

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Saat ini pencemaran kualitas udara menjadi masalah yang cukup krusial yang secara dramatis mempengaruhi paparan lingkungan. Hal ini terlihat dari semakin beragamnya efek kesehatan yang didokumentasikan dengan baik dari hasil penelitian ekstensif yang dilakukan di berbagai wilayah di seluruh dunia (Utama, 2019). Akibatnya, lebih dari 90% populasi tinggal di tempat-tempat di mana kualitas udara tidak memenuhi rekomendasi Organisasi Kesehatan Dunia (WHO). Badan Lingkungan Eropa melaporkan bahwa sebagian besar penduduk perkotaan terpapar konsentrasi partikel halus (PM2.5) dan partikel berdiameter  $\leq 10$   $\mu\text{m}$  (PM10) di atas rekomendasi WHO (masing-masing 74% dan 42%) (Eguiluz-Gracia et al., 2020).

Dampak akibat polusi udara bukan hanya berdampak bagi kesehatan manusia saja. Namun, banyak elemen pada bumi yang ikut terdampak akibat polusi udara yang terus meningkat. Hal ini dapat mengakibatkan suhu yang terlalu panas dan memiliki dampak jangka panjang bagi iklim yakni perubahan iklim. Tingkat pemanasan global telah meningkat dalam beberapa dekade terakhir, dengan suhu udara permukaan rata-rata global naik sebesar 1,1 °C di atas level pra-industri. Pemanasan global meningkatkan energi termal dan laten yang memperkuat kejadian cuaca ekstrem, seperti gelombang panas, hujan lebat, dan banjir. (Wang et al., 2023).

Hari ini, sebagian besar polusi udara terkait langsung dengan pembakaran bahan bakar untuk produksi industri, transportasi, dan pembangkit listrik untuk penggunaan domestik (C. David Cooper & F. C. Alley, 2010). Pada umumnya, dari berbagai sektor yang potensial dalam mencemari udara, maka, sektor transportasi memegang peran yang sangat besar dibanding dengan sektor yang lainnya. Apalagi di kota-kota besar, di Indonesia mengalami peningkatan jumlah transportasi per tahunnya sehingga mempengaruhi polusi udara pada kota-kota besar di Indonesia (Badan Pusat Statistik, 2022).

Beberapa penelitian sebelumnya menyatakan data kualitas udara adalah data runtun waktu atau *stochastic time series* sehingga proses peramalan dapat didasarkan pada data historis. Analisis *time series* adalah bagian dari prosedur statistik yang digunakan untuk peramalan struktur probabilitas situasi mendatang yang dapat dimanfaatkan dalam pengambilan keputusan (Khumaidi et al., 2020). Analisis ini akan dikaitkan dengan elemen-elemen penting yang dipengaruhi oleh penurunan kualitas udara. Kami secara eksplisit mendekomposisi data yang tidak pasti menjadi kontribusi terpisah dari dua agen pendorong yang paling signifikan. Pendekatan yang digunakan adalah simulasi model secara tidak langsung untuk mengidentifikasi untuk pemodelan deret waktu (Risser et al., 2024) dengan bantuan *python*.



## 1.2 Tujuan dan Manfaat

### 1.2.1 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis peningkatan jumlah polusi udara di Kota Makassar dan Kota Jakarta.
2. Menerapkan model peramalan Prophet untuk mengidentifikasi pola tren dan musiman dalam data polusi udara, serta memahami dinamika perubahan kualitas udara dari waktu ke waktu di kedua kota.
3. Mengevaluasi kapabilitas model Prophet dalam memodelkan data deret waktu yang bersifat non-linear, mengandung pola musiman, serta dipengaruhi oleh faktor-faktor eksternal seperti kebijakan atau peristiwa khusus.

### 1.2.2 Manfaat

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat antara lain:

1. Penelitian ini dapat membantu dalam perencanaan kebijakan lingkungan dengan menyediakan prediksi kualitas udara yang lebih akurat, mendukung strategi mitigasi polusi berdasarkan tren historis, serta memberikan wawasan tentang kapan lonjakan polusi kemungkinan besar akan terjadi.

## 1.3 Landasan Teori

### 1.3.1 Pencemaran Udara

Udara mempunyai peranan penting bagi kehidupan sehari-hari baik itu untuk manusia maupun makhluk hidup lainnya. Udara dibutuhkan oleh manusia dan hewan untuk proses bernapas dan juga dibutuhkan oleh tumbuhan untuk melakukan fotosintesis. Jadi, udara memiliki sumber daya alam yang harus selalu di lindungi untuk kelangsungan makhluk hidup (Anantama et al., 2023). Namun pada era modern ini, sejalan dengan perkembangan pembangunan fisik kota dan pusat-pusat industri, serta berkembangnya transportasi, maka, kualitas udara pun mengalami perubahan yang disebabkan oleh terjadinya pencemaran udara, atau, sebagai berubahnya salah satu komposisi udara dari keadaan yang normal; yaitu masuknya zat pencemar (berbentuk gas-gas dan partikel kecil/aerosol) ke dalam udara dalam jumlah tertentu untuk jangka waktu yang cukup lama, sehingga akan berdampak pada kualitas udara dan dapat mengganggu kehidupan manusia, hewan, dan tanaman (Ismiyati et al., 2014).

Berdasarkan Undang-Undang Pokok Pengolahan Lingkungan Hidup No. 4 Tahun 1982, pencemaran lingkungan atau polusi adalah masuknya atau dimasukkannya makhluk hidup, zat energi, dan atau komponen lain ke dalam lingkungan, atau perubahan lingkungan oleh kegiatan manusia atau oleh proses alam yang mengakibatkan lingkungan menjadi kurang atau tidak dapat berfungsi lagi sesuai dengan peruntukannya. Salah satu indikator kualitas udara adalah Indeks Mutu Udara Ambien (IMUA). IMUA merupakan suatu ukuran pada batas atau ambang/atau komponen yang ada atau yang seharusnya ada dan/atau yang ditenggang keberadaannya dalam udara ambien (Abidin &



Masalah pencemaran udara adalah masalah yang setiap tahunnya selalu terjadi. Meningkatnya jumlah aktivitas manusia pada zaman modern saat ini memerlukan peningkatan teknologi untuk membantu aktivitas manusia. Peningkatan teknologi seperti semakin banyaknya pabrik-pabrik industri, pembangkit listrik, dan kendaraan bermotor yang setiap harinya menghasilkan zat polutan sebagai pencemar udara. Alhasil udara bersih yang sebagai sumber pernapasan menjadi tercemar yang bisa menimbulkan gangguan kesehatan pada manusia dan juga dapat merusak lingkungan ekosistem (Abidin & Hasibuan, 2019b).

Polusi udara terdiri dari campuran gas dan partikel dalam jumlah berbahaya yang dilepaskan ke atmosfer akibat aktivitas alami atau manusia. Sumber polutan dapat dibagi menjadi dua kategori (Bai et al., 2018):

#### (1) Sumber Alami

Sumber polusi alami adalah fenomena alam yang mengeluarkan zat berbahaya atau memiliki efek berbahaya pada lingkungan. Fenomena alami, seperti letusan gunung berapi dan kebakaran hutan, akan menghasilkan polutan udara, termasuk  $SO_2$ ,  $CO_2$ ,  $NO_2$ , CO, dan sulfat (Jaffe et al., 2020).

#### (2) Sumber Antropogenik (Buatan manusia)

Sumber buatan manusia seperti pembakaran bahan bakar, limbah dari proses produksi industri, dan emisi transportasi adalah sumber utama polusi udara. Ada banyak jenis polutan yang dikeluarkan oleh sumber polusi buatan manusia, termasuk hidrogen, oksigen, nitrogen, belerang, senyawa logam, dan partikel materi (Bai et al., 2018).

Sumber alami dari letusan gunung api dan kebakaran hutan secara langsung mengeluarkan PM Bersama dengan senyawa gas. Senyawa gas tersebut meliputi oksida nitrogen ( $NO_x$ ), karbon monoksida (CO), metana ( $CH_4$ ), dan ratusan senyawa organik yang mudah menguap (VOCs), termasuk sejumlah besar VOC yang teroksidasi (OVOCs). Asap dari letusan gunung api dan kebakaran hutan mengalami transformasi kimia di atmosfer, yang mengubah campuran senyawa dan menghasilkan polutan sekunder, seperti ozon ( $O_3$ ) dan aerosol organik sekunder (SOA) (Jaffe et al., 2020). Akibatnya, seluruh senyawa pada lapisan atmosfer mengalami pencampuran senyawa yang dapat mempengaruhi kualitas udara.

Aktivitas harian manusia umumnya menyebabkan polusi udara dalam ruangan (IAP) dengan pelepasan gas buang, asap tembakau, pestisida, pelarut, agen pembersih, partikel, debu, jamur, serat, dan alergen. Manusia juga menciptakan kondisi yang menguntungkan bagi perkembangan jutaan jamur, cendawan, serbuk sari, spora, bakteri, virus, dan serangga, seperti tungau debu dan kecoa. Sumber pembakaran dan aktivitas memasak berkontribusi terhadap emisi karbon dioksida ( $CO_2$ ), sulfur



, nitrogen dioksida ( $NO_2$ ), dan partikel (PM) ke dalam lingkungan an. Selain itu, peralatan seperti komputer, mesin fotokopi, printer, lainnya mengeluarkan ozon ( $O_3$ ) dan senyawa volatil. Bahan seperti penutup lantai poly (vinyl chloride) PVC, parket, linoleum, cat, lak, cat, sealant, dan papan partikel, dapat melepaskan (yaitu alkan, senyawa aromatik, 2-ethylhexanol, acetophenone,

senyawa aromatik beralkil, stirena, toluena, glikol, glikolester, texanol, keton, ester, siloksan, dan formaldehida) (Tran et al., 2020).

### 1.3.2 Sumber Emisi NO<sub>2</sub>, CO, dan SO<sub>2</sub>

Perkembangan ekonomi yang pesat selama tiga dekade terakhir, konsumsi bahan bakar fosil telah meningkat secara substansial, dan akibatnya, polutan udara terkait seperti karbon monoksida (CO), nitrogen dioksida (NO<sub>2</sub>), sulfur dioksida (SO<sub>2</sub>), partikel (misalnya, PM<sub>2.5</sub> dan PM<sub>10</sub>) dan gas rumah kaca (misalnya, karbon dioksida (CO<sub>2</sub>)) juga meningkat (Han et al., 2021). Menurut Organisasi Kesehatan Dunia (WHO), polutan termasuk partikel, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, dan O<sub>3</sub>, menimbulkan risiko terbesar bagi kesehatan manusia (Brown et al., 2009).

NO<sub>2</sub> dan SO<sub>2</sub> adalah dua polutan gas paling kritis yang mempengaruhi kualitas udara regional dan global, kesehatan manusia, kondisi ekologi, dan perubahan iklim. Baik Badan Perlindungan Lingkungan Amerika Serikat (US EPA) maupun Organisasi Kesehatan Dunia (WHO) menganggap NO<sub>2</sub> sebagai polutan yang parah. Karena NO<sub>2</sub> dan SO<sub>2</sub> bersifat racun, mereka menimbulkan risiko besar bagi keanekaragaman hayati, dan campuran NO<sub>2</sub> dan SO<sub>2</sub> lebih berbahaya bagi tumbuhan. SO<sub>2</sub> juga berkontribusi pada hujan asam (Yoo et al., 2014), penipisan ozon, dan kondisi pernapasan seperti asma dan kanker pada manusia. Emisi NO<sub>2</sub> dan SO<sub>2</sub> berdampak negatif pada vegetasi, hewan, dan ekosistem, serta dapat menyebabkan masalah reproduksi pada satwa liar (Jion et al., 2023).

CO dan O<sub>3</sub> jauh lebih sedikit larut dibandingkan SO<sub>2</sub> atau NO<sub>2</sub> dan banyak polutan udara lainnya. O<sub>3</sub> troposferik diproduksi selama oksidasi fotokimia dari karbon organik volatil dan CO di hadapan NO<sub>3</sub>. Namun, konsentrasi O<sub>3</sub> juga cenderung meningkat dalam kondisi hujan. Peningkatan konsentrasi O<sub>3</sub> dalam hujan disebabkan oleh pencampuran vertikal konsentrasi O<sub>3</sub> stratosferik dan troposferik selama aktivitas hujan konvektif dan badai petir (Yoo et al., 2014).

Pada penelitian yang dilakukan oleh (Copat et al., 2020) mengatakan bahwa NO<sub>2</sub> adalah gas berbau tidak sedap yang terbentuk melalui reaksi NO<sub>2</sub> dengan bahan kimia lain di atmosfer. NO<sub>2</sub> secara alami diproduksi di atmosfer melalui petir letusan gunung berapi (Jaffe et al., 2020), laut, dan pelapukan biologis. Sumber antropogenik utama NO<sub>2</sub> di luar ruangan berasal dari emisi transportasi dan pembakaran bahan bakar, terutama di daerah perkotaan, yang berasal dari gas buang kendaraan dan pemanasan domestik (Tran et al., 2020).

Konsentrasi NO<sub>2</sub> di troposfer biasanya sangat terkait dengan emisi NO<sub>x</sub> lokal, yang sering berasal dari aktivitas manusia. Namun, karena efek meteorologi dan sudut zenit matahari terhadap kelimpahan NO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> dapat bervariasi hingga dua kali lipat hanya karena perubahan musiman. Oleh karena itu, data satelit biasanya dihitung untuk waktu yang panjang (sekitar musiman/tahunan) untuk menilai emisi NO<sub>x</sub> (Goldberg et al., 2020).

Resolusi spasial-temporal yang besar dari polutan udara dikibat variasi sumber emisi dan transportasi atmosfer, sulit untuk mencapai resolusi yang lebih halus, seperti pada skala jalan, yang sangat mendesak baik untuk pengurangan tingkat grid MEE untuk



manajemen yang baik dan kebutuhan publik akan informasi polusi lokal (Han et al., 2021).

### 1.3.3 Gambaran Umum Kualitas Udara di Indonesia

Sejak tahun 1998 hingga 2016, Indonesia beralih dari salah satu negara paling bersih di dunia menjadi salah satu dari dua puluh negara paling terpolusi, karena konsentrasi polusi partikulat udaranya meningkat 171 persen (Greenstone & Fan, 2019). Lebih dari 50% dari total populasi Indonesia sekarang tinggal di daerah perkotaan (Istiqomah & Marleni, 2020).

Di Indonesia, polusi udara adalah salah satu dari banyak masalah lingkungan serius yang dihadapi oleh kota-kota besar akibat pertumbuhan penduduk yang tinggi, peningkatan aktivitas ekonomi, transportasi yang intensif, dan kegiatan industry (Santoso et al., 2021). Dalam sektor transportasi, berdasarkan Badan Pusat Statistik Republik Indonesia, jumlah total kendaraan bermotor di Indonesia per tahun 2022 adalah 148.261.817 juta unit (Badan Pusat Statistik, 2024a) dan adapun jumlah pabrik di Indonesia per tahun 2022 adalah 4.122.869 juta unit pabrik skala mikro (Badan Pusat Statistik, 2024b). Semua aktivitas antropogenik ini dapat berkontribusi pada peningkatan partikel materi di atmosfer.

Menurut Organisasi Kesehatan Dunia (WHO), polusi udara adalah pencemaran lingkungan dalam ruangan atau luar ruangan oleh agen kimia, fisik, atau biologis yang memasuki atmosfer dan akhirnya mengubah karakteristik alami atmosfer, yang disebut sebagai polusi udara. Sumber-sumbernya meliputi pemanas rumah, emisi kendaraan, cerobong industri, dan kebakaran hutan (Hoque et al., 2020).

Pembakaran biomassa saat ini menjadi sumber utama polusi udara di daerah tropis. Meskipun pada dasarnya menghasilkan spesies jejak yang sama seperti pembakaran bahan bakar fosil, pembakaran biomassa umumnya mengeluarkan jumlah yang lebih tinggi dari spesies yang relevan terhadap polusi udara, seperti yang menyebabkan produksi ozon dan kabut asap fotokimia. Pembakaran biomassa diperkirakan menyumbang  $39 \pm 6\%$  terhadap emisi karbon monoksida (CO) secara global dan lebih dari 20% terhadap emisi nitrogen oksida (NO<sub>x</sub>), hidrokarbon non-metana (NMHC), dan metil klorida (CH<sub>3</sub>Cl) (Heil, 2007). Emisi dari kebakaran vegetasi dan gambut di Indonesia berkontribusi terhadap perubahan iklim dan menyebabkan masalah kualitas udara regional yang parah (Adrianto et al., 2019).

### 1.3.4 Teknologi Penginderaan Jauh dan Satelit

*Remote sensing* atau penginderaan jauh didefinisikan sebagai perolehan informasi tentang suatu objek tanpa kontak fisik langsung. Informasi diperoleh dengan mendeteksi dan mengukur perubahan yang diakibatkan oleh objek tersebut pada medan sekitarnya baik itu medan elektromagnetik, akustik, maupun potensial. Hal



medan elektromagnetik yang dipancarkan atau dipantulkan oleh akustik yang dipantulkan atau terganggu oleh objek, atau dan gravitasi atau potensial magnetik sekitar akibat keberadaan

elit memungkinkan perolehan informasi global dan rinci tentang Bumi) dan lingkungannya. Sensor-sensor pada satelit yang

mengorbit Bumi memberikan informasi tentang pola global dan dinamika awan, penutupan vegetasi permukaan beserta variasi musimannya, struktur morfologis permukaan, suhu permukaan laut, dan angin dekat permukaan. Kemampuan platform satelit untuk meliputi area yang luas dengan cepat memungkinkan pemantauan fenomena yang berubah dengan cepat, khususnya di atmosfer. Durasi yang panjang dan kemampuan pengulangan memungkinkan pengamatan perubahan musiman, tahunan, dan jangka panjang seperti tutupan es kutub, perluasan gurun, pergerakan permukaan padat, dan penurunan serta deforestasi tropis. Cakupan sinoptik skala luas memungkinkan pengamatan dan studi fitur skala regional dan kontinental seperti batas lempeng dan pegunungan (Elachi & Van Zyl, 2021).

Penginderaan jauh semakin penting dalam banyak aplikasi, termasuk pemantauan penggunaan lahan, pertanian presisi, pencegahan bencana, deteksi kebakaran hutan, surveilans penyakit yang ditularkan oleh vektor, penanggulangan perubahan iklim (Manas et al., 2021), dan mendeteksi luapan sampah di laut (Biermann et al., 2020), serta banyak pengaplikasian lainnya (Hassan & Woo, 2021). Digabungkan dengan kemajuan terbaru dalam *deep learning* dan visi komputer, terdapat potensi besar untuk memantau isu-isu global melalui analisis otomatis dari data penginderaan jauh dan data geospasial lainnya.

Penginderaan jauh menyediakan pasokan data yang besar. Jumlah satelit pengamat Bumi terus bertambah, dengan lebih dari 700 satelit saat ini mengorbit dan menghasilkan terabita data citra setiap hari. Namun, banyak tugas turunan yang menarik dibatasi oleh kurangnya anotasi, yang mahal untuk diperoleh karena sering kali memerlukan pengetahuan ahli atau sensor darat yang mahal. Dalam beberapa tahun terakhir, beberapa teknik telah dikembangkan untuk mengurangi kebutuhan akan data berlabel, tetapi, aplikasinya pada citra penginderaan jauh masih banyak yang belum dieksplorasi (Manas et al., 2021).

Ada beberapa satelit yang digunakan dan setiap satelit memiliki fungsi masing-masing, seperti penginderaan jauh, pengamatan cuaca, dan sebagainya. Contoh penginderaan satelit jarak jauh meliputi Landsat, Sentinel, MODIS, MERIS, dan VIIRS (Hassan & Woo, 2021).

### 1.3.5 Satelit Sentinel-5P dan Instrumen TROPOMI

#### 1.3.5.1 Sentinel-5P

Copernicus Sentinel-5P adalah hasil kolaborasi erat antara ESA, Komisi Eropa, Kantor Antariksa Belanda, industri, pengguna data, dan ilmuwan. Tujuan utama misi Copernicus Sentinel-5P adalah melakukan pengukuran atmosfer dengan resolusi *spatio-temporal* tinggi, yang akan digunakan untuk kualitas udara, radiasi ozon & UV, & prakiraan iklim.



) adalah misi satelit tunggal, sebagai bagian dari program I untuk Lingkungan dan Keamanan (GMES/Copernicus). Tujuan memastikan kontinuitas data antara misi SCIAMACHY, GOME-2, sebelumnya dan Sentinel-5 yang akan datang, menyediakan

informasi tentang gas jejak atmosfer, aerosol, distribusi awan yang mempengaruhi kualitas udara dan iklim, dengan cakupan global harian (Virghileanu et al., 2020).

Mengenai ketepatan waktu, citra S-5P tersedia dalam dua layanan, yaitu waktu nyata (NRT) dalam 3 jam setelah penginderaan, dan sebagai layanan tidak kritis waktu dengan produk offline (OFF) tersedia dengan penundaan 12 jam untuk produk L1B dan 5 hari untuk produk L2 [123]. Produk S-5P L2-NO2 disampaikan dalam format netCDF, memungkinkan penyimpanan informasi ilmiah multidimensional, termasuk dimensi, variabel/parameter, atribut, dan koordinat (Virghileanu et al., 2020).



**Gambar 1.** Satelit Sentinel-5P (*S5P Mission*, n.d.)

### 1.3.5.2 Instrumen TROPOMI

TROPOMI diluncurkan oleh Badan Antariksa Eropa (ESA) untuk misi satelit Sentinel 5 Precursor (S5P) milik Uni Eropa pada tanggal 13 Oktober 2017 (*S5P Mission*, n.d.). Satelit ini mengikuti orbit Bumi rendah (825 km) yang sinkron dengan matahari, dengan waktu melewati khatulistiwa setiap hari sekitar pukul 13:30 waktu matahari lokal. TROPOMI mengukur jumlah kolom total beberapa gas jejak di wilayah spektral Ultraviolet-Tampak-Dekat Inframerah-Sinar Inframerah Pendek. Pada posisi nadir, ukuran pikselnya adalah  $3,5 \times 7 \text{ km}^2$  (dikurangi menjadi  $3,5 \times 5,6 \text{ km}^2$  pada tanggal 6 Agustus 2019) dengan sedikit variasi ukuran piksel di seluruh swat 2.600 km (Van Geffen et al., 2022).

Instrumen Pemantauan TROPOsferik, yang dikenal sebagai TROPOMI memiliki tingkat resolusi spasial yang lebih tinggi dibandingkan pendahulunya, yaitu  $7 \times 3,5$  km (melintasi jalur), TROPOMI menawarkan potensi baru untuk pemantauan sumber emisi gas jejak atmosfer (Virghileanu et al., 2020).

Penelitian telah dilakukan menggunakan data satelit Sentinel-5P untuk pemantauan kualitas udara, terutama selama periode pandemi COVID-19. Misalnya, penelitian (Virghileanu et al., 2021) memantau nilai kepadatan kolom NO2 dan PM 2.5 di tiga lokasi di kota Bucharest.



provinsi di Pakistan dari 22 Maret 2020 hingga 30 Juni 2020 (selama COVID-19). Data Sentinel-5P TROPOMI untuk nilai NO<sub>2</sub> dan PM 2.5 direkam dari lokasi pengambilan sampel. Faisal et al. (2021) memantau gas polutan CO, O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, dan NO<sub>2</sub> dengan citra Sentinel-5P selama pandemi COVID-19 (dari November 2020 hingga Desember 2020) di Indonesia (Yilmaz et al., 2023).

### 1.3.6 Model Prophet Python

Model Prophet diperkenalkan oleh Taylor dan Letham (2017). Model Prophet dengan tambahan regressor (Taylor dan Letham 2017, 2019) memiliki tiga komponen: tren, musiman, dan regressor dengan sebuah istilah error.

Prophet adalah perangkat lunak sumber terbuka, yang berarti bahwa seluruh kode dasarnya tersedia secara gratis bagi siapa saja untuk diperiksa dan dimodifikasi. Hal ini memberikan Prophet kekuatan besar karena pengguna dapat menambah fitur atau memperbaiki *bug*, tetapi juga memiliki beberapa kelemahan. Banyak paket perangkat lunak tertutup, seperti Microsoft Word atau Tableau, dikemas dalam file instalasi independen mereka sendiri dengan antarmuka pengguna grafis yang rapi, tidak hanya memandu pengguna melalui proses instalasi tetapi juga memungkinkan mereka untuk berinteraksi dengan perangkat lunak setelah terinstal.

Prophet, di sisi lain, diakses melalui bahasa pemrograman Python atau R dan bergantung pada banyak pustaka sumber terbuka tambahan. Hal ini memberikan Prophet fleksibilitas besar karena pengguna dapat menyesuaikan fitur atau bahkan menambah fitur baru sepenuhnya untuk memecahkan masalah yang spesifik, tetapi juga dapat sulit digunakan karena kebutuhan untuk menguasai bahasa pemrograman dan penanganan pustaka tambahan tersebut (Rafferty, 2021).

Menurut Facebook, Prophet "bekerja dengan baik untuk deret waktu yang memiliki efek musiman yang kuat dan beberapa musim data historis serta tahan terhadap *outlier* dan pergeseran *tren*." (Aditya Satrio et al., 2021).

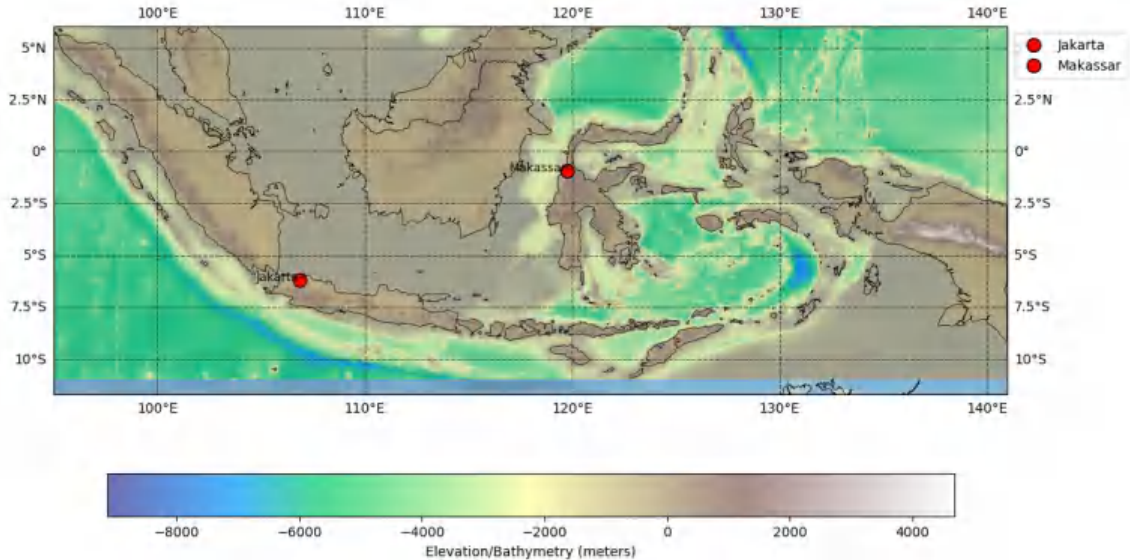


## BAB II METODOLOGI

### 2.1 Tempat dan Waktu

#### 2.1.1 Tempat

Lokasi penelitian berada dilakukan di daerah Jakarta dan Makassar.



Gambar 2. Peta Penelitian

#### 2.1.2 Waktu

Waktu pada penelitian ini dari 11-07-2018 hingga 13-04-2024 dan merupakan data harian.

### 2.2 Alat dan Bahan

#### 2.2.1 Alat

1. Python 3.12.2
2. Inkscape 1.3.2.0
3. Visual Studio Code 1.92.2

#### 2.2.2 Bahan

1. Data CO. Data ada pada lampiran 1 dan 2.

### 2.3 Penyiapan Data

Data penelitian ini diperoleh dari *website* Google Engine Earth (GEE). Dibandingkan *ud* lainnya, GEE mendukung lebih banyak jenis data geospasial, el dan Landsat awal, dan menyediakan layanan secara gratis ngguna. Hal ini sangat penting, terutama di negara-negara memiliki berbagai bidang data yang berkaitan dengan perubahan uk: pertanian, sumber daya air, tutupan lahan/penggunaan lahan, an iklim, Tanah, Lahan basah, hutan, urbanisasi , serta bidang



lainnya (Zhao et al., 2021). Data pada penelitian ini adalah data CO yang diperoleh dari 11-07-2018 hingga 13-04-2024.

**Tabel 1.** Batas Indeks Standar Pencemar Udara dalam satuan SI (Apriawati & Kiswandono, 2017).

Indeks Standar Pencemaran Udara	24 Jam PM10 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	24 Jam SO2 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	24 Jam CO ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	24 Jam O3 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	24 Jam NO2 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
50	50	80	5	120	*)
100	150	365	10	235	*)
200	350	800	17	400	1130
300	420	1600	34	800	2260
400	500	2100	46	1000	3000
500	600	2620	57,5	1200	3750

**Tabel 2.** Angka dan kategori Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU) (Apriawati & Kiswandono, 2017).

Indeks	Kategori
1-50	Baik
51-100	Sedang
101-199	Tidak Sehat
200-299	Sangat Tidak Sehat
300-lebih	Berbahaya

## 2.4 Pengolahan Data

Untuk memprediksi data, data harus memenuhi persyaratan input model. Dalam hal ini digunakan pendekatan fungsi pada Python untuk memproses data agar sesuai dengan format yang tepat untuk memenuhi persyaratan format Prophet Forecasting Model (PFM), dengan stempel waktu dalam format YYYY-MM-DD (Hasnain et al., 2022). Format YYYY-MM-DD ini merupakan format tanggal yang digunakan oleh Model Prophet yang nantinya akan diprediksi dengan data aktual.

### 2.4.1 Implementasi Model

Untuk menganalisis deret waktu dan meramalkan dengan tren, musiman, dan hari libur, PFM adalah alat yang berpengaruh dan kuat untuk prediksi yang akurat dan efektif, dan hanya membutuhkan beberapa detik untuk menyesuaikan



Optimized using  
trial version  
[www.balesio.com](http://www.balesio.com)

l., 2022). Model ini menggunakan formula berikut:

$$- h(t) + \varepsilon_t \quad (2)$$

an prediksi umum untuk PFM. Nilai yang diprediksi  $y(t)$ , ditentukan ear atau logistik  $g(t)$ , musiman berdasarkan tahunan, bulanan,  $\varepsilon$  lainnya  $s(t)$ , pencilan hari libur  $h(t)$ , dan kesalahan tak terduga memiliki beberapa parameter yang dapat dioptimalkan untuk

meramalkan yang lebih baik. Pada model linear, pencilan dinormalisasi dan tidak ada batas maksimum atau minimum yang ditetapkan. Model logistik digunakan untuk ramalan yang jenuh, di mana nilai tertinggi dan terendah ditentukan. Kedua model tersebut memungkinkan, tetapi karena dataset yang sering diisi dengan pencilan yang umum terjadi dalam tren polusi udara, model linear digunakan untuk memastikan bahwa PFM memperhitungkan pencilan-pencilan khas yang diamati dalam tren polusi udara (Shen et al., 2020).

Dalam PFM, titik perubahan adalah parameter yang signifikan dan nilai eksplisit dari titik perubahan atau skala fitting dapat ditentukan; dengan lebih banyak titik perubahan, model menunjukkan kinerja yang lebih baik saat melakukan fitting data. Namun, dalam memprediksi tren masa depan, model kehilangan efikasi dan efektivitas karena penggunaan titik perubahan yang lebih sedikit dan tidak dapat melakukan fitting dengan baik. Awalnya, PFM memplot nilai besar untuk menentukan jumlah titik perubahan, kemudian model menggunakan regularisasi L1 untuk memilih beberapa titik yang akan digunakan. Untuk menghindari overfitting karena kurangnya titik perubahan, regularisasi L1 digunakan untuk tujuan ini, yang memilih hanya titik perubahan yang signifikan (Hasnain et al., 2022).

$$L(x, y) = \sum_{i=1}^n (y_i - h_{\theta}(x_i))^2 + \lambda \sum_{i=1}^n |\theta_i| \quad (3)$$

Persamaan 2 mewakili regularisasi L1, di mana  $x$  dan  $y$  adalah koordinat dari titik perubahan.

$\sum_{i=1}^n (y_i - h_{\theta}(x_i))^2$  mewakili perubahan antara nilai aktual dan nilai yang diprediksi. Tujuan dari  $\lambda \sum_{i=1}^n |\theta_i|$  adalah untuk mempertahankan keseimbangan dalam bobot untuk menghindari overfitting, di mana  $\lambda$  menunjukkan seberapa banyak bobot dihukum; nilai tinggi menghasilkan underfitting, sementara nilai rendah berarti bias tinggi. PFM memiliki nilai dalam menentukan nilai  $\lambda$  berdasarkan jumlah estimator, atau nilai rata-rata perubahan<sup>12</sup> dapat ditentukan.

## 2.5 Evaluasi Model

Dalam penelitian ini, empat metrik digunakan untuk mengevaluasi kinerja model: koefisien korelasi ( $R^2$ ), mean squared error (MSE), root mean squared error (RMSE), dan mean absolute error (MAE). Koefisien korelasi ( $R^2$ ) digunakan untuk menentukan seberapa baik nilai-nilai yang diprediksi cocok dengan nilai-nilai aktual secara keseluruhan. MSE adalah perubahan rata-rata antara nilai aktual dan nilai yang diprediksi, sedangkan RMSE adalah akar kuadrat dari MSE, dan MAE adalah perubahan rata-rata antara nilai aktual dan nilai yang diprediksi. Dibandingkan dengan MAE, RMSE memberikan lebih banyak bobot pada varian antara *outlier* data (Hasnain et al., 2022)



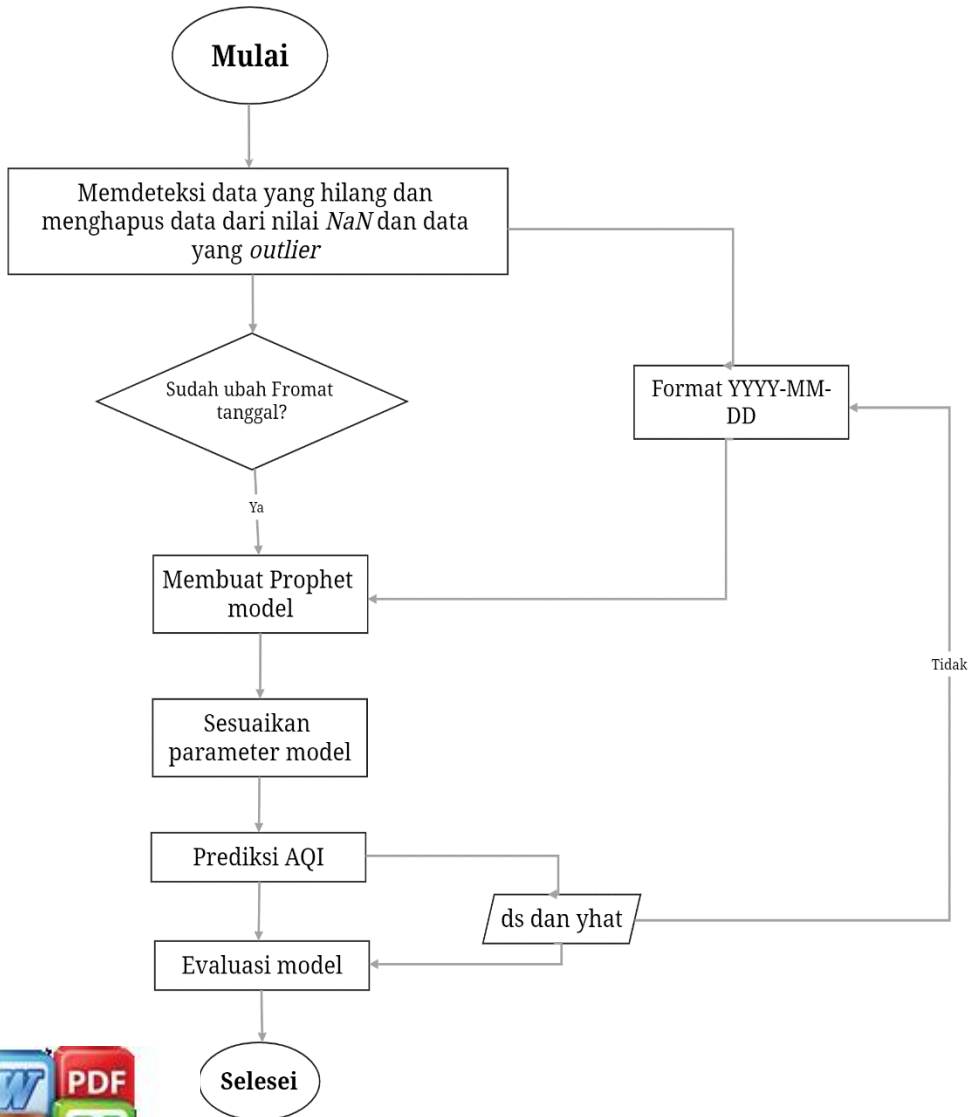
al karena mencerminkan tren umum tanpa *overfitting*. Cakupan jilias bahwa nilai yang diprediksi akan berada di antara interval  $\tau$  PFM; nilai default untuk PFM adalah 80%. Nilai cakupan yang ukkan variabilitas yang lebih rendah dalam *dataset* (Shen et al., < ini dihitung dengan rumus-rumus berikut:

$$R = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2} \quad (5)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - \hat{x}_i| \quad (6)$$

## 2.6 Bagan Alir



Presented with xmind

**Gambar 3.** Bagan Alir Penelitian

