

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Udara bersih adalah kebutuhan mendasar bagi kesehatan dan kesejahteraan manusia (Sannigrahi et al., 2021). Secara umum, udara yang tercemar dianggap sebagai salah satu faktor utama penyebab berbagai penyakit seperti penyakit kardiovaskular, gangguan pernapasan, dan kanker paru-paru bagi masyarakat. Selain itu, polusi udara berdampak buruk bagi hewan dan merusak lingkungan tanaman (Almetwally et al., 2020).

Saat ini, polusi udara secara luas dianggap sebagai faktor risiko lingkungan yang paling merugikan, dengan beberapa studi memperkirakan bahwa hampir 20% dari seluruh kematian di dunia dapat dikaitkan dengan kualitas udara yang buruk. Di antara semua paparan lingkungan, polusi udara adalah penyebab utama morbiditas dan mortalitas global, menduduki peringkat ke-4 dari semua faktor risiko dalam studi GBD (Global Burden of Disease) tahun 2019 (Kuntic et al., 2023).

Aktivitas manusia yang meningkat, terutama dalam sektor industri, telah menyebabkan peningkatan polusi udara (Siddiqua et al., 2022). Kegiatan industri memainkan peran penting terhadap emisi partikel debu (seperti PM_{10} (*Particulate Matter* $\leq 10 \mu m$) dan $PM_{2.5}$ (*Particulate Matter* $\leq 2,5 \mu m$)) dan gas berbahaya (seperti NO_2 (Nitrogen Dioksida), NO (Nitrogen Monoksida), SO_2 (Sulfur Dioksida), CO (Karbon Monoksida), O_3 (Ozon), senyawa organik volatil/VOCs, dan NH_3 (Amonia)), serta logam berat (seperti Pb (Timbal) dan Hg (Merkuri)). Proses industri yang melibatkan pembakaran bahan bakar fosil, pengolahan bahan baku, dan aktivitas operasional lainnya menghasilkan emisi polutan dalam jumlah besar yang terlepas ke udara (Elawa & Farahat, 2022).

Industri semen, misalnya, memberikan kontribusi yang signifikan terhadap polusi udara ambien. Sekitar 5% dari emisi karbon global disebabkan oleh produksi semen. Diperkirakan bahwa produksi satu ton klinker semen dapat menghasilkan hingga 46,7 g debu, 1,80 kg NO_x sebagai NO_2 , 0,504 kg SO_2 , dan sebagainya. Dari berbagai jenis pencemar udara yang dihasilkan oleh aktivitas industri, PM_{10} , NO_2 , SO_2 , dan CO merupakan empat parameter dominan yang paling sering terdeteksi pada kegiatan produksi semen. Hal ini disebabkan oleh intensitas tinggi proses pembakaran, penggilingan, dan pergerakan kendaraan berat yang menyebabkan pelepasan partikulat dan gas-gas berbahaya ke atmosfer (Al-Zboon et al., 2021).

Industri semen memainkan peran krusial dalam pembangunan dan pertumbuhan ekonomi suatu negara. Semen digunakan secara luas di sektor konstruksi dan proyek-proyek infrastruktur (Venkata Sudhakar & Reddy, 2023). Semen adalah bahan perekat yang paling umum dan banyak digunakan dalam industri konstruksi. Semen digunakan di jalan raya, rumah, tanggul, jembatan, gedung komersial, dan jembatan layang. Oleh karena itu, industri pembuatan semen telah memainkan peran fundamental dalam perkembangan ekonomi global,

dengan sektor konstruksi, baja, minyak mentah, besi, dan telekomunikasi menjadi aspek infrastruktur utama di seluruh dunia (Etim et al., 2021).

Dampak polusi udara yang dihasilkan oleh industri semen ini menjadi tantangan besar, salah satunya di negara-negara berkembang seperti Indonesia. Kebutuhan semen di Indonesia meningkat secara signifikan, dengan tingkat penjualannya diperkirakan tumbuh 4,9% dari tahun sebelumnya menjadi 73 juta ton pada tahun 2019, seiring dengan percepatan pembangunan infrastruktur nasional (Pambudi et al., 2020).

Industri Semen X merupakan salah satu produsen semen terbesar di wilayah Indonesia Timur yang memiliki luas lahan 715 hektar di desa Biringere, kecamatan Bungoro, Kabupaten Pangkep (Anwar et al., 2018). Industri semen yang menjadi objek studi ini mengoperasikan fasilitas produksi terintegrasi dengan kapasitas mencapai 7,4 juta ton/tahun. Industri semen yang menjadi objek studi memiliki fasilitas pengemasan semen yang tersebar di berbagai wilayah Indonesia Timur, termasuk di Makassar (Sulawesi Selatan), Bitung (Sulawesi Utara), Palu (Sulawesi Tengah), Mamuju (Sulawesi Barat), Kendari (Sulawesi Tenggara), Ambon (Maluku), Oba (Maluku Utara), Samarinda dan Balikpapan (Kalimantan Timur), serta Sorong (Papua Barat) (Wahyu et al., 2024).

Sebagai salah satu industri semen terbesar di Indonesia, sekitar industri semen yang diteliti sangat penting untuk melindungi kesehatan masyarakat serta lingkungan. Namun, ketersediaan stasiun pemantau kualitas udara di beberapa wilayah di Indonesia masih terbatas, sehingga untuk memperoleh data kualitas udara masih tergolong sulit. Menurut data dari IQAir (2024), di Sulawesi Selatan, hanya terdapat tiga stasiun pemantau udara (dua stasiun di Kota Makassar dan 1 stasiun di Kabupaten Maros).

Dalam menghadapi hal ini, penggunaan penginderaan jauh (*remote sensing*) menjadi salah satu metode yang dapat digunakan dalam mengukur atau mengestimasi kualitas udara. Teknologi penginderaan jauh berbasis satelit menawarkan cara yang efektif untuk pemantauan kualitas udara jangka panjang secara spasial-temporal pada berbagai skala. Dengan perkembangan teknologi penginderaan jauh satelit, data citra satelit telah memainkan peran penting dalam pemantauan lingkungan ekologi perkotaan karena resolusi spasialnya yang tinggi, cakupannya yang luas, dan kecepatan akuisisinya (Wang et al., 2022).

Penggunaan citra satelit untuk memantau polusi udara telah dimulai sejak tahun 1970-an dengan memanfaatkan Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) dan Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES). Selain itu, satelit seperti Landsat juga sering digunakan untuk pemantauan kualitas udara (Ghasempour et al., 2021).

Landsat 8 merupakan salah satu dari satelit Landsat yang sering digunakan untuk memantau kualitas udara. Satelit Landsat 8 dilengkapi dengan dua instrumen ilmiah utama—Operational Land Imager (OLI) dan Thermal Infrared Sensor (TIRS). Kedua sensor ini menyediakan cakupan musiman terhadap daratan global dengan resolusi spasial 30 meter (citra tampak, NIR, SWIR); 100 meter (termal); dan 15

meter (pankromatik). Landsat 8 dikembangkan melalui kolaborasi antara NASA dan U.S. Geological Survey (USGS) (NASA, 2024).

Dalam pemantauan kualitas udara berbasis citra satelit seperti Landsat 8, salah satu tantangan utama adalah pengembangan algoritma konsentrasi polutan udara. Algoritma ini berfungsi untuk mengubah informasi spektral dari citra satelit menjadi estimasi kuantitatif konsentrasi polutan tertentu, seperti PM_{10} , NO_2 , SO_2 , dan CO. Keberadaan algoritma yang tepat sangat penting karena menentukan tingkat akurasi dalam menggambarkan kondisi kualitas udara di lapangan. Oleh karena itu, pemahaman dan analisis terhadap formulasi algoritma konsentrasi polutan udara menjadi langkah krusial dalam pemanfaatan data penginderaan jauh untuk pemantauan kualitas udara.

Pemanfaatan citra Landsat 8 dalam estimasi konsentrasi polutan udara memungkinkan pemetaan distribusi spasial dan temporal kualitas udara di sekitar area industri semen di wilayah studi. Data dari citra ini dapat digunakan untuk mendeteksi serta mengukur konsentrasi polutan, sehingga memberikan gambaran kondisi udara secara lebih komprehensif. Pendekatan ini juga memiliki nilai strategis bagi wilayah yang belum memiliki jaringan stasiun pemantau udara yang merata. Analisis berbasis Landsat 8 diharapkan mampu memberikan kontribusi nyata terhadap peningkatan sistem pemantauan kualitas udara serta mendukung upaya mitigasi dampak polusi udara di Indonesia.

1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana karakteristik dan tingkat konsentrasi polutan udara berdasarkan pengukuran langsung di area industri semen?
2. Bagaimana hasil estimasi konsentrasi polutan udara di area industri semen menggunakan model berbasis citra satelit?
3. Bagaimana pola sebaran spasial polutan udara di area industri semen berdasarkan data citra satelit?

1.3 Tujuan Penelitian

1. Menganalisis konsentrasi polutan udara berdasarkan pengukuran langsung di area industri semen.
2. Menganalisis model polutan udara berbasis citra satelit di area industri semen.
3. Menganalisis pola sebaran polutan udara berbasis citra satelit di area industri semen.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi teoretis dan praktis dalam pemantauan kualitas udara menggunakan penginderaan jauh. Secara teoretis,

penelitian ini memperluas pemahaman tentang algoritma konsentrasi polutan udara dan analisis citra satelit untuk estimasi polutan udara. Secara praktis, hasilnya diharapkan menjadi acuan dalam mengembangkan metode yang lebih presisi untuk pemantauan kualitas udara, khususnya di daerah dengan keterbatasan stasiun pemantauan. Penelitian ini juga dapat menyediakan informasi mengenai konsentrasi polutan udara di kawasan industri semen yang menjadi lokasi studi, yang berguna bagi pemerintah, industri, dan masyarakat dalam mengelola dampak polusi udara serta mendukung pengembangan kebijakan mitigasi polusi yang lebih efektif.

1.5 Ruang Lingkup

Penelitian ini mencakup analisis kualitas udara di kawasan industri semen yang berlokasi di Kabupaten Pangkep, Sulawesi Selatan. Penelitian akan mengestimasi konsentrasi empat jenis polutan udara utama yang umumnya dihasilkan oleh industri semen, yaitu PM_{10} , NO_2 , SO_2 , dan CO. Data citra satelit yang digunakan adalah Landsat 8, dengan pengolahan dan analisis dilakukan menggunakan perangkat lunak pengolahan citra ArcGIS. Analisis difokuskan pada periode yang relevan dengan aktivitas industri serta membandingkan hasil konsentrasi parameter aktual dengan hasil prediksi, sehingga diperoleh gambaran kualitas udara yang lebih komprehensif.

1.6 Teori

1.6.1 Udara

Udara merupakan campuran mekanis dari berbagai jenis gas, bukan senyawa kimia. Sebagai bagian dari atmosfer bumi, udara berperan penting dalam membentuk zona kehidupan di permukaan bumi. Udara terdiri atas sejumlah gas dengan konsentrasi yang relatif tetap di permukaan bumi, kecuali beberapa gas seperti metana, amonia, hidrogen sulfida, karbon monoksida, dan nitrogen oksida, yang konsentrasinya dapat bervariasi tergantung pada wilayah atau lokasi tertentu. Secara umum, konsentrasi gas-gas tersebut cenderung lebih tinggi di daerah rawa maupun kawasan industri kimia (Pratomo, 2019).

Udara normal terdiri dari nitrogen sebagai unsur utama sebanyak 78,1%, diikuti oleh oksigen 20,93%, dan karbon dioksida 0,3%. Sisanya terdiri dari gas-gas seperti argon, neon, kripton, xenon, dan helium. Selain gas-gas tersebut, udara juga mengandung uap air, partikel debu, bakteri, spora, serta sisa-sisa tumbuhan (Takuloe et al., 2023).

Menurut Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No. 41 Tahun 1999 Tentang Pengendalian Pencemaran Udara, udara ambien adalah udara bebas di permukaan bumi pada lapisan troposfir yang berada di dalam wilayah yurisdiksi Republik Indonesia yang dibutuhkan dan mempengaruhi kesehatan manusia, makhluk hidup, dan unsur lingkungan hidup lainnya. Jika perubahan komposisi

udara alami melebihi konsentrasi tertentu yang menyebabkan udara ambien tidak dapat memenuhi fungsinya, maka dikatakan udara tersebut telah tercemar.

1.6.2 Pencemaran Udara

Menurut Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No. 41 Tahun 1999 Tentang Pengendalian Pencemaran Udara, pencemaran udara adalah masuknya atau dimasukkannya zat, energi, dan/atau komponen lain ke dalam udara ambien oleh kegiatan manusia, sehingga mutu udara ambien turun ke tingkat tertentu yang menyebabkan udara ambien tidak memenuhi fungsinya.

Pencemaran udara adalah masalah yang sudah lama ada dan kompleks yang menyertai proses urbanisasi, serta aktivitas manusia yang intensif yang telah terjadi sepanjang sejarah manusia, terutama setelah abad ke-18. Namun, selama dan setelah abad ke-18, penurunan kualitas udara berubah dari skala spasiotemporal yang lokal dan/atau jangka pendek menjadi skala spasiotemporal yang regional dan/atau jangka panjang akibat revolusi dalam penggunaan energi dan pertumbuhan pesat kota-kota modern (Zhang et al., 2022). Sama seperti perubahan iklim bumi, pengasaman laut, hilangnya keanekaragaman hayati, penggurunan, serta penipisan pasokan air bersih secara global, polusi merusak sistem penopang keberlanjutan bumi dan mengancam keberlangsungan kehidupan manusia (Raimi et al., 2021).

Polutan udara diklasifikasikan ke dalam dua kategori utama: polutan udara primer (polutan yang langsung dilepaskan ke atmosfer) dan polutan udara sekunder (polutan yang terbentuk di dalam atmosfer itu sendiri). Polutan udara primer adalah polutan yang dilepaskan langsung dari sumbernya, seperti knalpot kendaraan bermotor atau cerobong asap pabrik. Selain itu, debu yang terkontaminasi juga dapat terbawa angin ke daerah yang sebelumnya tidak terkontaminasi. Polutan ini dapat diukur dengan menghitung jumlah yang dilepaskan oleh sumbernya. Polutan udara primer meliputi oksida nitrogen, karbon monoksida (CO), sulfur dioksida (SO₂), senyawa organik volatil (VOCs), serta partikel primer karbonasi dan non-karbonasi. Sementara itu, polutan udara sekunder terbentuk melalui reaksi kimia di atmosfer dengan komponen alami seperti air dan oksigen. Contoh polutan udara sekunder termasuk ozon (O₃) dan oksida nitrogen (Bălă et al., 2021).

Polusi udara berasal dari berbagai sumber emisi, baik alami maupun antropogenik, di mana yang sumber antropogenik menjadi dominan secara global sejak awal industrialisasi. Proses pembakaran merupakan penyumbang terbesar polusi udara, terutama pembakaran bahan bakar fosil dan biomassa untuk menghasilkan energi. Di lingkungan dalam ruangan, penggunaan bahan bakar yang mencemari dalam alat pemanas dan kompor memasak tanpa ventilasi, pembakaran tembakau, serta pembakaran untuk tujuan lain seperti praktik budaya atau keagamaan juga menjadi faktor penting. Pembakaran bahan bakar fosil dan biomassa untuk pemanas domestik juga merupakan sumber utama polusi udara luar ruangan di banyak bagian dunia (World Health Organization, 2021).

Sumber pembakaran luar ruangan mencakup transportasi darat, udara, dan laut; industri dan pembangkit listrik; serta pembakaran biomassa, termasuk kebakaran hutan dan savana yang terkendali maupun tidak terkendali, serta pembakaran limbah pertanian dan limbah di daerah perkotaan. Sumber dan proses lain yang turut menyumbang polusi luar ruangan meliputi resuspensi debu permukaan dan aktivitas konstruksi. Transportasi atmosferik jarak jauh dari polutan yang berasal dari sumber yang jauh turut berkontribusi pada polusi lokal, terutama polusi udara di perkotaan. Beberapa polutan dilepaskan langsung oleh sumber pembakaran sebagai polutan primer (dengan karbon elemental sebagai komponen utama PM), sementara yang lainnya terbentuk di udara sebagai polutan sekunder (seperti nitrat, sulfat, dan karbon organik) melalui proses fisikokimia kompleks yang melibatkan prekursor gas yang berasal dari sumber pembakaran, aktivitas pertanian (amonia), proses antropogenik lainnya, serta proses alami seperti emisi biogenik (World Health Organization, 2021).

Di beberapa lokasi, konsentrasi polutan rendah, tetapi kontribusi keseluruhan terhadap paparan tinggi karena waktu yang dihabiskan di sana lebih lama (misalnya, di rumah); sedangkan di lokasi lain, konsentrasi polutan sangat tinggi (misalnya, di titik-titik lalu lintas padat), dan meskipun waktu yang dihabiskan di sana singkat, paparan yang terjadi tetap tinggi (World Health Organization, 2021).

Ketika konsentrasi bervariasi seiring waktu, konsentrasi rata-rata waktu digunakan untuk perhitungan paparan. Untuk penilaian risiko kesehatan, paparan didefinisikan berdasarkan berbagai rentang waktu, yaitu: paparan seumur hidup, yang merupakan jumlah dari semua paparan yang terjadi di berbagai lingkungan – ini sangat penting untuk polutan yang bersifat karsinogenik; paparan jangka panjang, yang diukur sebagai rata-rata dalam satu atau beberapa tahun; dan paparan jangka pendek, yang diukur dalam rentang waktu beberapa menit hingga beberapa hari (World Health Organization, 2021).

Selain masalah kesehatan, pencemaran udara juga menyebabkan kerugian total terhadap kesejahteraan dan berdampak negatif pada aktivitas ekonomi. Biaya perawatan kesehatan yang dipicu oleh polusi udara diperkirakan akan mencapai 176 miliar dolar AS pada tahun 2060, dan sekitar 3,7 miliar hari kerja diperkirakan akan hilang (L. Liu et al., 2021).

1.6.3 PM₁₀ (Particulate Matter)

PM (*Particulate Matter*) didefinisikan sebagai partikel karbon yang berasosiasi dengan bahan kimia organik teradsorpsi dan logam reaktif. Komponen utama PM meliputi sulfat, nitrat, endotoksin, hidrokarbon aromatik polisiklik, dan logam berat seperti besi, nikel, tembaga, seng, dan vanadium. Berdasarkan ukuran partikelnya, PM umumnya diklasifikasikan menjadi: partikel kasar, PM₁₀ dengan diameter <10 µm; partikel halus, PM_{2.5} dengan diameter <2.5 µm; dan partikel ultrahalus, PM_{0.1} dengan diameter <0.1 µm (Tran et al., 2020).

PM₁₀ dihasilkan dari berbagai aktivitas manusia, termasuk penggunaan mesin diesel, operasi pertanian, lalu lintas jalan, dan reaksi fotokimia yang

melibatkan zat pencemar. Di kawasan industri dan pertambangan, PM_{10} sering berasal dari erosi angin di lokasi tambang, yang memudahkan penyebaran partikulat ke area sekitar. Selain itu, emisi dari peledakan batuan, pemindahan material menggunakan alat transportasi seperti truk, serta polusi akibat tiupan angin dan peledakan juga berkontribusi. Sumber tambahan meliputi penggunaan alat berat, proses konstruksi, debu jalanan akibat lalu lintas, dan pembakaran bahan tertentu (Maulydia, 2024).

PM_{10} merupakan pencemar udara yang tergolong pencemar primer (*primary pollutant*), yang masuk ke udara secara langsung dari sumber pencemar seperti kendaraan bermotor. Partikel kecil di udara dapat terhirup ke dalam saluran udara dan menyebabkan masalah pernapasan dan kerusakan paru-paru (Gunawan et al., 2018).

PM_{10} juga menyebabkan berbagai masalah selain yang berkaitan dengan kesehatan manusia, seperti mengurangi jarak pandang di daerah berpenduduk dan merupakan faktor penting bagi perubahan iklim. Karena peristiwa polusi udara yang serius sering terjadi, peran aktivitas manusia terhadap konsentrasi polutan udara termasuk PM_{10} telah diselidiki di beberapa kota besar di seluruh dunia. Studi-studi ini menunjukkan bahwa faktor lingkungan seperti kecepatan angin, lapisan batas planet, tekanan permukaan laut, divergensi angin, dan curah hujan juga memberikan pengaruh besar pada konsentrasi PM_{10} (Kim & Kim, 2020).

Distribusi PM_{10} di atmosfer dipengaruhi oleh karakteristik sumber emisi serta berbagai proses fisik dan kimia yang terjadi di udara. Faktor musim juga berperan dalam menentukan konsentrasi PM_{10} di suatu area. Selama musim kemarau, konsentrasi partikulat cenderung lebih tinggi dibandingkan musim hujan. Hal ini disebabkan oleh kemampuan hujan untuk membersihkan atmosfer melalui proses pencucian udara, yang secara efektif mengurangi jumlah polutan di lingkungan (Sari et al., 2021).

1.6.4 NO_2 (Nitrogen Dioksida)

NO_2 adalah gas berwarna cokelat dengan aroma khas yang kuat. *Nitric oxide* secara spontan menghasilkan nitrogen dioksida ketika terpapar udara. Gas ini merupakan oksidan kuat yang menghasilkan asam nitrat dan nitrogen oksida melalui reaksi dengan air, serta merupakan gas jejak penting yang memengaruhi kesehatan manusia. NO_2 menyerap radiasi matahari, berkontribusi pada rendahnya visibilitas di atmosfer, dan memainkan peran langsung dalam perubahan iklim global (Bălă et al., 2021).

NO_2 mengalami transformasi lebih lanjut, dan setelah rangkaian reaksi fotokimia dimulai oleh aktivasi yang dipicu radiasi matahari, polutan baru terbentuk, termasuk partikel organik. Di antara sumber alami, sumber yang diwakili meliputi petir, masuknya nitrogen oksida dari stratosfer, serta aktivitas bakteri dan vulkanik. Sumber antropogenik utama berasal dari sumber bergerak (mesin pembakaran) dan sumber pembakaran stasioner (pembangkit tenaga listrik). Pasien dengan asma dan penyakit paru obstruktif kronis (PPOK) dikaitkan dengan peningkatan

risiko rawat inap akibat gangguan pernapasan setelah terpapar NO_2 (Bălă et al., 2021).

Nitrogen dioksida (NO_2) memiliki tingkat toksisitas yang empat kali lebih tinggi dibandingkan nitrogen monoksida (NO). Polusi gas ini dapat menyebabkan pembengkakan pada paru-paru, sehingga memicu kesulitan bernapas yang berpotensi fatal. Paparan jangka pendek terhadap NO_2 , dalam rentang waktu 30 menit hingga 24 jam, telah dikaitkan dengan efek merugikan pada sistem pernapasan, termasuk peradangan saluran napas pada individu sehat dan peningkatan gejala pernapasan pada penderita asma. Selain itu, NO_2 dapat mengiritasi paru-paru dan menurunkan daya tahan tubuh terhadap infeksi pernapasan (Izzati et al., 2021).

1.6.5 SO_2 (Sulfur Dioksida)

Sulfur dioksida (SO_2) adalah gas transparan tanpa warna yang termasuk dalam kategori polutan udara. Sebanyak 80% SO_2 di atmosfer berasal dari oksidasi hidrogen sulfida (H_2S), sedangkan sisanya, sekitar 20%, dihasilkan dari aktivitas manusia. Sumber utama emisi buatan ini meliputi pembakaran bahan bakar yang mengandung belerang, proses peleburan logam non-ferrous, pengolahan di kilang minyak, serta aktivitas vulkanik seperti letusan gunung berapi (Takuloe et al., 2023).

Sulfur secara alami terdapat dalam hampir semua bahan mentah yang belum diolah, seperti minyak mentah, batu bara, serta bijih logam yang mengandung aluminium, tembaga, seng, timbal, dan besi. Di wilayah perkotaan, sumber utama sulfur berasal dari aktivitas pembangkit listrik, terutama yang menggunakan batu bara atau minyak diesel sebagai bahan bakar. Selain itu, emisi gas buang dari kendaraan bermesin diesel dan aktivitas industri yang mengandalkan batu bara dan minyak mentah juga menjadi kontributor signifikan (GAW Palu, 2024).

Sulfur dioksida (SO_2) adalah gas yang paling umum di antara kelompok oksida sulfur (SO_x) yang terdapat di atmosfer. SO_2 terutama dihasilkan dari proses pembakaran bahan bakar fosil dan bergabung dengan aerosol serta PM (*Particulate Matter*) dan dapat membentuk kelompok kompleks polutan udara yang berbeda (Tran et al., 2020). SO_2 memiliki dampak buruk yang signifikan terhadap kesehatan manusia. Pelepasan asam sulfat secara substansial memengaruhi kimia atmosfer, kualitas udara, iklim, dan kesehatan ekosistem, serta menyebabkan dampak kesehatan negatif seperti kanker dan masalah kardiovaskular. Selain itu, SO_2 memiliki dampak ekologis pada tanah, hutan, dan perairan tawar. SO_2 juga merupakan komponen utama dalam produksi asam sulfat (Fayyazbakhsh et al., 2022).

Paparan jangka pendek sulfur dioksida (SO_2), bahkan pada konsentrasi rendah, dapat memberikan dampak negatif terhadap kesehatan, terutama pada sistem pernapasan manusia. Gas ini juga dapat menyebabkan gangguan pernapasan dan iritasi mata (Takuloe et al., 2023). Peningkatan gejala gangguan pernapasan telah terbukti terkait dengan paparan SO_2 yang diemisikan oleh

pembangkit listrik berbahan bakar batu bara, bahkan konsentrasi yang lebih rendah pun dikaitkan dengan kematian akibat gangguan pernapasan. Sumber utama SO_2 yang berasal dari aktivitas manusia terdapat di negara-negara berkembang dan dihasilkan dari pembakaran bahan bakar fosil yang mengandung sulfur. Pembakaran bahan bakar fosil dilakukan untuk pemanasan rumah, penggunaan di pembangkit listrik, serta sebagai bahan bakar kendaraan (Bălă et al., 2021).

Sulfur dioksida (SO_2) juga memberikan dampak merugikan bagi tanaman. Pada konsentrasi tinggi, gas ini dapat merusak jaringan daun, terutama di pinggiran dan area di antara tulang-tulang daun, bahkan menyebabkan kematian jaringan. Secara kronis, paparan SO_2 mengakibatkan klorosis pada tanaman. Kerusakan ini cenderung memburuk dengan meningkatnya kelembapan udara, karena SO_2 di atmosfer dapat berubah menjadi asam sulfat. Di wilayah yang mengalami pencemaran SO_2 tinggi, tanaman sering rusak oleh paparan aerosol asam sulfat. Pada konsentrasi yang tinggi, SO_2 dapat menimbulkan noda putih atau cokelat pada daun, dan paparan jangka panjang dapat menyebabkan kematian tanaman. Selain tanaman, SO_2 juga merusak material bangunan, terutama yang terbuat dari batu kapur, marmer, dan dolomit. Kerusakan ini memengaruhi penampilan, struktur, dan masa pakai bangunan. Dampak tersebut menjadi ancaman serius bagi bangunan bersejarah, termasuk monumen, candi, dan patung, yang rentan terhadap efek jangka panjang dari pencemaran ini (GAW Palu, 2024).

1.6.6 CO (Karbon Monoksida)

Sumber utama karbon monoksida (CO) di lingkungan adalah pembakaran tidak sempurna bahan bakar fosil yang berkaitan dengan lalu lintas, yang menyumbang lebih dari 50% emisi di kawasan perkotaan. Sumber lainnya (seperti aktivitas manufaktur dan proses alami) memiliki kontribusi yang lebih kecil. Karbon monoksida dianggap sebagai "pembunuh diam-diam" karena sifat toksiknya yang berasal dari kemampuannya mengikat hemoglobin lebih kuat dibandingkan oksigen. Hal ini meningkatkan risiko kematian akibat asfiksia pada paparan tingkat tinggi atau kerusakan jaringan akibat hipoksia pada paparan tingkat rendah. Penyakit asma, bronkiektasis, dan pneumonia telah dikaitkan dengan paparan jangka pendek CO di lingkungan (Bălă et al., 2021).

CO yang dihasilkan selama pembakaran tidak sempurna merupakan polutan penting lainnya yang berdampak pada kesehatan manusia, karena paru-paru manusia lebih mudah menyerap CO dibandingkan oksigen jika kedua gas tersebut berada dalam jumlah yang sama di lingkungan (Fayyazbakhsh et al., 2022).

1.6.7 Industri Semen

Industrialisasi, sebagai sebuah proses, tidak dapat dipahami tanpa merujuk pada kehidupan masyarakat yang tinggal di masyarakat tersebut. Dengan kata lain, ada hubungan erat antara masyarakat dan lingkungan mereka dari satu sisi, dan industri dari sisi lain. Terkadang, masyarakat menyalahgunakan lingkungan sosial dan fisik mereka untuk meningkatkan dan memperbaiki kehidupan mereka. Ketika

sebuah industri didirikan di suatu lokasi untuk memproduksi produk tertentu, industri tersebut membawa perubahan positif terhadap eksistensi ekonomi masyarakat yang tinggal di sekitar lingkungan tersebut dalam bentuk lapangan pekerjaan dan berbagai usaha bisnis. Di sisi lain, aktivitas industri juga membawa dampak negatif terhadap lingkungan yang memengaruhi pembangunan ekonomi komunitas, seperti polusi, baik udara, air, maupun tanah, yang memiliki dampak merusak bagi manusia, kesehatan hewan, dan alam itu sendiri (Muhammad et al., 2021).

Industri semen memiliki dampak negatif terhadap kualitas udara di lingkungan tempat suatu komunitas berada. Emisi polutan udara utama dari industri semen adalah oksida nitrogen, sulfur dioksida, dan partikel-partikel. Emisi dari industri semen dan pabrik manufaktur lainnya merupakan salah satu penyumbang utama terhadap buruknya kualitas udara, terutama di daerah perkotaan yang berkembang di negara-negara berkembang (Muhammad et al., 2021).

Debu, yang menjadi dampak kesehatan signifikan dari industri semen, dihasilkan hampir dari semua proses produksi. Proses-proses tersebut meliputi peledakan batuan, pengeboran, penghancuran batu, pemuatan dan pembongkaran, penyimpanan material, penggilingan klinker, penyimpanan klinker, dan pengemasan semen. Unit penghancur (*crusher*) dan pabrik penggilingan semen merupakan sumber utama partikel debu (PM_{10} dan $PM_{2.5}$) (Al-Zboon et al., 2021).

Polusi semen dan dampak negatifnya terhadap kesehatan manusia secara umum meliputi serangan batuk dan produksi lendir, rasa sesak di dada, gangguan fungsi paru-paru, penyakit paru obstruktif dan prohibitif, penebalan pleura, fibrosis, emfisema, nodulasi paru, pneumokoniosis, dan kanker paru-paru. Dampak tersebut juga mencakup respons sensitif yang mengganggu pernapasan: reaksi alergi yang menyebabkan masalah pernapasan, mulai dari hidung berair biasa hingga penyakit pernapasan yang berbahaya (Muhammad et al., 2021).

Berbagai kondisi patologis telah ditemukan pada pekerja di industri semen. Kondisi tersebut meliputi penyakit saluran pernapasan, penyakit kulit, nyeri dada, detak jantung tidak teratur, gangguan rematik, gangguan pendengaran dan penglihatan, serta kanker. Hubungan yang kuat antara fungsi paru-paru dan pernapasan dengan paparan debu semen telah dilaporkan. Pekerja di unit penghancuran dan pengemasan terpapar emisi debu tinggi, yang dapat menyebabkan berbagai masalah kesehatan. Selain itu, ditemukan bahwa area dengan tingkat debu tinggi menyebabkan gangguan mata, terutama saat pekerja menyentuh mata mereka dengan tangan yang tertutup debu semen selama bekerja (Al-Zboon et al., 2021).

1.6.8 Penginderaan Jauh (*Remote Sensing*)

Penginderaan jauh adalah proses mendeteksi dan memantau karakteristik fisik suatu area dengan mengukur radiasi yang dipantulkan dan dipancarkan dari jarak jauh (biasanya dari satelit atau pesawat). Kamera khusus mengumpulkan gambar

yang terindra jauh, yang membantu peneliti "merasakan" informasi tentang Bumi (USGS, 2024).

Beberapa contoh penginderaan jauh yaitu kamera pada satelit dan pesawat terbang mengambil gambar dari area yang luas di permukaan bumi, memungkinkan kita untuk melihat lebih banyak daripada yang bisa kita lihat saat berdiri di tanah; sistem sonar pada kapal dapat digunakan untuk membuat gambar dasar laut tanpa perlu pergi ke dasar lautan; dan kamera pada satelit dapat digunakan untuk membuat gambar perubahan suhu di lautan (USGS, 2024).

Beberapa penggunaan khusus dari gambar yang terindra jauh di bumi meliputi kebakaran hutan besar dapat dipetakan dari luar angkasa, memungkinkan petugas untuk melihat area yang jauh lebih luas daripada yang bisa dilihat dari tanah; melacak awan untuk membantu memprediksi cuaca atau memantau gunung berapi yang meletus, serta membantu mengawasi badai debu; melacak pertumbuhan kota dan perubahan di lahan pertanian atau hutan selama beberapa tahun atau decade; serta penemuan dan pemetaan topografi dasar laut yang berbatu (misalnya, pegunungan besar, ngarai dalam, dan "pola magnetik" di dasar laut) (USGS, 2024).

Teknologi penginderaan jauh berbasis satelit menawarkan cara yang efektif untuk pemantauan kualitas udara jangka panjang secara spasial-temporal pada berbagai skala. Dengan perkembangan teknologi penginderaan jauh satelit, data citra satelit telah memainkan peran penting dalam pemantauan lingkungan ekologi perkotaan karena resolusi spasialnya yang tinggi, cakupannya yang luas, dan kecepatan akuisisinya (Wang et al., 2022).

Penggunaan citra satelit untuk memantau polusi udara telah dimulai sejak tahun 1970-an dengan memanfaatkan Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR), Landsat, dan Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES). Selain itu, satelit seperti Nimbus-7, European Remote-sensing Satellite-2 (ERS-2), Terra, ENVironmental SATellite (ENVISAT), Aqua, Aura, Meteorological Operational Satellite (MetOP), dan Sentinel-5 precursor (Sentinel-5P) juga sering digunakan untuk pemantauan kualitas udara sejak tahun 1978 (Ghasempour et al., 2021).

1.6.9 Landsat 8



Gambar 1.1 Landsat 8

Landsat 8 diluncurkan pada 11 Februari 2013, dari Pangkalan Angkatan Udara Vandenberg, California, menggunakan roket Atlas-V 401, dengan *Extended Payload Fairing* (EPF) dari *United Launch Alliance*, LLC. Satelit Landsat 8 dilengkapi dengan dua instrumen ilmiah utama—*Operational Land Imager* (OLI) dan *Thermal Infrared Sensor* (TIRS). Kedua sensor ini menyediakan cakupan musiman terhadap daratan global dengan resolusi spasial 30 meter (citra tampak, NIR, SWIR); 100 meter (termal); dan 15 meter (pankromatik). Landsat 8 dikembangkan melalui kolaborasi antara NASA dan *U.S. Geological Survey* (USGS). NASA memimpin fase desain, konstruksi, peluncuran, dan kalibrasi di orbit, selama periode tersebut satelit ini disebut sebagai *Landsat Data Continuity Mission* (LDCM). Pada 30 Mei 2013, USGS mengambil alih operasi rutin dan satelit ini menjadi Landsat 8. USGS memimpin kegiatan kalibrasi pasca-peluncuran, operasi satelit, pembuatan produk data, dan pengarsipan data di pusat *Earth Resources Observation and Science* (EROS) (NASA, 2024).

Instrumen Landsat 8 merupakan kemajuan evolusioner dalam teknologi. OLI (*Operational Land Imager*) meningkatkan kinerja dibandingkan sensor Landsat sebelumnya dengan pendekatan teknis yang telah diuji melalui sensor yang diterbangkan pada satelit eksperimental EO-1 milik NASA. OLI adalah sensor push-broom dengan teleskop empat cermin dan kuantisasi 12-bit. OLI mengumpulkan data untuk pita spektral cahaya tampak, inframerah dekat, dan inframerah gelombang pendek, serta satu pita pankromatik. Instrumen ini dirancang untuk masa pakai selama lima tahun. Grafik di bawah ini membandingkan pita spektral OLI dengan pita ETM+ pada Landsat 7. OLI menyediakan dua pita spektral baru, satu dirancang khusus untuk mendeteksi awan cirrus dan satu lagi untuk pengamatan zona pesisir (NASA, 2024).

Selanjutnya, TIRS (*Thermal Infrared Sensor*) mengumpulkan data untuk dua pita spektral (*spectral band*) sempit di wilayah termal yang sebelumnya hanya tercakup oleh satu pita spektral lebar pada Landsat 4–7. Data TIRS dengan resolusi 100 m dipadukan dengan data OLI untuk menghasilkan produk data 12-bit yang telah dikoreksi secara radiometrik, geometrik, dan topografi. Landsat 8 diwajibkan mengirimkan 400 citra per hari ke arsip data USGS (150 lebih banyak dibandingkan yang harus ditangkap oleh Landsat 7). Namun, Landsat 8 secara rutin menghasilkan 725 citra per hari (sementara Landsat 7 menghasilkan 438 citra per hari). Hal ini meningkatkan kemungkinan mendapatkan citra bebas awan untuk daratan global. Ukuran citra Landsat 8 adalah 185 km melintang dan 180 km memanjang. Ketinggian nominal satelit adalah 705 km. Akurasi kartografis sebesar 12 m atau lebih baik (termasuk kompensasi untuk efek topografi) diwajibkan untuk produk data Landsat 8 (NASA, 2024).

1.6.10 Klasifikasi Data Spasial

Dalam penyajian peta atau pola sebaran spasial parameter polutan udara, tahap awal yang penting adalah mengelompokkan nilai-nilai data kontinu ke dalam kelas-kelas interval yang kemudian direpresentasikan dengan warna-warna berbeda agar pola spasial fenomena tersebut mudah diinterpretasikan. Salah satu pendekatan yang sering digunakan dalam statistik deskriptif untuk menentukan jumlah kelas interval adalah menggunakan aturan Sturges, yang memberikan estimasi jumlah kelas yang optimal berdasarkan banyaknya pengamatan dalam dataset (Afuw et al., 2023). Aturan ini dapat dilihat pada Pers. 1.

$$k = 1 + 3,3 \log(n) \quad (1)$$

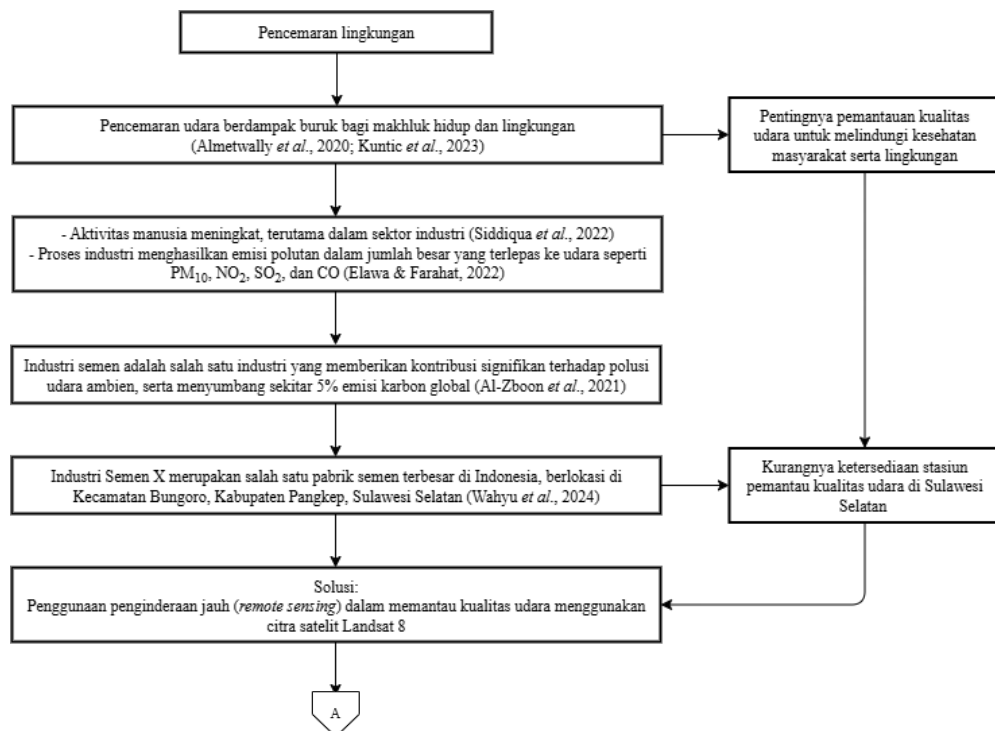
Dimana:

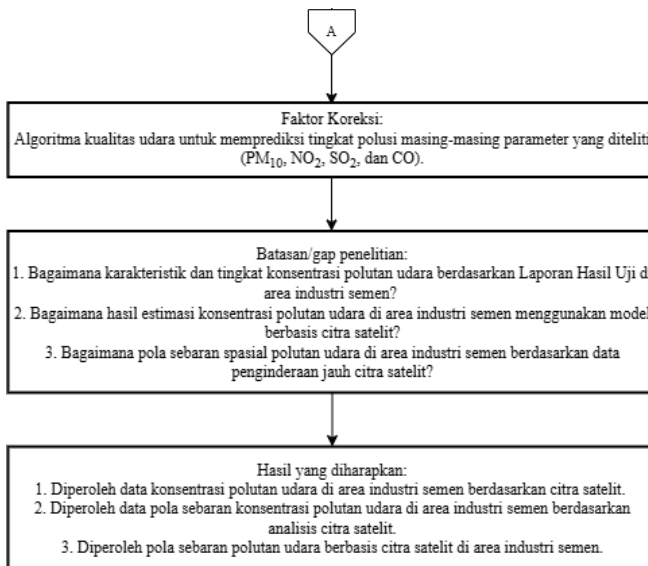
k = Jumlah kelas

n = Jumlah data pengamatan yang dianalisis

Penggunaan aturan Sturges ini umum ditemukan dalam literatur statistik praktis ketika menyusun distribusi frekuensi atau histogram sebelum diterapkan dalam peta tematik untuk data lingkungan seperti konsentrasi polutan udara.

1.6.11 Kerangka Pikir Penelitian





Gambar 1.2 Kerangka pikir penelitian

1.6.12 Penelitian Terdahulu

Untuk menjelaskan kontribusi penelitian ini terhadap perkembangan ilmu pengetahuan, disusun perbandingan dengan penelitian sebelumnya berdasarkan variabel, metode, dan temuan utama. Perbandingan tersebut menegaskan keunikan dan perbedaan penelitian ini, sehingga diharapkan dapat menghasilkan temuan baru yang bermanfaat.

Tabel 1.1 Penelitian terdahulu

Nama	Judul	Tujuan	Perbandingan
Wang, Y., Cai, G., Yang, L., Zhang, N., & Du, M. (2022).	<i>Monitoring of urban ecological environment including air quality using satellite imagery</i>	Mengembangkan indeks pemantauan lingkungan ekologis perkotaan berbasis citra satelit yang lebih komprehensif dengan menambahkan informasi tentang kualitas udara ke dalam model pemantauan yang sudah ada dan untuk mengevaluasi secara objektif kualitas lingkungan ekologis perkotaan.	Penelitian ini memanfaatkan pemetaan lokal dengan GIS, sementara penelitian sebelumnya hanya menggunakan GEE untuk analisis luas di Beijing dan menghasilkan indikator gabungan (AQRSEI) menggunakan PCA.
Al-Alola, S. S.,	<i>Air quality</i>	Menganalisis	Kedua metode

Nama	Judul	Tujuan	Perbandingan
Alkadi, I. I., Alogayell, H. M., Mohamed, S. A., & Ismail, I. Y. (2022).	<i>estimation using remote sensing and GIS-spatial technologies along Al-Shamal train pathway, Al-Qurayyat City in Saudi Arabia</i>	konsentrasi NO ₂ , SO ₂ , dan CO di sepanjang jalur kereta Al-Shamal, Al-Qurayyat, Arab Saudi, menggunakan data satelit Sentinel-5P, MODIS, dan MERRA-2, serta mengkaji hubungan polutan dengan suhu dan kecepatan angin.	menggunakan data satelit untuk analisis polusi udara. Penelitian ini berfokus pada pemetaan lokal menggunakan GIS yang diterapkan di wilayah sekitar kawasan industri semen yang menjadi objek studi, sementara penelitian sebelumnya mencakup survei, klasifikasi lahan, dan interpolasi IDW, serta berorientasi di jalur kereta.
Al-Zboon, K., Matalqah, W., & Ammary, B. (2021).	<i>Effect of Cement Industry on Ambient Air Quality and Potential Health Risk: A Case Study from Riyadh, Saudi Arabia</i>	Menilai dampak industri semen terhadap kualitas udara ambien di empat lokasi sekitar pabrik semen di Arab Saudi. Juga menyelidiki potensi dampak kesehatan, risiko kesehatan, dan risiko kanker yang mungkin terjadi akibat emisi dari pabrik tersebut, serta menggunakan model AERMOD untuk memprediksi konsentrasi polutan di area sekitar pabrik.	Kedua penelitian menganalisis polusi udara di sekitar industri, tetapi penelitian ini fokus pada pemetaan lokal dengan GIS, sementara penelitian sebelumnya menggunakan model AERMOD untuk prediksi polutan di area luas dan menghitung risiko kesehatan dengan HQ dan HI.
Ghasempour, F., Sekertekin, A., & Kutoglu, S. H. (2021).	<i>Google Earth Engine Based Spatio-temporal Analysis of Air Pollutants Before and 1</i>	Memantau pola spasial-temporal polutan udara (NO ₂ , SO ₂ , AOD) dari Sentinel-5P dan MODIS antara Januari 2019 hingga September 2020 di Turki, serta	Kedua metode menggunakan data satelit dan stasiun darat untuk analisis polusi udara. Penelitian ini juga meliputi pemetaan lokal dengan GIS, sedangkan penelitian

Nama	Judul	Tujuan	Perbandingan
	<i>During the First Wave COVID-19 Outbreak over Turkey via Remote Sensing</i>	menganalisis hubungan polutan dengan parameter meteorologi dan indeks PMI selama lockdown COVID-19.	sebelumnya memanfaatkan GEE untuk analisis di Turki, dengan cakupan lebih luas, integrasi faktor ekonomi, dan analisis meteorologi.
Pambudi, R. A., Naldi, A., Luthfi, A., Puspitarini, D. A., Chaerani, M. M., Permana, M. W., & Shafira, S. (2020).	<i>Spatiotemporal trend of particulate matter (PM10) concentration on cement industries in Klapanunggal and Citeureup Sub-districts</i>	Mengidentifikasi variasi konsentrasi polusi PM ₁₀ yang diemisikan oleh industri semen di Kecamatan Klapanunggal dan Citeureup secara spasial dan temporal, yang berpotensi memengaruhi kesehatan masyarakat.	Persamaan kedua penelitian yaitu menggunakan satelit untuk analisis spasial-temporal polusi udara. Penelitian ini difokuskan pada pemetaan lokal di sekitar kawasan industri semen yang menjadi objek studi dengan GIS, sedangkan penelitian sebelumnya menganalisis tren PM ₁₀ selama 16 tahun menggunakan Landsat 7 dan 8 dengan algoritma AOT untuk estimasi PM ₁₀ .
Muthukumar, P., Cocom, E., Nagrecha, K., Comer, D., Burga, I., Taub, J., Fukuda Calvert, C., Holm, J., & Pourhomayoun, M. (2022).	<i>Predicting PM_{2.5} atmospheric air pollution using deep learning with meteorological data and ground-based observations and remote-sensing satellite big data</i>	Mengembangkan model untuk menganalisis pola spasial dan temporal polusi udara menggunakan data dari citra satelit dan sensor darat. Model ini bertujuan memahami penyebaran geografis dan perubahan konsentrasi polusi dari waktu ke waktu.	Kedua penelitian menggunakan data citra satelit dan sensor darat untuk analisis polusi udara. Penelitian sebelumnya berfokus pada prediksi PM _{2.5} menggunakan GCN dan ConvLSTM serta berskala regional, sementara penelitian ini berfokus pada pemrosesan data lokal menggunakan GIS, dengan cakupan wilayah di sekitar kawasan

Nama	Judul	Tujuan	Perbandingan
Amah, V. E., Udeh, N., & Effiong, B. O. (2020).	<i>Particulate Matter Pollution around a Cement Industry and its Potential Effect</i>	Menganalisis konsentrasi partikel PM _{2.5} dan PM ₁₀ di sekitar industri semen di Rivers State, Nigeria, serta menentukan indeks polusi udara pada jarak tertentu dari sumber emisi. Memahami sejauh mana polusi partikulat tersebut berdampak pada kualitas udara dan kesehatan masyarakat di area sekitar pabrik semen.	industri semen yang menjadi objek studi. Kedua metode mengukur konsentrasi polutan udara di sekitar area industri dan mempertimbangkan faktor lingkungan. Penelitian ini berfokus pada pemetaan lokal menggunakan GIS dengan data satelit untuk analisis spasial, sementara studi sebelumnya menitikberatkan pada pengukuran langsung di lapangan dengan interval jarak dari cerobong, analisis varians dua arah, perhitungan indeks polusi berdasarkan standar EPA.
Dede, M., Widiawaty, M. A., Nurhanifah, N., Ismail, A., Artati, A. R. P., Ati, A., & Ramadhan, Y. R. (2020).	Estimasi Perubahan Kualitas Udara Berdasarkan Citra Satelit Penginderaan Jauh di Sekitar PLTU Cirebon	Mengestimasi perubahan kualitas udara di sekitar PLTU Cirebon menggunakan citra satelit untuk menganalisis dampak lingkungan dan mendukung pengelolaan lingkungan.	Kedua penelitian menggunakan citra satelit dan perangkat lunak GIS untuk analisis spasial-temporal polusi udara. Persamaannya terletak pada fokus analisis kualitas udara menggunakan data satelit. Namun, penelitian ini lebih berorientasi pada pemetaan lokal di sekitar kawasan industri semen yang menjadi objek studi dengan detail proses pengolahan dan validasi model,

Nama	Judul	Tujuan	Perbandingan
			sedangkan penelitian sebelumnya menitikberatkan pada analisis perubahan kualitas udara di sekitar PLTU Cirebon dengan membandingkan hasil terhadap standar kualitas udara.
Yulianita, Y., Suryani, N., & Mariati, H. (2022).	Analisis Perubahan Kualitas Udara di Kawasan PLTU Teluk Sirih Kota Padang Menggunakan Remote Sensing	Menganalisis perubahan kualitas udara di Kecamatan Bungus Teluk Kabung sebelum (2013) dan setelah (2020) beroperasinya PLTU Teluk Sirih, menggunakan citra satelit Landsat 8 untuk parameter PM ₁₀ , SO ₂ , dan NO _x .	Persamaan kedua metode yaitu menggunakan citra satelit dan GIS untuk analisis kualitas udara, termasuk PM ₁₀ dan SO ₂ . Penelitian ini fokus pada pemetaan lokal, sementara penelitian sebelumnya perubahan kualitas udara antara 2013 dan 2020 dengan uji Wilcoxon.
Sameen, M., Al Kubaisy, M., Nahas, F., Ali, A., Othman, N., & Hason, M. (2014).	<i>Sulfur Dioxide (SO₂) Monitoring Over Kirkuk City Using Remote Sensing Data</i>	Memantau konsentrasi SO ₂ di Kirkuk menggunakan data Landsat 8 dan pengukuran in-situ untuk menghasilkan peta distribusi yang akurat dan terjangkau guna mendukung pengelolaan lingkungan.	Kedua metode menggunakan citra satelit dan GIS untuk analisis spasial polusi udara, dengan fokus pada parameter seperti SO ₂ . Persamaannya terletak pada pengolahan data satelit dan pembuatan peta distribusi. Keduanya mengintegrasikan data lapangan dengan analisis regresi non-linear untuk membangun model prediksi parameter.

BAB II METODE PENELITIAN

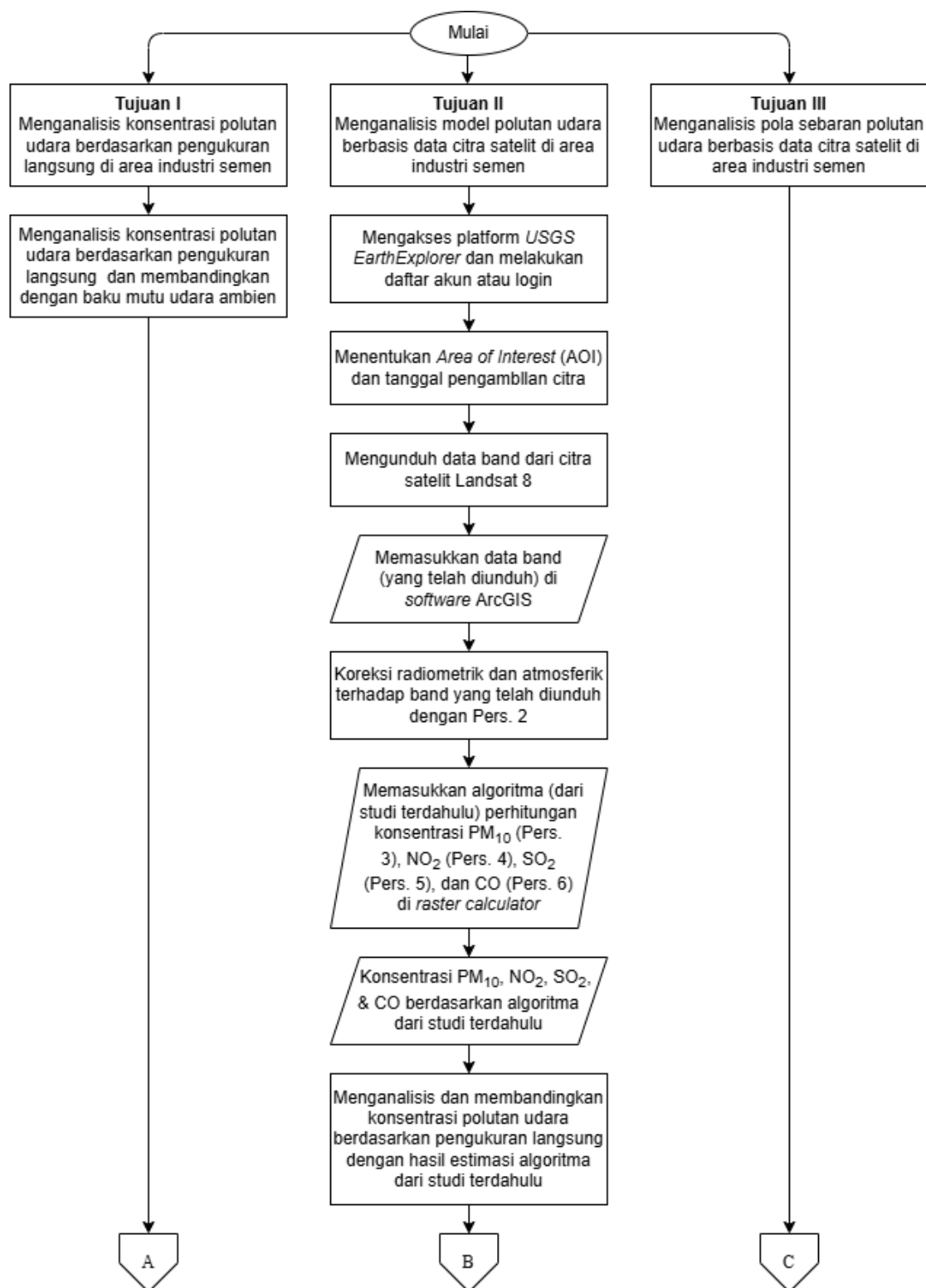
2.1 Rancangan Penelitian

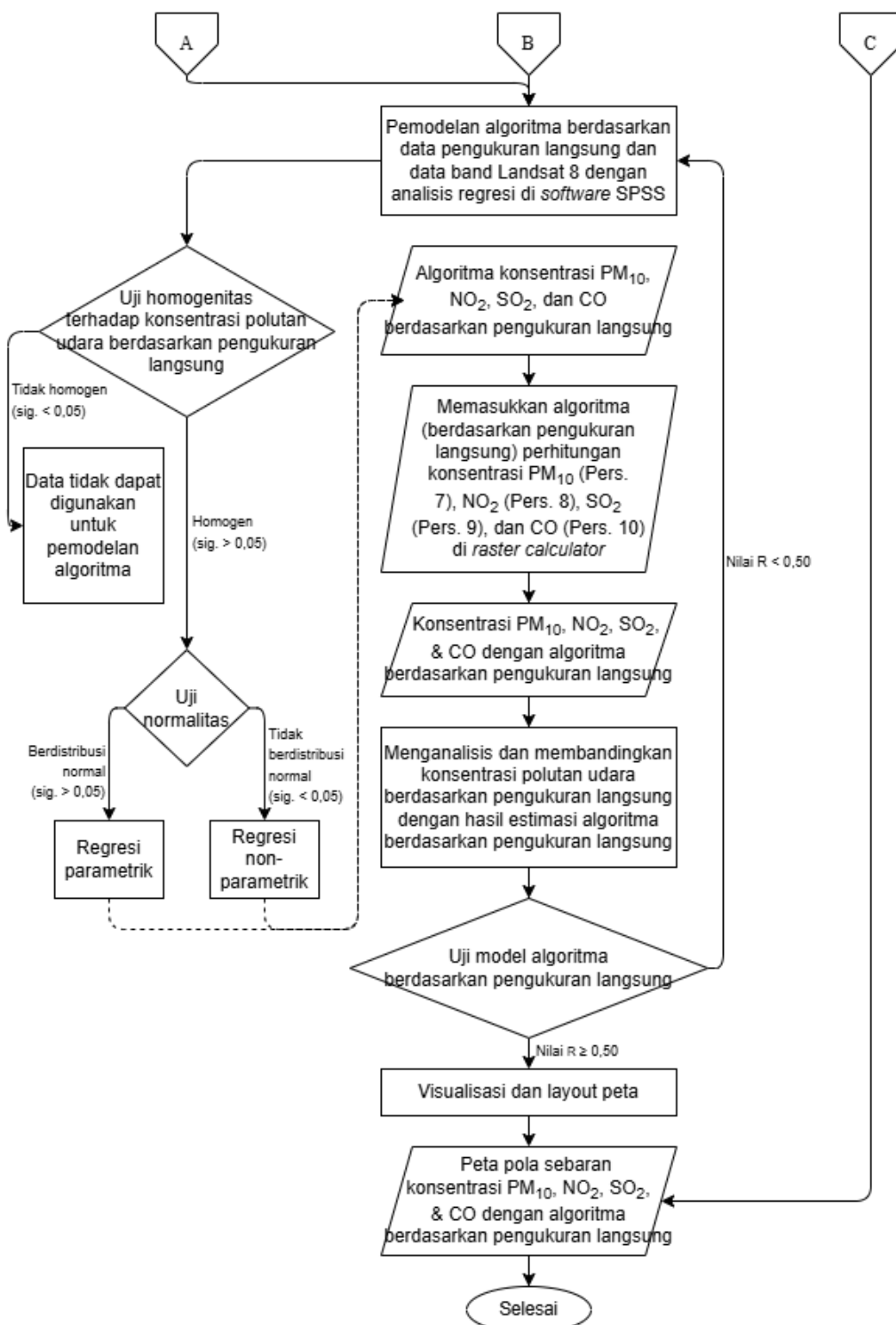
Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan rancangan deskriptif-komparatif, yang bertujuan untuk menggambarkan kondisi kualitas udara di kawasan industri semen sekaligus membandingkan hasil estimasi konsentrasi polutan berbasis citra satelit dengan data pengukuran lapangan. Variabel dependen dalam penelitian ini meliputi konsentrasi PM_{10} , NO_2 , SO_2 , dan CO , sedangkan variabel independen terdiri atas nilai digital pada berbagai band dan *Land Surface Temperature* (LST) dari citra Landsat 8.

Prosedur penelitian dibagi menjadi tiga tahap utama sesuai dengan tujuan penelitian. Tahap pertama berfokus pada analisis konsentrasi polutan udara berdasarkan pengukuran langsung pada 41 titik pengamatan di area industri semen. Tahapan ini mencakup uji homogenitas untuk memastikan keseragaman data setiap parameter dan uji normalitas untuk menentukan jenis analisis regresi yang sesuai. Data yang tidak homogen tidak dapat digunakan dalam pemodelan algoritma, sementara data yang berdistribusi normal dianalisis menggunakan regresi parametrik, dan data yang tidak berdistribusi normal menggunakan regresi nonparametrik.

Tahap kedua meliputi pengunduhan citra satelit Landsat 8 melalui platform *USGS EarthExplorer*, penentuan *Area of Interest* (AOI) serta tanggal pengambilan citra, dilanjutkan dengan koreksi radiometrik dan atmosferik, dan ekstraksi nilai reflektansi tiap band. Nilai reflektansi tersebut digunakan dalam analisis regresi multivariat di SPSS untuk membangun model estimasi konsentrasi PM_{10} , NO_2 , SO_2 , dan CO berdasarkan pengukuran langsung.

Model yang dihasilkan diuji menggunakan 20% data validasi dengan koefisien korelasi Pearson (R). Model dengan nilai korelasi $R \geq 0,50$ dinyatakan layak digunakan untuk pemetaan spasial (Kazi et al., 2023; Alvarez et al., 2024; Ho et al., 2024). Tahap ketiga mencakup visualisasi dan layout peta untuk menampilkan sebaran spasial konsentrasi PM_{10} , NO_2 , SO_2 , dan CO , yang kemudian dianalisis secara deskriptif untuk menginterpretasikan pola distribusi polutan terhadap aktivitas industri semen di wilayah penelitian.

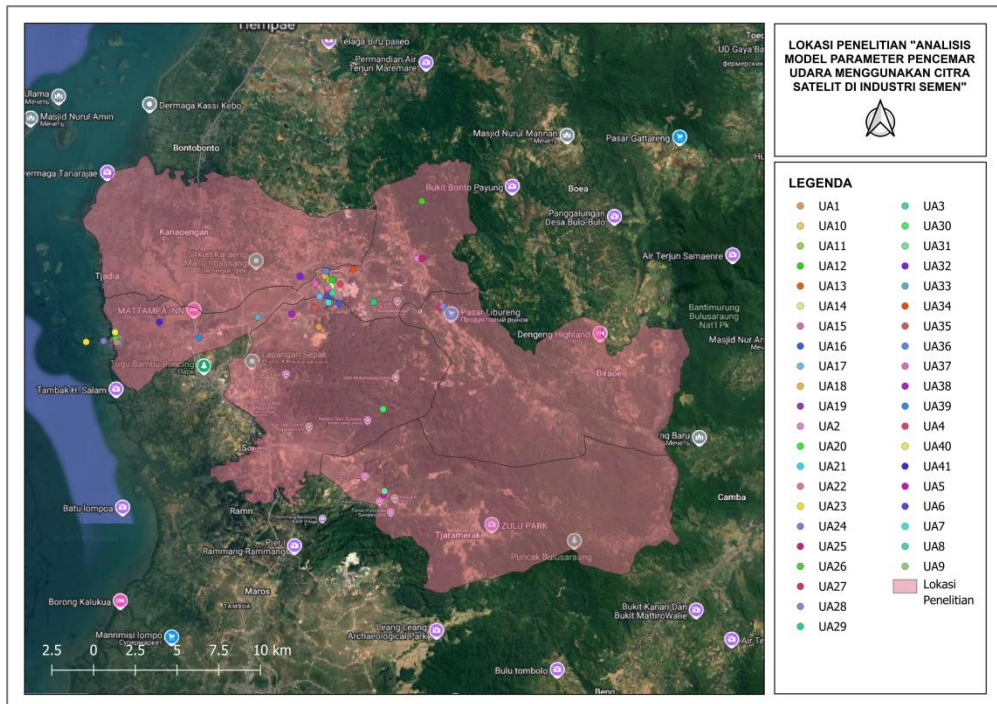




Gambar 2.1 Alur penelitian

2.2 Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian ini akan dilaksanakan di area sekitar kawasan industri semen yang berlokasi di Kabupaten Pangkep, Sulawesi Selatan, mencakup 41 titik di area pabrik dan sekitarnya yang terdampak emisi polutan. Penelitian akan dilakukan selama 3-6 bulan untuk mendapatkan cakupan data spasial dan temporal yang memadai.



Gambar 2.2 Lokasi penelitian

Adapun koordinat dari titik pengukuran dari penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Titik pengukuran

Area	Titik Pengukuran	Kode	Titik Koordinat	
			S	E
Area Kerja (Operasional)	Tambang Clay Bontoa (Taman Kehati)	UA1	-4,80908	119,6101
	Tambang Clay Tabo-Tabo	UA2	-4,77181	119,663
	Tambang Clay Bulutellue	UA3	-4,79847	119,6771
	Tambang Batu Kapur	UA4	-4,78581	119,6215
	Tambang Clay Tonasa 1	UA5	-4,89978	119,6455
	Packer Unit 5	UA6	-4,79183	119,6147
	Cement Mill Unit 5	UA7	-4,79578	119,6152
	Kiln Unit 5	UA8	-4,79056	119,6174

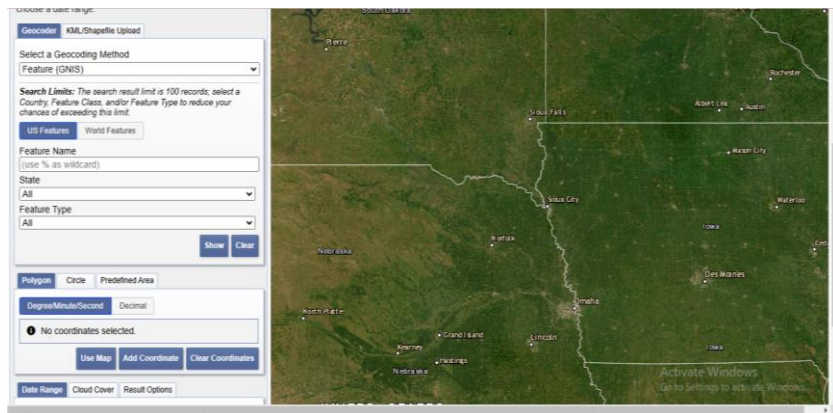
Area	Titik Pengukuran	Kode	Titik Koordinat	
			S	E
Permukiman	Packer Unit 2/3/4	UA9	-4,78361	119,6176
	Cement Mill Unit 2/3	UA10	-4,78389	119,6162
	Coal Mill Unit 2/3	UA11	-4,78378	119,6156
	Kiln Unit 2/3	UA12	-4,78372	119,6173
	Coal Stock Pile Unit 2/3/4	UA13	-4,78883	119,6146
	Kiln Unit 4	UA14	-4,78692	119,6167
	Cement Mill Unit 4	UA15	-4,78792	119,6149
	Coal Stockpile Unit 5	UA16	-4,79622	119,6209
	Coal Stockpile Bontoa	UA17	-4,79253	119,6105
	Batching Plant Biringere	UA18	-4,78139	119,6132
	Gudang Batubara Biringkassi	UA19	-4,81733	119,5002
	Silo Semen Biringkassi	UA20	-4,81611	119,5004
	PLTU 1 Biringkassi	UA21	-4,81789	119,5018
	PLTU 2 Biringkassi	UA22	-4,81786	119,501
	Tengah Dermaga Khusus Biringkassi	UA23	-4,81761	119,4845
	Dermaga II Biringkassi	UA24	-4,81714	119,4939
	Jalan Tambang Clay Tabo-Tabo	UA25	-4,77177	119,6657
	Pemukiman Dekat Tambang Tabo-Tabo	UA26	-4,74074	119,6654
	Pemukiman Dekat Tambang Bulutellue	UA27	-4,79831	119,6755
	Jalan Tambang Clay Bulutellue	UA28	-4,79759	119,6771
	Desa Mangilu	UA29	-4,79547	119,6397
	Jalan Tambang Clay Tonasa 1	UA30	-4,85344	119,645
	Pemukiman Dekat Tambang Clay Tonasa 1	UA31	-4,89784	119,6459
	Desa Taraweang	UA32	-4,78167	119,5998
	Depan Kantor Desa Sapanang	UA33	-4,80383	119,5772
	Depan Masjid Kampung Sela	UA34	-4,77778	119,6285
	Depan Kantor Pusat	UA35	-4,79872	119,6078
	Kantor Desa Biringere	UA36	-4,77883	119,6138
	Depan Masjid Taqwa	UA37	-4,78567	119,6082
	Jalan Poros Tonasa - Bungoro (Bontoa)	UA38	-4,80214	119,5955
	Perempatan Bungoro	UA39	-4,81514	119,5453
	Depan SD Bujung Tangaya (Bulu Cindea)	UA40	-4,81233	119,5001
	Desa Bowong Cindea	UA41	-4,80681	119,5239

2.3 Alat dan Bahan

Pada penelitian ini, digunakan beberapa perangkat lunak untuk mengumpulkan dan mengolah data, antara lain:

1. *USGS EarthExplorer*

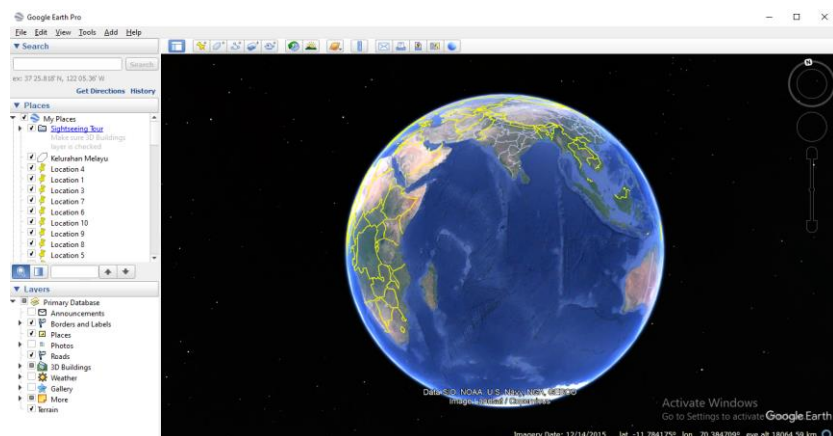
USGS EarthExplorer merupakan platform online yang menyediakan akses gratis terhadap berbagai jenis data citra satelit, termasuk data Landsat. Dalam penelitian ini, *USGS EarthExplorer* digunakan untuk mengakses data Landsat 8.



Gambar 2.3 *USGS EarthExplorer*

2. *Aplikasi Google Earth Pro*

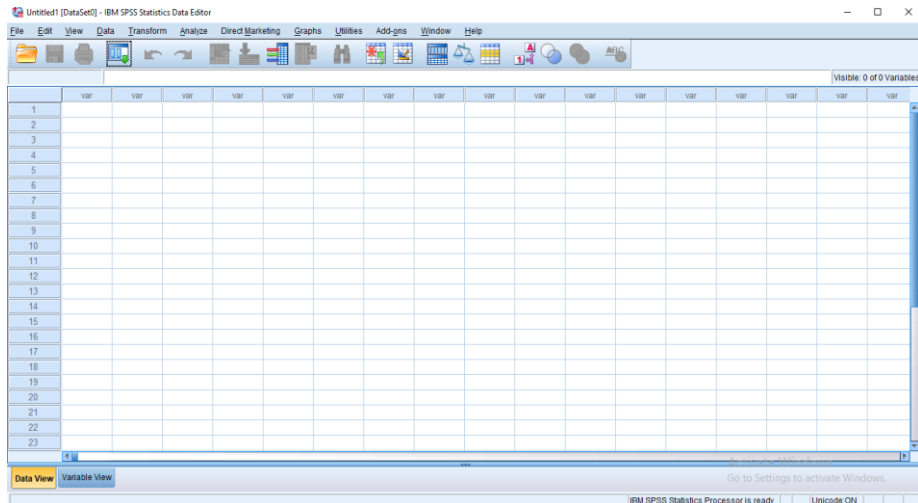
Google Earth Pro merupakan sebuah perangkat lunak yang memungkinkan pengguna untuk menjelajahi permukaan bumi secara virtual dengan sangat detail. Dalam penelitian ini, *Google Earth Pro* digunakan untuk menampilkan peta dan koordinat lokasi penelitian.



Gambar 2.4 *Google Earth Pro*

5. IBM SPSS Statistics 22

IBM SPSS Statistics 22 adalah perangkat lunak statistika yang sering digunakan dalam berbagai bidang penelitian, termasuk ilmu sosial, kesehatan, dan lingkungan. Dalam penelitian ini, SPSS 22 memiliki peran yang sangat penting dalam menganalisis data kuantitatif yang diperoleh dari Laporan Hasil Uji dan citra satelit.



Gambar 2.7 IBM SPSS Statistics 22

2.4 Sumber Data

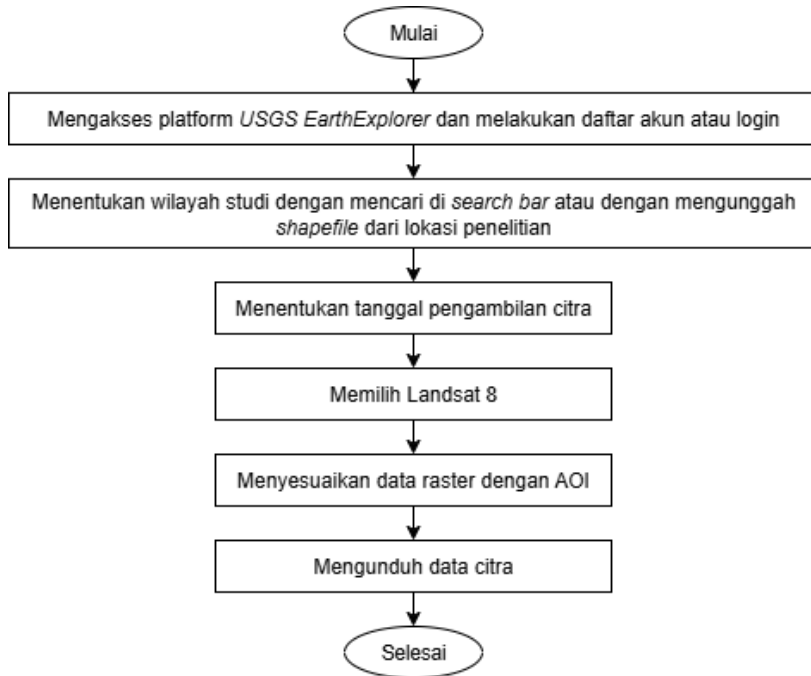
Dalam penelitian ini, data yang digunakan berasal dari berbagai sumber guna memberikan gambaran yang komprehensif mengenai kualitas udara di sekitar kawasan industri semen yang menjadi objek studi. Data pengukuran langsung diperoleh dari pihak industri semen yang menjadi objek studi, berupa data konsentrasi PM_{10} , NO_2 , SO_2 , dan CO pada 41 titik pengukuran. Selain itu, juga digunakan data yang diperoleh dari citra satelit Landsat 8. Data ini memberikan informasi tambahan mengenai kondisi lingkungan, penggunaan lahan, dan faktor-faktor lain yang dapat mempengaruhi kualitas udara.

2.5 Metode Pengambilan Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas data pengukuran langsung dan data penginderaan jauh berbasis citra satelit Landsat 8. Data pengukuran langsung diperoleh dari industri semen yang menjadi objek penelitian dan mencakup hasil pengukuran konsentrasi empat parameter utama polutan udara, yaitu PM_{10} , NO_2 , SO_2 , dan CO pada 41 titik pengamatan di area industri.

Data penginderaan jauh diperoleh melalui platform *USGS EarthExplorer* dengan citra Landsat 8 (OLI dan TIRS). Tahap pengambilan data mencakup penentuan *Area of Interest* (AOI) berdasarkan batas wilayah penelitian dalam

format *shapefile* (SHP), kemudian dilakukan pengunduhan data band dan citra termal (LST) sesuai tanggal pengambilan yang mewakili periode pengukuran lapangan. Adapun metode pengambilan data citra satelit Landsat 8 dapat dilihat pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Metode pengambilan data citra satelit Landsat 8

2.6 Metode Pengolahan Data

Pengolahan data citra satelit Landsat 8 (Lampiran 1) dilakukan menggunakan perangkat lunak ArcGIS dan SPSS. Tahapan pengolahan dimulai dengan koreksi radiometrik dan atmosferik untuk mengurangi pengaruh hamburan dan penyerapan atmosfer sehingga diperoleh nilai reflektansi permukaan yang lebih akurat. Pada tahapan koreksi ini, digunakan Pers. 2 (USGS, 2018).

$$\rho\lambda = \frac{M_p Q_{cal} + A_p}{\sin(\theta_{SE})} \quad (2)$$

Dimana:

$\rho\lambda$ = Reflektans *Top-of-Atmosphere* (TOA)

M_p = Faktor penskalaan ulang multiplikatif khusus band dari metadata (REFLECTANCE_MULT_BAND_x, di mana x adalah nomor band)

Q_{cal} = Nilai piksel produk standar yang terkuantisasi dan terkalibrasi (DN)

A_p = Faktor penskalaan ulang aditif khusus band dari metadata (REFLECTANCE_ADD_BAND_x, di mana x adalah nomor band)

θ_{SE} = Sudut elevasi matahari lokal. Sudut elevasi matahari pada pusat scene dalam satuan derajat tersedia pada metadata (SUN_ELEVATION)

Data hasil koreksi (Lampiran 2) kemudian digunakan untuk ekstraksi nilai reflektansi band serta *Land Surface Temperature* (LST) sebagai variabel independen dalam analisis. Tahap berikutnya adalah penerapan algoritma studi terdahulu untuk menghitung estimasi konsentrasi PM_{10} , NO_2 , SO_2 , dan CO menggunakan fitur *Raster Calculator* pada ArcGIS. Dalam penelitian ini, algoritma estimasi PM_{10} mengacu pada rumus dari Othman et al. (2010) (Pers. 3), estimasi NO_2 dan SO_2 mengacu pada Mahardianti et al. (2024) (Pers. 4 dan 5), sedangkan estimasi CO mengacu pada Somvanshi et al. (2019) (Pers. 6).

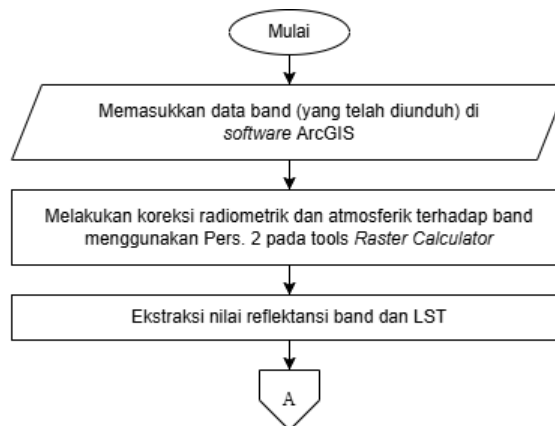
$$PM_{10} = (396 \times \beta_2) + (253 \times \beta_3) - (194 \times \beta_4) \quad (3)$$

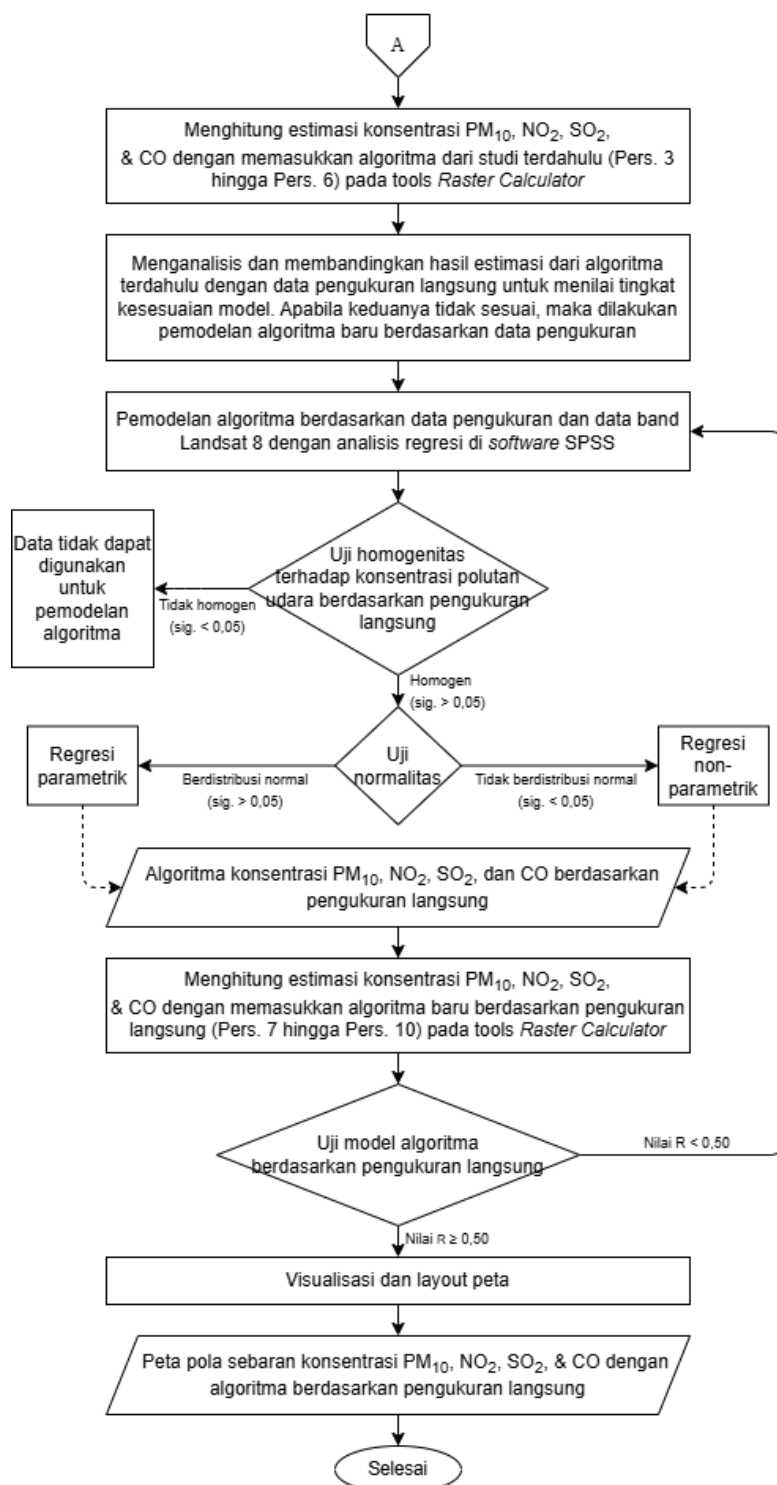
$$NO_2 = LST \times 1,875 \quad (4)$$

$$SO_2 = LST \times 6,0232 \quad (5)$$

$$CO = 83,659 + (-0,427 \times \beta_3) + (0,22 \times \beta_4) + (-0,461 \times \beta_7) \quad (6)$$

Hasil estimasi dari algoritma terdahulu dibandingkan dengan data pengukuran langsung untuk menilai tingkat kesesuaian model. Apabila konsentrasi polutan udara dari hasil estimasi dengan algoritma terdahulu tidak sesuai dengan pengukuran langsung, dan apabila data pengukuran langsung memenuhi syarat homogenitas dan berdistribusi normal, dilakukan pemodelan algoritma baru menggunakan analisis regresi linear multivariat di SPSS menggunakan 80% dari keseluruhan data. Sementara jika data pengukuran langsung tidak berdistribusi normal, digunakan pendekatan regresi nonparametrik. Model yang dihasilkan kemudian divalidasi menggunakan koefisien korelasi Pearson (R), dengan $R \geq 0,50$ sebagai indikator kelayakan model (Kazi et al., 2023; Alvarez et al., 2024; Ho et al., 2024). Hasil estimasi dengan model (algoritma yang dihasilkan) tersebut divisualisasikan dalam bentuk peta sebaran spasial PM_{10} , NO_2 , SO_2 , dan CO, yang kemudian diinterpretasikan untuk menganalisis hubungan antara pola distribusi polutan dan aktivitas industri semen di wilayah penelitian. Adapun metode pengolahan data dapat dilihat pada Gambar 2.9.





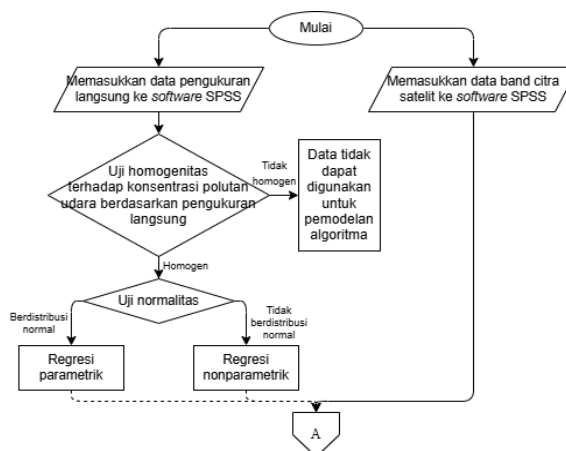
Gambar 2.9 Metode pengolahan data

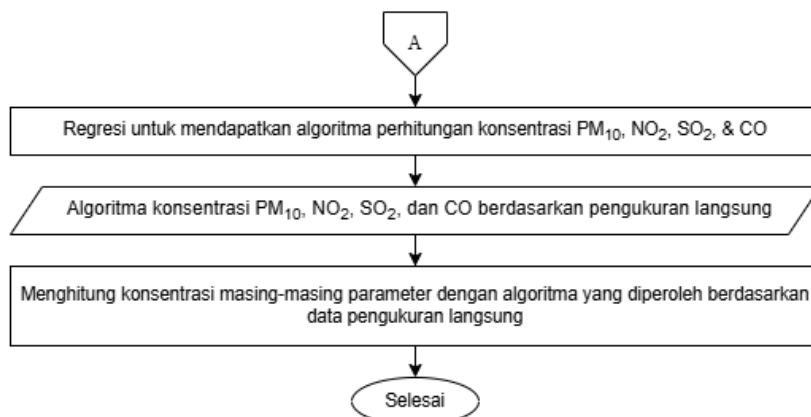
2.7 Metode Analisis Data

Analisis data dalam penelitian ini difokuskan pada pengembangan dan validasi model algoritma estimasi konsentrasi polutan udara berbasis citra satelit. Proses analisis diawali dengan uji homogenitas terhadap data pengukuran langsung untuk memastikan keseragaman data tiap parameter polutan udara. Selanjutnya dilakukan uji normalitas untuk menentukan jenis regresi yang akan digunakan, regresi parametrik untuk data berdistribusi normal dan regresi nonparametrik untuk data yang tidak berdistribusi normal.

Model algoritma dibangun dengan analisis regresi multivariat antara nilai reflektansi band dan LST dari citra Landsat 8 (Lampiran 2) dengan konsentrasi PM_{10} , NO_2 , SO_2 , dan CO berdasarkan pengukuran langsung (Lampiran 3). Model yang dihasilkan digunakan untuk menghitung konsentrasi polutan di seluruh area penelitian melalui Raster Calculator di ArcGIS, dan kemudian divalidasi 20% dari keseluruhan data menggunakan koefisien korelasi Pearson (R) dengan batas kelayakan $R \geq 0,50$. Menurut Kazi et al. (2023) Alvarez et al. (2024), dan Ho et al. (2024), koefisien korelasi dengan nilai $R \geq 0,5$ termasuk dalam kategori hubungan yang berarti (*meaningful correlation*) dan dapat digunakan sebagai indikator kelayakan model. Dengan demikian, penelitian ini menetapkan bahwa model dianggap memenuhi kriteria validitas apabila R menunjukkan nilai minimal 0,5. Proporsi 20% dari keseluruhan titik dipilih sebagai data validasi karena pendekatan ini umum digunakan dalam analisis regresi dan *machine learning* untuk menguji performa model pada data yang tidak dilibatkan dalam proses pembentukan algoritma (Vabalas et al., 2019). Selanjutnya konsentrasi polutan dengan model algoritma berdasarkan pengukuran langsung kemudian divisualisasikan dalam bentuk peta. Analisis statistik dan pengujian model dilakukan menggunakan perangkat lunak SPSS dan Microsoft Excel, sedangkan pengolahan spasial dilakukan pada ArcGIS.

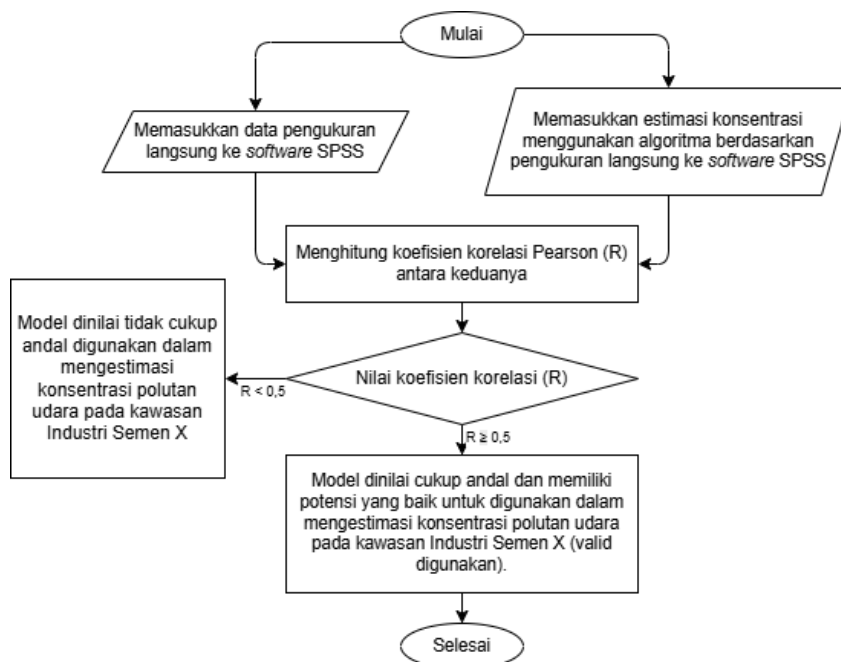
2.7.1 Algoritma Konsentrasi Polutan Udara Berdasarkan Pengukuran Langsung





Gambar 2.10 Analisis algoritma konsentrasi polutan udara

2.7.2 Uji Model Algoritma Berdasarkan Data Pengukuran Langsung



Gambar 2.11 Validasi algoritma berdasarkan data pengukuran