

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

Dalam pelaksanaan penelitian ini diperlukan suatu metode yang berfungsi sebagai pedoman dalam memperoleh hasil yang sesuai dengan tujuan penelitian “Pemodelan Spasial dalam Menghadapi Kerentanan Kekeringan di Kota Kupang.” Pada bab ini dijelaskan mengenai metode pengumpulan data, yaitu pendekatan yang digunakan untuk memperoleh data dan informasi yang relevan dengan tema penelitian, serta metode analisis, yaitu teknik yang digunakan untuk mengolah dan menganalisis data spasial maupun nonspasial guna menghasilkan model dan interpretasi tingkat kerentanan kekeringan di wilayah studi.

3.2 Metode Pendekatan dan Jenis Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan deskriptif kuantitatif berbasis analisis spasial, yang dirancang untuk memahami fenomena kerentanan kekeringan di Kota Kupang secara komprehensif melalui pengukuran, pengolahan, dan interpretasi data numerik. Pendekatan deskriptif kuantitatif dipilih karena mampu memberikan gambaran faktual mengenai kondisi eksisting berdasarkan variabel terukur yang dapat dianalisis secara statistik (Sugiyono, 2019). Fenomena kekeringan di wilayah perkotaan seperti Kota Kupang memiliki sifat yang kompleks dan dipengaruhi oleh berbagai faktor fisik dan nonfisik sehingga memerlukan pendekatan yang sistematis dan terukur untuk memperoleh representasi ilmiah yang kuat. Dengan menggunakan pendekatan ini, penelitian berfokus untuk menggambarkan pola, intensitas, dan tingkat kerentanan kekeringan tanpa melakukan manipulasi atau perlakuan terhadap variabel yang diteliti.

Pendekatan ini kemudian dipadukan dengan analisis spasial melalui pemanfaatan teknologi Sistem Informasi Geografis (SIG) dan penginderaan jauh. Analisis spasial menjadi krusial karena kekeringan merupakan fenomena yang memiliki dimensi geografis yang kuat, berbeda antar wilayah, dan bergantung pada karakteristik tutupan lahan, kondisi vegetasi, dan aktivitas manusia di setiap lokasi. Burrough dan McDonnell (2015) menyatakan bahwa analisis spasial diperlukan untuk memahami variasi ruang dalam fenomena lingkungan serta interaksi antar variabel pada skala lokal hingga regional. Melalui analisis spasial, penelitian ini dapat mengidentifikasi wilayah dengan tingkat kerentanan yang berbeda, menemukan pola distribusi kerentanan kekeringan, serta menganalisis kaitannya dengan pertumbuhan penduduk dan intensitas pembangunan. Dengan demikian, pendekatan spasial memberikan

pemahaman yang lebih mendalam dan detail mengenai kondisi biofisik Kota Kupang.

Dalam konteks penelitian ini, pendekatan kuantitatif diwujudkan melalui pemanfaatan data citra satelit untuk menghitung indeks kekeringan berupa *Normalized Difference Drought Index* (NDDI). Perhitungan NDDI dilakukan melalui pemrosesan indeks NDVI dan NDWI sesuai konsep Gu et al. (2007) yang menyatakan bahwa kedua indeks vegetasi tersebut dapat menggambarkan kondisi kelembapan vegetasi dan tanah secara akurat pada wilayah kering. Selain data biofisik, pendekatan kuantitatif juga mencakup penggunaan data statistik kependudukan dari BPS untuk mengukur tingkat tekanan penduduk terhadap sumber daya air, serta analisis area terbangun untuk memahami dampak urbanisasi terhadap daya resap air. Seluruh data ini diperlakukan sebagai variabel kuantitatif yang dapat diukur, diolah, dan dibandingkan sehingga penelitian dapat menghasilkan temuan yang objektif dan dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah.

Jenis penelitian ini dapat dikategorikan sebagai penelitian deskriptif-prediktif. Penelitian deskriptif digunakan untuk menggambarkan kondisi eksisting tingkat kekeringan dan kerentanannya pada periode 2019–2023. Sementara sifat prediktif berasal dari penerapan pemodelan *Machine Learning*, khususnya algoritma Random Forest, untuk memproyeksikan tingkat kerentanan kekeringan di Kota Kupang pada tahun 2030 dan 2040. Model Random Forest dipilih karena mampu menangani hubungan nonlinear antarvariabel, memiliki akurasi prediksi yang tinggi, serta terbukti efektif dalam penelitian-penelitian sebelumnya terkait peramalan kekeringan (Park, 2019; Wu & Chen, 2017). Kombinasi kedua jenis penelitian ini memungkinkan studi untuk tidak hanya menggambarkan kondisi saat ini, tetapi juga memberikan prediksi yang berbasis data yang relevan bagi perencanaan kota ke depan.

Secara keseluruhan, penelitian ini memadukan pendekatan kuantitatif, analisis spasial, dan pemodelan prediktif untuk menghasilkan gambaran menyeluruh mengenai kerentanan kekeringan di Kota Kupang. Pendekatan ini memungkinkan peneliti untuk menjelaskan hubungan antar variabel biofisik dan sosial yang memengaruhi tingkat kekeringan, serta menyediakan dasar ilmiah bagi rekomendasi perencanaan kota tangguh. Dengan demikian, metode penelitian yang digunakan tidak hanya memberikan gambaran deskriptif mengenai kondisi eksisting, tetapi juga memiliki nilai strategis dalam menyusun kebijakan adaptasi dan mitigasi kekeringan di masa mendatang.

3.3 Variabel Penelitian

Berdasarkan sintesis tinjauan pustaka, diperoleh sejumlah variabel yang digunakan untuk memahami karakteristik wilayah yang diamati serta menjadi batasan yang jelas dalam pelaksanaan penelitian. Teori-teori yang menjadi dasar penentuan variabel tersebut telah teruji melalui berbagai penelitian terdahulu dan karena itu dapat dijadikan landasan ilmiah yang kuat bagi penelitian “Pemodelan Spasial dalam Menghadapi Kerentanan Kekeringan di Kota Kupang.”

Dalam penelitian ini, variabel yang digunakan disusun ke dalam tiga tahapan utama sesuai dengan sasaran penelitian, yaitu: (1) merumuskan tingkat kekeringan melalui analisis indeks NDDI sebagai indikator biofisik; (2) mengidentifikasi faktor-faktor yang berpengaruh terhadap kerentanan kekeringan, khususnya variabel populasi, area terbangun, dan kondisi lingkungan yang memengaruhi kapasitas adaptasi wilayah; serta (3) menentukan tingkat kerentanan kekeringan melalui integrasi variabel biofisik dan sosial dalam analisis spasial dan pemodelan prediksi.

Ketiga tahapan tersebut menjadi kerangka kerja variabel yang saling berhubungan dalam menjelaskan kondisi aktual dan proyeksi kerentanan kekeringan di Kota Kupang. Dengan struktur ini, penelitian dapat menghasilkan pemahaman menyeluruh mengenai dinamika kekeringan serta potensi risiko yang mungkin terjadi di masa mendatang.

1. Mengidentifikasi Tingkat Kekeringan Melalui Analisis Indeks NDDI

Tabel 3 1 Variabel dan Definisi Operasional

Variabel	Definisi Operasional	Indikator	Sumber
<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>	<i>Normalized Difference Vegetation Index</i> (NDVI) adalah indeks vegetasi yang digunakan untuk mengukur tingkat kehijauan, kesehatan, dan kerapatan vegetasi melalui perbandingan nilai reflektansi kanal	• Nilai NDVI (-1 sampai +1) • Nilai rendah mengindikasikan vegetasi stres / area gersang • Nilai tinggi mengindikasikan vegetasi sehat / rapat	Rouse et al., 1974

Variabel	Definisi Operasional	Indikator	Sumber
	Near Infrared (NIR) dan Red pada citra satelit (Rouse et al. 1974).		
<i>Normalized Difference Water Index</i>	<i>Normalized Difference Water Index</i> (NDWI) adalah indeks yang digunakan untuk mengidentifikasi kandungan air pada vegetasi dan permukaan tanah melalui perbedaan reflektansi antara kanal Green dan Near Infrared (NIR) pada citra satelit (Gao, B, 1996).	• Nilai NDWI (-1 s/d +1) • NDWI rendah mengindikasikan kelembapan rendah, potensi kekeringan • NDWI tinggi mengindikasikan kandungan air tinggi/tanah lembap	Gao, 1996
<i>Normalized Difference Drought Index</i>	<i>Normalized Difference Drought Index</i> (NDDI) adalah indeks kekeringan yang dikembangkan untuk mengukur tingkat kekeringan vegetasi dan permukaan tanah melalui kombinasi dua indeks utama, yaitu <i>Normalized Difference Vegetation Index</i> (NDVI) dan <i>Normalized Difference Water Index</i> (NDWI) (Gu, et al, 2007).	• Nilai NDDI (-1 s/d +1) • Nilai rendah mengindikasikan kondisi normal / tidak kering • Nilai tinggi mengindikasikan kekeringan sedang-berat	Gu et al., 2007

Sumber: Hasil Sintesa, 2025

2. Mengidentifikasi dampak kerentanan kekeringan berdasarkan aspek sosial, fisik, ekonomi, dan lingkungan di Kota Kupang

Tabel 3 2 Variabel dan Definisi Operasional

Variabel	Definisi Operasional	Indikator	Sumber
<i>Aspek Fisik</i>			
Debit Sumber Air Baku	Penurunan kuantitas air yang keluar dari mata air (springs) dan sumur bor utama (groundwater) yang digunakan untuk suplai air domestik/PDAM.	Persentase penurunan debit air (liter/detik) di sumber-sumber utama.	Wilhite & Glantz, 1985; Tallaksen & Van Lanen, 2004
Kebakaran Lahan	Peningkatan potensi dan frekuensi kebakaran pada lahan kering, padang savana, dan vegetasi yang dipicu oleh tingginya suhu, kelembaban rendah, dan kondisi vegetasi yang sangat kering.	Luas lahan yang terbakar (Hektare) yang tercatat oleh BPBD.	Fire Weather Index (FWI): (Van Wagner, 1987)
Ketersediaan ruang resapan	Menurunnya kemampuan lahan terbuka, RTH (Ruang Terbuka Hijau), dan daerah tangkapan air (DTA) untuk menyerap dan menyimpan air hujan, yang diperburuk oleh kekeringan dan alih fungsi lahan.	Luas RTH (% per kelurahan)	IPCC (2021)
<i>Aspek Sosial</i>			
Akses air bersih	Derajat kemudahan masyarakat dalam memperoleh air layak pakai selama masa kekeringan yang diukur melalui sumber air utama rumah tangga, jumlah jam/ketersediaan air per hari, dan persentase rumah tangga yang mengalami kesulitan akses air.	Persentase rumah tangga kesulitan air, sumber air utama, jam akses	UNDRR (2021); WHO (2015)

Variabel	Definisi Operasional	Indikator	Sumber
Kepadatan penduduk	Jumlah penduduk per kilometer persegi di suatu kelurahan yang menunjukkan tingkat tekanan kebutuhan air terhadap ketersediaan sumber daya air selama kekeringan.	Kepadatan Jiwa/km ²	Mazdiyasni & AghaKouchak (2015)
Kelompok Rentan	Persentase penduduk dari kelompok rentan (balita, lansia, dan keluarga berpenghasilan rendah) yang lebih sensitif terhadap dampak kekeringan karena keterbatasan akses ekonomi dan fisik terhadap sumber air.	Persentase lansia, balita, keluarga miskin	UNDRR (2021)
Dampak kesehatan	Jumlah kasus penyakit yang dipicu oleh kekurangan air bersih, seperti diare, penyakit kulit, atau gangguan sanitasi, yang meningkat selama periode kekeringan.	Kasus diare, penyakit kulit, gangguan sanitasi	WHO (2015)
<i>Aspek Ekonomi</i>			
Beban Biaya	Jumlah pengeluaran rumah tangga untuk memperoleh air (galon, air tangki, PDAM) selama masa kekeringan, yang meningkat seiring menurunnya ketersediaan air.	Pengeluaran bulanan air, harga air tangki	Stoler et al, 2019
Produktivitas masyarakat	Penurunan kegiatan ekonomi seperti UMKM, usaha rumah makan, laundry, dan sektor informal yang bergantung pada	Gangguan aktivitas UMKM, kehilangan jam kerja	Brouwer, 2007

Variabel	Definisi Operasional	Indikator	Sumber
	ketersediaan air bersih.		
Penurunan Hasil Pangan	Peningkatan konflik alokasi sumber daya air utama yang terbatas (sungai, mata air, atau waduk) antara berbagai sektor pengguna (seperti kebutuhan domestik/PDAM Kota Kupang vs. irigasi pertanian), yang memicu ketidakpastian pasokan air untuk produksi pangan.	Rasio alokasi air yang diprioritaskan untuk PDAM (domestik) dibandingkan kebutuhan irigasi pertanian selama puncak musim kemarau	Homer-Dixon, 1999
Aspek Lingkungan			
Penurunan kualitas vegetasi	Kondisi lingkungan yang ditandai oleh menurunnya tingkat kehijauan (NDVI rendah), meningkatnya area gersang, dan kerusakan ekosistem hijau.	Penurunan NDVI, peningkatan area gersang	UNEP (2019)
Risiko kebakaran lahan	Potensi terjadinya kebakaran lahan dan vegetasi yang meningkat seiring rendahnya kelembapan tanah dan tingginya suhu, ditunjukkan melalui jumlah hotspot atau catatan kejadian kebakaran.	Jumlah hotspot, area rawan terbakar	UNEP (2019)

Sumber: Hasil Sintesa, 2025

3. Menyusun pemodelan spasial kerentanan kekeringan

Variabel	Definisi Operasional	Indikator	Sumber
<i>Normalized Difference Drought Index</i>	<i>Normalized Difference Drought Index</i> (NDDI) adalah indeks kekeringan yang dikembangkan untuk mengukur tingkat kekeringan vegetasi dan permukaan tanah melalui kombinasi dua indeks utama, yaitu <i>Normalized Difference Vegetation Index</i> (NDVI) dan <i>Normalized Difference Water Index</i> (NDWI) (Gu, et al, 2007).	• Nilai NDDI ($-1 \leq \text{NDDI} \leq 1$) • Nilai rendah mengindikasikan kondisi normal / tidak kering • Nilai tinggi mengindikasikan kekeringan sedang-berat	(Gu et al, 2007; Renza et al, 2010)
Area Terbangun	Area terbangun adalah persentase luasan wilayah yang telah berubah menjadi permukiman, infrastruktur, fasilitas publik, atau penggunaan lahan terbangun lainnya. Semakin luas area terbangun, semakin rendah kapasitas resapan air, sehingga meningkatkan potensi kekeringan. Variabel ini digunakan untuk mengidentifikasi intensitas urbanisasi dan dampaknya pada kondisi kekeringan.	Luas area terbangun (hektar / %)	Orimoloye et al., 2019; Mistry & Suryanarayana, 2023; Zia-ul-Minallah et al., 2022
Populasi Penduduk	Populasi penduduk menggambarkan jumlah penduduk di	• Jumlah penduduk per kelurahan	Smirnov et al., 2016; BPS Kota Kupang, 2023

Variabel	Definisi Operasional	Indikator	Sumber
	suatu wilayah yang berpotensi terdampak kekeringan. Pertumbuhan populasi meningkatkan tekanan terhadap sumber daya air dan memperburuk risiko kekeringan, terutama pada wilayah yang sudah rentan. Variabel ini digunakan untuk mengukur tekanan demografis terhadap kebutuhan air.	Kepadatan penduduk (jiwa/km²)	

Sumber: Hasil Sintesa, 2025

3.4 Metode Pelaksanaan Studi

Metode pelaksanaan studi terdiri dari tahap persiapan dan tahap pelaksanaan, berikut merupakan penjelasan terkait kedua tahap tersebut.

3.4.1 Tahap Persiapan

Tahap persiapan merupakan langkah awal yang dilakukan sebelum pelaksanaan penelitian dan analisis spasial pada wilayah studi. Tahapan ini penting untuk memastikan seluruh kebutuhan penelitian terpenuhi, baik dari segi data, metode, maupun pemahaman awal terhadap kondisi Kota Kupang. Pengamatan pendahuluan diperlukan agar peneliti memperoleh gambaran umum mengenai permasalahan kekeringan, pola spasial wilayah, serta potensi indikator yang akan digunakan dalam analisis kerentanan. Adapun kegiatan yang dilakukan pada tahap persiapan meliputi:

1. Menyusun latar belakang, rumusan masalah, tujuan, sasaran, dan ruang lingkup penelitian. Penyusunan latar belakang dilakukan berdasarkan urgensi permasalahan kekeringan di Kota Kupang, kajian ilmiah mengenai indeks kekeringan, serta kebutuhan perencanaan wilayah perkotaan semi-arid. Rumusan masalah, tujuan, sasaran, dan ruang lingkup disusun untuk mengarahkan penelitian pada pembahasan mengenai pemodelan spasial kerentanan kekeringan.

2. Penentuan Wilayah Studi. Pemilihan Kota Kupang sebagai wilayah penelitian didasarkan pada karakteristik iklim semi-arid, tingginya kerentanan terhadap kekeringan, serta ketersediaan data spasial yang mendukung analisis. Pemilihan wilayah studi juga mempertimbangkan relevansi fenomena kekeringan yang terjadi dan kesesuaiannya dengan tujuan penelitian.
3. Kajian Teori dan Literatur. Kajian teori dilakukan untuk memperkuat dasar konseptual penelitian, meliputi teori terkait indeks kekeringan (NDVI, NDWI, NDDI), konsep kerentanan dan dampak kekeringan, serta penggunaan *Machine Learning* dalam pemodelan spasial. Studi literatur digunakan untuk menyusun variabel penelitian dan membandingkan hasil penelitian terdahulu.
4. Perumusan Metode Penelitian. Tahap ini mencakup penyusunan pendekatan penelitian, lokasi dan waktu penelitian, definisi operasional variabel, alat dan perangkat lunak yang digunakan (GIS dan *Machine Learning*), kebutuhan data spasial dan nonspasial, serta teknik perolehan dan analisis data. Penelitian ini menggunakan pendekatan deskriptif kuantitatif dengan analisis spasial, yang terintegrasi dengan pemodelan prediksi berbasis *Machine Learning*.
5. Penyusunan Teknis Pelaksanaan Penelitian. Tahap ini meliputi penentuan alur kerja penelitian, kebutuhan data citra satelit, data kependudukan, serta data penggunaan lahan. Perencanaan teknis juga mencakup desain pengolahan data spasial, verifikasi data sekunder, dan prosedur analisis NDDI serta pemodelan Random Forest. Tahap akhir dari proses persiapan adalah menyusun rencana pengolahan data sehingga proses analisis dapat dilakukan secara sistematis dan akurat.

3.4.2 Tahap Pelaksanaan

Tahap pelaksanaan merupakan proses inti dalam pengumpulan dan pengolahan data penelitian yang digunakan untuk menganalisis kerentanan kekeringan di Kota Kupang. Pada tahap ini, seluruh data spasial dan nonspasial dikumpulkan, diproses, dan dianalisis menggunakan pendekatan kuantitatif dan teknik pemodelan spasial. Fokus utama tahap pelaksanaan adalah memperoleh informasi yang akurat mengenai tingkat kekeringan, faktor penyebab, serta prediksi kerentanan di masa mendatang. Adapun tahapan pelaksanaan meliputi:

1. Perumusan Masalah dan Identifikasi Kondisi Kekeringan di Kota Kupang. Tahap ini dilakukan dengan menelaah kondisi

biofisik Kota Kupang, termasuk tingkat kekeringan berdasarkan nilai indeks NDDI, serta memahami dampak yang ditimbulkan pada wilayah-wilayah dengan kerentanan tinggi. Proses ini bertujuan untuk memperjelas arah analisis dan memastikan bahwa penelitian menjawab isu utama terkait kerentanan kekeringan di wilayah perkotaan semi-arid.

2. Studi Pustaka. Studi pustaka dilakukan untuk mempelajari teori-teori dasar terkait indeks kekeringan (NDVI, NDWI, NDDI), konsep kerentanan dan dampak kekeringan, serta teknik pemodelan *Machine Learning* yang relevan. Selain itu, studi literatur juga digunakan untuk mengumpulkan referensi data sekunder dan membandingkan hasil penelitian terdahulu dengan konteks Kota Kupang.
3. Pengumpulan Data Spasial dan Nonspasial. Tahap ini meliputi pengumpulan citra satelit (Landsat atau MODIS) untuk menghitung indeks biofisik, data kependudukan untuk menganalisis tekanan sosial, data area terbangun, serta informasi lingkungan yang mendukung proses analisis. Semua data dikumpulkan dari sumber resmi seperti BPS, BMKG, dan portal data spasial.
4. Pengolahan dan Analisis Data. Data yang terkumpul kemudian diolah menggunakan perangkat lunak sistem informasi geografis (SIG) dan *Machine Learning*. Analisis dilakukan dengan menghitung NDDI, melakukan *Zonal Statistics* per kelurahan, menganalisis dampak kerentanan dari aspek fisik, sosial, ekonomi, dan lingkungan, serta menyusun model prediksi spasial menggunakan metode Random Forest.
5. Penarikan Kesimpulan. Tahap akhir pelaksanaan adalah menyimpulkan hasil analisis berdasarkan temuan spasial dan prediksi model. Kesimpulan disusun untuk menjawab tujuan utama penelitian, yaitu memahami pola kerentanan kekeringan serta memberikan dasar rekomendasi bagi pemerintah dan pemangku kepentingan di Kota Kupang.

3.5 Tahapan Penelitian

Tahapan-tahapan dari jalannya penelitian ini dimulai dari tahap pendahuluan, tahap penentuan rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, tahap pengumpulan data, tahap analisis, tahap pembahasan, tahap penarikan kesimpulan, dan tahap pembuatan laporan. Creswel (2008) telah menyajikan tahapan khusus penelitian kualitatif. Masing-masing langkah penelitian diuraikan secara rinci sebagai berikut:

A. Identifikasi Masalah

Pada penelitian ini, peneliti memulai dengan mengidentifikasi permasalahan yang menjadi sasaran penelitian, yaitu menyangkut fenomena dan isu utama yang hendak dikaji, yaitu kerentanan kekeringan di wilayah perkotaan Kota Kupang. Permasalahan kekeringan di Kota Kupang terjadi akibat kombinasi antara perubahan iklim global, pertumbuhan penduduk yang pesat, serta perluasan area terbangun yang mengurangi daya serap air dan ruang hijau. Kondisi ini menimbulkan tekanan terhadap ketersediaan sumber daya air dan berpotensi mengganggu ketahanan lingkungan serta kesejahteraan masyarakat kota.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini berfokus untuk mengidentifikasi serta memodelkan kondisi kerentanan kekeringan secara spasial dengan dukungan analisis citra satelit dan data demografis. Secara umum, terdapat tiga (3) sasaran utama yang ingin dicapai dalam penelitian ini, yaitu:

- 1) Mengidentifikasi tingkat kerentanan kekeringan di Kota Kupang, dengan menggunakan pendekatan indeks NDDI (*Normalized Difference Drought Index*) untuk mengetahui sebaran spasial dan kategori tingkat kekeringan.
- 2) Mengidentifikasi dampak kerentanan kekeringan dari berbagai aspek, baik biofisik, sosial, maupun lingkungan, melalui analisis terhadap variabel populasi, area terbangun, serta kondisi ruang terbuka hijau dan ketersediaan air bersih.
- 3) Membangun pemodelan spasial prediksi kerentanan kekeringan di Kota Kupang, melalui pendekatan pembobotan dan algoritma *Machine Learning* (Random Forest) dengan menggunakan tiga variabel utama, yaitu NDDI, populasi, dan area terbangun untuk menghasilkan peta prediksi tahun 2030 dan 2040.

Melalui ketiga sasaran tersebut, penelitian ini diharapkan mampu memberikan gambaran yang komprehensif mengenai kondisi eksisting dan proyeksi kerentanan kekeringan di Kota Kupang, sekaligus menjadi dasar bagi perencanaan kota yang tangguh dan adaptif terhadap perubahan iklim.

B. Tinjauan Pustaka

Tinjauan pustaka dalam penelitian ini dilakukan secara sistematis untuk mengidentifikasi konsep, teori, dan hasil penelitian terdahulu yang relevan dengan topik kerentanan kekeringan perkotaan. Proses

penelusuran literatur dilakukan dengan pendekatan Systematic Literature Review (SLR) yang mengacu pada pedoman PRISMA 2020 (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) yang menekankan transparansi proses seleksi dan sintesis data (Page et al., 2021). Fokus utama kajian literatur mencakup tiga hal, yaitu: (1) teori dan perhitungan *Normalized Difference Drought Index* (NDDI) yang dikembangkan oleh Gu et al. (2007) sebagai penggabungan antara NDVI dan NDWI untuk mendeteksi kondisi kekeringan secara spasial; (2) penerapan metode *Zonal Statistics* yang dikemukakan oleh Haag et al. (2020) untuk menghitung nilai rata-rata indeks dalam batas administrasi wilayah; dan (3) pemanfaatan model *Machine Learning* seperti Random Forest (Breiman, 2001; Park, 2019) untuk prediksi spasial tingkat kerentanan kekeringan.

Literatur juga menyoroti bahwa faktor sosial seperti kepadatan penduduk dan perluasan area terbangun memiliki pengaruh signifikan terhadap meningkatnya risiko kekeringan di kawasan urban (Smirnov et al., 2016; Orimoloye et al., 2019). Dengan demikian, kajian pustaka ini menjadi dasar teoritis dalam menentukan variabel penelitian dan merancang kerangka pemodelan spasial di Kota Kupang.

C. Tujuan Penelitian

Tujuan utama penelitian ini adalah untuk menganalisis dan memodelkan kerentanan kekeringan secara spasial di Kota Kupang dengan menggunakan pendekatan kuantitatif dan teknologi penginderaan jauh. Secara rinci, tujuan penelitian dibagi menjadi tiga sasaran: (1) mengidentifikasi tingkat kerentanan kekeringan melalui analisis NDDI berbasis citra satelit; (2) mengidentifikasi dampak kerentanan kekeringan dari berbagai aspek biofisik, sosial, dan lingkungan; serta (3) menyusun model spasial prediksi kerentanan kekeringan menggunakan algoritma Random Forest dengan tiga variabel utama, yaitu NDDI, populasi, dan area terbangun. Ketiga tujuan ini diharapkan dapat menghasilkan peta zonasi risiko kekeringan dan prediksi tren hingga tahun 2040 sebagai dasar perencanaan kota tangguh di wilayah semi-arid seperti Kupang.

D. Pengumpulan Data

Data penelitian dikumpulkan melalui kombinasi data spasial dan statistik sekunder. Data spasial berupa citra satelit Landsat 8 dan MODIS untuk periode 2019–2023 diperoleh dari Climate Engine dan EO Browser untuk menghitung indeks NDVI, NDWI, dan NDDI (Gu et al., 2007). Data sosial dan fisik wilayah mencakup jumlah penduduk per

kelurahan dari BPS Kota Kupang, serta luas area terbangun dan ruang terbuka hijau (RTH) hasil klasifikasi citra satelit. Metode pengumpulan ini mengikuti pendekatan geospasial data integration, yang menggabungkan data raster (indeks kekeringan) dengan data vektor (batas administrasi kelurahan) menggunakan teknik *Zonal Statistics* (Haag et al., 2020).

Pendekatan ini memungkinkan peneliti untuk memperoleh gambaran spasial yang lebih rinci mengenai kondisi kekeringan dan faktor-faktor penyusunnya di tingkat kelurahan, sehingga hasilnya dapat digunakan dalam model prediksi yang lebih akurat.

E. Analisis Data

Tahapan analisis data mengacu pada kerangka CRISP-DM (Cross Industry Standard Process for Data Mining) (Chapman et al., 2000), yang meliputi enam langkah utama: understanding, preparation, modeling, evaluation, dan deployment. Pertama, dilakukan perhitungan NDVI, NDWI, dan NDDI untuk setiap tahun pengamatan, kemudian nilai NDDI diolah menggunakan teknik *Zonal Statistics* untuk memperoleh nilai rata-rata per kelurahan. Kedua, data sosial (populasi) dan fisik (area terbangun, RTH) digabungkan ke dalam basis data spasial.

Tahap berikutnya adalah pemodelan menggunakan algoritma Random Forest Regression, sebagaimana disarankan oleh Park (2019) dan Wu & Chen (2017), karena algoritma ini mampu menangani hubungan nonlinier antarvariabel dan menghasilkan akurasi tinggi. Model dievaluasi dengan menggunakan nilai R-squared (R^2) dan Root Mean Square Error (RMSE) untuk mengukur kesesuaian hasil prediksi dengan data aktual.

F. Interpretasi Data

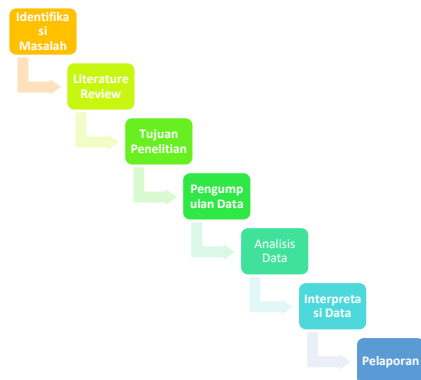
Interpretasi data dilakukan berdasarkan kerangka Vulnerability Framework dari UNDRR (2020) yang membagi kerentanan menjadi tiga komponen, yaitu *exposure*, *sensitivity*, dan *adaptive capacity*. Dalam konteks penelitian ini, *exposure* diukur melalui kepadatan penduduk, *sensitivity* melalui luas area terbangun, dan *adaptive capacity* melalui ketersediaan ruang terbuka hijau (RTH) dan infrastruktur air bersih. Hasil analisis kemudian dikategorikan menjadi lima tingkat kerentanan (sangat rendah hingga sangat tinggi) sesuai dengan klasifikasi nilai NDDI dari Renza et al. (2010). Interpretasi spasial ini digunakan untuk memahami pola distribusi kekeringan dan wilayah yang paling memerlukan prioritas penanganan.

Hasil akhir berupa peta tematik memungkinkan identifikasi wilayah rawan kekeringan serta proyeksi perubahan hingga tahun 2040.

G. Pelaporan

Tahap pelaporan dilakukan dengan mengacu pada struktur penulisan ilmiah sebagaimana disarankan oleh American Psychological Association (APA 7th Edition) dan pedoman pelaporan PRISMA 2020 untuk transparansi metode. Laporan disusun dalam lima bab yang terdiri atas Pendahuluan, Tinjauan Pustaka, Metodologi Penelitian, Hasil dan Pembahasan, serta Kesimpulan dan Saran. Hasil akhir penelitian disajikan dalam bentuk peta spasial kerentanan kekeringan, tabel rekapitulasi nilai NDDI, hasil evaluasi model (R^2 dan RMSE), serta rekomendasi kebijakan pengelolaan sumber daya air berbasis spasial.

Laporan ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah sekaligus praktis bagi pemerintah daerah dalam perencanaan kota tangguh (*resilient city*) yang adaptif terhadap perubahan iklim.



Grafik 3 1 Tahap Penelitian

3.6 Waktu Penelitian

Jangka waktu penelitian yang dilakukan oleh penyusun dapat dijelaskan melalui tabel berikut:

Tabel 3 3 Waktu Penelitian

Kegiatan	Waktu Penelitian				
	Juli	Agustus	September	Oktober	November
Identifikasi Masalah					
Tinjauan Pustaka					
Tujuan Penelitian					
Pengumpulan Data					
Analisis Data					
Interpretasi Data					
Penyusunan Laporan					

Sumber: Penulis, 2025

3.7 Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Kota Kupang, yang merupakan ibu kota Provinsi Nusa Tenggara Timur dan berfungsi sebagai pusat pemerintahan, perdagangan, serta aktivitas sosial ekonomi utama di kawasan tersebut. Secara geografis, Kota Kupang terletak pada koordinat 10°36'14" – 10°39'58" Lintang Selatan dan 123°32'23" – 123°37'01" Bujur Timur. Posisi geografis ini menempatkan Kota Kupang pada zona iklim semi-arid (kering) yang ditandai dengan curah hujan tahunan rendah, musim kemarau panjang, dan suhu udara yang relatif tinggi sepanjang tahun. Kondisi tersebut menjadikan kota ini termasuk salah satu wilayah perkotaan yang paling rentan terhadap kekeringan di Indonesia. Penelitian ini dilaksanakan di Kota Kupang, yang merupakan ibu kota Provinsi Nusa Tenggara Timur dan berfungsi sebagai pusat pemerintahan, perdagangan, serta aktivitas sosial ekonomi utama di kawasan tersebut. Secara geografis, Kota Kupang terletak pada koordinat 10°36'14" – 10°39'58" Lintang Selatan dan 123°32'23" – 123°37'01" Bujur Timur. Posisi geografis ini menempatkan Kota Kupang pada zona iklim semi-arid (kering) yang ditandai dengan curah hujan tahunan rendah, musim kemarau panjang, dan suhu udara yang relatif tinggi sepanjang tahun. Kondisi tersebut menjadikan kota ini termasuk salah satu wilayah perkotaan yang paling rentan terhadap kekeringan di Indonesia.

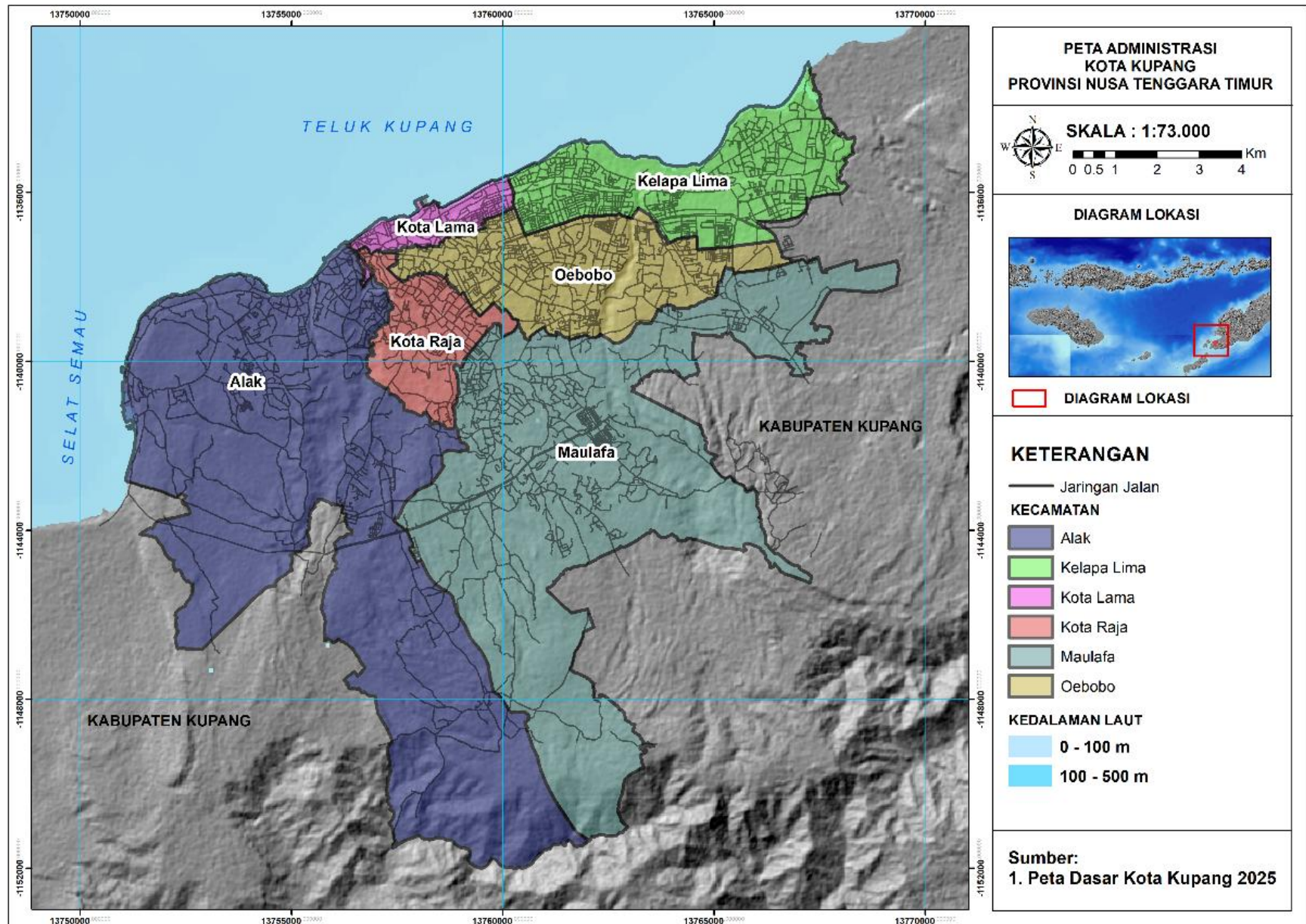
Secara administratif, wilayah Kota Kupang memiliki batas-batas sebagai berikut:

- Sebelah Utara: berbatasan dengan Teluk Kupang
- Sebelah Timur: berbatasan dengan Kabupaten Kupang
- Sebelah Barat: berbatasan dengan Selat Semau dan Kabupaten Kupang
- Sebelah Selatan: berbatasan dengan Kabupaten Kupang

Letak ini membuat Kota Kupang memiliki karakteristik geografis dan topografi yang beragam, mulai dari kawasan pesisir hingga wilayah perbukitan di bagian tengah dan selatan kota. Variasi karakter fisik ini berpengaruh kuat terhadap distribusi kerentanan kekeringan, terutama pada wilayah-wilayah yang memiliki sedikit ruang terbuka hijau dan tingkat urbanisasi tinggi.

Selain itu, Kota Kupang terdiri dari enam kecamatan dan tiga belas kelurahan utama yang menjadi unit analisis dalam penelitian ini. Setiap kelurahan dianalisis berdasarkan nilai indeks kekeringan (NDDI), tingkat kepadatan penduduk, serta luas area terbangun untuk menghasilkan pemetaan kerentanan kekeringan yang lebih spesifik dan akurat.

Untuk memberikan gambaran visual mengenai wilayah studi, peta lokasi penelitian disajikan pada Gambar 1, yang menunjukkan batas administratif Kota Kupang serta posisi geografisnya di lingkup regional Nusa Tenggara Timur.



Peta 3 1 Administrasi Kota Kupang

3.8 Teknik Pengumpulan Data Penelitian

Penelitian ini menggunakan kombinasi data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh melalui interpretasi citra satelit dan survei lapangan terbatas, sedangkan data sekunder berasal dari instansi pemerintah dan sumber ilmiah kredibel.

A. Data Sekunder

Data sekunder merupakan data yang diperoleh dari berbagai instansi atau lembaga yang relevan untuk memenuhi kebutuhan informasi dalam proses analisis penelitian. Data ini umumnya berbentuk dokumen, laporan resmi, atau basis data yang telah diolah oleh pihak lain. Dalam penelitian ini, data sekunder digunakan sebagai dasar utama untuk mengukur tingkat kekeringan di Kota Kupang serta mendukung analisis spasial dan pemodelan prediksi. Pemanfaatan data sekunder memungkinkan peneliti mendapatkan gambaran yang akurat terkait kondisi biofisik, kependudukan, dan perkembangan wilayah perkotaan. Adapun jenis data sekunder yang dibutuhkan meliputi sebagai berikut:

Tabel 3 4 Jenis Data dan Sumber Data

No	Jenis Data	Variabel / Indikator	Sumber Data	Skala / Tahun
1	Data Spasial	Batas administrasi, penggunaan lahan, kawasan lindung	Bappeda Kota Kupang, BIG	1:25.000 / 2023
2	Data Iklim	Curah hujan, suhu, kelembapan	BMKG El Tari Kupang	2018–2023
3	Data Sosial	Jumlah penduduk, kelompok rentan (balita, lansia, disabilitas, perempuan)	BPS Kota Kupang, Dinas Sosial	2023

No	Jenis Data	Variabel / Indikator	Sumber Data	Skala / Tahun
4	Data Ekonomi	PDRB sektor unggulan, luas lahan produktif	BPS Kota Kupang, Dinas Pertanian	2023
5	Data Fisik	Fasilitas umum, fasilitas kritis, infrastruktur air	Dinas PU, Dinas Kesehatan	2023
6	Data Lingkungan	Tutupan vegetasi, kawasan lindung, lahan kritis	Dinas Lingkungan Hidup, BIG	2023
7	Data Dokumen	RTRW Kota Kupang, RPJMD, Kajian Risiko Bencana	Bappeda, BNPB	2023–2024

Sumber: Penulis, 2025

B. Data Primer

Data primer dalam penelitian ini merupakan data yang diperoleh langsung oleh peneliti melalui proses observasi di lapangan maupun hasil interpretasi citra satelit. Data primer digunakan untuk memberikan validasi terhadap kondisi aktual wilayah studi serta mendukung analisis spasial yang dilakukan. Dalam penelitian ini, data primer diperoleh melalui dua metode utama, yaitu interpretasi citra satelit dan survei lapangan terbatas.

Pertama, citra satelit digunakan untuk menghasilkan data biofisik berupa nilai NDVI, NDWI, dan NDDI yang digunakan dalam analisis tingkat kekeringan. Proses ini meliputi identifikasi tutupan lahan, kondisi

vegetasi, tingkat kelembapan permukaan, dan karakteristik fisik wilayah lainnya yang relevan dengan pemetaan kekeringan. Hasil interpretasi ini menjadi dasar dalam menentukan pola sebaran kerentanan kekeringan pada skala kelurahan.

Kedua, survei lapangan dilakukan untuk memverifikasi kondisi aktual di beberapa wilayah dengan tingkat kerentanan tinggi maupun rendah berdasarkan hasil perhitungan indeks kekeringan. Survei ini meliputi pengamatan terhadap kondisi vegetasi, ketersediaan air bersih, kondisi penggunaan lahan, serta observasi terhadap kondisi sosial yang berkaitan dengan dampak kekeringan. Survei lapangan juga digunakan untuk memastikan kesesuaian antara hasil analisis spasial dengan kondisi riil di lokasi penelitian.

Dengan demikian, data primer berfungsi untuk memperkuat akurasi analisis spasial, mendukung proses validasi model prediksi, serta memberikan gambaran langsung mengenai dinamika kerentanan kekeringan di Kota Kupang.

3.8.1 Teknik Pengolahan dan Penyajian Data

Tahap pengolahan data dilakukan untuk menghasilkan analisis dan menjawab permasalahan yang ada pada data sekunder maupun data primer. Untuk mempermudah melakukan analisis, dilakukan pengolahan data dalam bentuk pengelompokan atau penyajian data sesuai dengan analisis yang akan dilakukan.

3.8.2 Teknik Pengolahan Data

Pengolahan data merupakan tahapan penting untuk memperoleh informasi yang siap dianalisis dari setiap variabel penelitian. Proses ini mencakup kegiatan pemeriksaan, transformasi, dan tabulasi data sehingga seluruh data yang digunakan dalam penelitian telah memenuhi standar kelengkapan, akurasi, dan konsistensi. Tahapan ini diperlukan agar analisis spasial dan pemodelan prediksi dapat dilakukan secara tepat. Adapun langkah-langkah pengolahan data meliputi:

a. Pemeriksaan Data

Pemeriksaan data dilakukan untuk memastikan bahwa seluruh data yang digunakan telah lengkap, akurat, dan sesuai dengan kebutuhan penelitian. Pemeriksaan dilakukan terhadap data citra satelit (NDVI, NDWI, dan NDDI), data kependudukan, data penggunaan lahan, batas administrasi kelurahan, serta hasil observasi lapangan. Proses ini mencakup

verifikasi kualitas citra, pengecekan nilai piksel yang hilang, konsistensi satuan, dan kesesuaian format koordinat.

b. Transformasi Data

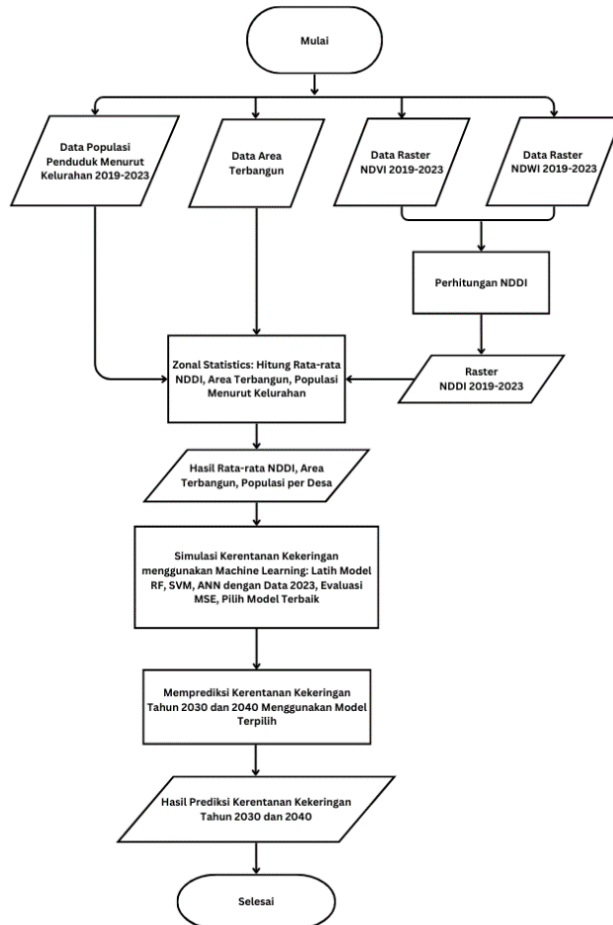
Transformasi data bertujuan untuk mengubah data mentah menjadi bentuk yang siap dianalisis. Pada penelitian ini, transformasi dilakukan melalui proses reprojection koordinat, clipping batas administrasi Kota Kupang, konversi raster-vektor, serta penghitungan indeks biofisik (NDVI, NDWI, dan NDDI). Data sosial dan penggunaan lahan juga ditransformasikan ke dalam format numerik per kelurahan agar dapat digunakan sebagai variabel input dalam model *Machine Learning*.

c. Tabulasi Data

Tabulasi data dilakukan dengan menyusun hasil pengolahan ke dalam bentuk tabel agar lebih mudah dianalisis dan dibandingkan antar wilayah. Tabulasi dilakukan untuk seluruh variabel, seperti nilai rata-rata NDDI per kelurahan, jumlah penduduk, luas area terbangun, ruang terbuka hijau, dan indikator dampak kerentanan kekeringan. Penyusunan dalam tabel memudahkan proses analisis deskriptif, analisis spasial, serta penyusunan model prediksi.

3.9 Metode Analisis

Metode analisis merupakan tahapan yang digunakan untuk mengolah dan menginterpretasikan data sehingga dapat menghasilkan informasi yang mampu menjawab tujuan penelitian. Pada penelitian ini, teknik analisis yang digunakan meliputi analisis indeks kekeringan, analisis dampak kerentanan berdasarkan berbagai aspek, serta pemodelan spasial untuk prediksi menggunakan *Machine Learning*. Tahap analisis dilakukan secara kuantitatif dan spasial dengan memanfaatkan citra satelit, data kependudukan, dan data penggunaan lahan yang telah ditabulasi per kelurahan. Alur pengolahan data dalam penelitian ini digambarkan melalui diagram alir yang dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 3 1 Alur Proses Analisa

3.9.1 Analisis Pengkajian Bencana Kekeringan (NDDI)

Analisis pengkajian kekeringan dilakukan menggunakan *Normalized Difference Drought Index* (NDDI) sebagai indikator biofisik utama untuk mengukur tingkat kekeringan di setiap kelurahan di Kota Kupang. NDDI dipilih karena mampu menggabungkan informasi vegetasi dan kelembapan permukaan sehingga memberikan representasi yang lebih akurat terhadap kondisi kekeringan pada wilayah semi-arid seperti Kota Kupang.

Konsep NDDI pertama kali diperkenalkan dan dikembangkan oleh Gu et al. (2007) dalam penelitian berjudul “*A five-year analysis of MODIS NDVI and NDWI for grassland drought assessment over the central Great Plains of the United States.*” Pada penelitian tersebut, Gu dkk. mengusulkan penggunaan kombinasi NDVI dan NDWI untuk mendeteksi kekeringan vegetasi secara lebih akurat dibandingkan dengan penggunaan satu indeks saja. Pendekatan ini kemudian dikembangkan lebih lanjut oleh berbagai peneliti, termasuk Renza, Arquero, & Sobrino (2010) yang menerapkan NDDI pada analisis kekeringan berbasis citra Landsat dan menghasilkan klasifikasi tingkat kekeringan yang banyak digunakan dalam kajian spasial.

Dengan demikian, analisis NDDI dalam penelitian ini memiliki dasar ilmiah yang kuat dan telah divalidasi melalui berbagai penelitian sebelumnya, menjadikannya relevan untuk digunakan pada wilayah semi-arid seperti Kota Kupang.

Tahap pertama analisis dilakukan dengan mengolah citra satelit untuk menghitung indeks NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) dan NDWI (*Normalized Difference Water Index*) sebagai komponen dasar pembentuk NDDI. NDVI digunakan untuk mengukur tingkat kehijauan dan kesehatan vegetasi, sedangkan NDWI digunakan untuk mengukur kandungan kelembapan vegetasi dan permukaan tanah. Kedua indeks ini kemudian digabungkan untuk menghasilkan nilai NDDI menggunakan rumus:

$$NDDI = \frac{NDVI - NDWI}{NDVI + NDWI}$$

Nilai NDDI yang lebih tinggi mencerminkan kondisi kekeringan yang lebih berat, sedangkan nilai yang lebih rendah menunjukkan kondisi yang lebih lembap.

Klasifikasi tingkat kekeringan berdasarkan nilai NDDI mengacu pada Renza dkk. (2010), seperti ditunjukkan pada tabel berikut:

Tabel 3 5 Klasifikasi Tingkat Kerentanan Kekeringan

Nilai NDDI	Tingkat Kekeringan
-0,05 – 0,01	Normal
0,01 – 0,15	Kekeringan Ringan
0,15 – 0,25	Kekeringan Sedang
0,25 – 1	Kekeringan Berat
> 1	Kekeringan Sangat Berat

Sumber: Renza, 2010

Klasifikasi tersebut digunakan untuk mengelompokkan wilayah ke dalam lima kategori berdasarkan kondisi biofisik yang terdeteksi. Kelurahan dengan nilai NDDI tinggi diidentifikasi sebagai wilayah dengan tingkat kekeringan berat hingga sangat berat, sedangkan kelurahan dengan nilai rendah digolongkan sebagai wilayah normal atau mengalami kekeringan ringan.

Hasil perhitungan dan klasifikasi NDDI kemudian disajikan dalam bentuk peta tematik untuk menunjukkan sebaran spasial kerentanan kekeringan di Kota Kupang. Peta ini menjadi dasar dalam mengidentifikasi wilayah prioritas dan melanjutkan analisis dampak kerentanan pada aspek sosial, fisik, ekonomi, dan lingkungan, serta menjadi input penting dalam pemodelan spasial prediksi kerentanan kekeringan tahap berikutnya.

Setelah nilai NDDI diperoleh, langkah selanjutnya adalah menerapkan teknik *Zonal Statistics* untuk menghitung nilai rata-rata NDDI pada tingkat kelurahan. Analisis ini dilakukan dengan memotong raster hasil perhitungan indeks berdasarkan batas administrasi Kota Kupang sehingga diperoleh nilai NDDI yang representatif untuk masing-masing kelurahan. Hasil *Zonal Statistics* kemudian diklasifikasikan untuk mengetahui tingkat kekeringan di Kota Kupang.

3.9.2 Analisis *Zonal Statistics*

Salah satu operasi umum yang menggabungkan data raster dan vektor berskala besar adalah *Zonal Statistics*, yang bertugas menghitung berbagai statistik untuk setiap poligon dalam dataset vektor (Singla & Eldawy, 2020). *Zonal Statistics* merupakan salah satu teknik dalam analisis data raster maupun vector berskala besar, terutama di bidang penginderaan jauh. Penelitian terbaru telah mengembangkan algoritma yang lebih efisien untuk mengolah dataset besar. Singla dan Eldawy (2020) memperkenalkan *Zonal Statistics*, sebuah metode terdistribusi yang mampu memproses data dalam skala petabyte tanpa memerlukan

prapemrosesan atau pengindeksan, sehingga cocok untuk kueri ad-hoc. Pendekatan ini menunjukkan peningkatan kinerja yang signifikan dibandingkan sistem yang ada.

Haag et al. (2020) memperkenalkan algoritma *Fast Zonal Statistics* (FZS), yang menawarkan kompleksitas komputasi konstan berdasarkan panjang perimeter poligon, sehingga meningkatkan efisiensi waktu eksekusi pada analisis poligon sederhana. Kemajuan dalam algoritma *Zonal Statistics* ini memungkinkan pemrosesan data geospasial berskala besar dengan lebih efisien, memberikan manfaat signifikan dalam bidang pemantauan lingkungan dan perencanaan kota.

Dalam analisis ini, metode *Zonal Statistics* digunakan untuk menghitung rata-rata nilai NDDI (*Normalized Difference Drought Index*) dan luas area terbangun di setiap kelurahan. *Zonal Statistics* memungkinkan perhitungan rata-rata dari data raster (seperti NDDI dan area terbangun) untuk setiap zona, yang dalam konteks ini adalah berupa data vector batas kelurahan. Selain itu, data populasi juga dianalisis untuk menghitung rata-rata populasi per kelurahan selama periode 2019-2023. Penambahan data populasi ini memberikan informasi tambahan mengenai tekanan populasi di setiap kelurahan, sehingga dapat membantu dalam memahami hubungan antara tekanan populasi, kerentanan kekeringan, dan luas area terbangun di setiap kelurahan sehingga ketiga variabel ini menjadi kunci dalam penelitian ini (Park, 2019; Krishna, et al., 2023; Sundararajan, et al., 2021).

3.9.2 Analisis Pemodelan Prediksi Kerentanan Kekeringan

Metode pemodelan spasial dalam penelitian ini terdiri dari tiga tahapan utama, yaitu simulasi tingkat kekeringan, evaluasi kinerja model *Machine Learning*, dan prediksi kekeringan. Ketiga tahapan ini digunakan untuk menghasilkan model prediktif yang mampu menggambarkan pola risiko kekeringan di masa mendatang pada tingkat kelurahan di Kota Kupang.

3.9.2 Metode Simulasi Kerentanan Kekeringan

Metode simulasi kerentanan kekeringan yang digunakan bertujuan untuk mengukur kerentanan dengan menghitung skor yang mengintegrasikan tiga faktor utama, yaitu NDDI (*Normalized Difference Drought Index*), populasi, dan area terbangun. NDDI memberikan indikasi kondisi kekeringan vegetasi, populasi mencerminkan jumlah penduduk yang berpotensi terdampak, dan area terbangun menunjukkan luas wilayah yang telah dikembangkan. Skor kerentanan ini kemudian digunakan sebagai variabel target dalam model *Machine Learning* untuk memprediksi risiko kekeringan di masa depan.

Pemilihan variabel populasi, area terbangun, dan indeks kekeringan (NDDI) dalam 5 tahun terakhir dalam penelitian prediksi

kekeringan untuk tahun 2030 dan 2040 didasarkan pada relevansi yang didukung oleh penelitian terkini. Variabel populasi dalam penelitian terkait kekeringan menunjukkan hubungan kompleks antara demografi dan kerentanan terhadap kekeringan. Meskipun perubahan iklim dianggap sebagai pendorong utama peningkatan kekeringan global (Smirnov, et al., 2016), pertumbuhan populasi tetap menjadi faktor penting dalam konteks kelangkaan air dan dampaknya terhadap kekeringan. Penelitian menunjukkan bahwa dengan pertumbuhan populasi yang signifikan, terutama di area yang sudah rawan kekeringan, tekanan terhadap sumber daya air meningkat, yang dapat memperburuk dampak kekeringan.

Justifikasi terkait hubungan antara variabel perubahan area terbangun dan kekeringan didasarkan pada bukti bahwa ekspansi perkotaan dapat memperburuk kondisi kekeringan. Penelitian di Cape Town menunjukkan bahwa peningkatan area terbangun bertepatan dengan penurunan vegetasi dan badan air, yang memperburuk kekeringan (Orimoloye, et al., 2019). Di Vadodara, peningkatan area terbangun juga terkait dengan penurunan indeks vegetasi dan air (Mistry & Suryanarayana, 2023). Di Faisalabad, urbanisasi menyebabkan penurunan level air tanah sebesar 1 kaki karena penambahan area terbangun (Zia, -u-Minallah, Tahir, & Hanif, 2022). Temuan ini menunjukkan bahwa konversi lahan alami menjadi area terbangun mengurangi kemampuan lanskap untuk menyerap dan menyimpan air, memperburuk kekeringan. Oleh karena itu, penting untuk mempertimbangkan dampak ekspansi perkotaan dalam perencanaan dan manajemen sumber daya air untuk mengurangi risiko kekeringan.

Selanjutnya, hubungan antara variabel indeks kekeringan dalam prediksi kekeringan didasarkan pada peran krusial indeks kekeringan dalam memantau dan meramalkan kondisi kekeringan. Penelitian menunjukkan bahwa indeks kekeringan dapat memberikan gambaran yang akurat tentang kondisi kekeringan. Misalnya, algoritma *Machine Learning* seperti *Random Forests* dan *Long Short-Term Memory Networks* telah terbukti efektif dalam memprediksi nilai indeks kekeringan, sehingga menunjukkan potensi metode ini untuk meningkatkan akurasi prediksi kekeringan (Krishna, et al., 2023).

Indeks kekeringan memungkinkan penilaian yang konsisten dan komprehensif terhadap kondisi kekeringan di berbagai wilayah dengan memanfaatkan data historis dan model prediktif. Dengan menerapkan indeks kekeringan dalam model prediksi, kita dapat mengidentifikasi pola kekeringan, memantau perubahan dalam tren kekeringan, dan merencanakan strategi mitigasi yang lebih baik. Oleh karena itu, penggunaan indeks kekeringan dalam prediksi kekeringan memberikan keuntungan dalam hal kesederhanaan, kecepatan, dan akurasi,

dibandingkan dengan metode prediksi dinamis lainnya, dan merupakan komponen penting dalam upaya mitigasi kekeringan yang efektif (Hao, 2017).

3.9.3 Analisis Hierarchy Process (AHP)

Analytic Hierarchy Process (AHP) adalah suatu metode pengambilan keputusan multikriteria yang dikembangkan oleh Thomas L. Saaty pada tahun 1980 di *Wharton School of Business*. Metode ini banyak digunakan untuk menyelesaikan permasalahan kompleks yang melibatkan berbagai kriteria yang bersifat kuantitatif maupun kualitatif. AHP bekerja dengan cara memecah suatu permasalahan ke dalam struktur hierarki, kemudian melakukan *pairwise comparison* untuk menentukan tingkat kepentingan relatif setiap variabel. Keunggulan AHP terletak pada kemampuannya mengubah penilaian subjektif menjadi bobot numerik melalui pendekatan matematis berbasis *eigenvector* (Saaty, 1980; Saaty, 1990).

Secara filosofis, AHP dibangun atas tiga prinsip utama: (1) dekomposisi, yaitu memecah permasalahan menjadi tujuan – kriteria – subkriteria; (2) penilaian komparatif, yaitu membandingkan setiap kriteria secara berpasangan menggunakan skala fundamental Saaty (1–9); dan (3) sintesis prioritas, yaitu menghitung bobot kriteria berdasarkan nilai *eigenvector* dari matriks perbandingan berpasangan (Saaty & Vargas, 2012). Proses AHP juga memastikan keandalan penilaian melalui Consistency Index (CI) dan Consistency Ratio (CR) yang harus $\leq 0,1$ agar hasil dapat dinyatakan konsisten dan valid (Saaty, 1980).

CR = CI/IR										
DIMANA:										
CR= CONSISTENCY RATIO										
CI = CONSISTENCY INDEX										
IR= INDEKS RANDOM CONSISTENCY										
NILAI IR DIAMBIL BERDASARKAN KETENTUAN:										
N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R	0,00	0,00	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,48
I										

Gambar 3 2 Penilaian melalui *Consistency Index* dan *Consistency Ratio*

Sumber: Saaty, 1980

Dalam penelitian ini, AHP digunakan untuk menentukan bobot prioritas tiga variabel utama dalam simulasi kerentanan kekeringan.

Proses penilaian dilakukan melalui *expert judgement* dan referensi teori. AHP Menjadi dasar penentuan bobot setiap variabel simulasi, sehingga model kerentanan tidak hanya berdasarkan angka mentah tetapi juga prioritas yang logis dan terukur dan meningkatkan keakuratan pemodelan spasial, karena variabel diberi bobot sesuai tingkat pengaruhnya terhadap risiko kekeringan. Dengan demikian, AHP berfungsi sebagai fondasi metodologis yang menguatkan validitas simulasi kerentanan kekeringan dan memperkuat model prediksi spasial pada penelitian ini.

3.9.3 Evaluasi Kinerja Model *Machine Learning*

Dalam metode ini, akan dievaluasi terlebih dahulu tiga model *Machine Learning* yang hendak digunakan, yaitu *Random Forests* (RF), *Support Vector Machine* (SVM), dan *Artificial Neural Network* (ANN). *Random Forest* (RF) adalah sebuah model *Machine Learning* statistik yang dikemukakan oleh Leo Breiman pada tahun 2001. Dibandingkan dengan metode lain, perkiraan *Random Forests* lebih akurat dan operasi lebih cepat dibandingkan dengan algoritma *Machine Learning* lainnya. Model *Random Forest* (RF) telah menunjukkan hasil yang menjanjikan dalam memprediksi kekeringan dan menilai kerentanannya. Penelitian menunjukkan bahwa RF dapat meramalkan tingkat kekeringan dengan sangat akurat, bahkan lebih baik daripada metode tradisional seperti ARIMA (Wu & Chen, 2017). Keunggulan RF terletak pada kemampuannya menangani hubungan nonlinier dan memberikan estimasi ketidakpastian statistik, membuatnya sangat berguna untuk peramalan kekeringan (Wu & Chen, 2017). Menariknya, model RF juga telah digunakan untuk memprediksi area dengan kekeringan parah tanpa perlu bergantung pada data meteorologi, memberikan informasi yang berguna untuk manajemen sumber daya air (Park, 2019).

Selanjutnya, model *Support Vector Machine* (SVM) adalah metode pembelajaran mesin yang digunakan untuk klasifikasi dan regresi. Prinsip dasar SVM adalah menemukan hyperplane terbaik yang memisahkan data ke dalam dua kelas dengan margin maksimum. Penelitian terbaru telah mengeksplorasi teknik pembelajaran mesin untuk memprediksi kekeringan, dengan *Support Vector Machine* (SVM) menjadi salah satu pendekatan yang paling menonjol. SVM telah menunjukkan keunggulan dalam menangkap karakteristik temporal dan spasial kekeringan dibandingkan dengan metode lain seperti *Artificial Neural Networks* dan *K-Nearest Neighbors* (Khan, 2020).

Di sisi lain, model *Artificial Neural Networks* (ANN) telah muncul sebagai pendekatan yang kuat untuk prediksi kekeringan karena kemampuannya dalam menangkap hubungan nonlinier dalam sistem hidrometeorologi yang kompleks (Dikshit, 2021). Berbagai model ANN,

termasuk *Multilayer Perceptron Neural Networks*, telah digunakan untuk memprediksi kekeringan jangka pendek dan jangka panjang. Model ANN telah menunjukkan kinerja tinggi dalam memprediksi indeks kekeringan dengan nilai R^2 melebihi 0,98 dalam beberapa kasus (Dayal, 2023). Penerapan ANN dalam peramalan kekeringan dapat memberikan wawasan berharga untuk manajemen sumber daya air dan strategi adaptasi terhadap perubahan (Dikshit, 2021).

Ketiga model ini kemudian dilatih menggunakan data zonal dari tahun 2023. Evaluasi kinerja model dilakukan dengan membandingkan nilai *R-squared mereka*, di mana *R-squared* mengukur akurasi tertinggi prediksi dengan membandingkan nilai yang diprediksi dengan nilai aktual. Model yang menunjukkan nilai *R-squared tertinggi dianggap sebagai model terbaik* karena menunjukkan kemampuan prediksi yang paling akurat.

3.9.4 Metode Prediksi Kerentanan Kekeringan

Tahap ketiga adalah melakukan prediksi kerentanan kekeringan menggunakan model terbaik yang diperoleh berdasarkan tahap evaluasi. Model dengan akurasi tertinggi, dalam penelitian ini adalah *Random Forests* yang digunakan untuk memprediksi kerentanan kekeringan pada tahun 2030 dan 2040.

Prediksi ini dilakukan dengan memasukkan variabel populasi, area terbangun, dan indeks kekeringan historis ke dalam model yang telah dilatih. Hasil prediksi berupa peta spasial kerentanan kekeringan yang telah dikategorikan ke dalam level kerentanan: rendah, sedang, tinggi, hingga sangat tinggi.

Metode ini memberikan estimasi spasial yang lebih andal mengenai risiko kekeringan di masa depan, sehingga dapat mendukung proses perencanaan, mitigasi, dan pengelolaan sumber daya air secara lebih efektif bagi Pemerintah Kota Kupang.