

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pencemaran udara merupakan isu global yang menjadi perhatian seluruh negara dan hal ini sejalan dengan program Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (TPB)/Sustainable Development Goals (SDGS) tujuan ke 11 (sebelas) yaitu kota dan permukiman yang berkelanjutan. Salah satu indikator yang digunakan adalah indeks pencemaran udara. Berdasarkan Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021, pencemaran udara adalah masuk atau dimasukkannya zat, energi, dan/atau komponen lainnya kedalam udara ambien oleh kegiatan manusia sehingga melampaui baku mutu udara ambien yang telah ditetapkan. Udara Ambien adalah udara bebas di permukaan bumi pada lapisan troposfir yang berada di dalam wilayah yuridiksi Republik Indonesia yang dibutuhkan dan berpengaruh terhadap kesehatan manusia, makhluk hidup, dan unsur lingkungan hidup lainnya. Baku mutu udara ambien adalah nilai pencemar udara yang ditenggang keberadaannya dalam udara ambien. Merujuk pada data World Health Organization (WHO), pada tahun 2019 diperkirakan terjadi kematian dini sebanyak 4,2 juta di seluruh dunia akibat polusi udara ambien di kota dan daerah pedesaan. Secara detail disebutkan bahwa kematian dini disebabkan oleh paparan partikel halus berdiameter 2,5 mikron atau kurang (PM2.5), yang menyebabkan penyakit kardiovaskular dan pernapasan, serta kanker. Dalam laporan Global Alliance on Health and Pollution (GAHP) tentang 10(sepuluh) negara teratas dengan kematian dini akibat pencemaran udara, Indonesia berada pada peringkat ke-4 dunia pada tahun 2017 dengan jumlah kematian dini 123.753 jiwa.

Berdasarkan data *Air Quality Live Index* (AQLI), pencemaran udara di Indonesia tercatat terus meningkat sejak dua dekade terakhir, dan saat ini berada di peringkat ke-13 dari 243 negara dengan pencemaran udara terburuk di dunia. Merujuk pada data WHO bahwa sekitar 99% populasi dunia tinggal di tempat-tempat di mana tingkat pencemaran udara melebihi batas yang ditetapkan oleh WHO. Perkotaan memiliki potensi sangat tinggi terjadinya pencemaran

udara karena tingkat kepadatan penduduk yang tinggi dan memiliki beragam aktifitas didalamnya. Adapun sumber pencemaran udara perkotaan seperti hasil pembakaran pada kendaraan bermotor, industri dan bahkan dari pemukiman (Indrayani, 2018; Yasir, 2021)

Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU) berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor P.14/MENLHK/SETJEN/KUM.1/7/2020 adalah angka yang tidak mempunyai satuan yang menggambarkan kondisi mutu udara ambien di lokasi tertentu, yang didasarkan kepada dampak kesehatan manusia, nilai estetika dan makhluk hidup lainnya. Pemantauan pencemaran udara ambien dipantau secara terus-menerus dan datanya dapat dipantau secara langsung dengan Stasiun Pemantau Pencemaran Udara Ambien (SPKUA). Parameter yang dipantau pada SPKUA adalah partikulat (PM₁₀), partikulat (PM_{2.5}), karbon monoksida (CO), nitrogen dioksida (NO₂), sulfur dioksida (SO₂), ozon (O₃) dan hidrokarbon (HC).

Kota Makassar sebagai ibu kota Provinsi Sulawesi Selatan menjadi kota yang memiliki penduduk terbanyak di Provinsi Sulawesi Selatan dengan jumlah penduduk pada tahun 2021 sebanyak 1.427.619 jiwa atau 15,62 % dari total penduduk Provinsi Sulawesi Selatan. Jumlah kendaraan pada tahun 2021 sebanyak 1.740.793 unit dan industri 1.113 unit (BPS Kota Makassar, 2022; BPS Provinsi Sulawesi Selatan, 2022).

Ruang terbuka hijau (RTH) memiliki peran strategis dalam mereduksi pencemaran udara (Inaku & Novianus, 2020; Suhardjo, 2007), sedangkan luas RTH Kota Makassar tahun 2021 menurut Pelaksana Tugas Kepala Bidang RTH Dinas Lingkungan Hidup Kota Makassar hanya 9,077% dari total luas Kota Makassar, sedangkan persyaratan minimal 30% berdasarkan Undang-Undang Nomor 26 tahun 2007 tentang penataan ruang (detik.com, 2022). Selain luasan RTH yang minim, sebaran RTH di Kota Makassar tidak mengikuti pola perkembangan struktur planologis sebagaimana diatur dalam Permen PU Nomor 5 Tahun 2008 (Dollah & Rasmawarni, 2019). Dengan kondisi tersebut maka kota makassar memiliki potensi pencemaran udara paling tinggi di Provinsi Sulawesi Selatan. Pada tahun 2019 Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan telah memasang satu buah SPKUA atau *Air Quality Monitoring System* (AQMS) di Kota Makassar yang terletak di lapangan karebosi (KLHK, 2019). Pemasangan

alat tersebut akan memberikan informasi pencemaran udara ambien dalam bentuk ISPU.

Pada tahun 2020 Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan bersama dengan Dinas Lingkungan Hidup Kabupaten/Kota di seluruh Indonesia melakukan pemantauan pencemaran udara menggunakan metode *passive sampler* dengan parameter sulfur dioksida (SO₂). Hasil pemantauan 6 (enam) kota besar di Indonesia dapat dilihat pada Tabel 1, dimana Kota Makassar peringkat keempat dengan nilai pencemaran 11,39 µg/m³. Hasil pemantauan setiap Kabupaten/Kota di Provinsi Sulawesi Selatan dapat dilihat pada Tabel 2, dimana Kota Makassar peringkat kedua dengan 11,39 µg/m³. Hasil pemantauan SPKUA pada tahun 2019 di Kota Makassar menghasilkan rata-rata konsentrasi PM_{2.5} yaitu 12,99 µg/m³ (KLHK,2019).

Tabel 1. Konsentrasi SO₂ enam kota besar di Indonesia tahun 2020

NO	KABUPATEN / KOTA	<i>Passive Sampler</i>	Baku Mutu Referensi EU (µg/m ³)
		SO ₂ (µg/m ³)	SO ₂ (µg/m ³)
1	Jakarta Pusat	12,24	20
2	Bandung	9,74	20
3	Surabaya	16,77	20
4	Makassar	11,39	20
5	Semarang	8,28	20
6	Medan	13,63	20

Sumber: KLHK(2020)

Tabel 2. Konsentrasi SO₂ kabupaten/kota di Provinsi Sulawesi Selatan tahun 2020

NO	KABUPATEN / KOTA	<i>Passive Sampler</i>	Baku Mutu Referensi EU (µg/m ³)
		SO ₂ (µg/m ³)	SO ₂ (µg/m ³)
1	Bantaeng	5,55	20
2	Barru	6,72	20
3	Bone	7,74	20
4	Bulukumba	9,87	20
5	Enrekang	5,83	20

Lanjutan Tabel 2.

NO	Kabupaten / Kota	<i>Passive Sampler</i>	Baku Mutu Referensi EU ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
		SO ₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	SO ₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
6	Gowa	8,63	20
7	Jeneponto	8,01	20
8	Luwu Timur	7,39	20
9	Luwu Utara	9,26	20
10	Luwu	9,96	20
11	Maros	9,64	20
12	Pangkep	12,04	20
13	Pinrang	5,54	20
14	Selayar	8,74	20
15	Sidrap	8,84	20
16	Sinjai	7,53	20
17	Soppeng	6	20
18	Takalar	8,68	20
19	Toraja	9,31	20
20	Toraja Utara	8,35	20
21	Wajo	7,51	20
22	Makassar	11,39	20
23	Palopo	9,59	20
24	Parepare	9,71	20

Sumber: KLHK (2020)

Pencemaran udara memiliki dampak serius terhadap kesehatan manusia, makhluk hidup dan lingkungan, sehingga penting melakukan peramalan pencemaran udara ambien Kota Makassar sebagai dasar menyusun sebuah perencanaan kedepan untuk mengendalikan pencemaran udara ambien. Peramalan (*forecasting*) adalah metode untuk memperkirakan suatu nilai dimasa depan dengan menggunakan data masa lalu, namun peramalan tidak pernah secara mutlak benar, akan tetapi jika faktor dan model yang digunakan tepat maka dapat menghasilkan peramalan yang mendekati kondisi yang sebenarnya (Wardah & Iskandar, 2017). Penelitian tentang pencemaran udara beberapa tahun terakhir mengalami peningkatan dan penelitian difokuskan pada 3 (tiga) aspek yaitu pemantauan pencemaran udara, analisis kausal pencemaran udara dan peramalan pencemaran udara (Lu & Liu, 2021).

Perkembangan teknologi yang pesat di era sekarang menawarkan kemudahan dalam menyelesaikan masalah pada berbagai bidang pekerjaan dan salah satunya terkait peramalan. Salah satu model yang bisa digunakan dalam peramalan adalah model *Long Short-Term Memory (LSTM)* yang merupakan pengembangan dari arsitektur *Recurrent Neural Network (RNN)* yang dirancang spesifik untuk memodelkan urutan temporal dan dependensi jarak jauhnya memiliki kinerja lebih akurat daripada RNN konvensional. Penerapan model LSTM dalam peramalan pencemaran udara memiliki tingkat akurasi yang tinggi dibanding beberapa model peramalan yang lain (Arsov et al., 2020; Karyadi, 2022).

Berdasarkan latar belakang diatas maka dibutuhkan arahan pengendalian pencemaran udara ambien Kota Makassar untuk jangka panjang. Penyusunan arahan pengendalian pencemaran udara ambien Kota Makassar mengacu pada sumber pencemar, kerapatan vegetasi, Rencana Tata Ruang Wilayah dan hasil peramalan pencemaran udara ambien. Arahan pengendalian pencemaran udara ambien Kota Makassar difokuskan pada intervensi sumber pencemar. Pada tahun 2045 Indonesia berusia 100 tahun atau Indonesia emas sehingga dengan adanya arahan ini maka diharapkan pencemaran udara ambien tidak melampaui baku mutu pada tahun 2045.

1.2 Rumusan Masalah

Dari latar belakang dapat ditarik kesimpulan bahwa Kota Makassar memiliki potensi terjadinya pencemaran udara, olehnya diperlukan analisis terkait pencemaran udara di Kota Makassar. Adapun rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

- 1) Bagaimana kondisi pencemaran udara ambien Kota Makassar tahun 2045 dalam bentuk indeks standar pencemar udara?
- 2) Bagaimana sumber pencemar udara ambien di Kota Makassar?
- 3) Bagaimana arahan pengendalian pencemaran udara ambien Kota Makassar?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun yang menjadi tujuan dari penelitian ini adalah untuk menjawab rumusan masalah yang telah ditentukan yaitu sebagai berikut:

- 1) Meramalkan pencemaran udara ambien kota Makassar tahun 2045.
- 2) Mengidentifikasi sumber pencemar udara ambien di Kota Makassar.
- 3) Menyusun arahan pengendalian pencemaran udara ambien Kota Makassar.

1.4 Manfaat Penelitian

Pencemaran udara berdampak buruk terhadap kesehatan manusia, makhluk hidup, dan unsur lingkungan hidup lainnya. Adapun beberapa jenis penyakit yang diakibatkan oleh pencemaran udara yang melampaui baku mutu udara ambien seperti penyakit kardiovaskular, pernapasan, serta kanker. Dengan adanya penelitian ini diharapkan memberikan manfaat sebagai berikut:

- 1) Hasil penelitian ini dapat memberi gambaran tingkat dan bahaya pencemaran udara ambien Kota Makassar pada tahun 2045 dalam bentuk indeks standar pencemar udara.
- 2) Hasil penelitian ini diharapkan menjadi bahan masukan pemerintah Kota Makassar dalam menyusun rencana tata ruang wilayah kota dalam mengendalikan pencemaran udara ambien.
- 3) Hasil penelitian ini diharapkan dapat mengendalikan pencemaran udara ambien Kota Makassar sehingga tidak melampaui baku mutu udara ambien yang berdampak buruk terhadap makhluk hidup.

1.5 Ruang Lingkup Penelitian

Penelitian ini memiliki batasan ruang lingkup sebagai berikut

- 1) Pemilihan sumber data pencemaran udara ambien hanya bersumber dari satu titik pantau karena ketersediaan SPKUA atau *Air Quality Monitoring System* (AQMS) yang memiliki data *real time* di Kota Makassar.
- 2) Data pencemaran udara yang digunakan adalah parameter partikulat (PM_{2.5}) dan sulfur dioksida (SO₂).
- 3) Data *time series* yang digunakan pada penelitian ini adalah data setiap satu jam pada tahun 2020 sampai tahun 2022.
- 4) Arahan pengendalian pencemaran udara ambien yang dihasilkan merupakan arahan indikatif, dimana pada arahan tersebut belum dihitung persentase pengurangan pencemaran udara,

1.6 Penelitian Terdahulu Dan Kebaruan Penelitian

Terdapat beberapa penelitian terdahulu yang memiliki keterkaitan dengan penelitian ini, (Oktaviani & Hustinawati, 2021) yang membangun model untuk memprediksi ISPU di DKI Jakarta menggunakan metode LSTM. Data ISPU yang digunakan dalam peramalan adalah PM10, SO₂, CO, O₃, dan NO₂. Model LSTM yang dibangun menggunakan 64 *layer neuron* atau LSTM unit dengan *dropout* 0.2. Berdasarkan hasil evaluasi model menggunakan *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE), maka model tersebut masuk dalam kategori akurat dengan nilai MAPE 12,28%. Pada penelitian yang berbeda, (Karyadi, 2022) membandingkan tiga model yaitu LSTM, LSTM *Bidirectional*, dan *Gate Recurrent Unit* (GRU) dalam peramalan pencemaran udara. Data yang digunakan adalah data *time series* suhu, PM10, kelembabab, dan ISPU. Berdasarkan hasil evaluasi ketiga model, maka penerapan model LSTM dan LSTM *Bidirectional* menunjukkan hasil yang lebih baik dibandingkan GRU dalam melakukan peramalan dengan menggunakan data *time series*.

Ruang terbuka hijau (RTH) memiliki peran dalam mereduksi pencemaran udara ambien, sebagaimana penelitian (Ahmad, 2017) yang dilakukan di kawasan industri PT. Petrokimia Gresik. Parameter pencemar udara yang digunakan pada penelitian tersebut adalah PM_{2.5} dan metode penelitian yang digunakan adalah perhitungan integrasi diferensiasi. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa RTH di kawasan industri PT. Petrokimia Gresik mampu mereduksi partikulat karena nilai rata-rata konsentrasi PM_{2.5} tidak melebihi baku mutu udara ambien. Selain mampu mereduksi PM_{2.5}, RTH juga mampu mereduksi SO₂, sebagaimana penelitian yang dilakukan oleh (Maharini, 2017) di Kota Surabaya tentang RTH dalam mereduksi SO₂ pada wilayah permukiman dan transportasi. Penelitian ini menggunakan metode *Box Model* dan hasil penelitian menunjukkan bahwa RTH memiliki kemampuan mereduksi SO₂, semakin luas RTH maka semakin baik dalam mereduksi SO₂ udara ambien.

Mengidentifikasi ruang terbuka hijau eksisting pada suatu kota atau wilayah bisa dilakukan dengan analisis kerapatan vegetasi menggunakan data citra, sebagaimana penelitian (Hatulesila et al., 2019) di Kota Ambon. Data citra yang digunakan pada penelitian tersebut adalah Landsat 8 dengan resolusi 30m,

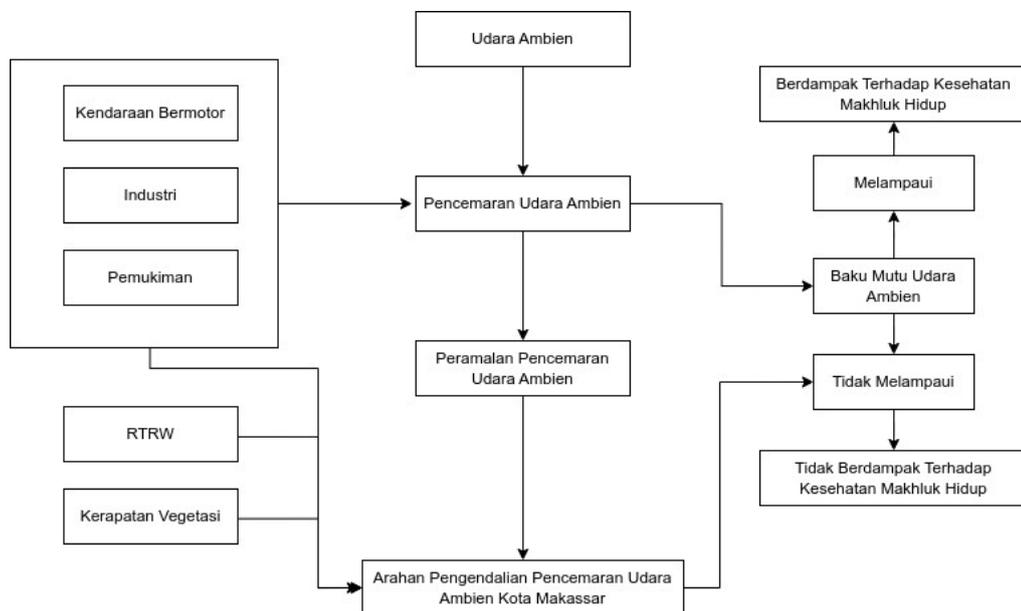
sedangkan metode yang digunakan adalah *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI). Dengan metode NDVI, maka kerapatan vegetasi eksisting bisa diidentifikasi berdasarkan tingkat kehijauan penutupan lahan dan hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa 58,31 % luas lokasi penelitian memiliki tutupan vegetasi. (Hashim et al., 2019) dalam penelitiannya menggunakan data citra beresolusi tinggi yaitu citra Pleiades 1A dengan resolusi 2m untuk mengidentifikasi vegetasi perkotaan. Metode yang digunakan adalah NDVI dan hasil penelitian dengan citra resolusi tinggi mampu mengidentifikasi dan mengklasifikasikan vegetasi perkotaan.

Perkotaan memiliki potensi pencemaran udara yang tinggi sehingga perlu ada pengendalian pencemaran udara. Pada penelitian (Yasir, 2021) mengungkapkan bahwa secara umum untuk menyelesaikan permasalahan pencemaran udara harus dimulai dari sumber masalahnya. Metode yang digunakan pada penelitian tersebut adalah studi literatur dengan pendekatan deskriptif kualitatif. Berdasarkan hasil penelitiannya, maka beberapa arahan yang disarankan untuk pengendalian pencemaran udara perkotaan adalah pengurangan konsumsi bahan bakar fosil dengan menggunakan transportasi ramah lingkungan, pembangunan RTH, pembuatan bangunan dan pemukiman yang berkelanjutan.

Berdasarkan penelitian terdahulu yang dibahas di atas maka dapat dilihat bahwa penelitian terkait pencemaran udara sangat beragam. Ragam penelitian yang dimaksud yaitu peramalan pencemaran udara, analisis RTH dalam mereduksi pencemaran udara, identifikasi RTH dengan citra satelit, dan metode pengendalian pencemaran udara. Penelitian terdahulu tersebut menjadi rujukan penulis dalam melakukan penelitian yang berjudul peramalan dan arahan pengendalian pencemaran udara ambien di Kota Makassar. Pada penelitian ini terdapat 3 (tiga) kebaruan, yang pertama adalah menggabungkan beragam penelitian terdahulu menjadi satu jenis penelitian. Kebaruan yang kedua adalah menambahkan variabel baru yaitu RTRW dan sumber pencemar (kendaraan bermotor, industri, pemukiman). Kebaruan yang ketiga adalah metode penyusunan arahan yang didasarkan pada empat aspek yaitu sumber pencemar, kerapatan vegetasi, Rencana Tata Ruang Wilayah dan hasil peramalan pencemaran udara.

1.7 Kerangka Pikir

Pada kerangka pikir yang terdapat pada Gambar 1 digambarkan bahwa objek dari penelitian ini adalah udara ambien di Kota Makassar, dimana terjadi pencemaran terhadap udara ambien. Pencemar udara ambien bersumber dari aktivitas pembakaran kendaraan bermotor, industri, serta aktivitas penduduk di pemukiman. Jika pencemaran udara ambien melampaui baku mutu udara ambien maka menimbulkan dampak buruk terhadap kesehatan makhluk hidup. Sebaliknya jika pencemaran udara ambien tidak melampaui baku mutu maka tidak berdampak buruk terhadap kesehatan makhluk hidup. Pencemaran udara ambien perlu untuk diramalkan sehingga mendapatkan gambaran pencemaran udara ambien kedepannya sebagai dasar untuk menyusun arahan pengendalian pencemaran udara ambien. Dalam menyusun arahan tersebut perlu menambahkan beberapa parameter seperti data sumber pencemar, RTRW, kerapatan vegetasi dan peramalan pencemaran udara ambien. Arahan pengendalian pencemaran udara ambien diharapkan bisa mengendalikan pencemaran udara sehingga tidak melampaui baku mutu udara ambien.



Gambar 1. Kerangka Pikir Arahan Pengendalian Pencemaran Udara Ambien

BAB II

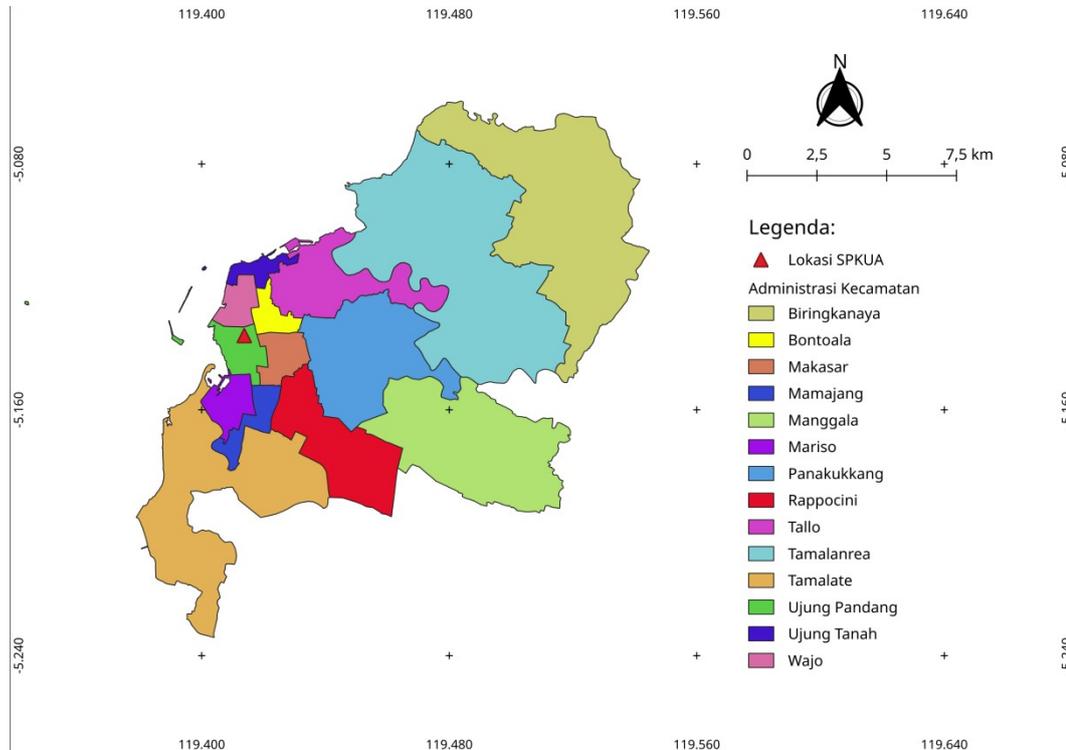
METODE PENELITIAN

1.8 Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan jenis penelitian yang bersifat deskriptif kuantitatif dengan menggunakan 2 (dua) bentuk teknik analisis data. Teknik analisis yang pertama menggunakan pendekatan algoritma *Deep Learning* dengan metode *Long Short Term Memory* (LSTM). Teknik analisis ini digunakan untuk melakukan peramalan pencemaran udara ambien. Teknik analisis yang kedua menggunakan pendekatan analisis spasial dalam pengolahan data. Teknik ini digunakan untuk mengidentifikasi sumber pencemaran udara, identifikasi kerapatan vegetasi dan penyusunan arahan pengendalian pencemaran udara ambien Kota Makassar.

1.9 Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Kota Makassar dengan di fokuskan pada 14 kecamatan yaitu kecamatan Biringkanaya, Bontoala, Makassar, Mamajang, Manggala, Mariso, Panakukkang, Rappocini, Tallo, Tamalanrea, Tamalate, Ujung Pandang, Ujung Tanah, dan kecamatan Wajo. Pemilihan lokasi penelitian karena di kota ini terdapat satu buah stasion pemantau pencemaran udara ambien yang otomatis sehingga memiliki data *time series* terkait pencemaran udara. Waktu penelitian direncanakan selama 4 (empat) bulan mulai bulan Juli 2022 sampai dengan Oktober 2022, dengan tahapan penelitian meliputi: persiapan penelitian, pengumpulan data, analisis data dan pembuatan laporan. Adminitrasi Kota Makassar dan lokasi SPKUA dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Peta Administrasi Kota Makassar dan Lokasi SPKUA

Sumber: Diolah dari data BIG tahun 2022

1.10 Jenis dan Sumber Data

Pada penelitian ini data yang digunakan merupakan data sekunder dari berbagai sumber. Adapun data dan sumber yang dimaksud sebagai berikut:

- 1) Data *time series* udara ambien yang terdiri dari partikulat (PM_{2.5}) dan sulfur dioksida (SO₂) selama dua tahun yaitu 2020-2022 dan data merupakan data pencemaran udara ambien setiap jam dalam setiap hari. Data pencemaran udara ambien tersebut menggunakan format data tabular dengan format file .csv. Data ini yang nantinya menjadi data *primer* dalam melakukan prediksi pencemaran udara ambien. Data pencemaran udara bersumber dari Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan yang merupakan data dari hasil stasiun pemantauan pencemaran udara ambien di Makassar.
- 2) Data Rencana Tata Ruang Wilayah (RTRW) Kota Makassar tahun 2015-2034 yang nantinya digunakan dalam penyusunan arahan pengendalian

pencemaran udara. Data tersebut bisa didapatkan dari Dinas Penataan Ruang Kota Makassar.

- 3) Data Administrasi Kota Makassar yang digunakan untuk menggambarkan lokasi kota makassar. Data tersebut bisa didapatkan dari Dinas Penataan Ruang Kota Makassar.
- 4) Data Jalan Kota Makassar yang digunakan untuk mengidentifikasi sumber pencemaran udara dari kendaraan bermotor bersumber Dinas Penataan Ruang Kota Makassar.
- 5) Data Industri dan data penduduk yang berasal dari Badan Pusat Statistik. Kedua data tersebut digunakan untuk mengidentifikasi kepadatan penduduk dan sebaran industri di kota Makassar.
- 6) Data citra satelit sentinel-2A tahun 2021 yang bersumber dari USGS untuk membuat peta NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) dengan tujuan mengidentifikasi kerapatan vegetasi yang di Kota Makassar.

1.11 Matriks Penelitian

Gambaran dari penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 3, dimana pada tabel tersebut dapat dilihat keterkaitan satu sama lain untuk menyusun arahan pengendalian. Pada kolom tabel kedua terdapat rumusan masalah yang harus diselesaikan, kemudian pada kolom ketiga terdapat tujuan yang merupakan tujuan penelitian untuk menyelesaikan rumusan masalah. Pada kolom tabel keempat terdapat variabel yang digunakan untuk mencapai tujuan penelitian dan pada kolom kelima ada sub variabel untuk menyusun variabel. Kolom tabel kelima menampilkan data dan informasi yang digunakan dalam penelitian, kemudian kolom selanjutnya adalah sumber data dan informasi yang digunakan pada penelitian ini. Kolom ketujuh terkait metode pengumpulan data dan kolom terakhir terkait jenis analisis data yang digunakan untuk menyelesaikan rumusan masalah. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat padat Tabel 3, tentang matriks penelitian.

Tabel 3. Matriks Penelitian

No	Rumusan Masalah	Tujuan	Variabel	Sub Variabel	Data dan Informasi	Sumber Data dan Informasi	Pengumpulan Data dan Informasi	Analisis
1	Bagaimana kondisi pencemaran udara ambien Kota Makassar tahun 2045?	Peramalan pencemaran udara ambien Kota Makassar tahun 2045 dalam bentuk indeks standar pencemar udara	Kategori ISPU Kota Makassar tahun 2045	Peramalan ISPU Kota Makassar tahun 2045	Data <i>time series</i> (PM2.5 dan SO2) tahun 2020 – 2022	KLHK	Permintaan data instansi	Teknik analisis menggunakan pendekatan algoritma <i>Deep Learning</i> dengan metode <i>Long Short Term Memory</i> (LSTM)
2	Bagaimana sumber pencemar udara ambien di Kota Makassar	Mengidentifikasi sumber pencemar udara ambien di Kota Makassar	Potensi sumber pencemar udara ambien	Potensi sumber pencemar dari Industri, pemukiman, dan kepadatan kendaraan	1. Data industri 2. Data Pemukiman 3. Data Lokasi Kepadatan kendaraan	Google Traffic	Identifikasi di Google Traffic	Teknik analisis menggunakan pendekatan analisis spasial
3	Bagaimana arahan pengendalian pencemaran udara ambien Kota Makassar	Menyusun arahan pengendalian pencemaran udara ambien untuk Kota Makassar, serta waktu implementasi arahan	1.Potensi Pencemar Udara Ambien 2.Kerapatan vegetasi 3.Peruntukan Penggunaan Ruang 4.Pola/tren data ISPU	1. Potensi pencemar hasil analisis 2.NDVI 3.Pola Ruang 4.ISPU hasil peramalan	1. RTRW 2. Data citra satelit Sentinel2A 3. Hasil Analisis	1.Dinas Tata Ruang Kota Makassar 2. USGS 3. Hasil analisis	1.Permintaan data instansi 2.Download data citra dari website USGS 3.Hasil Analisis	Teknik analisis menggunakan pendekatan analisis spasial (overlay, NDVI)

1.12 Peramalan pencemaran udara

Pada tahapan ini dilakukan peramalan pencemaran udara dalam bentuk data Indeks Standar Pencemaran udara dengan parameter yang digunakan adalah PM_{2.5} dan SO₂ yang merupakan data dari hasil pengukuran setiap jam pada SPKUA. Pemilihan 2 (dua) parameter ISPU dari total 7 (tujuh) parameter karena terkait ketersediaan data. Parameter PM_{2.5} dan SO₂ memiliki data yang cukup lengkap dalam kurung waktu tiga tahun (2020-2022) dibanding kelima parameter lainnya. Salah satu kriteria yang dibutuhkan model LSTM untuk memperoleh tingkat akurasi yang tinggi adalah jumlah data, semakin banyak data yang dipelajari oleh model maka kemampuan model dalam meramalkan akan semakin baik. Selain jumlah data, kedua parameter tersebut dipilih karena memiliki data *time series* (deret waktu) yang baik.

1.12.1 Penghitungan Indeks Standar Pencemar Udara

Penghitungan nilai ISPU menggunakan hasil pengukuran dari SPKUA dan setiap penghitungan satu satu jam nilai ISPU harus menggunakan data akumulasi dari 24 jam konsentrasi pencemaran udara kebelakang. Perhitungan nilai ISPU mengacu pada Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor P.14/MENLHK/SETJEN/KUM 1/7/2020. Konversi nilai konsentrasi parameter ISPU dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Konversi nilai konsentrasi parameter ISPU

ISPU	24 Jam PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	24 Jam PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	24 Jam SO ₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	24 Jam CO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	24 Jam O ₃ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	24 Jam NO ₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	24 Jam HC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
0 - 50	50	15,5	52	4000	120	80	45
51 - 100	150	55,4	180	8000	235	200	100
101 – 200	350	150,4	400	15000	400	1130	215
201 - 300	420	250,4	800	30000	800	2260	432
>300	500	500	1200	45000	1000	3000	648

Sumber: Permen LHK No. 14 tahun 2020

Perhitungannya menggunakan persamaan berikut:

$$I = \frac{(I_a - I_b)}{(X_a - X_b)}(X_x - X_b) + I_b$$

Dimana:

I = ISPU terhitung

I_a = ISPU batas atas

I_b = ISPU batas bawah

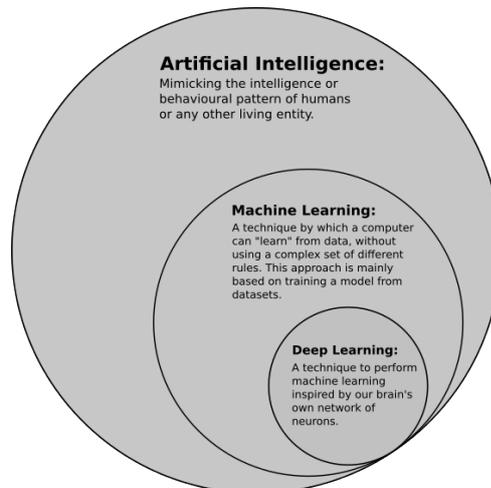
X_a = Konsentrasi ambien batas atas (µg/m³)

X_b = Konsentrasi ambien batas bawah (µg/m³)

X_x = Konsentrasi ambien nyata hasil pengukuran (µg/m³)

1.12.2 Deep Learning

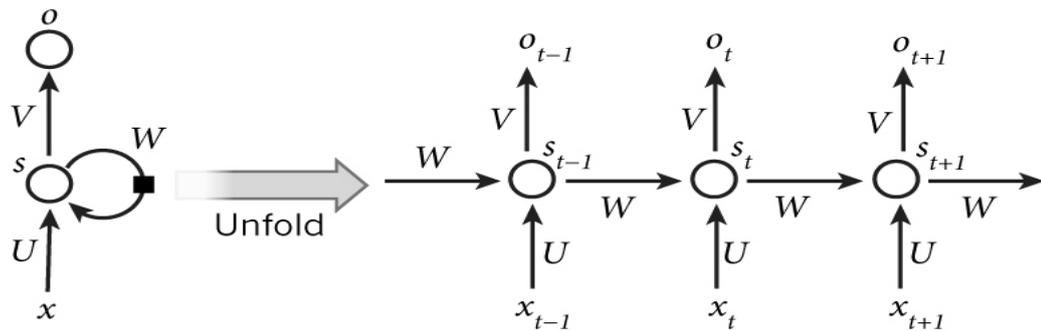
Deep Learning (DL) adalah sekumpulan algoritma dalam *Machine Learning* (ML) yang mempelajari berbagai level model statistik dengan menggunakan *Artificial Neural Networks* (ANN) atau jaringan saraf tiruan (Deng, 2014). *Machine Learning* juga masih merupakan turunan dari metode *Artificial Intelligence* (AI) atau kecerdasan buatan. Algoritma utama yang digunakan pada *Deep Learning* adalah *Deep Neural Network* (DNN), *Deep Belief Network* (DBN), *Recurrent Neural Network* (RNN) dan *Convolutional Neural Network* (CNN) dan algoritma tersebut diterapkan untuk analisis yang berbeda-beda sesuai dengan kebutuhan dan kinerja dengan berbagai jenis data (Shetty & Siddiq, 2019). Semua metode yang dibahas tersebut masih saling terkait dimana DL merupakan teknik dari ANN, sedangkan ANN adalah teknik dari ML dan paling terakhir adalah AI yang merupakan induk dari semua karena ML adalah teknik dalam AI (Ahmad Hania, 2017). Keterkaitan dari metode tersebut dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Keterkaitan AI, ML, dan DL
Sumber: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:AI-ML-DL.svg>

1.12.3 Recurrent Neural Network

Recurrent Neural Network (RNN) atau jaringan saraf berulang adalah salah satu bentuk arsitektur dari *Artificial Neural Network* (ANN) atau jaringan saraf tiruan yang dalam pemrosesan datanya berung kali dipanggil dan data yang diproses adalah data sekuensial/beruntun (*sequential data*), RNN merupakan bagian dari DL karena cara kerjanya dalam memproses data melalui banyak lapis (*layer*) (Firmansyah et al., 2020; Mukhlis et al., 2021). Dengan cara kerja seperti di atas maka RNN dalam mengolah data sekuensial sangat baik karena merupakan model yang sangat kuat (Graves et al., 2013). Proses pada RNN ketika melakukan prediksi data tidak tergantung pada satu data input, tetapi input data yang digunakan juga berasal dari input sebelumnya sehingga setiap input memiliki keterkaitan yang kemudian akan di informasikan ke *hidden layer* pada RNN (Sen et al., 2020). Cara kerja RNN dapat dilihat pada Gambar 4 berikut:



Gambar 4. Recurrent Neural Network

Sumber: <https://machinelearning.mipa.ugm.ac.id/2018/07/01/recurrent-neural-network-rnn/>

Dimana:

x_t : *input* data pencemaran udara (PM2.5 dan SO2) dalam bentuk angka yang berasal dari hasil pemantauan SPKUA

s_t : h_t adalah *hidden state* pada waktu t

U, V, W : *Weights* U untuk koneksi dari input ke *hidden state*, *Weights* W koneksi dari *hidden* ke *hidden*, *weights* V untuk koneksi dari *hidden state* ke *output*

O_t : *Output* (Hasil peramalan pencemaran udara)

Rumus:

Menghitung keadaan saat ini:

$$s_t = f(s_{t-1}, x_t) \quad (1)$$

Menerapkan fungsi aktivasi (tanh):

$$s_t = \tanh(U \cdot x_t + W \cdot s_{t-1}) \quad (2)$$

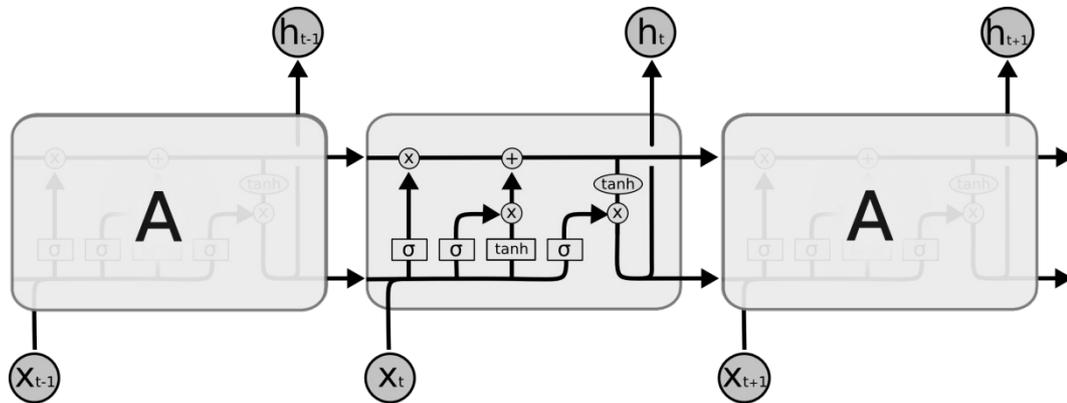
Menghitung hasil :

$$O_t = \text{softmax}(V \cdot s_t) \quad (3)$$

1.12.4 Long Short Term Memory

Long Short Term Memory (LSTM) adalah jenis atau pengembangan dari RNN. *Long Short Term Memory* diciptakan untuk menutupi kekurangan dari RNN yaitu gradien menghilang (*vanishing gradient*) yang menyebabkan pembelajaran model menjadi terlalu lambat atau berhenti sama sekali. Selain itu LSTM juga memiliki keunggulan lain dibanding RNN yaitu memiliki memori yang lebih panjang saat mengolah data dan dapat belajar dari input yg dipisahkan satu

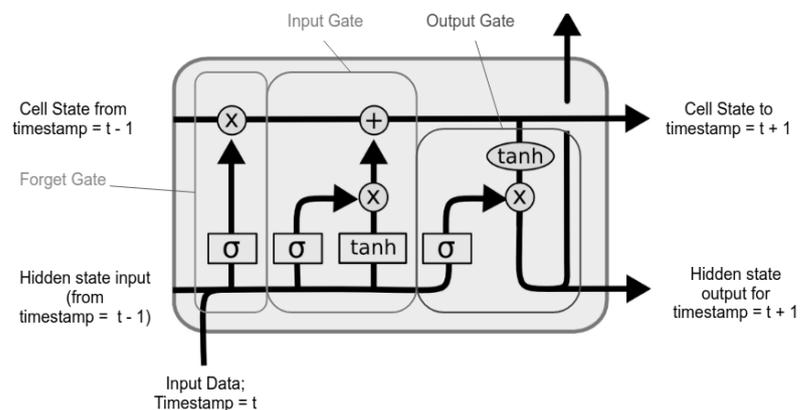
sama lain oleh jeda waktu yang lama, namun secara arsitektur tidak berbeda dari RNN (Firmansyah et al., 2020; Yadav et al., 2020). Arsitektur LSTM dapat dilihat pada gambar 5.



Gambar 5. Arsitektur LSTM

Sumber: <https://colah.github.io/>

Pada Gambar 5 dapat dilihat tentang arsitektur LSTM terdapat tiga tahapan yaitu input data, proses data atau *cell LSTM* yang merupakan inti dari LSTM, dan yang terakhir adalah output atau hasil. *Cell LSTM* dapat dilihat lebih jelas pada Gambar 6.



Gambar 6. Cell LSTM

Sumber: <https://medium.com/analytics-vidhya/lstms-explained-a-complete-technically-accurate-conceptual-guide-with-keras-2a650327e8f2>

Pada Cell LSTM terdapat *cell stage* dan tiga *gate* pengolahan data yaitu *forget gate*, *input gate* dan *output gate*. Adapun cara kerjanya sebagai berikut::

1) *Forget Gate (ft)*

Forget gate memiliki fungsi untuk menentukan informasi yang akan digunakan, jika informasinya penting maka akan disimpan dan menghapus informasi yang tidak penting. Tahapan ini mengolah data dari output pencemaran udara pada waktu (h_{t-1}) dan input data pencemaran udara pada waktu t (X_t). kemudian menerapkan fungsi aktivasi *sigmoid*. Hasil dari *forget gate* bernilai antara 0 dan 1 karena fungsi *sigmoid*. Jika nilai *forget gate* mendekati angka 0 maka informasinya akan dihapus dan jika f_t mendekati angka 1 maka informasinya akan disimpan. Adapun persamaan yang digunakan dalam menghitung *forget gate* di sajikan pada persamaan 1:

$$f_t = \sigma(W_f x_t + U_f h_{t-1} + b_f) \quad (1)$$

x_t = Input nilai ISPU (PM2.5 dan SO₂)

f_t = Nilai ISPU dari *forget gate*

W_f = Bobot nilai input di waktu ke t ,

U_f = Bobot nilai output dari waktu ke $t-1$

h_{t-1} = Output nilai ISPU pada waktu ke $t-1$

b_f = Bias pada *forget gate*

σ = Fungsi *sigmoid*

2) Input Gate

Input gate memiliki fungsi untuk menentukan informasi yang relevan untuk ditambahkan pada *state* ini. Pada *input gate* terdapat dua proses yaitu menghitung nilai *input gate* dan menghitung nilai kandidat *cell state*. Pada perhitungan nilai *input gate* (i_t) menghasilkan nilai antaran 0 dan 1 karena menggunakan fungsi *sigmoid*, sedangkan untuk perhitungan nilai kandidat *cell state* (\tilde{C}_t) bernilai antara -1 dan 1 karena menggunakan fungsi *tanh (hyperbolic tangent)*. Menghitung *input gate* menggunakan persamaan 2, sedangkan untuk menghitung nilai kandidat *cell state* menggunakan persamaan 3:

$$i_t = \sigma(W_i x_t + U_i x_t + b_i) \quad (2)$$

x_t = *input* nilai ISPU pada waktu t

i_t = Nilai *input gate* (Nilai ISPU)

W_i = Bobot nilai input ISPU pada waktu ke t

U_i = Bobot nilai output ISPU pada waktu ke $t-1$

h_{t-1} = Output nilai ISPU pada waktu ke $t-1$

b_i = Bias di *input gate*

σ = Fungsi sigmoid

$$\tilde{C}_t = \tanh(W_c x_t + U_i h(c-1) + b_c) \quad (3)$$

x_t = input nilai pISPU pada waktu t

\tilde{C}_t = Nilai candidate cell state

W_c = Bobot nilai input di cell ke c

U_i = Output di cell ke c-1

b_c = Bias di cell ke c

\tanh = Fungsi hyperbolic tangent

3) Cell State

Cell state berfungsi sebagai memori tambahan pada jaringan LSTM yang tidak dimiliki oleh RNN biasa. Cell state bertindak sebagai penghubung yang mentransfer informasi yang relevan selama pemrosesan urutan. Adapun persamaan yang digunakan untuk menghitung cell state disajikan pada persamaan 4:

$$C_t = it * C_t + ft * c(t-1) \quad (4)$$

C_t = Nilai Memory cell state

it = Nilai input gate

f_t = forget gate

$c(t-1)$ = Memory cell state pada cell sebelumnya

4) Output Gate

Output gate berfungsi untuk menentukan nilai dari hidden state untuk state berikutnya. Pada tahap ini terdapat dua proses yaitu menghitung output data pencemaran udara sementara (O_t) dan output data pencemaran udara final (h_t). Adapun persamaan yang digunakan untuk menghitung output gate sementara menggunakan persamaan 5, sedangkan untuk output gate final di menggunakan persamaan 6:

$$O_t = \sigma(W_o X_t + U_o h(t-1) + b_o) \quad (5)$$

O_t = Hasil peramalan ISPU sementara

W_o = Bobot nilai input pada waktu ke t,

X_t = Input data ISPU pada waktu ke t

U_o = Bobot untuk output dari waktu ke t-1

$h(t-1)$ = Output data ISPU dari waktu ke t-1

b_o = Bias pada output gate

σ = Fungsi *sigmoid*

$$h_t = O_t * \tanh(C_t) \quad (6)$$

h_t = Output final (hasil peramalan ISPU)

O_t = *Output gate* (hasil peramalan ISPU sementara)

C_t = *Memory cell mate* yang baru

\tanh = Fungsi *hyperbolic tangent*

1.12.5 Proses Peramalan pencemaran udara

Pada peramalan pencemaran udara menggunakan aplikasi **jupyterlab** sebagai wadah untuk menulis syntax bahasa pemrograman dan mengeksekusi/menjalankan syntax yang telah ditulis. Bahasa pemrograman yang digunakan adalah **Python** namun dikemas dalam bentuk **framework** yang bernama **keras**. Pada **framework keras** ini terdapat metode **Long-short Term Memory(LSTM)** yang digunakan untuk peramalan. Berdasarkan dari *website* <https://jupyter.org/> dijelaskan bahwa Jupyterlab adalah lingkungan pengembangan interaktif berbasis web terbaru untuk notebook, kode, dan data. Antarmuka fleksibelnya memungkinkan pengguna untuk mengonfigurasi dan mengatur alur kerja dalam ilmu data, komputasi ilmiah, jurnalisme komputasi, dan pembelajaran mesin. Desain modular mengundang ekstensi untuk memperluas dan memperkaya fungsionalitas. **Framework keras** dijelaskan pada *website* <https://keras.io/about/> bahwa keras adalah API pembelajaran mendalam yang ditulis dalam Python, berjalan di atas platform pembelajaran mesin **TensorFlow**. Ini dikembangkan dengan fokus pada memungkinkan eksperimen cepat. mampu beralih dari ide ke hasil secepat mungkin adalah kunci untuk melakukan penelitian yang baik. Pemilihan *tools* dan bahasa pemrograman di atas untuk digunakan pada penelitian ini karena *tools* dan bahasa pemrograman tersebut paling populer saat ini dan berlisensi bebas untuk digunakan(gratis). Terdapat beberapa tahapan peramalan pencemaran udara sebagai berikut:

1.12.5.1 Preprocessing Data

Preprocessing adalah tahap mempersiapkan data sebaik mungkin dengan tujuan meminimalkan terjadinya *error* pada saat pengolahan data. Pada tahap ini dilakukan normalisasi pada data pencemaran udara, dimana data yang tidak memiliki nilai akan dihapus kemudian dilakukan *scaling*. Pada proses

scaling data pencemaran udara akan ditransformasikan dengan merubah data aktual menjadi data *range interval*. Selain melakukan *scaling* data pada tahap ini juga perlu dilakukan konversi data tanggal dan jam pemantauan pencemaran udara kedalam format *Datetime* (Karyadi, 2022; Khumaidi et al., 2020). Adapun formula *scaling* dengan menggunakan metode *min-max scaling* sebagai berikut:

$$xStand = \frac{x - \text{mean}(x)}{\text{standardeviation}(x)}$$

Dimana:

- x = Data pencemaran udara yang akan dinormalisasi
- xStand = Data pencemaran udara yang telah dinormalisasi
- mean(x) = Nilai rata-rata pencemaran udara
- standar deviation(x) = Standar deviation dari data pencemaran udara

1.12.5.2 Proses *Training*

Langkah selanjutnya adalah *training data* menggunakan algoritma LSTM dan pada proses ini dilakukan peramalan data pencemaran udara. Data yang akan ditraining yaitu data pencemaran udara (PM2.5 dan SO2) hasil normalisasi. Sebelum melakukan *training*, akan dibuat dulu pemodelan LSTM dengan mengatur *hidden layer*, *window size*, *batch size*, *optimizer*, *epoch* dan penentuan fungsi *loss* yang akan digunakan (Khumaidi et al., 2020). Proses *training* dijalankan jika kriteria yang dibutuhkan sudah terpenuhi dan dalam proses *training* digunakan data sebanyak 80% dari jumlah seluruh data pencemaran udara.

1.12.5.3 Proses *Testing*

Tahap selanjutnya setelah melakukan *training* data adalah proses *testing* dimana proses ini merupakan uji model dengan menggunakan sisa data pencemaran udara yang tidak dimasukkan pada proses *training* sebesar 20%. Proses ini menghasilkan data hasil perbandingan antara data prediksi dan data aktual (Moch Farryz Rizkilloh & Sri Widiyanesti, 2022). Hasil dari proses *testing* akan digunakan pada tahap selanjutnya pada evaluasi model.

1.12.5.4 Denormalisasi

Setelah proses *testing* maka data peramalan pencemaran udara sudah bisa diketahui namun data tersebut perlu di denormalisasi kembali menjadi angka

rill karena data sebelumnya merupakan data interval yang telah dinormalisasi (Wiranda & Sadikin, 2019). Adapun formula untuk denormalisasi data sebagai berikut:

$$x_{Norm} = \frac{x - \text{Min}(x)}{\text{Max}(x) - \text{Min}(x)}$$

Dimana:

x_{Norm} = Data hasil denormalisasi

x = Data pencemaran udara

$\text{Max}(x)$ = Nilai maksimum dari data pencemaran udara

$\text{Min}(x)$ = Nilai minimum dari data pencemaran udara

1.12.5.5 Evaluasi

Pada proses ini akan dilakukan evaluasi terhadap kinerja model LSTM dalam melakukan peramalan pencemaran udara dengan menggunakan parameter *Root Mean Square Error* (RMSE) untuk mengukur kevalidan hasil peramalan. *Root Mean Square Error* merupakan parameter yang digunakan untuk mengevaluasi nilai hasil peramalan dengan nilai aktual atau nilai yang dianggap benar. Hasil evaluasi dari RMSE menggambarkan bahwa semakin kecil nilainya (semakin mendekati angka 0 (nol)) maka data peramalan semakin valid (Febrianti et al., 2016). Adapun formula RMSE sebagai berikut:

$$RMSE = \sqrt{\sum \frac{(y^1 - y)^2}{n}}$$

Dimana:

(y^1) = Nilai pencemaran udara hasil prediksi

(y) = Nilai pencemaran udara aktual

n = Jumlah data

Jika hasil evaluasi peramalan pencemaran udara memiliki nilai akurasi yang baik maka model tersebut baik atau layak digunakan untuk melakukan peramalan pencemaran udara 23 tahun kedepan. Jika hasil evaluasi memiliki nilai akurasi yang kurang baik maka kembali melakukan proses *training* dengan pengaturan model yang baru.

1.12.5.6 Klasifikasi Indeks Standar Pencemar Udara

Setelah proses peramalan pencemaran udara dalam bentuk ISPU, selanjutnya dilakukan klasifikasi/kategori agar nilai ISPU mudah dipahami masyarakat. Klasifikasi ISPU dilakukan pada aplikasi jupyterlab dengan mengacu pada Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor P.14/MENLHK/SETJEN/KUM 1/7/2020. Hasil dari klasifikasi ISPU menghasilkan informasi kualitas udara ambien Kota Makassar. Adapun kategori ISPU pada Tabel 5 dan penjelasan nilai kategori ISPU pada Tabel 6.

Tabel 5. Kategori angka rentang ISPU

Kategori	Status Warna	Angka Rentang
Baik	Hijau	1 - 50
Sedang	Biru	51 - 100
Tidak Sehat	Kuning	101 - 200
Sangat Tidak Sehat	Merah	201 - 300
Berbahaya	Hitam	≥ 300

Sumber: Permen LHK No. 14 tahun 2020

Tabel 6. Penjelasan kategori ISPU

Kategori	Keterangan	Apa yang harus dilakukan
Baik	Tingkat pencemaran udara yang sangat baik, tidak memberikan efek negatif terhadap manusia, hewan dan tumbuhan	Sangat baik melakukan kegiatan di luar
Sedang	Tingkat pencemaran udara masih dapat diterima pada kesehatan manusia, hewan dan tumbuhan	Kelompok sensitif : Kurangi aktivitas fisik yang terlalu lama atau berat Setiap orang: Masih dapat beraktivitas di luar

Lanjutan Tabel 6.

Kategori	Keterangan	Apa yang harus dilakukan
Tidak sehat	Tingkat pencemaran udara yang bersifat merugikan pada kesehatan manusia, hewan dan tumbuhan	<p>Kelompok sensitif: Boleh melakukan aktivitas di luar, tetapi mengambil rehat lebih sering dan melakukan aktivitas ringan. Amati gejala berupa batuk atau nafas sesak</p> <p>Penderita asma: Harus mengikuti petunjuk kesehatan untuk asma dan menyimpan obat asma.</p> <p>Penderita penyakit jantung: gejala seperti <i>palpitasi</i>/jantung berdetak lebih cepat, sesak nafas, atau kelelahan yang tidak biasa mungkin mengindikasikan masalah serius.</p> <p>Setiap orang: Mengurangi aktivitas fisik yang terlalu lama di luar ruangan</p>
Sangat tidak sehat	Tingkat pencemaran udara yang dapat meningkatkan resiko kesehatan pada jumlah segmen populasi yang terpapar	<p>Kelompok sensitif: Hindari semua aktivitas di luar. Perbanyak aktivitas di dalam ruangan atau lakukan penjadwalan ulang pada waktu dengan pencemaran udara yang baik.</p> <p>Setiap orang: Hindari aktivitas fisik yang terlalu lama di luar ruangan, pertimbangkan untuk melakukan aktivitas di dalam ruangan</p>
Berbahaya	Tingkat pencemaran udara yang dapat merugikan kesehatan serius pada populasi dan perlu penanganan cepat	<p>Kelompok sensitif: Tetap di dalam ruangan dan hanya melakukan sedikit aktivitas</p> <p>Setiap orang: Hindari semua aktivitas di luar</p>

Sumber: Permen LHK No. 14 tahun 2020

1.12.5.7 Analisis Data Indeks Standar Pencemar Udara

Pada tahapan ini akan dilakukan analisis terhadap data ISPU hasil peramalan. Bentuk analisis yang dilakukan adalah mencari pola/trend perubahan pencemaran udara ambien seperti pola/trend bulanan dan tahunan.

1.13 Identifikasi Sumber Pencemar Udara

Pada tahapan ini akan dilakukan indentifikasi sumber potensi pencemaran udara dan yang menjadi dasar dalam penentuan sumber adalah kendaraan bermotor, industri dan pemukiman. Ketiga sumber tersebut dipilih karena menurut (Indrayani, 2018; Yasir, 2021) ketiganya merupakan sumber utama pencemaran udara di perkotaan. Adapun metode yang digunakan adalah sebagai berikut:

- 1) Mengidentifikasi sumber pencemaran udara dari kendaraan bermotor dengan mengidentifikasi jalan yang sering mengalami kepadatan kendaraan menggunakan aplikasi *google traffic* dan dipadukan dengan aplikasi Sistem Informasi Geografis (SIG). Pada jalan yang mengalami kemacetan atau kepadatan kendaraan akan diberikan titik dengan menambahkan atribut nama jalan serta waktu terjadinya padat kendaraan. Proses identifikasi atau pengamatan dilakukan selama 7 (tujuh) hari kemudian hasilnya akan diakumulasi guna mendapatkan lokasi atau jalan yang berpotensi terjadinya pencemaran udara tinggi dari aktivitas pembakaran bahan bakar kendaraan.
- 2) Mengidentifikasi sumber pencemaran udara dari industri dengan melakukan analisis sebaran industri berdasarkan wilayah kecamatan dengan pendekatan analisis spasial. Data industri dari BPS akan di olah menjadi data spasial menggunakan aplikasi Sistem Informasi Geografis dengan cara data administrasi kecamatan di Kota Makassar ditambahkan data atribut jumlah industri. Data hasil olahan kemudian dibuatkan kelas perbandingan antar kecamatan dengan asumsi bahwa kecamatan yang memiliki jumlah industri terbanyak memiliki potensi terjadinya pencemaran udara lebih besar.
- 3) Mengidentifikasi sumber pencemaran udara dari pemukiman dengan melakukan analisis kepadatan penduduk berdasarkan wilayah kecamatan dengan pendekatan analisis spasial. Metode yang digunakan sama dengan cara identifikasi sumber pencemaran dari industri. Data kepadatan penduduk akan diolah kedalam data spasial dengan menggunakan aplikasi Sistem Informasi Geografis dengan cara menambahkan atribut kepadatan penduduk kedalam administrasi kecamatan. Data hasil olahan kemudian dibuatkan kelas perbandingan antar kecamatan dengan asumsi bahwa kecamatan

yang memiliki kepadatan penduduk paling tinggi memiliki potensi terjadinya pencemaran udara lebih besar.

1.14 Identifikasi Kerapatan Vegetasi

Pentingnya vegetasi sebagai salah satu penutupan lahan karena sebagai fungsi ekologis memiliki peran yang baik dalam menyerap polutan (Nawang Sari & Mussadun, 2018; Nugraheni et al., 2018). Penutupan vegetasi dapat dianalisis dengan menggunakan teknologi penginderaan jarak jauh karena vegetasi memiliki ciri yang mudah diidentifikasi dan salah satu metode yang digunakan adalah metode *Normalized Difference Vegetation Indeks* (NDVI) (Hardianto et al., 2021; Lufilah et al., 2017). Dalam menghitung NDVI kota Makassar maka data yang digunakan adalah data citra Sentinel-2A dengan menggunakan aplikasi Sistem Informasi Geografis. Adapun rumus untuk menghitung nilai NDVI sebagai berikut:

$$NDVI = \frac{(NIR - Red)}{(NIR + Red)}$$

Dimana:

NIR = Reflektan band inframerah dekat untuk sebuah sel/ Band 8

RED = Reflektan band merah untuk sebuah sel/ Band 4

1.15 Penyusunan Arah

Dengan merujuk pada hasil peramalan pencemaran udara, hasil identifikasi sumber pencemaran udara, hasil NDVI dan RTRW maka arahan pengendalian pencemaran udara siap disusun dengan pendekatan analisis spasial. Penyusunan arahan dibagi dalam 2 (dua) bagian berdasarkan sumber pencemar.

1.15.1 Arahan Berdasarkan Sumber Tidak Bergerak

Proses penyusunan arahan pengendalian pencemaran udara dari sumber tidak bergerak menggunakan data sumber pencemar dari industri dan sumber pencemar dari pemukiman. Kedua data tersebut di *overlay* menggunakan aplikasi Sistem Informasi Geografis, kemudian di *overlay* dengan data NDVI dan administrasi kecamatan. Data hasil *overlay* kemudian di analisis untuk mengidentifikasi potensi pencemaran udara dan NDVI setiap kecamatan. Kemudian di *overlay* dengan RTRW untuk mengetahui peruntukan penggunaan

ruang setiap wilayah. Arahan pengendalian pencemaran udara disesuaikan dengan pola/*trend* hasil peramalan pencemaran udara. Jika pola/*trend* peramalan pencemaran udara mengalami peningkatan pencemaran yang tinggi dan cepat maka arahan pengendalian harus diterapkan secepat mungkin sebelum mencapai batas tingkat pencemaran udara yang berbahaya. Adapun arahan pengendalian pencemaran udara untuk sumber tidak bergerak sebagai berikut:

- 1) Penambahan Ruang Terbuka Hijau (RTH)
- 2) Sosialisasi penggunaan peralatan rumah tangga ramah lingkungan
- 3) Perketat Pemantauan emisi industri

1.15.2 Arahan Berdasarkan Sumber Bergerak

Proses penyusunan arahan pengendalian pencemaran udara dari sumber bergerak menggunakan data jalan dengan atribut lokasi dan waktu kemacetan lalu lintas. Data jalan di *overlay* dengan NDVI menggunakan aplikasi Sistem Informasi Geografis dengan tujuan mengidentifikasi NDVI disekitar lokasi kemacetan lalu lintas. Setelah itu di *overlay* dengan RTRW dengan tujuan mengidentifikasi peruntukan penggunaan ruang di sekitar lokasi kemacetan lalu lintas. Arahan pengendalian pencemaran udara disesuaikan dengan *trend* hasil peramalan pencemaran udara. Jika *trend* peramalan pencemaran udara mengalami peningkatan pencemaran yang tinggi dan cepat maka arahan pengendalian harus diterapkan secepat mungkin sebelum mencapai batas tingkat pencemaran udara yang berbahaya. Adapun arahan pengendalian pencemaran udara untuk sumber tidak bergerak sebagai berikut:

- 1) Penambahan Ruang Terbuka Hijau (RTH)
- 2) Mengurai kepadatan kendaraan
- 3) Menguji emisi kendaraan bermotor
- 4) Penggunaan transportasi ramah lingkungan

1.15.3 Bagan Alur Pengolahan Data

Berdasarkan dari penjelasan pengolahan data di atas, maka alur pengolahan data secara garis besar dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7: Bagan Alur Pengolahan Data Peramalan dan Arahan Pengendalian Pencemaran Udara Ambien

1.15.4 Dasar Arahan

Arahan pengendalian pencemaran udara ambien Kota Makassar yang digunakan pada penelitian ini mengacu kepada regulasi dan hasil penelitian. Adapun jenis arahan dan acuannya sebagai berikut:

1.15.4.1 Penambahan Ruang Terbuka Hijau (RTH)

Arahan ini bertujuan untuk mengurangi pencemaran udara yang bersumber dari industri dan pemukiman. Ruang terbuka hijau merupakan salah satu alternatif yang digunakan untuk mereduksi pencemaran udara (Abdullah & Boedisantoso, 2019; Kusminingrum, 2008; Rawung, 2015; Susanto & Komarawidjaja, 2018). RTH diatur dalam Undang-undang Nomor 26 tahun 2007 tentang penataan ruang bahwa setiap kota wajib memiliki ruang terbuka hijau minimal 30 % dari total luas wilayah kota. Pedoman penyediaan dan pemanfaatan ruang terbuka hijau di kawasan perkotaan di atur dalam peraturan Menteri Pekerjaan Umum Nomor: 05/PRT/M2008. Penataan dan pengelolaan ruang terbuka hijau juga diatur pada peraturan daerah Kota Makassar No 3 tahun 2014. Beberapa jenis vegetasi yang memiliki kemampuan menyerap polutan dan baik untuk RTH di pemukiman dan industri adalah pohon dadap, kiara, jambu batu, jambu air, dan pohon tanjung. Pemilihan jenis dan penanaman vegetasi untuk RTH secara detail mengacu pada petunjuk teknis penanaman spesies pohon penyerap polutan udara yang di terbitkan oleh Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK,2015).

1.15.4.2 Sosialisasi Penggunaan Peralatan Rumah Tangga Ramah Lingkungan

Arahan ini bertujuan untuk mengurangi pencemaran udara dari aktifitas rumah tangga sebagaimana arahan ini sejalan dengan peraturan Menteri Kesehatan Nomor 1077/MENKES/PER/V/2011 tentang pedoman penyehatan udara dalam ruangan rumah.

1.15.4.3 Perketat Pemantauan Emisi Industri

Arahan ini bertujuan untuk menekan pencemaran udara langsung dari sumber pencemar. Arahan ini berdasarkan peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor 11 tahun 2021 tentang baku mutu emisi mesin dengan pembakaran dalam. Permen LHK Nomor 13 tahun 2021 tentang sistem informasi

pemantauan emisi industri. Sanksi untuk industri yang menghasilkan emisi melebihi baku mutu mengacu pada Peraturan Pemerintah Nomor 22 tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup.

1.15.4.4 Penambahan Ruang Terbuka Hijau (RTH) di Sekitar Lokasi Rawan Padat Kendaraan.

Arahan ini sama halnya dengan arahan penambahan RTH di area pemukiman dan industri, namun pada arahan ini penempatan lokasi arahan di sekitar daerah rawan kemacetan dengan tujuan mereduksi pencemaran udara dari emisi gas buang kendaraan bermotor. RTH merupakan salah satu alternatif yang baik dalam mereduksi pencemaran udara dari emisi gas buang kendaraan (Nugraheni et al., 2018; Wa Ode Dwi Muja Lestari et al., 2021; Ym et al., 2021). Beberapa jenis vegetasi yang memiliki kemampuan menyerap polutan dan baik untuk RTH di sekitar lokasi padat kendaraan adalah pohon sonokeling, trengguli, asam keranji, angkana, pohon tanjung dan tanaman perdu seperti puring, canna, dan soka jepang. Pemilihan jenis dan penanaman vegetasi untuk RTH secara detail mengacu pada petunjuk teknis penanaman spesies pohon penyerap polutan udara yang diterbitkan oleh Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK, 2015).

1.15.4.5 Mengurangi Kepadatan Kendaraan

Tujuan dari arahan ini adalah untuk mengurangi tingkat kemacetan/kepadatan kendaraan. Semakin tinggi tingkat kemacetan/kepadatan kendaraan maka semakin tinggi tingkat konsumsi bahan bakar yang mengakibatkan tinggi pula pencemaran yang dihasilkan (Ismiyati et al., 2014; Purwoko & Prastiwi, 2019; Putra et al., 2016). Untuk mengatasi pencemaran udara dari gas buang kendaraan maka dibutuhkan manajemen lalu lintas yang tepat (Kusminingrum, 2007).

1.15.4.6 Menguji Emisi Kendaraan Bermotor

Arahan ini bertujuan untuk menekan pencemaran udara langsung dari sumbernya dimana setiap kendaraan wajib melakukan uji emisi dan kendaraan yang boleh beroperasi hanya yang memenuhi standar baku mutu emisi gas buang kendaraan. Arahan ini tertuang dalam peraturan menteri LHK Nomor P.20/MENLHK/SETJEN/KUM.1/3/2017 tentang baku mutu emisi gas buang

kendaraan bermotor tipe baru kategori M, kategori N, dan kategori O. Arahan ini juga tertuang dalam Peraturan Gubernur Sulawesi Selatan Nomor 69 tahun 2010 tentang baku mutu dan kriteria kerusakan lingkungan hidup.

1.15.4.7 Penggunaan Transportasi Ramah Lingkungan

Arahan ini bertujuan untuk menekan pencemaran udara langsung dari sumbernya dengan menggunakan transportasi ramah lingkungan. Salah satu model transportasi ramah lingkungan yang populer saat ini adalah kendaraan yang menggunakan energi listrik. Menurut Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, penggunaan transportasi ramah lingkungan khususnya kendaraan bermotor listrik dapat mengurangi emisi dari kendaraan bermotor (KESDM,2022). Arahan ini berdasarkan pada Peraturan Presiden No. 55 Tahun 2019, tentang percepatan program kendaraan bermotor listrik berbasis baterai (*battery electric vehicle*). Arahan ini juga berdasar pada Instruksi Presiden No. 7 Tahun 2022 tentang penggunaan kendaraan bermotor listrik berbasis baterai sebagai kendaraan dinas operasional dan/atau kendaraan perorangan dinas instansi pemerintah pusat dan pemerintah daerah.