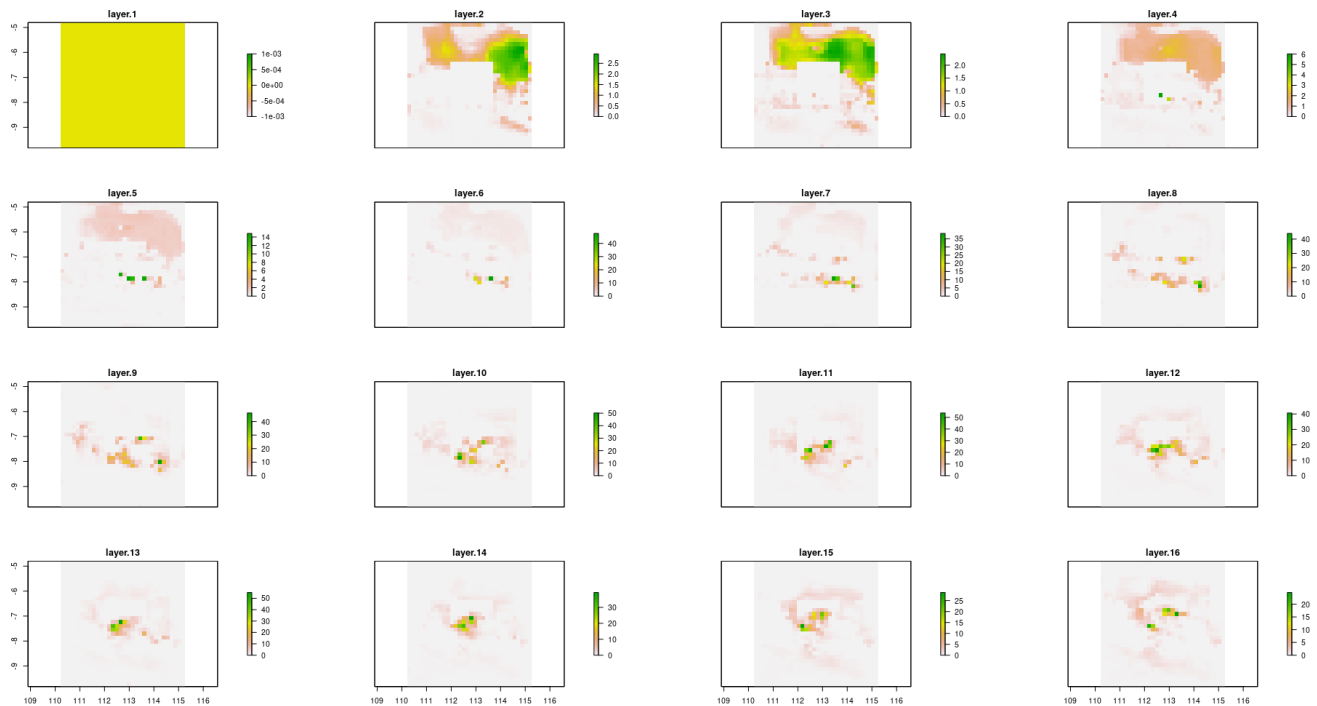
```
# Waktu
time_sel <- getZ(rain)

# Lokasi
lats_sel <- -7.271372797667375
lons_sel <- 112.73417496409039

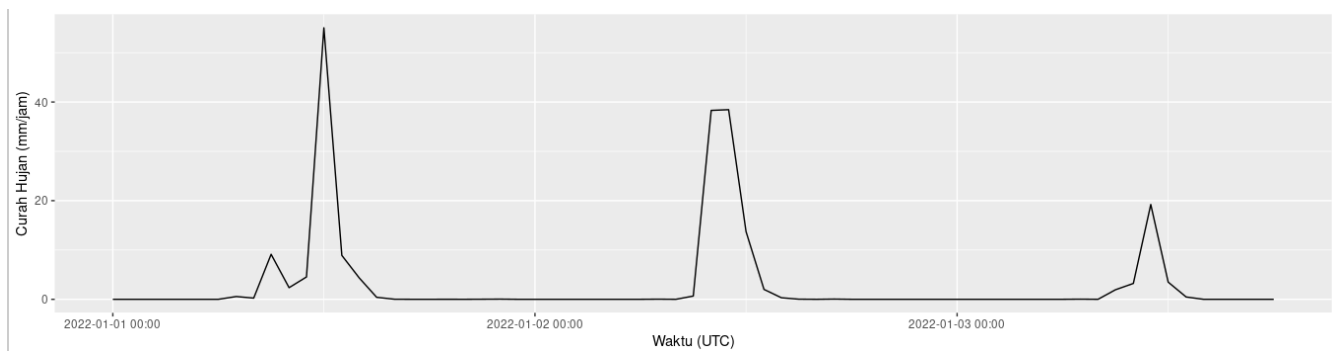
# Ekstrak nilai curah hujan berdasarkan lokasi
rain_sel <- extract(rain, data.frame(x = lons_sel, y = lats_sel))

# Plot grafik seri waktu
ggplot() +
  geom_line(aes(x = time_sel, y = rain_sel[1,])) +
  scale_x_datetime("Waktu (UTC)", date_labels = "%Y-%m-%d %H:%M") +
  scale_y_continuous("Curah Hujan (mm/jam)")
```

1 Dynamical Downscaling: Model Weather Research Forecasting (WRF)



Gambar 1.19: Plot curah hujan per 1 jam dari wrfout_d01*



Gambar 1.20: Grafik seri waktu curah hujan per 1 jam

1.5.3 NCL

NCAR telah menyediakan contoh skrip pengolahan data WRF dengan NCL. Anda dapat mengakses lebih banyak di <https://www.ncl.ucar.edu/Applications/wrf.shtml>. File netcdf luaran WRF pada dasarnya berbeda dengan file netcdf pada umumnya karena tidak mengikuti pedoman *Climate and Forecast Convention*. Alhasil, mengolah data WRF menggunakan aplikasi lain seperti ArcMap atau Matlab cukup rumit. Jika Anda ingin cukup mudah mengolahnya dengan aplikasi lainnya, skrip NCL untuk mengubah WRF menjadi CF-Convention dibuat oleh Mark Seefeldt dan telah tersedia di https://sundowner.colorado.edu/wrfout_to_cf/wrfout_to_cf.ncl. Berikut ini adalah cara penggunaan skrip `wrfout_to_cf.ncl`.

1. Aktifkan terlebih dahulu *environment ncl* pada terminal. Tulisan (**base**) menjadi (**ncl**) setelah perintah berhasil dipanggil.

```
conda activate ncl
```

2. Anda hanya perlu memasukkan variabel `dir_in` (lokasi folder wrfout), `dir_out` (lokasi folder wrfout setelah dikonversi), `file_in` (nama file wrfout), dan `file_out` (nama file wrfout setelah dikonversi).
3. Masukkan perintah berikut.

```
ncl 'dir_in="/home/absen/WRF-Model/WRF/test/em_real/'
↪ 'file_in="wrfout_d01_2022-01-01_00:00:00"'
↪ 'file_out="wrfout_cf_d01_2022-01-01_00:00:00.nc"' wrfout_to_cf.ncl
```

4. Anda dapat mengolah data luaran WRF setelah dikonversi menjadi CF-Convention pada aplikasi apapun dengan mudah. Hanya saja, Anda perlu memperhatikan perubahan nama variabel dan sesuaikan dengan data WRF asli.

Selain mengubah menjadi CF-Convention, Anda dapat langsung menerapkan skrip NCL untuk analisis maupun visualisasi. Sebagai contoh skrip berikut ini untuk menampilkan suhu udara dekat permukaan dari luaran `wrfout_d01*`. Perlu diperhatikan bahwa simbol `;` adalah komentar di dalam NCL. Anda dapat mengganti format file dari luaran skrip ini (mis. `png`, `pdf`, atau `x11`).

```
;---Read file
fpath    = "/home/absen/WRF-Model/WRF/test/em_real/"
filename = "wrfout_d01_2022-01-01_00:00:00"
a        = addfile(fpath+filename, "r")

;---Get CEN_LAT and CEN_LON from WRF metadata (in global attributes)
cen_lat = a@CEN_LAT
cen_lon = a@CEN_LON

;---Select time index
nt = 30
```

```

;---Read temperature at first time step
tc = wrf_user_getvar(a, "tc", nt)

;---Open worksheet
wks = gsn_open_wks("png", "wrf_nogsn") ; Format file luaran grafik, contoh png

;---Set up resource list
res                                = True
res@gsnDraw                        = False
res@gsnFrame                       = False
res@tfDoNDCOverlay                = True

;---Plotting options for air temperature
opts_r                             = res

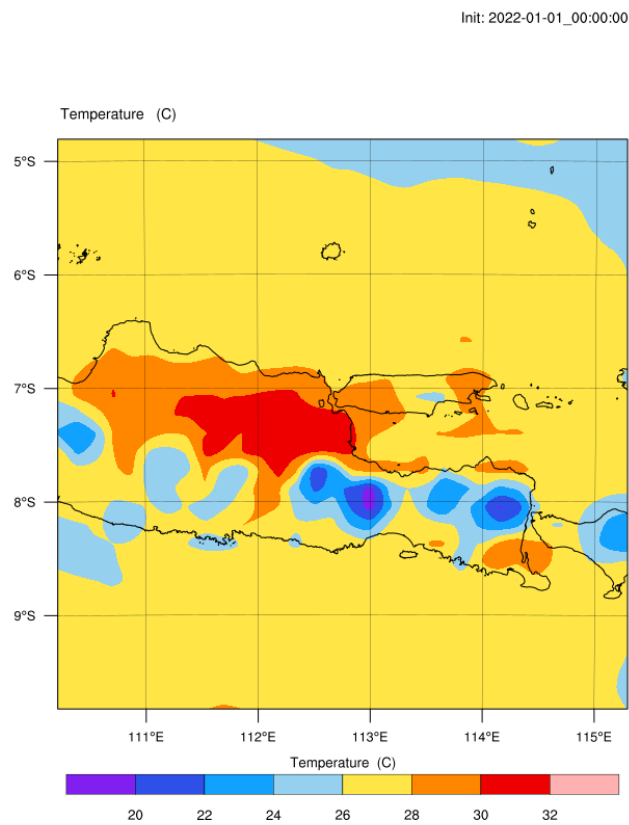
opts_r@cnFillOn                    = True
opts_r@cnLevelSelectionMode        = "ExplicitLevels"
opts_r@cnLevels                     = (/ 20, 22, 24, 26, 28, 30, 32 /)
opts_r@cnSmoothingOn                = True
opts_r@cnSmoothingDistanceF         = .005

;---Option for plt_res
plt_res = res

;---Option for plt_res
map_res = res
map_res@mpDataBaseVersion           = "HighRes"                ; Jika memilih
↪ "HighRes", Anda harus mengunduh semua file di
map_res@mpDataResolution             = "FinestResolution"      ;
↪ https://www.io-warnemuende.de/rangs-en.html
map_res@mpCenterLatF                 = cen_lat                  ; dan letakkan di
↪ folder $NCARG_ROOT/lib/ncarg/database/rangs
map_res@mpCenterLonF                 = cen_lon
map_res@mpGeophysicalLineColor        = "black"
map_res@mpGeophysicalLineThicknessF  = 2.0
map_res@mpGridSpacingF               = 1.0
map_res@mpGridLineColor              = "black"

;---Plot
contour_tot = wrf_contour(a, wks, tc(0,:,:), opts_r)
plot = wrf_map_overlays(a, wks, (/contour_tot/), plt_res, map_res)

```



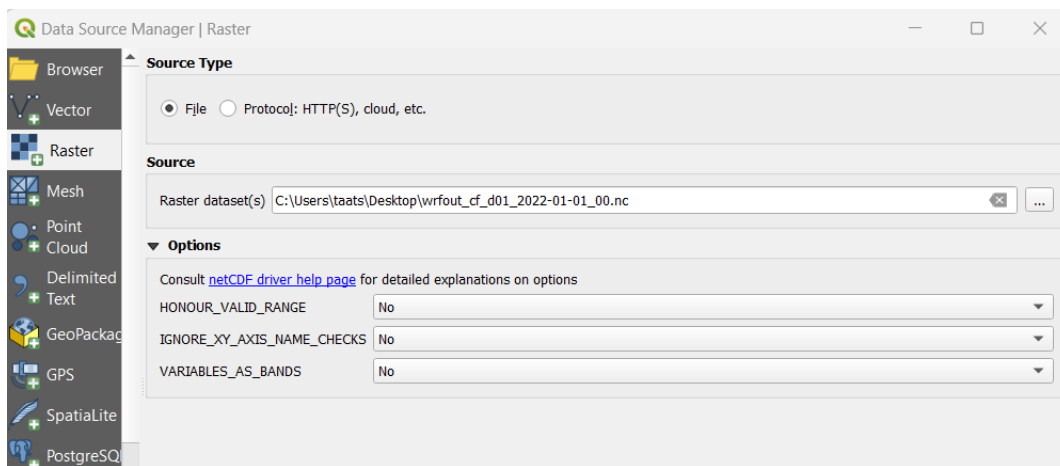
OUTPUT FROM WRF V4.4.2 MODEL
WE = 33 ; SN = 33 ; Levels = 44 ; Dis = 18km ; Phys Opt = 6 ; PBL Opt = 1 ; Cu Opt = 16

Gambar 1.21: Plot suhu udara dekat permukaan pada 2022-01-02 06:00:00 UTC

1.5.4 QGIS

Aplikasi QGIS dapat digunakan untuk mengolah data WRF. Untuk memudahkan pengolahan data WRF, Anda dapat mengubah data WRF menjadi CF-Convention dengan skrip NCL sebelumnya pada terminal Bash Linux. Setelah itu, Anda dapat mengimpor data WRF yang telah terkonversi dalam format NetCDF Classic ke QGIS. Berikut ini adalah langkah-langkahnya.

1. Pada menu QGIS, pilih **Layer > Add Layer > Add Raster Layer** (CTRL + SHIFT + R).
2. Pada bagian **Source**, klik ikon ... dan pilih file `wrfout_*` yang telah dikonversi menjadi CF-Convention.



Gambar 1.22: Import data WRF ke QGIS

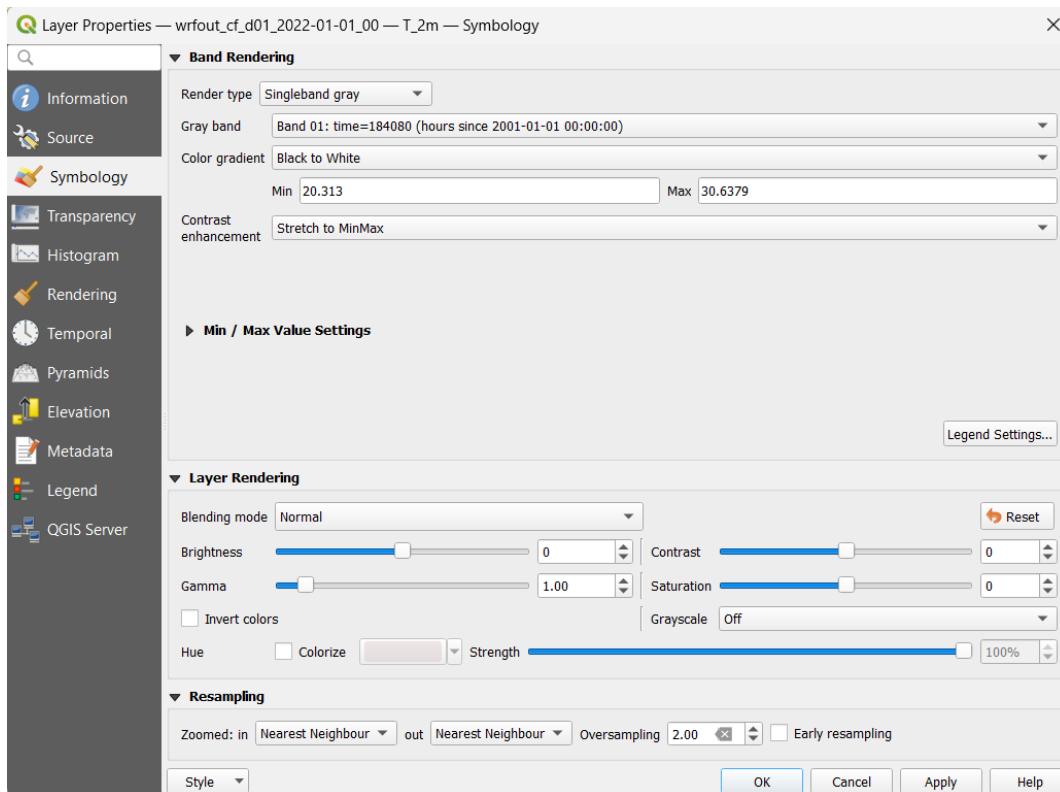
3. Pilih variabel yang ingin Anda tampilkan. Misalnya, Anda dapat memilih `T_2m` untuk menampilkan suhu udara pada ketinggian 2 meter. Klik **Add Layers**, kemudian klik **Add**.
4. Klik kanan pada raster yang telah diimpor dan pilih **Properties**. Pada **Band Rendering** di bagian *Render type*, pilih **Singleband Gray**. Pada bagian *Gray band*, terdapat pilihan nomor *Band* yang berisikan waktu.

Nilai maksimum dan minimum suhu udara dapat terlihat di bawah layer.

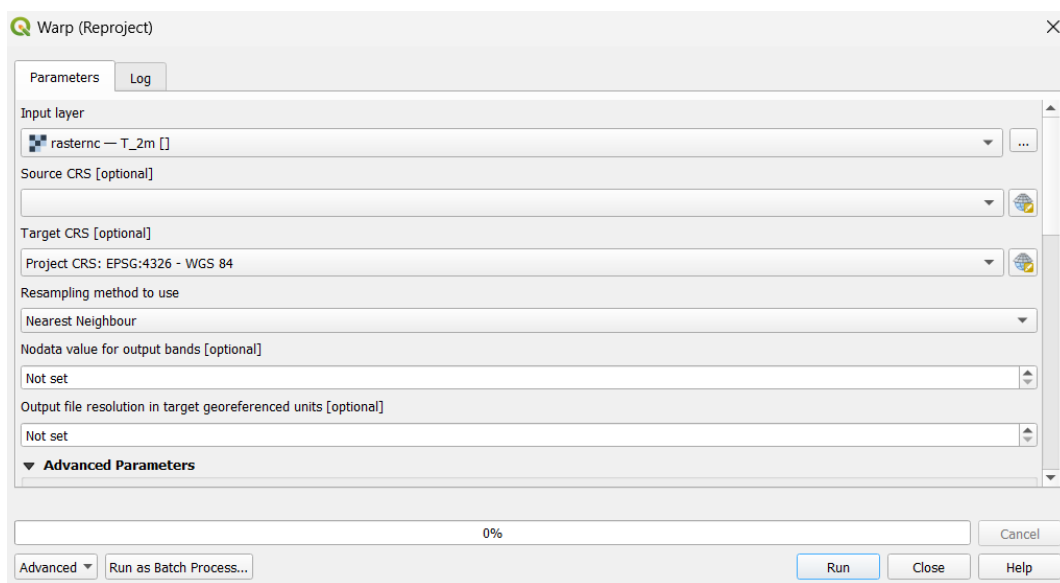
5. Setelah berhasil mengimpor, data raster dari WRF belum terproyeksi ke koordinat. Default sistem proyeksi pada QGIS kami adalah EPSG:4326 (WGS 84). Untuk mengubah sistem proyeksi, klik menu **Raster > Projections > Warp (Reproject)**. Bagian **Input layer** diisi dengan raster yang akan diubah sistem proyeksinya dan **Target CRS** diisi dengan **EPSG:4326 - WGS 84**. Kemudian, klik **Run**.

Layer raster baru akan muncul dengan nama **Reprojected**. Klik kanan pada raster tersebut dan pilih **Zoom to Layer(s)**

6. Agar lebih meyakinkan, Anda dapat mengimpor file vector dari batas wilayah Indonesia. Untuk data ini, bisa Anda unduh di gadm.org. Pada contoh ini, kami menggunakan file `*.json`. Untuk mengimpornya, klik menu **Layer > Add Layer > Add Vector Layer** (CTRL + SHIFT + V). Pada



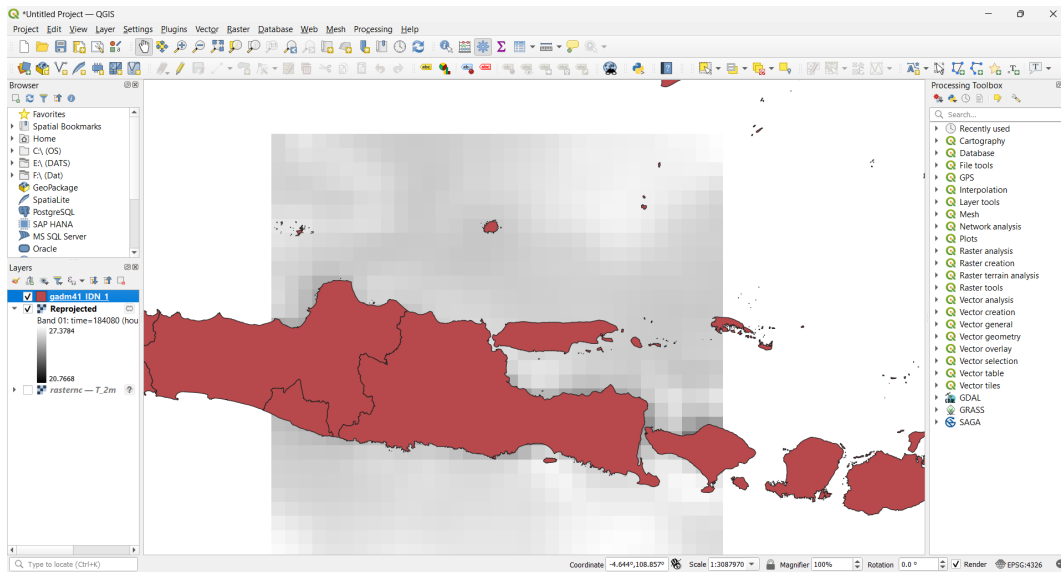
Gambar 1.23: Layer properties



Gambar 1.24: Reproyeksi raster

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

bagian **Source**, klik ikon ... dan pilih file `gadm41_IDN_1.json`. Klik **Add Layers**, kemudian klik **Add**.



Gambar 1.25: Import data vector

1.5.5 Julia

Selain R dan Python, bahasa pemrograman Julia juga dapat digunakan untuk mengolah data WRF. Hanya saja, package khusus untuk WRF masih belum tersedia. Julia dapat digunakan di sistem operasi apa saja. Untuk pengguna Windows 10/11, Anda bisa menggunakan WSL atau terminal Windows langsung. Untuk membaca data netcdf dari WRF, algoritma yang kami berikan cukup memerlukan logika sehingga tidak semudah mengolahnya seperti di R. Anda dapat menggunakan package `NCDatasets.jl`, sedangkan untuk membuat grafik menggunakan `Plots.jl`. Berikut ini adalah langkah-langkahnya.

1. Buka terminal interaktif Julia dengan mengetik `julia.exe` pada Command Prompt/PowerShell atau carilah program Julia pada Start Menu.
2. Buka **Jupyter Notebook** pada terminal interaktif Julia dengan perintah berikut ini.

```
using IJulia
notebook()
```

3. Aktifkan package `NCDatasets.jl` dan `Plots.jl`.

```
using NCDatasets
using Plots
```

4. Anda dapat menggunakan fungsi `ncread()` untuk membaca data WRF sekaligus menentukan variabel yang ingin diimpor. Berikut ini adalah contoh untuk mengimpor data suhu udara pada ketinggian 2 meter.

```
wrf_path = "C:\\Users\\taats\\Desktop\\";
wrf_file = joinpath(wrf_path, "wrfout_d01_2022-01-01_00");
ds = NCDataset(wrf_file, "r");
t2 = ds["T2"]
```

```
T2 (32 × 32 × 67)
Datatype:      Float32
Dimensions:    west_east × south_north × Time
Attributes:
  FieldType      = 104
  MemoryOrder    = XY
  description    = TEMP at 2 M
  units          = K
  stagger        =
  coordinates    = XLONG XLAT XTIME
```

i Note

Perhatikan tanda ; pada akhir baris kode. Tanda ini digunakan untuk menghilangkan respons dari kode tersebut. Ini sama seperti sintaks pada Matlab.

Dimensi pada variabel `t2` bervariasi terhadap longitude (`west_east`), latitude (`south_north`), dan waktu (`Time`) secara berturut-turut. Cara membaca dimensi ini sama seperti pada package `ncdf4` di R. Hanya saja, ini sudah didefinisikan di dalam skrip `wrf-raster.R`.

3. Sebelum menampilkan data, Anda perlu mengambil lokasi (latitude dan longitude).

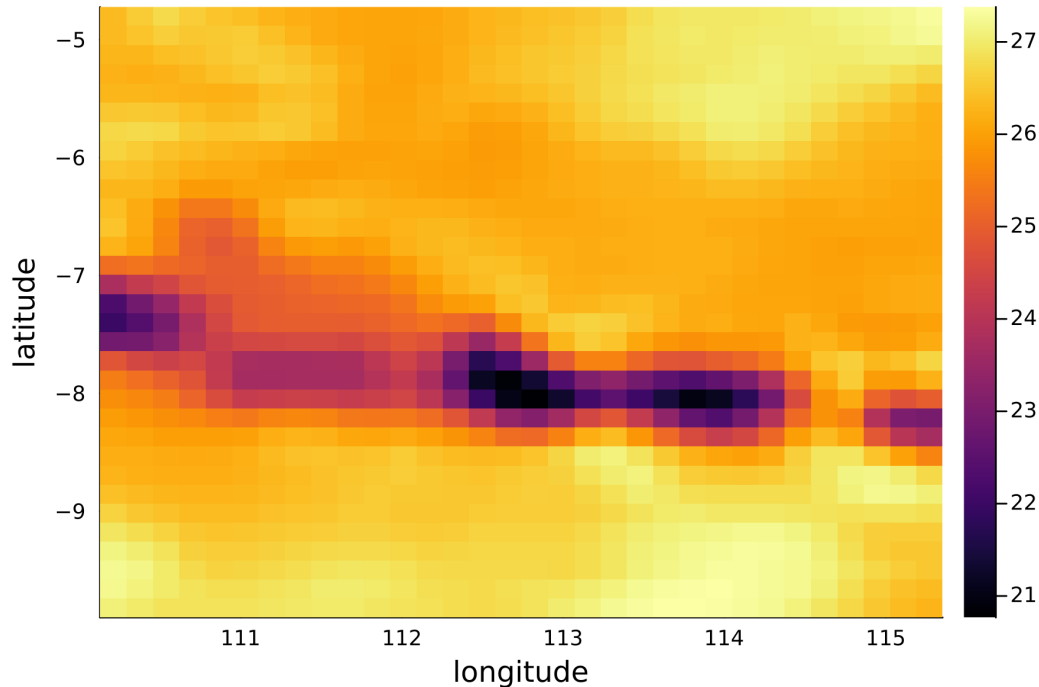
```
lat = ds["XLAT"][1, :, 1];
lon = ds["XLONG"][:, 1, 1];
```

4. Anda dapat menampilkan grafik spasial untuk 1 waktu dengan package `Plots.jl` dengan fungsi `heatmap()`.

```
nt = 1 # Indeks waktu = "2022-01-01 00:00:00"
heatmap(lon, lat, transpose(t2[:, :, nt]))
ylabel!("latitude") # Menambahkan label sumbu y
xlabel!("longitude") # Menambahkan label sumbu x
```

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

Nilai pada setiap baris dari `t2` bervariasi terhadap longitude, sedangkan pada kolom bervariasi terhadap latitude. Untuk menampilkan grafik dengan koordinat yang benar, Anda perlu membalikkan (baris ke kolom, dan sebaliknya) pada matriks `t2` dengan fungsi `transpose()`.



Gambar 1.26: Grafik grid/raster suhu udara 2m

5. Selain divisualisasikan dalam bentuk grid/raster, Anda juga dapat menampilkan dalam bentuk kontur terisi dengan fungsi `contourf()` dari package `Plots.jl`.

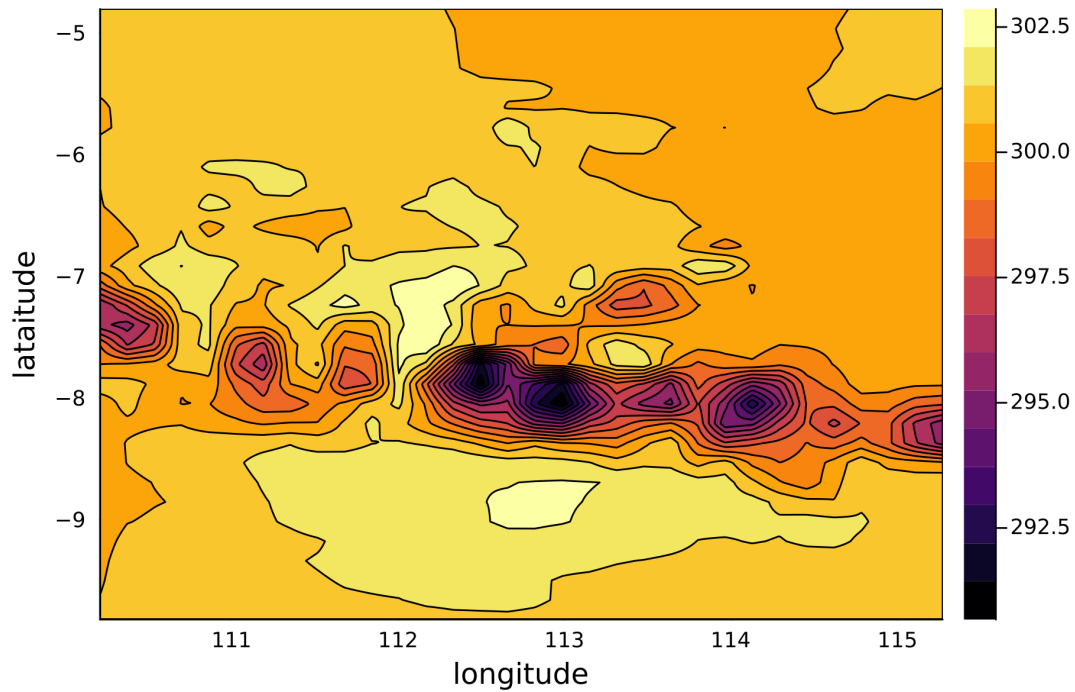
```
nt = 10 # Indeks waktu = "2022-01-01 09:00:00"
contourf(lon, lat, transpose(t2[:, :, nt]))
ylabel!("latitude") # Menambahkan label sumbu y
xlabel!("longitude") # Menambahkan label sumbu x
```

6. Untuk grafik seri waktu, Anda dapat menggunakan fungsi `plot()` dari package `Plots.jl`. Berikut ini adalah contoh untuk menampilkan grafik seri waktu suhu udara pada ketinggian 2 meter.

```
using Dates

# Mengambil variabel waktu
time = ds["XTIME"];
ticks = Dates.format.(time, "yyyy-mm-dd HH:MM");

# Pemilihan lokasi
```

Gambar 1.27: Grafik kontur terisi suhu udara 2m

```

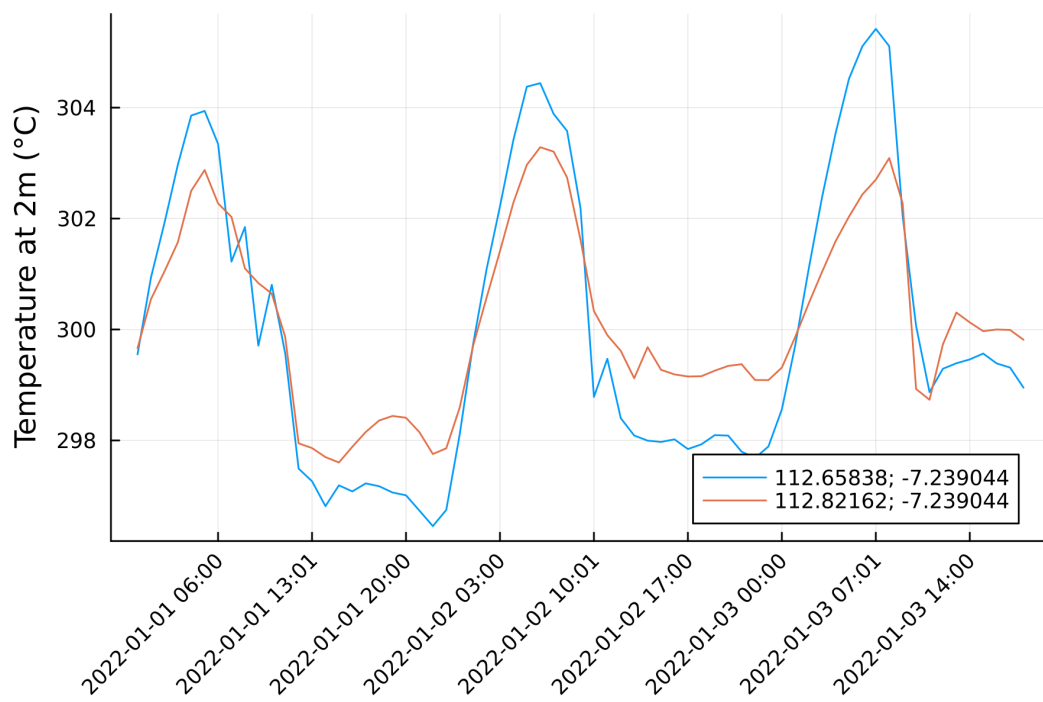
lats_sel = -7.27;
lons_sel = 112.73;

lat_idx = findall(y -> (y > lats_sel - 0.1) && (y < lats_sel + 0.1), lat);
lon_idx = findall(x -> (x > lons_sel - 0.1) && (x < lons_sel + 0.1), lon);

lons = lon[lon_idx];
lats = lat[lat_idx];

# Membuat grafik seri waktu
plot(ticks, t2[lon_idx[1], lat_idx[1], 1:length(time)],
     labels="$ (lons[1]); $ (lats[1])", xrotation=45)
plot!(ticks, t2[lon_idx[2], lat_idx[1], 1:length(time)],
     labels="$ (lons[2]); $ (lats[1])")
ylabel!("Suhu udara 2m (°C)") # Menambahkan label sumbu y
xlabel!("Waktu (per 1 jam)")  # Menambahkan label sumbu x

```



Gambar 1.28: Grafik seri waktu suhu udara 2m dari dua grid

2 Model Pendugaan Radiasi Matahari

2.1 Pendahuluan

Radiasi matahari merupakan sumber energi utama dan berperan penting dalam siklus iklim di permukaan bumi. Besaran radiasi matahari yang datang kemudian mengalami proses pemantulan, pemancaran, dan penerusan baik secara langsung maupun tidak langsung ke dan dari permukaan bumi. Radiasi matahari yang datang tersebut berpengaruh terhadap pergerakan massa udara dan massa air di bumi, selanjutnya melalui proses evaporasi maupun transpirasi, uap air dilepaskan ke udara dan membentuk awan sehingga terjadi hujan.

Pengukuran radiasi matahari secara langsung masih terbilang sedikit dengan periode perekaman data historis yang pendek. Padahal pengamatan radiasi matahari sangat penting dalam menjelaskan variabilitas dan perubahan iklim. Pada pemodelan iklim yang terus berkembang untuk menjelaskan kondisi iklim di masa lalu, saat ini dan masa depan tak lepas dari input data radiasi matahari dan kondisi karbon di atmosfer. Untuk mengetahui besaran nilai penduga radiasi matahari di suatu wilayah dapat dilakukan melalui model berdasarkan data historis parameter iklim lainnya seperti curah hujan dan suhu udara. Pendekatan dapat dilakukan dengan menggunakan model empirik dan model mekanistik.

Aplikasi pengolahan data yang digunakan dalam praktikum ini adalah R dan Python (pilih salah satu). Data contoh yang digunakan adalah data cuaca di Hancock, Maine, Amerika Serikat

2.2 Model Pendugaan Ball et al. (2004)

Ball et al. [1] membangun model empiris untuk menduga radiasi matahari di permukaan bumi dengan masukan suhu udara maksimum, suhu udara minimum, curah hujan, dan *julian days*. Persamaan yang digunakan berupa regresi linier berganda, yaitu

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \dots + \beta_{12} X_{12}$$

di mana keterangan setiap variabel bebas dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 2.1: Keterangan variabel bebas dari persamaan empirik [1]

Variabel	Keterangan
X_1	Curah hujan (mm)
X_2	Suhu udara maksimum (°C)
X_3	Suhu udara minimum (°C)

Variabel	Keterangan
X_4	Julian days
X_5	(Curah hujan) ²
X_6	(Suhu udara maksimum) ²
X_7	(Suhu udara minimum) ²
X_8	(Julian days) ²
X_9	Curah hujan * Suhu udara minimum
X_{10}	Suhu udara maksimum * Suhu udara minimum
X_{11}	Curah hujan * Suhu udara maksimum
X_{12}	Suhu udara maksimum * Julian days

2.3 Model Pendugaan Hunt et al. (1998)

Model pendugaan radiasi matahari lain adalah oleh Hunt et al. [5], yaitu gabungan model mekanistik dan empirik dengan masukan suhu udara maksimum, suhu udara minimum, dan curah hujan. Model mekanistik digunakan untuk menduga radiasi matahari yang berada di permukaan atmosfer (radiasi ekstraterrestrial, S_0). Model pendugaan Hunt et al. adalah sebagai berikut.

$$R_s = a_0 S_0 (T_{max} - T_{min})^{0.5} + a_1 T_{max} + a_2 P + a_3 P^2 + a_4$$

dimana R_s adalah radiasi matahari harian ($MJ m^{-2} hari^{-1}$), S_0 adalah radiasi matahari di puncak atmosfer ($MJ m^{-2} hari^{-1}$), P adalah curah hujan (mm), T_{max} adalah suhu udara maksimum ($^{\circ}C$), dan T_{min} adalah suhu udara minimum ($^{\circ}C$). Untuk mengestimasi nilai S_0 , persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut

$$S_0 = S_{sc} \left[1 + 0.033 \cos \left(\frac{360 t_d}{365} \right) \right] \sin(\beta)$$

dimana, S_0 adalah irradiansi ekstra terestrial ($Jm^{-2}s^{-1}$), S_{sc} konstanta matahari ($1370 Jm^{-2}s^{-1}$), suku \cos adalah jarak tahunan antara bumi dan matahari yang dinyatakan dalam derajat, t_d adalah julian day, dan \sin adalah sinus sudut elevasi matahari yang didefinisikan pada persamaan:

$$\sin(\beta) = \sin(\lambda) \sin(\delta) + \cos(\lambda) \cos(\delta) \cos[15(t_h - 12)]$$

dimana, λ adalah letak lintang dari lokasi stasiun, t_h adalah jumlah jam dalam sehari, dan δ adalah sudut deklinasi matahari pada saat julian day dan dinyatakan dalam derajat dengan estimasi pada persamaan:

$$\sin(\delta) = -\sin(23.45) \cos \left(\frac{360(t_d + 10)}{365} \right)$$

Nilai harian dari S_0 dihitung dengan mengintegrasikan irradiansi ekstraterrestrial dari matahari terbit hingga terbenam (D adalah panjang hari, dalam jam):

$$D = 12 + \frac{24}{180} \arcsin(\tan(\lambda) - \tan(\delta))$$

Persamaan dari $\sin\beta$ diintegrasikan terhadap t_h sehingga menjadi:

$$\int \sin(\beta) dt_h = 3600 \left[D \sin(\lambda) \sin(\delta) + \frac{24}{\pi} \cos(\lambda) \cos(\delta) \sqrt{(1 - \tan^2(\lambda) \tan^2(\delta))} \right]$$

Daftar Pustaka

- [1] Rosalind A Ball, Larry C Purcell, and Sean K Carey. “Evaluation of solar radiation prediction models in North America”. In: *Agronomy Journal* 96.2 (2004), pp. 391–397.
- [2] Jingyi Bao, Fotini Katopodes Chow, and Katherine A Lundquist. “Large-eddy simulation over complex terrain using an improved immersed boundary method in the Weather Research and Forecasting Model”. In: *Monthly Weather Review* 146.9 (2018), pp. 2781–2797.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] LA Hunt, L Kuchar, and CJ Swanton. “Estimation of solar radiation for use in crop modelling”. In: *Agricultural and Forest Meteorology* 91.3-4 (1998), pp. 293–300.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] W Ladwig. *wrf-python Version 1.3.4*. 2017. DOI: <https://doi.org/10.5065/D6W094P1>.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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>.
- [13] Clarence W Richardson. “Stochastic simulation of daily precipitation, temperature, and solar radiation”. In: *Water resources research* 17.1 (1981), pp. 182–190.
- [14] 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.

- [15] 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.
- [16] 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>.
- [17] T Sonkaew et al. “Finding the Optimum Microphysics and Convective Parameterization Schemes for the WRF Model for LPRU, Thailand”. In: ().
- [18] Charles Talbot, Elie Bou-Zeid, and Jim Smith. “Nested mesoscale large-eddy simulations with WRF: Performance in real test cases”. In: *Journal of Hydrometeorology* 13.5 (2012), pp. 1421–1441.
- [19] 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.
- [20] Hongxiong Xu et al. “Performance of WRF large eddy simulations in modeling the convective boundary layer over the Taklimakan desert, China”. In: *Journal of Meteorological Research* 32.6 (2018), pp. 1011–1025.