

EVALUASI MODEL PREDIKSI ANGIN PERMUKAAN PADA WILAYAH RAWAN KEBAKARAN HUTAN: KASUS WINDNINJA DI KALIMANTAN SELATAN

Evaluation of Surface Wind Prediction Models in Forest Fire-Prone Areas: The Case of WindNinja in South Kalimantan

Riefda Novikarany^{1)*}, Bagus Briliano²⁾

¹⁾Universitas Pertahanan Republik Indonesia, Kawasan IPSC Sentul, Sukahati, Kec. Citeureup, Kabupaten Bogor, Jawa Barat 16810.

²⁾Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, Jl. Angkasa I No.2 Kemayoran, Jakarta Pusat 10610.

*e-mail: riefda.novikarany@tp.idu.ac.id

Intisari

Prediksi angin di lapisan permukaan sangat penting untuk menunjang berbagai aktivitas pemantauan lingkungan, salah satunya untuk prediksi arah pergerakan asap akibat kebakaran hutan dan lahan dan prediksi kemudahan terjadinya kebakaran hutan dan lahan ditinjau dari parameter angin permukaan sebagai bentuk peringatan dini. Akurasi model prediksi angin yang dilakukan oleh berbagai badan meteorologi dunia memiliki sisi bias dan ketidakpastian yang tinggi sehingga perlu dilakukan teknik downscaling dari model angin beresolusi tinggi tersebut. Teknik downscaling dalam pengembangan model cuaca yang ada saat ini (salah satunya dengan WindNinja) dilakukan untuk mendapatkan prediksi angin yang memperhitungkan efek medan lokal, seperti kecepatan angin di atas pegunungan dan wilayah hutan. Penelitian ini menjadi evaluasi dari model angin dengan resolusi spasial tinggi di wilayah dengan topografi atau landscape yang kasar dan rawan kebakaran hutan. Metode pengujian model yang di downscaling di wilayah Gunung Besar Kalimantan Selatan menggunakan 3 (tiga) model cuaca yaitu WRF 10km, ECMWF 0.125° dan model output dari WindNinja NOMADS GFS 0.25° diuji dengan pengamatan arah dan kecepatan angin dari 5 AWS yang ada di Kalimantan Selatan selama kurun waktu 3 (tiga) hari data. Prediksi angin dengan pendekatan area landscape yang kompleks ini mampu menghasilkan nilai dengan Tingkat keandalan yang baik untuk dijadikan sebagai model prediksi dan peringatan dini kebakaran hutan dan penyebaran asap, meski performa dari beberapa fitur yang disediakan program WindNinja masih perlu ditingkatkan untuk optimalisasi pemanfaatannya di domain global.

Kata Kunci : Downscaling, WindNinja, Prediksi kecepatan angin, Prediksi arah angin.

Abstract

Wind prediction in the surface layer is essential to support various environmental monitoring activities, one of which is to predict the direction of smoke movement due to forest and land fires and predict the ease of occurrence of forest and land fires in terms of surface wind parameters as a warning. The accuracy of wind prediction models carried out by various world meteorological agencies has a high bias and uncertainty, so downscaling of existing high-resolution wind models is needed to obtain wind predictions that take into account local terrain effects, such as wind speed over mountains and forest areas. This study is an evaluation of high spatial resolution wind models in areas with rough topography or landscape, and prone to forest fires. With the method of comparing models that have been downscaled in a fairly complex area, namely South Kalimantan with the Big Mountain area in the middle, testing was carried out using 3 (three) weather models, namely WRF 10km, ECMWF 0.125° and the output model from WindNinja, namely NOMADS GFS 0.25° as well as observations of wind direction and speed from 5 AWS in the South Kalimantan region for 3 (three) days of data. Wind prediction with this complex landscape area approach can produce values with a good level of reliability to be used as a prediction and early warning model for forest fires and smoke spread. However, the performance of some features provided by the WindNinja program still needs to be improved to optimise its use in the global domain.

Keywords: Downscaling, WindNinja, Wind speed prediction, Wind direction prediction

1. PENDAHULUAN

Kebakaran hutan ekstrem di suatu wilayah pasti akan dikaitkan dengan kondisi cuaca dengan kelembaban udara yang kering, suhu udara panas (Clark *et al.*, 2015) serta minim curah hujan. Dari pengamatan penginderaan jauh satelit HIMAWARI-9, titik panas secara spasial kerap terdeteksi di Pulau Sumatra dan Pulau Kalimantan, dimana kedua pulau ini memiliki topografi dan jenis vegetasi hutan lebih banyak apabila dibandingkan dengan pulau lainnya di Indonesia.

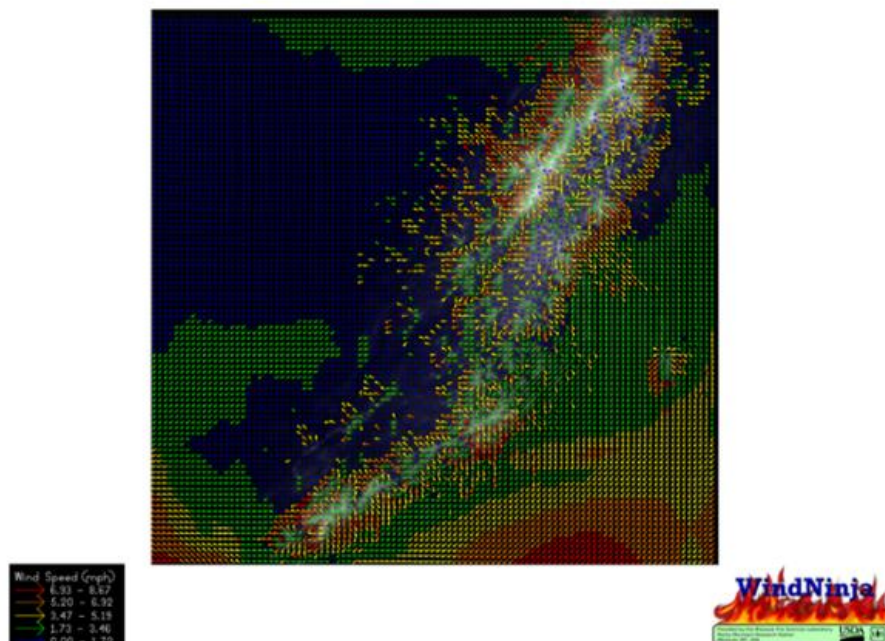
Berbagai metode digunakan untuk mengurangi dampak bencana terhadap lingkungan. Dengan cara menyediakan produk informasi yang berbasis citra satelit dan konten berbasis Sistem Informasi Geografis (SIG) (Perera *et al.*, 2021) sebagai peringatan dini potensi bencana terutama yang diakibatkan oleh cuaca dan iklim. Dari beberapa parameter cuaca yang ada, angin permukaan memiliki tingkat sensitifitas yang cukup tinggi terhadap lokasi terjadinya kebakaran hutan dan lahan. Dari beberapa hasil penelitian menunjukkan bahwa angin permukaan merupakan parameter penyebab utama dari perluasan dampak kebakaran hutan (Patacca *et al.*, 2023). Angin biasanya lebih bervariasi secara spasial dan temporal dan lebih diperhitungkan untuk diprediksi pada resolusi spasial yang tinggi. Pergerakan yang sensitif seperti pemanasan diurnal dan angin diurnal dapat mengubah aliran massa udara secara vertikal (Kumar *et al.*, n.d.), hal ini dapat terjadi di area dengan topografi bergunung.

Kebutuhan akan informasi prediksi angin beresolusi spasial tinggi, menjadi tantangan

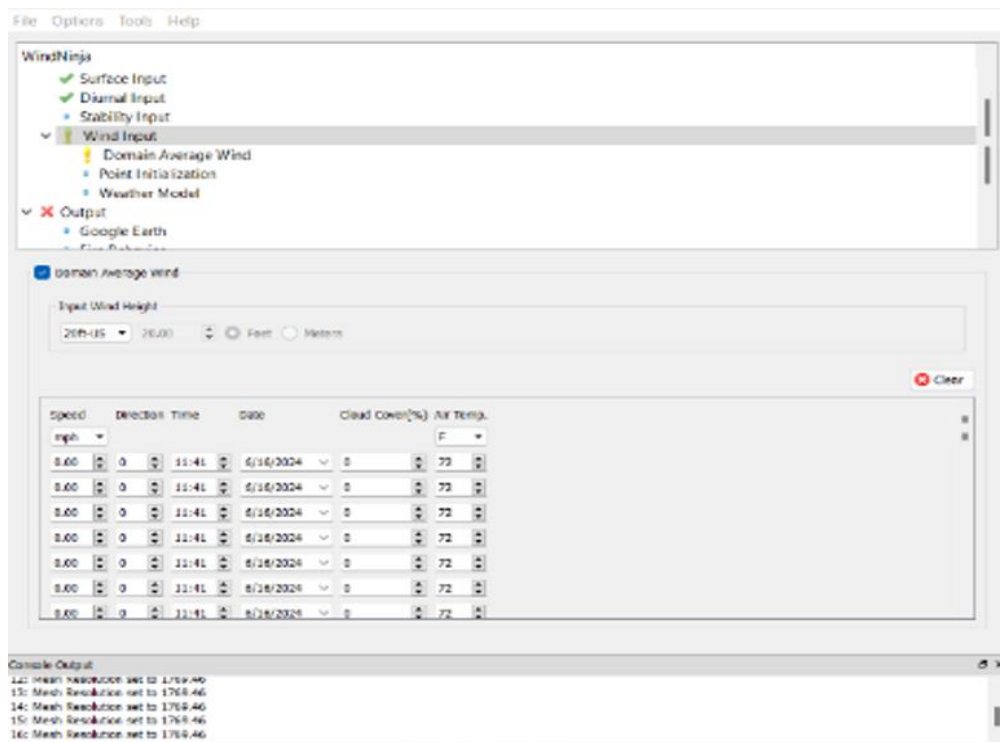
karena kelemahan dari model cuaca numerik yang kurang mempertimbangkan bentuk topografi, misal pegunungan, sehingga beberapa parameter cuaca seperti angin meridional yang terbentuk secara mekanik dan termal, parameterisasi melibatkan algoritma termal dan mekanis untuk menghasilkan output berupa fitur lapisan batas/*boundary layer* (Numerical Study of Urban Impact on Boundary Layer Structure: Sensitivity to Wind Speed, Urban Morphology, and Rural Soil Moisture, 2002). Pemantauan aktivitas kebakaran hutan dan lahan di sejumlah wilayah dengan topografi bergunung pun sangat bergantung akan

kondisi arah dan kecepatan angin, sehingga dalam pelaksanaan kegiatan Operasi Modifikasi Cuaca, prediksi parameter angin di tiap lapisan menjadi krusial untuk diprediksi. Output dari model global yang kurang merepresentasikan hubungan antara topografi dengan proses konvektif serta evolusi waktu spesifik parameter, hal ini disebabkan karena topografi model lebih halus daripada topografi sebenarnya, jarak titik grid model global tidak dapat menangkap konveksi lokal yang terbentuk karena fitur topografi kompleks, misalnya wilayah pegunungan (Spreitzhofer *et al.*, 2013).

Tujuan dari penelitian ini yaitu untuk menguji model angin beresolusi tinggi yang disediakan oleh program WindNinja dimana program tersebut menampilkan informasi prediksi angin yang *finest resolution* dan mempertimbangkan lanskap area di permukaan yang kasar serta menyesuaikan periode diurnal dengan harapan tersedianya output yang dapat dimanfaatkan untuk peringatan dan aksi dini salah satunya untuk mendukung pelaksanaan Operasi Modifikasi Cuaca.



Gambar 1. Plot Model NOMAD GFS 0.25 tanggal 26 Maret 13.00 WIB



Gambar 2. Interface mode pengaturan WindNinja

1.1. Deskripsi Model dan Konfigurasi

1.1.1. WRF-10KM

Model *Weather Research and Forecasting* (WRF) adalah sistem prediksi yang dirancang selain untuk prediksi juga untuk kebutuhan penelitian atmosfer. (Cardoso Pereira *et al.*, 2020). WRF dikembangkan oleh *National Center for Atmospheric Research (NCAR)*, the *National Oceanic and Atmospheric Administration* (yang terwakili oleh the *National Centers for Environmental Prediction (NCEP)* dan *Earth System Research Laboratory*), the *U.S Air Force*, the *Naval Research laboratory*, the *University of Oklahoma*, Universitas Colorado dan berbagai mitra lainnya (Zhao *et al.*, 2012). Resolusi spasial grid 10 km menunjukkan bahwa setiap sel grid memiliki lebar dan panjang 10 km area permukaan bumi. Model prediksi resolusi tinggi dapat diaplikasikan dalam mendukung berbagai aktifitas pengguna, seperti aktifitas penerbangan, energi dan deteksi cuaca ekstrem (James *et al.*, 2022). Penyelesaian numerik dengan sistem 4DVar memungkinkan WRF untuk memberikan prakiraan cuaca yang lebih terfokus pada skala regional dan lokal (Rafalimanana *et al.*, 2022). Dengan kata lain model cuaca WRF lebih fleksibel dalam hal output resolusi spasial, domain serta konfigurasi berdasarkan pada skenario dan kebutuhan penelitian dimana WRF dirancang untuk mengintegrasikan data atmosfer dari berbagai sumber, seperti *Automatic Weather Station (AWS)*, radar dan satelit cuaca untuk *initialization* dan *data assimilation*.

1.1.2. ECMWF 0.125

Model ECMWF 0.125 ini merupakan model yang menggunakan metode dinamis spektral

Semi-Lagrangian. NWP ini dihasilkan dengan menggunakan asimilasi data variasi empat dimensi (4D-Var) (Hodges & Emerton, 2015) yang mengasimilasikan data observasi baik data pengamatan permukaan, udara atas hingga penginderaan jauh dengan rentang prakiraan hingga 10 hari ke depan dan sigma level mencapai 91 level vertikal untuk model deterministik (Drechsel *et al.*, 2012). Model ECMWF ini dirancang agar mampu menjadi panduan prakiraan ke depan yang berhasil menggabungkan interaksi antara atmosfer dan laut (Déqué *et al.*, 1994) sehingga model ini dirasa akan memiliki kesesuaian tinggi terhadap perpindahan interaksi atmosfer dan lautan yang digambarkan oleh kecepatan angin di berbagai lapisan ketinggian dan kekasaran permukaan

1.1.3. NOMAD GFS 0.25

Model cuaca *Global Forecast System (GFS)* merujuk pada versi model NWP yang dikembangkan oleh *National Centers for Environmental Prediction (NCEP)* di Amerika Serikat. Model ini dirancang untuk memberikan prakiraan cuaca global dengan memperhitungkan momentum atmosfer, lautan dan permukaan bumi karena pada dasarnya model GFS ini (Gambar 1) diperuntukkan pada prediksi variabel iklim dan lingkungan (An *et al.*, 2014). Karena itu model GFS ini kerap menjadi inputan dasar dari model cuaca lainnya seperti WRF (Davis *et al.*, 2022) serta pemanfaatannya dalam WindNinja yang diintegrasikan pada server NOMAD GFS sebagai model dasar prediksi angin.

1.1.4. Prinsip Kerja Wind Ninja

WindNinja adalah program komputer yang menghitung medan angin yang bervariasi secara spasial untuk kebakaran hutan dan aplikasi lain yang membutuhkan prediksi angin beresolusi tinggi di medan yang kompleks (Wagenbrenner *et al.*, 2016). WindNinja ini dibuat oleh *Missoula Fire Sciences Laboratory 5775 US Highway 10 W Missoula, MT*. WindNinja dikembangkan untuk digunakan oleh para petugas tanggap darurat. Karena hal itu, program WindNinja ini dapat dimanfaatkan untuk kebutuhan peringatan dini terhadap potensi bencana alam di wilayah yang memiliki keterbatasan data pengamatan dan area yang berlandskap kompleks. WindNinja dikembangkan untuk menutupi analisis operasional terkait interaksi aliran – landscape misal di area pegunungan pada skala makro dan mikro yang dapat menyebabkan modulasi kuat terhadap vektor angin termasuk penurunan kecepatan angin di dekat permukaan (B. O. Bauer *et al.*, 2012).

WindNinja dapat dijalankan dalam tiga mode yang berbeda bergantung pada aplikasi dan input yang tersedia (Gambar 2). Mode pertama adalah prakiraan, dimana WindNinja menggunakan data model cuaca skala meso dengan resolusi yang kasar. Mode kedua menggunakan satu atau beberapa pengukuran angin permukaan untuk membuat medan angin di area tersebut, dan mode ketiga menggunakan kecepatan dan arah angin permukaan rata-rata yang ditentukan pengguna.

Input lain yang diperlukan untuk simulasi WindNinja termasuk data ketinggian untuk area permodelan, tanggal dan waktu, serta jenis vegetasi yang dominan (Wagenbrenner *et al.*, 2016). Model aliran lereng diurnal dan model stabilitas atmosfer non-netral juga dapat diaktifkan atau dinonaktifkan. Siklus aliran lereng diurnal dipertimbangkan dalam program tersebut karena umumnya fenomena ini terjadi berulang dalam beberapa hari (Millán *et al.*, 1996). Pada aplikasi WindNinja, panas permukaan dan fluks momentum, tinggi lapisan batas dan parameter lapisan batas lainnya dimasukkan sebagai penghitung model aliran lereng diurnal dan stabilitas atmosfer pada permodelan angin gradien.

Besaran aliran lereng diurnal dimodelkan berdasar fungsi dari jarak percepatan, persen kemiringan, entrainment parameter hambatan di lapisan permukaan dan *heat flux sensibel* di lapisan permukaan. Input data untuk penelitian ini antara lain pengukuran angin permukaan, kecepatan dan arah angin permukaan rata-rata, data ketinggian untuk area permodelan, tanggal dan waktu, serta jenis vegetasi yang dominan. Dan output dari model program ini adalah grid ASCII raster dari kecepatan dan arah angin, *shapefile* GIS untuk *plot vector* pada program GIS

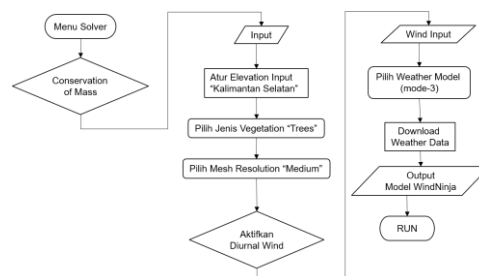
dan file .kmz yang dapat ditampilkan dengan *Google Earth*.

2. METODE

2.1. Metode Downscaling

Salah satu cara mendeteksi cuaca ke depan dengan melakukan permodelan secara statistik dengan mengotimalkan fungsionalitas pengamatan (Duraichi *et al.*, 2022). *Numerical Weather Prediction* (NWP) adalah suatu teknis untuk memperoleh karakteristik parameter cuaca pada waktu yang akan datang, yang dibangun dari persamaan-persamaan atmosfer yang diselesaikan dengan pendekatan numerik dan digabungkan dengan data pengamatan permukaan sebagai data awal. Beberapa kategori NWP ini tidak semua memiliki karakter yang memperhitungkan efek lokal, bergantung pada metode permodelan yang digunakan *initial condition*, serta *boundary condition* yang detail. (P. Bauer *et al.*, 2015). *Initial condition* mengandung ketidakpastian akibat data observasi yang tidak merata, keterbatasan algoritma, perbedaan resolusi (Bonavita & Laloyaux, 2020), serta sifat *chaotic* di atmosfer (Scheffel *et al.*, 2018). Pemanfaatan model cuaca bergantung pada skala fenomena yang akan diamati. Umumnya kebutuhan prediksi cuaca di wilayah lebih sempit, misal dengan mengubah domain model dari cakupan skala regional ke skala lokal (Janeiro *et al.*, 2017), yaitu dengan metode downscaling dalam berbagai teknik.

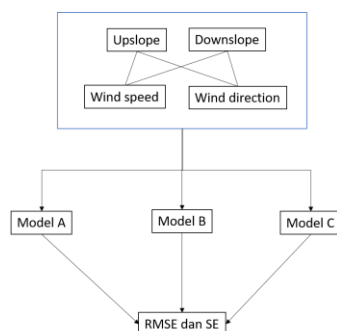
Dalam penelitian ini dilakukan metode downscaling dari 2 model global yaitu ECMWF 0.125 dan WRF 10 km serta model Nomad GFS 0.25 yang didownscaling dalam program WindNinja. Tabel 1 model resolusi tinggi yang disediakan oleh WindNinja sebagai dasar downscaling. Metode downscaling yang dilakukan di WindNinja dalam pengujian ini adalah metode *Wind Input* dengan *Weather Model* yaitu mode ketiga dari mode yang disediakan dalam WindNinja, dengan mekanisme mode (Gambar 3) sebagai berikut:



Gambar 3. Flow chart Mode Wind Input Weather Model pada program WindNinja

Tabel 1. Model numerik yang disediakan oleh WindNinja sebagai inisial perhitungan model.

| Name WindNinja | in | Forecast Model | Domain | Horizontal Resolution | Forecast Duration and Temporal Resolution |
|---------------------------------------|-----------------|--|--------------------------|--------------------------|--|
| UCAR-NDFD- CONUS-2.5KM | National | Digital Forecast Database (NDFD) | contiguous US (CONUS) | 2.5 km | 6 hourly to 168 hrs |
| UCAR-NAM- CONUS-12KM | North | American Mesoscale Model (NAM) | contiguous US (CONUS) | 12 km | 3 hourly to 84 hrs |
| UCAR-NAM- Alaska-11KM | North | American Mesoscale Model (NAM) | Alaska | 11 km | 3 hourly to 84 hrs |
| UCAR-RAP- CONUS-13KM | Rapid | Refresh Model (RAP) | contiguous US (CONUS) | 13 km | 1 hourly to 18 hrs |
| UCAR-GFS- GLOBAL-0.5-DEG | Global | Forecast System (GFS) | global | 0.5 degrees | 3 hourly to 168 hrs |
| NOMADS-GFS- GLOBAL-0.25-DEG | Global | Forecast System (GFS) | global | 0.25 degrees | 3 hourly to 240 hrs 12 hourly to 384 hrs |
| NOMADS-HIRES- ALASKA-5KM | High-Resolution | WRF | Alaska | 5 km | 1 hourly to 48 hrs |
| NOMADS-HIRES- ARW-CONUS-5KM | High | Resolution WRF-ARW Core | contiguous US (CONUS) | 5 km | 1 hourly to 48 hrs |
| NOMADS-HIRES- NMM-CONUS-5KM | High | Resolution WRF-ARW Core | contiguous US (CONUS) | 5 km | 1 hourly to 48 hrs |
| NOMADS-NAM- ALASKA-11.25KM | North | American Mesoscale Model (NAM) | Alaska | 11.25 km | 3 hourly to 36 hrs 6 hourly to 86 hrs |
| NOMADS-NAM- CONUS-12KM | North | American Mesoscale Model (NAM) | contiguous US (CONUS) | 12 km | 1 hourly to 36 hrs 3 hourly to 86 hrs |
| NOMADS-NAM- NEST-CONUS- 3KM | North | American Mesoscale Model (NAM) | contiguous US (CONUS) | 3 km | 1 hourly to 60 hrs |
| NOMADS-NAM- NEST-ALASKA- 3KM | North | American Mesoscale Model (NAM) | Alaska | 3 km | 1 hourly to 60 hrs |
| NOMADS-NAM- NORTH-AMERICA- 32KM | North | American Mesoscale Model (NAM) | North America | 32 km | 3 hourly to 36 hrs 6 hourly to 86 hrs |
| NOMADS-HRRR- CONUS-3KM | High | Resolution Rapid Refresh (HRRR) | contiguous US (CONUS) | 3 km | 1 hourly to 18 hrs |



Gambar 4. Alur kerja evaluasi performa model.

Metode *downscaling* ini dilakukan karena memperhatikan efek variasi topografi yang kompleks di area penelitian yaitu Kalimantan Selatan.

2.2. Metode evaluasi

Evaluasi performa hasil dari model dilakukan dengan membandingkan 3 model NWP dengan output model WindNinja terhadap data pengamatan (*point to point*) serta dengan meninjau mekanisme pengolahan data input pada program WindNinja hingga menghasilkan output model prediksi. Model NWP dan model WindNinja hanya akan menggunakan *initial run* jam 00 dan 12 UTC sehingga perbedaan antar model hanyalah pada resolusi grid horizontal. Resolusi grid horizontal mempengaruhi solusi numerik karena lebih sedikit fitur medan yang dapat diselesaikan oleh grid yang lebih kasar. Grid yang lebih kasar pada dasarnya memberikan efek *smoothing* yang mampu mendistorsi geometri sebenarnya dari medan yang ada. Pada saat ukuran sel horizontal dan kompleksitas medan meningkat, maka akurasi representasi medan di dekat permukaan

dapat memburuk. Dengan melakukan downscaling, diharapkan hal tersebut tidak terjadi. Berikut alur evaluasi kuantitatif untuk mengetahui performa model dari WindNinja terhadap kondisi sebenarnya (Gambar 4). Model A adalah perbandingan WindNinja dengan data model ECMWF 0.125. Model B adalah perbandingan WindNinja dengan data model WRF 10km. Model C adalah perbandingan WindNinja dengan data AWS

Hasil evaluasi model dihitung *root mean square error* (RMSE) dan *standar error* (SE), dengan formulasi seperti berikut:

$$\bar{\varphi}' = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varphi'_i$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\varphi'_i)^2 \right]^{1/2}$$

$$SDE = \left[\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\varphi'_i - \bar{\varphi}')^2 \right]^{1/2}, \quad (\text{Zhao et al., 2012}).$$

dimana φ' adalah selisih antara variabel simulasi dan observasi dan N adalah jumlah observasi

Penelitian ini dilakukan pada periode tanggal 24–26 Maret 2024 dengan domain wilayah Kalimantan Selatan, seperti pada (Gambar 5) dimana area tersebut mencakup gunung besar yang mewakili lanskap kompleks, lalu data pengamatan yang digunakan sebagai verifikator yaitu 5 stasiun pengamatan AWS, verifikator ini diperlukan sepanjang proses analisis penelitian ini.

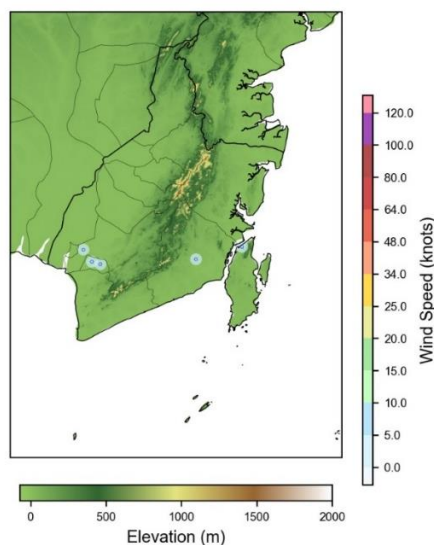
Lima AWS yang dipilih berdasar lokasi ini mewakili area barat, dan timur dari posisi gunung besar sehingga kita dapat mencermati karakter/pola angin dari sudut datang angin yang berbeda-beda beserta dampaknya masing-masing terhadap penyebaran asap akibat kebakaran hutan dan lahan. 5 (lima) titik pengamatan tersebut yaitu AWS Kusan Hulu yang berada di koordinat 3.415 LS, 115.735 BT, AWS Sungai Tabuk yang berada di koordinat 3.325 LS,

114.681 BT, AWS Staklim Banjarbaru yang berada di koordinat 3.461 LS, 114.840 BT, AWS Digi Banjarmasin yang berada di koordinat 3.439 LS, 114.761 BT, dan AWS Digi Kotabaru yang berada di koordinat 3.299 LS, 116.167 BT. Karena data observasi yang digunakan data AWS, maka titik awal dari permukaan yang dapat diambil sekitar 6–10 meter dari tinggi vegetasi dominan di wilayah tersebut yaitu pohon untuk mewakili kondisi arah dan kecepatan angin. Pemilihan periode bulan Maret diharapkan menjadi bentuk persiapan memasuki periode musim kemarau.

Penelitian ini mengambil wilayah Kalimantan Selatan yang memiliki keterkaitan erat dengan kejadian kebakaran hutan dan lahan (Purnomo *et al.*, 2021). Wilayah Kalimantan Selatan memiliki vegetasi dominan berupa lahan gambut (Rozaki *et al.*, 2022). Luasnya lahan untuk perkebunan dan pertanian di wilayah pegunungan di wilayah Kalimantan Selatan yang menjadi area penelitian disini, seringkali melibatkan pembukaan lahan untuk perkebunan, lahan pertanian serta pembangunan perkotaan dengan membakar hutan (Yan *et al.*, 2020).

2.3. Area Penelitian

Kalimantan Selatan merupakan salah satu wilayah di Indonesia yang memiliki tantangan tersendiri dalam mengelola dampak kebakaran hutan dan lahan, dalam hal memprediksi arah dan kecepatan angin yang memengaruhi persebaran asap. Kompleksitas topografi Kalimantan Selatan, dengan kehadiran Pegunungan Meratus yang membentang dari sisi timur laut hingga barat daya, menciptakan pola angin lokal yang sulit dipahami. Pegunungan ini mempengaruhi pergerakan massa udara melalui fenomena seperti angin lembah, angin gunung dan turbulensi lokal yang sangat dipengaruhi oleh kontur medan. Hal ini menjadikan estimasi dan prediksi arah persebaran asap akibat kebakaran hutan dan lahan sebagai tugas yang penuh tantangan.



| No. | Nama Stasiun AWS | Arah | Kecepatan |
|-----|-----------------------------|-------|-----------|
| 1 | AWS Kusan Hulu | 110.1 | 0.808 |
| 2 | AWS Staklim Banjarbaru | 114.7 | 1.294 |
| 3 | AWS Digi Stamet Kotabaru | 126.1 | 1.27 |
| 4 | AWS Sungai Tabuk | 99.0 | 1.612 |
| 5 | AWS Digi Stamet Banjarmasin | 204.0 | 0.94 |

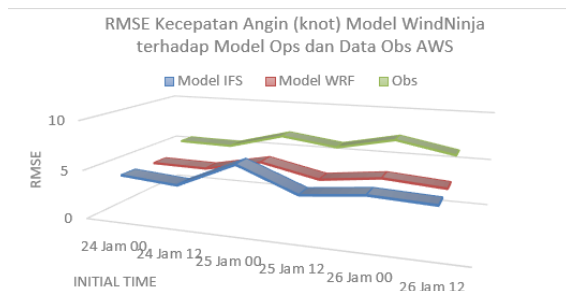
Gambar 5. Peta Observasi Angin wilayah. Kalimantan Selatan tanggal 26 Maret 2024 06 UTC.

Dalam konteks wilayah dengan lanskap yang kompleks seperti Kalimantan Selatan, model cuaca numerik dengan resolusi spasial yang sangat tinggi menjadi penting. Topografi Kalimantan Selatan tergolong kompleks, ditandai dengan adanya Pegunungan Meratus yang membentang diagonal dari sisi timur laut hingga barat daya propinsi ini. Pegunungan tersebut merupakan elemen geologis utama yang membentuk lanskap, terdiri dari puncak–puncak curam, lembah–lembah sempit, dan hamparan hutan yang sebagian besar wilayah lainnya berupa dataran rendah yang sering digenangi air, termasuk kawasan rawa gambut yang menjadi ciri khas di Kalimantan Selatan. Keberadaan Pegunungan Meratus tidak hanya memengaruhi pola aliran angin permukaan, tetapi juga memainkan peran penting dalam memodifikasi pola cuaca setempat, seperti pembentukan pola angin lokal, penangkapan hujan di lereng (*windward*) dan daerah bayangan hujan (*rain shadow*) di sisi lainnya. Interaksi antara berbagai elemen ini menciptakan tantangan tersendiri dalam penanganan kebakaran hutan dan lahan serta dampak seperti persebaran asap.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

2.4. Evaluasi Model

Pada tahap ini dilakukan penilaian keandalan dari program komputer WindNinja dalam mengestimasi arah dan kecepatan angin di *terrain* atau permukaan yang kompleks dengan menggunakan penilaian statistik yaitu fungsi objektif terhadap point diantaranya *Root Mean Squared Error* (RMSE) dan *Standart Error* (SE). Nilai RMSE mendekati nilai 0 (nol) merupakan hasil yang baik karena menunjukkan tingkat kesalahan rendah dan rentang nilai model dan observasi yang mendekati sama. Dan nilai SE yang mendekati 1 merupakan nilai yang baik karena menunjukkan tingkat keandalan yang tinggi antara data observasi dan data model.



Grafik 1. Hasil RMSE parameter kecepatan angin.

| Perbandingan WindNinja dengan Data Model ECMWF 0.125 | | | | |
|--|------------|------------|------------|------------|
| Inisial Data | RMSE | | SDE | |
| | Kec. Angin | Arah Angin | Kec. Angin | Arah Angin |
| 24 Jan 00 | 4.32209 | 182.8379 | 3.7092 | 158.3631 |
| 24 Jan 12 | 3.85792 | 109.539 | 3.31267 | 94.3484 |
| 25 Jan 00 | 6.45521 | 171.3102 | 5.13101 | 146.6735 |
| 25 Jan 12 | 4.10379 | 108.4222 | 3.54445 | 93.7440 |
| 26 Jan 00 | 4.71712 | 172.844 | 4.02537 | 149.916 |
| 26 Jan 12 | 4.43944 | 129.5064 | 3.57651 | 113.1534 |

Tabel 3. Perbandingan Model B.

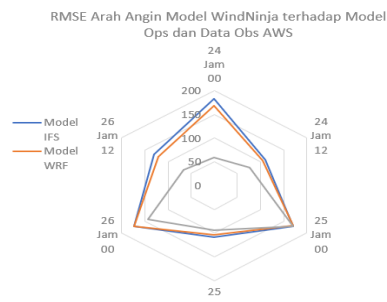
| Perbandingan WindNinja dengan Data Model WRF | | | | |
|--|------------|------------|------------|------------|
| Inisial Data | RMSE | | SDE | |
| | Kec. Angin | Arah Angin | Kec. Angin | Arah Angin |
| 24 Jan 00 | 4.179874 | 168.7664 | 3.607661 | 145.6588 |
| 24 Jan 12 | 4.092456 | 104.9723 | 2.884526 | 89.13264 |
| 25 Jan 00 | 5.284903 | 169.4751 | 4.527695 | 146.0581 |
| 25 Jan 12 | 4.013177 | 104.2345 | 3.443576 | 90.40698 |
| 26 Jan 00 | 4.717122 | 172.8444 | 4.02537 | 149.916 |
| 26 Jan 12 | 4.261755 | 120.7352 | 3.46558 | 105.3821 |

Tabel 4. Perbandingan Model C.

| Perbandingan WindNinja dengan Data AWS | | | | |
|--|------------|------------|------------|------------|
| Inisial Data | RMSE | | SDE | |
| | Kec. Angin | Arah Angin | Kec. Angin | Arah Angin |
| 24 Jan 00 | 5.411448 | 58.76873 | 4.312587 | 59.7014 |
| 24 Jan 12 | 5.300456 | 76.88648 | 3.888802 | 77.6005 |
| 25 Jan 00 | 6.832893 | 170.0977 | 5.323279 | 172.5134 |
| 25 Jan 12 | 6.036097 | 93.07302 | 4.729541 | 94.51801 |
| 26 Jan 00 | 7.278414 | 143.3489 | 4.640921 | 146.3638 |
| 26 Jan 12 | 6.116203 | 65.47601 | 4.034101 | 64.19518 |

Dari Grafik 1. menunjukkan *RMSE value* parameter kecepatan angin dari model NWP terhadap data observasi, nilai RMSE menunjukkan hasil yang mendekati batas toleransi dan masih dalam *margin* yang dapat diterima untuk mengizinkan penggunaan program komputer WindNinja ini dalam aksi dini, dimana model WindNinja cukup baik dalam mereplika kecepatan angin permukaan di wilayah Kalimantan Selatan, begitu juga dengan model ECMWF (Tabel 2) dan WRF (Tabel 3) dimana kedua model ini memiliki nilai RMSE mendekati nilai dari hasil perhitungan WindNinja.

Tabel 2. Perbandingan Model A.



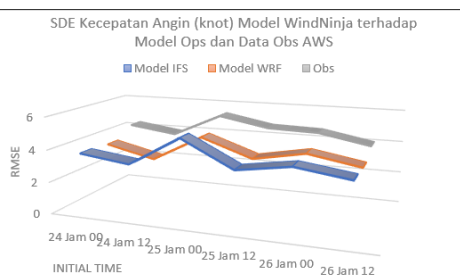
Grafik 2. Hasil RMSE parameter arah angin.

Dari Grafik 2. menunjukkan *RMSE value* parameter arah angin dari model NWP terhadap data observasi, nilai RMSE menunjukkan hasil yang mendekati batas toleransi, dalam artian model WindNinja cukup baik dalam mereplika arah angin permukaan di wilayah Kalimantan Selatan, namun arah angin hasil perhitungan WindNinja cukup berbeda jauh terhadap arah angin dari model ECMWF (Tabel 2) dan WRF (Tabel 3).

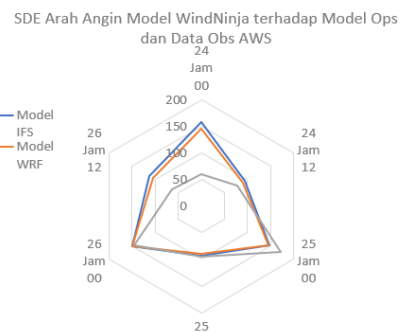
Grafik 3 menunjukkan *SDE value* parameter kecepatan angin dari model NWP terhadap data observasi, nilai SDE menunjukkan hasil yang mendekati batas toleransi, dalam artian model WindNinja memiliki tingkat kesalahan yang rendah dan mampu mencapai tingkat keandalan yang baik dalam mengestimasi kecepatan angin di *terrain* yang kompleks, begitu juga dengan model ECMWF (Tabel 2) dan WRF (Tabel 3) dimana kedua model ini memiliki nilai rentang mendekati nilai batas toleransi terhadap hasil perhitungan WindNinja.

Dari Grafik 4. menunjukkan *SDE value* parameter arah angin dari model NWP terhadap data observasi, nilai SDE menunjukkan hasil yang mendekati batas toleransi, dalam artian model WindNinja memiliki tingkat kesalahan yang rendah dan mampu mencapai tingkat keandalan yang baik dalam mengestimasi arah angin di *terrain* yang kompleks, namun arah angin hasil perhitungan WindNinja cukup berbeda jauh terhadap arah angin dari model ECMWF (Tabel 2) dan WRF (Tabel 3).

Pada *initial time* model 25 Maret jam 00 ditemukan hasil perbandingan yang menunjukkan adanya perbedaan signifikan nilai RMSE dan SE bila dibandingkan dengan *initial time* model yang lainnya, hal ini dapat ditandai bahwa pada *initial time* tersebut telah terjadi penurunan performa model.



Grafik 3. Hasil SDE parameter kecepatan angin.



Grafik 4. Hasil SDE parameter arah angin.

2.5. Performa fitur pada program WindNinja

Dari penggunaan program WindNinja dalam penelitian ini, penulis menemukan kelebihan yang mungkin tidak dimiliki oleh model global lainnya serta kelemahan fitur dari program WindNinja yang perlu ditingkatkan terutama dalam hal membantu memberikan referensi penanganan bencana alam kepada institusi penanggulangan bencana alam.

Kelebihan fitur yang dimiliki oleh WindNinja yaitu output model WindNinja ini telah disesuaikan dengan besaran aliran lereng diurnal, kemiringan lereng, entrainment parameter hambatan di lapisan permukaan dan *heat flux sensibel* di lapisan permukaan dan fitur ini terbukti menjadi fitur yang perlu disediakan untuk memaksimalkan performa model WindNinja di area dengan lanskap yang kompleks atau topografi yang kasar. Hal ini ditandai dengan nilai RMSE parameter kecepatan dan arah angin dalam *margin* dapat diterima untuk mereplika kondisi angin sebenarnya. Model seperti ini dapat menangkap variasi topografi secara detail dan menyediakan prediksi pola angin yang lebih akurat. Pemanfaatan model cuaca dengan *finest resolution* memungkinkan pendeteksian mikroklimat lokal, serta pola angin kecil yang signifikan terhadap penyebaran asap. Dengan demikian, informasi yang presisi ini dapat mendukung pengambilan keputusan cepat dalam mitigasi dampak asap, termasuk perlindungan kesehatan masyarakat.

Kelemahan fitur yang dimiliki WindNinja, antara lain:

- Pengaplikasian program WindNinja ini memerlukan spesifikasi teknis komputer yang tinggi terutama diperlukan pada saat mengoperasikan (*running*) model output dengan *leadtime* yang cukup panjang akan rentan gagal *running*. Sehingga perlu adanya pemrosesan yang lebih sederhana namun dapat menjamin penggunaan model yang lebih panjang mengingat bahaya kebakaran hutan dan lahan serta penyebaran asap pada lahan gambut memerlukan informasi peringatan dini dan aksi berjangka panjang dan waktu penanganan yang cukup lama.

- b) Pemilihan waktu penelitian yang cukup singkat disebabkan karena keterbatasan WindNinja yang tidak menyediakan *initial run model* yang lampau, sehingga rentang pengujian model hanya terbatas pada rentang *initial model* ke depan dari waktu pengambilan data. Karena itu, WindNinja perlu menyediakan model dengan *initial* terdahulu dengan harapan dapat dijadikan bahan pertimbangan konsistensi model setiap waktu *initial* yang dapat berubah, mengingat output model beresolusi spasial tinggi rentan terhadap sifat *chaos* atmosfer
- c) Penentuan model yang dilakukan dalam pengujian terbatas hanya pada beberapa data model yang tersedia untuk domain wilayah Indonesia, karena meskipun program WindNinja menyediakan beberapa input model global namun hanya beberapa yang berhasil mencetak domain tertentu.

4. KESIMPULAN

Hasil perbandingan parameter kecepatan dan arah angin dari model ECMWF 0.125°, WRF 10 km dan WindNinja menunjukkan performa yang baik untuk dijadikan sebagai referensi pertimbangan dalam membuat peringatan dini kebakaran hutan dan lahan serta asap terutama dalam menentukan arah penyebaran asap apabila terjadi bencana kebakaran hutan dan lahan di wilayah Kalimantan Selatan. Dan satu sama lain output model prediksi angin ini juga dapat dijadikan sebagai peringatan akan penurunan performa model karena ketiga model memiliki tingkat konsistensi yang baik. Namun beberapa fitur dalam program WindNinja ini masih perlu ditingkatkan agar lebih maksimal dalam membantu institusi penanggulangan bencana alam di seluruh dunia

5. DAFTAR PUSTAKA

- An, X., Yao, B., Li, Y., Li, N., & Zhou, L. (2014). Tracking source area of shangdianzi station using lagrangian particle dispersion model of FLEXPART. *Meteorological Applications*, 21(3), 466–473. <https://doi.org/10.1002/met.1358>
- Bauer, B. O., Davidson-Arnott, R. G. D., Walker, I. J., Hesp, P. A., & Ollerhead, J. (2012). Wind direction and complex sediment transport response across a beach-dune system. *Earth Surface Processes and Landforms*, 37(15), 1661–1677. <https://doi.org/10.1002/esp.3306>
- Bauer, P., Thorpe, A., & Brunet, G. (2015). The quiet revolution of numerical weather prediction. *Nature*. <https://www.nature.com/articles/nature14956>
- Bonavita, M., & Laloyaux, P. (2020). Machine Learning for Model Error Inference and Correction. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 12(12), 1–22. <https://doi.org/10.1029/2020MS002232>
- Cardoso Pereira, S., Marta-Almeida, M., Carvalho, A. C., & Rocha, A. (2020). Extreme precipitation events under climate change in the Iberian Peninsula. *International Journal of Climatology*, 40(2), 1255–1278. <https://doi.org/10.1002/joc.6269>
- Clark, K. A., Sheehan, M., Harrison, S. P., Prentice, I. C., Bloomfield, K. J., Dong, N., & Forkel, M. (2015). *Understanding and modelling wildfire regimes: an ecological perspective OPEN ACCESS Understanding and modelling wildfire regimes: an ecological perspective*.
- Davis, S., Pentakota, L., Saptarishy, N., & Mujumdar, P. P. (2022). A Flood Forecasting Framework Coupling a High Resolution WRF Ensemble With an Urban Hydrologic Model. *Frontiers in Earth Science*, 10(May), 1–18. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.883842>
- Déqué, M., Dreveton, C., Braun, A., & Cariolle, D. (1994). The ARPEGE/IFS atmosphere model: a contribution to the French community climate modelling. *Climate Dynamics*, 10(4–5), 249–266. <https://doi.org/10.1007/BF00208992>
- Drechsel, S., Mayr, G. J., Messner, J. W., & Stauffer, R. (2012). Wind speeds at heights crucial for wind energy: Measurements and verification of forecasts. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 51(9), 1602–1617. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-11-0247.1>
- Duraichi, N., Abinaya, D., Sree, S. D., & Krishika, R. (2022). Accurate Stipulation of Weather Condition Using Deep Learning. *Data Analytics and Artificial Intelligence*, 2(4), 88–97. <https://doi.org/10.46632/daai/2/4/16>
- Hodges, K. I., & Emerton, R. (2015). The prediction of Northern Hemisphere tropical cyclone extended life cycles by the ECMWF ensemble and deterministic prediction systems. Part I: Tropical cyclone stage. *Monthly Weather Review*, 143(12), 5091–5114. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-13-00385.1>
- James, E. P., Alexander, C. R., Dowell, D. C., Weygandt, S. S., Benjamin, S. G., Manikin, G. S., Brown, J. M., Olson, J. B., Hu, M., Smirnova, T. G., Ladwig, T., Kenyon, J. S., & Turner, D. D. (2022). The High-Resolution Rapid Refresh (HRRR): An Hourly Updating Convection-Allowing Forecast Model. Part II: Forecast Performance. *Weather and Forecasting*, 37(8), 1397–1417. <https://doi.org/10.1175/WAF-D-21-0130.1>
- Janeiro, J., Neves, A., Martins, F., & Relvas, P. (2017). Integrating technologies for oil spill response in the SW Iberian coast. *Journal of*

- Marine Systems*, 173, 31–42.
<https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2017.04.005>
- Kumar, N., Lerczak, J. A., Xu, T., Waterhouse, A. F., Thomson, J., Terrill, E. J., Swann, C., Suanda, S. H., Spyrell, M. S., Smit, P. B., Simpson, A., Romeiser, R., Pierce, S. D., Paolo, T. De, Palóczy, A., Dea, A. O., Nyman, L., Moum, J. N., Moulton, M., ... Ahn, S. (n.d.). *The Inner-Shelf Dynamics Experiment*. 1033–1063.
- Millán, M., Salvador, R., Mantilla, E., & Artífano, B. (1996). Meteorology and photochemical air pollution in Southern Europe: Experimental results from EC research projects. *Atmospheric Environment*, 30(12), 1909–1924. [https://doi.org/10.1016/1352-2310\(95\)00220-0](https://doi.org/10.1016/1352-2310(95)00220-0)
- Numerical Study of Urban Impact on Boundary Layer Structure: Sensitivity to Wind Speed, Urban Morphology, and Rural Soil Moisture*. (2002).
- Patacca, M., Lindner, M., Esteban, M., Cordonnier, T., Fidej, G., Gardiner, B., Hauf, Y., Nabuurs, J., Nagel, T. A., Nikinmaa, L., Panyatov, M., Socha, J., Thom, D., Vuletic, D., Zudin, S., & Schelhaas, M.-J. (2023). *Significant increase in natural disturbance impacts on European forests since 1950*. November 2022, 1359–1376. <https://doi.org/10.1111/gcb.16531>
- Perera, K., Tateishi, R., Akihiko, K., & Herath, S. (2021). *A Combined Approach of Remote Sensing, GIS, and Social Media to Create and Disseminate Bushfire Warning Contents to Rural Australia have Instit.* 715–730.
- Purnomo, E. P., Zahra, A. A., Malawani, A. D., & Anand, P. (2021). The kalimantan forest fires: An actor analysis based on supreme court documents in Indonesia. *Sustainability (Switzerland)*, 13(4), 1–12. <https://doi.org/10.3390/su13042342>
- Rafalimanana, A., Giordano, C., Ziad, A., & Aristidi, E. (2022). Optimal Prediction of Atmospheric Turbulence by Means of the Weather Research and Forecasting Model. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 134(1035), 0. <https://doi.org/10.1088/1538-3873/ac6536>
- Rozaki, Z., Nopembereni, E. D., Rahayu, L., Rahmawati, N., Murhidayah, M. L., Rejeki, T. M., Ariffin, A. S., Azizah, S. N., & Tjale, M. M. (2022). Farmers' lives and adaptation strategies toward the forest and peatland fires in Indonesia: Evidence from Central and South Kalimantan, Indonesia. *Biodiversitas*, 23(5), 2379–2388. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d230515>
- Scheffel, J., Lindvall, K., & Yik, H. F. (2018). A time-spectral approach to numerical weather prediction. *Computer Physics Communications*, 226, 127–135. <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2018.01.010>
- Spreitzhofer, G., Sperka, S., & Steinacker, R. (2013). *MetGIS TM: combination of Meteorological and Geographic Information Systems to produce high resolution mountain weather forecasts*. 378(January 2012), 371–378. <https://doi.org/10.1002/met.1299>
- Wagenbrenner, N. S., Forthofer, J. M., & ... (2016). Downscaling surface wind predictions from numerical weather prediction models in complex terrain with WindNinja. *Atmospheric ...* <https://acp.copernicus.org/articles/16/5229/2016/>
- Yan, J., Wang, M., Su, F., Zhang, X., Gao, S., & Xu, M. (2020). Changes in land cover and ecological stress in Borneo based on remote sensing and an ecological footprint method. *Landscape and Ecological Engineering*, 16(4), 319–333. <https://doi.org/10.1007/s11355-020-00425-8>
- Zhao, P., Wang, J., Xia, J., Dai, Y., Sheng, Y., & Yue, J. (2012). Performance evaluation and accuracy enhancement of a day-ahead wind power forecasting system in China. *Renewable Energy*, 43, 234–241. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.11.051>