BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kualitas udara menjadi isu global yang semakin mendesak, organisasi Kesehatan Dunia (WHO) melaporkan bahwa polusi udara bertanggung jawab atas sekitar 7 juta kematian setiap tahun secara global (World Health Organization. 2014). Di Indonesia, sektor energi terutama pembangkit Listrik tenaga uap (PLTU) berbahan bakar Batubara menjadi salah satu contributor utama emisi udara, terutama Sulfur Dioksida (SO_2), Nitrogen Dioksida (NO_2), dan Partkel tersuspensi (PM10/PM2,5). Emisi Ini berkontribusi terhadap penurunan kualitas udara, gangguan kesehatan masyarakat, dan kerusakan lingkungan. Kondisi ini menjadi tantangan yang besar dalam pencapaian target Pembangunan berkelanjutan (Sustainable Development Goals/SDGs), khususnya SDG 3 (Kehidupan sehat dan Sejahtera), SDG 11 (kota dan pemukiman yang berkelanjutan), serta SDG 13 (penanganan perubahan iklim). Pemerintah Indonesia juga telah menyatakan komitmennya dalam mengendalikan pencemaran udara melalui berbagai kebijakan nasional dan rencan aksi iklim, termasuk *Nationally Determined Contribution* (NDC) (Farhan et al. 2023).

Secara regulatif, pengelolaan kualitas udara di indonesia diatur melalui Peraturan Pemerintah Indonesia Nomor 22 tahun 2021 Tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, Serta Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor 15 Tahun 2019 tentang Baku Mutu Emisi Sumber Tidak Bergerak untuk Usada dan/atau Kegiatan Pembangkit Listrik Tenaga Thermal. Dalam Regulasi ini, PLTU Diwajibkan memenuhi standar baku mutu emisi dan melakukan pemantauan serta pelaporan secara berkala. Ketidak patuhan terhadap

ketentuan tersebut dapat menimbulkan konsekuensi hukum, menciptakan konflik sosial dengan masyarakat terdampak, dan menyebabkan kerusakan lingkungan yang luas. Oleh karena itu, pemantauan dan pelaporan emisi secara akurat menjadi bagian penting dari tata kelola lingkungan yang bertanggung jawab.

PLTU Celukan Bawang merupakan pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) berbahan bakar batubara dan merupakan satu-satunya PLTU yang ada di Pulau Bali dengan kapasitas terpasang sebesar 3x142 MW dengan daya mampu 380 MW, PLTU Celukan Bawang berlokasi di Banjar Dinas Pungkukan, Desa Celukan Bawang, Kecamatan Gerokgak, Kabupaten Buleleng, Provinsi Bali dengan batas wilayah sebalah timur adalah Dusun Brombong, Sebelah Selatan Desa Tinga-tinga, sebelah barat adalah Desa Celukan Bawang, dan sebelah utara adalah laut bali.

PLTU Celukan bawang dalam sistem operasinya menghasilkan polutan utama yaitu adalah SO_2, NO_2, dan Partikulat. Pencemaran SO_x di udara terutama berasal dari pemakaian batubara pada kegiatan industri, transportasi dan lain sebagainya. (Wisnu Wardhana, 2004). Pembentukan NO dan NO_2 merupakan reaksi antara nitrogen dan oksigen di udara sehingga membentuk NO, yang bereaksi lebih lanjut dengan lebih banyak oksigen membentuk NO_2. Pencemar utama NO_x berasal dari gas buangan hasil pembakaran bahan bakar gas alam (Wisnu Wardhana, 2004). Sedangkan Partikulat (PM_{10} & $PM_{2,5}$) adalah debu partikulat yang terutama dihasilkan dari emisi gas buangan dari proses pembakaran pada Boiler (Muziansyah,dkk.2015).

Paparan polutan udara ambien seperti $PM_{2.5}$, NO_2, dan SO_2 telah terbukti berdampak signifikan terhadap kesehatan manusia. Studi global oleh Liu et al. (2019) yang menganalisis data dari 652 kota di dunia menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi $PM_{2.5}$ berhubungan signifikan dengan peningkatan angka kematian harian akibat penyakit pernapasan dan kardiovaskular. Selain itu, penelitian Chen et al.

(2020) menunjukkan bahwa setiap kenaikan konsentrasi $PM_{2.5}$ sebesar 10 µg/m³ dapat meningkatkan risiko kematian sebesar 6–8%. Temuan ini diperkuat oleh studi Global Burden of Disease yang menyatakan bahwa paparan $PM_{2.5}$ berkontribusi terhadap jutaan kematian prematur setiap tahunnya di seluruh dunia (Burnett et al., 2018).

Paparan gas NO_2 juga memiliki dampak signifikan terhadap kesehatan, khususnya pada kelompok rentan. Achakulwisut et al. (2019) menunjukkan bahwa paparan NO_2 berkontribusi terhadap sekitar 4 juta kasus baru asma anak setiap tahunnya secara global. Sementara itu, studi lain menunjukkan bahwa paparan jangka panjang terhadap polutan dari aktivitas pembakaran, termasuk pembangkit listrik tenaga uap (PLTU), berkontribusi terhadap peningkatan konsentrasi SO_2, NO_2, dan partikulat di wilayah sekitar sumber emisi (Gulia et al., 2020; Zhang et al., 2021).

Secara spasial, penelitian menunjukkan bahwa masyarakat yang tinggal di dekat sumber emisi industri memiliki tingkat paparan polutan yang lebih tinggi dibandingkan wilayah non-industri. Hal ini mengindikasikan bahwa kedekatan dengan sumber emisi menjadi faktor penting dalam menentukan tingkat risiko paparan terhadap masyarakat. Oleh karena itu, dalam konteks wilayah sekitar PLTU Celukan Bawang, terdapat potensi nyata bahwa masyarakat sekitar mengalami paparan polutan udara. Namun demikian, distribusi spasial konsentrasi polutan dan tingkat risiko paparan di wilayah tersebut masih belum teridentifikasi secara spesifik, sehingga diperlukan penelitian berbasis data empiris dan analisis spasial untuk memetakan zona risiko secara lebih akurat.

Secara lingkungan, emisi tersebut dapat menyebabkan deposisi asam yang merusak vegetasi dan mempercepat pelapukan bangunan, terlebih bangunan-bangunan yang berdekatan dengan sumber emisi serta menurunkan visibilitas atmosfer yang penting untuk sektor pariwisata seperti di Bali. Wilayah pesisir utara pulau bali,

termasuk Celukan Bawang, dipengaruhi oleh pola angin musiman (musim barat dan timur). Topografi pesisir yang landai berupa dataran dengan dominasi penggunaan lahan tegalan, dan pemukiman memungkinkan transportasi polutan ke daerah pemukiman yang berada di sekitar PLTU Celukan bawang, tergantung arah dan kecepatan angin.

Pemantauan kualitas udara sekitar PLTU Celukan Bawang saat ini masih terbatas, pemantauan kualitas udara dilakukan secara internal perusahaan yang dilaksanakan secara periodik bekerja sama dengan laboratorium terakreditasi dan tidak terdapat informasi publik yang memadai terkait pemantauan ambien rutin atau hasil pemantauan emisi oleh lembaga atau instansi institusi terkait. Titik pemantauan masih terbatas untuk mencerminkan distribusi spasial yang luas, sehingga tidak dapat digunakan sebagai analisis zona resiko secara komprehensif. Ketiadaan peta sebaran konsentrasi polutan yang berbasis data menimbulkan kesenjangan informasi bagi pengambil keputusan.

Emisi dari cerobong PLTU celukan bawang berpotensi membentuk zona resiko pencemaran udara di wilayah permukiman terdekat, khususnya pada musim-musim tertentu katika arah angin dominan menuju daratan. Namun hingga kini belum tersedia pemetaan spasial terhadap konsentrasi polutan di sekitar PLTU Celukan Bawang. Hal ini menyulitkan dalam merumuskan kebijakan mitigasi berbasis bukti seperti penetapan zona aman, penyesuaian tata ruang, atau sistem peringatan dini. Studi mengenai sebaran emisi PLTU di indonesia umumnya masih terbatas pada model perhitungan dispersi berbasis perangkat lunak tertentu tanpa integrasi dengan data spasial. Minimnya riset lokal yang menggabungkan pengkukuran langsung di lapangan, analisis spasial menggunakan GIS, serta indeks resiko berbasis paparan menjadi tantangan tersendiri. Belum adanya integrasi antara data konsentrasi emisi,

distribusi penduduk, serta lokasi fasilitas vital seperti sekolah, dan fasilitas kesehatan menjadi kekurangan yang ingin dijawab dalam penelitian ini.

Pendekatan berbasis Sistem Informasi Geografis (SIG) dan Penginderaan Jauh (PJ) telah banyak digunakan dalam kajian kualitas udara, termasuk dalam analisis sebaran polutan dari sumber emisi industri. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa SIG efektif dalam memetakan distribusi spasial polutan seperti $PM_{2.5}$, NO_2, dan SO_2 melalui teknik interpolasi dan integrasi data lingkungan dengan parameter meteorologi. Studi oleh *Gupta et al.* (2020) menunjukkan bahwa penggunaan GIS dan model spasial mampu mengidentifikasi pola sebaran polutan udara secara akurat di wilayah perkotaan dan industri. Demikian pula, penelitian oleh *Zhang et al.* (2021) mengungkapkan bahwa integrasi data emisi dan faktor meteorologi dalam analisis spasial memberikan gambaran yang lebih komprehensif terhadap dispersi polutan dari sumber pembakaran, termasuk pembangkit listrik berbasis batubara.

Di tingkat nasional, penggunaan SIG dalam kajian kualitas udara juga telah berkembang. Penelitian oleh *Pratama et al.* (2021) menunjukkan bahwa metode interpolasi spasial menggunakan ArcGIS dapat digunakan untuk memetakan distribusi konsentrasi PM_{10} di kawasan perkotaan di Indonesia. Selain itu, studi oleh *Sari et al.* (2022) menegaskan bahwa pendekatan SIG mampu mengintegrasikan data kualitas udara dengan data kepadatan penduduk untuk mengidentifikasi wilayah dengan risiko paparan tinggi. Namun demikian, sebagian besar penelitian tersebut masih terbatas pada pemetaan distribusi konsentrasi polutan tanpa mengintegrasikan analisis risiko lingkungan secara komprehensif.

Secara khusus, penelitian yang mengkaji polusi udara dari aktivitas PLTU dengan pendekatan SIG masih relatif terbatas, terutama yang mengkombinasikan analisis kualitas udara dengan penilaian risiko berbasis spasial. Beberapa studi

internasional telah mengkaji dampak emisi PLTU terhadap kualitas udara, namun umumnya berfokus pada estimasi emisi atau model dispersi tanpa mengaitkan secara langsung dengan zonasi risiko bagi masyarakat sekitar (Gulia et al., 2020; Karagulian et al., 2021). Sementara itu, di Indonesia, kajian yang secara spesifik mengintegrasikan analisis ISPU, SIG, dalam pemetaan risiko pencemaran udara di sekitar PLTU masih sangat terbatas.

Oleh karena itu, terdapat *research gap* yang jelas, yaitu belum adanya kajian yang secara komprehensif mengintegrasikan analisis kualitas udara berbasis parameter ISPU dengan pendekatan spasial (SIG) untuk menghasilkan zonasi risiko pencemaran udara di sekitar PLTU. Penelitian ini menjadi penting untuk mengisi kesenjangan tersebut, khususnya pada wilayah sekitar PLTU Celukan Bawang, dengan menghasilkan peta sebaran polutan sekaligus peta zonasi risiko yang dapat digunakan sebagai dasar pengambilan kebijakan pengelolaan lingkungan yang lebih tepat sasaran dan berkelanjutan.

Penelitian ini akan menghasilkan peta zona risiko dengan konsentrasi SO_2, NO_2, dan Partikulat (PM_{10} & $PM_{2,5}$) pada kualitas udara ambien di permukiman sekitar dari aktivitas PLTU Celukan bawang berbasis pendekatan *hazard exposure vilnerability* yang tervalidasi. Kerangka ini dapat direplikasi di lokasi PLTU lain di Indonesia dan menjadi referensi dalam perencanaan perlindungan masyarakat dan manajemen pengendalian pencemaran lingkungan khususnya udara secara terukur.

Beberapa penelitian terkait kualitas udara telah dilakukan oleh peneliti sebelumnya. Hartanto et al. (2024) mengkaji konsentrasi Nitrogen Dioxide (NO_2) dan Sulphur Dioxide (SO_2) di Pulau Kalimantan menggunakan data satelit Sentinel-5P melalui Google Earth Engine dengan pendekatan analisis spasial dan temporal. Penelitian tersebut memberikan gambaran pola distribusi polutan dalam skala regional,

namun masih terbatas pada aspek pemetaan konsentrasi dan belum mengkaji tingkat risiko pencemaran serta implikasinya terhadap masyarakat terdampak.

Selanjutnya, penelitian yang dilakukan oleh Lewa Leko dan Manullang (2024) menganalisis pola sebaran gas pencemar SO_2 dan NO_2 di sekitar industri semen menggunakan pemodelan AERMOD View berbasis data pengukuran lapangan. Meskipun penelitian ini telah menggambarkan pola dispersi polutan secara teknis, pendekatan yang digunakan masih berfokus pada aspek fisik lingkungan dan belum mengintegrasikan faktor sosial masyarakat dalam analisis risiko pencemaran udara.

Ramdhanu et al. (2024) juga melakukan kajian terkait dampak emisi PLTU terhadap konsentrasi PM2,5 di wilayah Jakarta menggunakan data satelit MODIS. Penelitian ini menunjukkan bahwa kontribusi PLTU terhadap konsentrasi PM2,5 tidak signifikan pada skala regional. Namun demikian, penelitian tersebut hanya berfokus pada satu parameter polutan dan belum mengkaji secara komprehensif berbagai parameter pencemar udara serta keterkaitannya dengan kondisi sosial masyarakat di sekitar sumber emisi.

Berdasarkan beberapa penelitian tersebut, dapat diketahui bahwa kajian kualitas udara umumnya masih berfokus pada analisis konsentrasi polutan atau pemodelan dispersi secara fisik, serta belum banyak yang mengintegrasikan aspek sosial masyarakat dalam analisis risiko pencemaran udara. Selain itu, pendekatan berbasis spasial yang menggabungkan data kualitas udara (ISPU) dengan data sosial masyarakat untuk menghasilkan zonasi risiko pencemaran udara masih terbatas.

Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengisi kesenjangan tersebut dengan mengintegrasikan data kualitas udara berbasis ISPU dan data sosial masyarakat ke dalam analisis spasial menggunakan ArcGIS, sehingga dapat

menghasilkan zonasi risiko pencemaran udara yang lebih komprehensif serta mendukung penyusunan strategi manajemen lingkungan yang berbasis risiko.

1.2 Identifikasi Masalah

Operasional PLTU Celukan Bawang sebagai sumber energi berbasis batubara menghasilkan emisi polutan udara seperti Sulfur Dioksida (SO_2), Nitrogen Dioksida (NO_2), dan Partikulat (PM) yang berdampak langsung terhadap kualitas udara di wilayah sekitar, dengan Lokasi PLTU yang berdekatan dengan permukiman penduduk, potensi dampak lingkungan dan kesehatan menjadi isu yang memerlukan perhatian khusus dalam konteks manajemen lingkungan. Namun, hingga saat ini, pemahaman yang komprehensif mengenai pola sebaran spasial zona tingkat resikonya masih terbatas. Berdasarkan Kondisi tersebut, maka dapat diidentifikasi beberapa permasalahan utama sebagai berikut:

1. Belum diketahui bagaimana kualitas udara ambien dengan parameter SO_2, NO_2, dan Partikulat di pemukiman sekitar PLTU Celukan Bawang
2. Belum dilakukannya pemetaan zona risiko pencemaran kualitas udara ambien berdasarkan metode indeks standar pencemaran udara (ISPU)
3. Belum tersedia rekomendasi strategi manajemen perusahaan dalam pengelolaan lingkungan yang berbasis data spasial dan hasil analisis risiko dalam mitigasi pencemaran udara ambien.

Ketiga masalah tersebut menunjukkan perlunya penelitian yang mengintegrasikan analisis spasial, pemodelan risiko, dan perumusan strategi manajemen pengelolaan lingkungan sebagai upaya nyata dalam mendukung pembangunan ramah lingkungan.

1.3 Pembatasan Masalah

Agar penelitian Tesis ini terarah, fokus, dan dapat diselesaikan secara efektif, maka dilakukan pembatasan masalah sebagai berikut:

1. Jenis Polutan yang dikaji: Penelitian ini hanya berfokus pada tiga jenis pencemaran udara utama yang dihasilkan dari operasi PLTU Celukan Bawang, yaitu Sulfur Dioksida (SO_2), Nitrogen Dioksida (NO_2), dan Partikulat (PM).
2. Cakupan wilayah penelitian: Analisis spasial difokuskan pada wilayah permukiman di sekitar PLTU Celukan Bawang dalam radius maksimum 1 km. Radius tersebut ditetapkan sebagai batas operasional penelitian untuk menggambarkan kondisi kualitas udara ambien dan tingkat risiko relatif pada permukiman terdekat, dan tidak dimaksudkan sebagai batas jangkauan dispersi emisi cerobong PLTU.
3. Pendekatan Pemodelan: Pemetaan dan analisis risiko pencemaran dilakukan menggunakan perangkat lunak ArcGis, dengan pendekatan berbasis interpolasi spasial dan klaisifikasi zona resiko.
4. Waktu dan Data: Penelitian ini menggunakan data pengukuran primer dengan melakukan pengukuran langsung di Lokasi sesuai zona yang sudah ditentukan. Kajian dilakukan dalam rentan waktu tertentu dan tidak mencakup analisis jangka Panjang atau musiman secara rinci
5. Aspek yang tidak dibahas: Penelitian tidak membahas dampak Kesehatan klinis atau epidemologis. Kajian ekonomi, social, atau kebijakan hukum hanya dibahas secara umum dalam konteks rekomendasi manajemen pengelolaan lingkungan.

1.4 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas maka yang menjadi rumusan masalah adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana tingkat kualitas udara ambien berdasarkan parameter SO_2, NO_2, dan Partikulat ($PM_{2,5}$ dan PM_{10}) di kawasan pemukiman sekitar PLTU Celukan Bawang?
2. Bagaimana pola distribusi spasial dan zonasi risiko pencemaran udara berdasarkan nilai ISPU menggunakan analisis GIS?
3. Bagaimana rekomendasi strategi manajemen lingkungan untuk mitigasi pencemaran udara disekitar PLTU Celukan Bawang?

1.5 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah di atas maka tujuan penelitian adalah untuk :

1. Menganalisis tingkat kualitas udara ambien berdasarkan parameter SO_2, NO_2, $PM_{2.5}$ dan PM_{10} serta membandingkannya dengan baku mutu udara ambien nasional.
2. Mendesaian model spasial zona risiko pencemaran udara (tinggi, sedang, rendah) di permukiman sekitar berdasarkan hasil pengukuran dan interpolasi data menggunakan perangkat lunak ArcGis dengan Metode Indeks Risiko Pencemaran Udara (ISPU).
3. Menyusun rekomendasi kebijakan dan arahan manajemen pengelolaan lingkungan berbasis spasial untuk perusahaan dan pemangku kepentingan terkait.

1.6 Manfaat Penelitian

1. Memberikan data dan analisis yang akurat mengenai kualitas udara ambien dengan parameter SO_2, NO_2, dan Partikulat ($PM_{2,5}$ dan PM_{10}) di pemukiman sekitar PLTU Celukan Bawang.
2. Memberikan pengetahuan terhadap pemanfaatan Tekonologi Sistem Informasi Geografis (SIG), khususnya ArcGis, sebagai alat bantu yang efektif untuk pemodelan zona risiko pencemaran, sehingga mendorong penerapan pendekatan berbasis data spasial dalam studi dan kebijakan manajemen pengelolaan lingkungan
3. Memberikan rekomendasi strategi mitigasi risiko pencemaran udara bagi perusahaan maupun pemerintah daerah secara lebih terarah, berbasis data, dan berkelanjutan, demi melindungi kesehatan masyarakat dan menjaga kualitas lingkungan.

1.7 Publikasi

Bagian dari penelitian ini telah dipublikasi pada tanggal 25 November 2025 dalam jurnal Penelitian Pendidikan IPA (JPPIPA) dengan Vol 11 nomor 11 Dengan Judul *Analysis of PM2,5 and PM10 Level in the Area Around the Celukan Bawang Coal Fried Steam Power Plant (CFSPP) Using an Air Quality Detector*. Berikut Web artikel pada jurnal https://doi.org/10.29303/jppipa.v11i11.13293 dan telah dipublikasi pada tanggal 31 Agsutus 2025 dalam Jurnal Penelitian Pendidikan IPA (JPPIPA) Vol 12 Nomor 8 Dengan Judul *GIS-Based Spatial Risk Zoning of Ambient Air Pollution Using the Air Pollution Standard Index (ISPU) Around the Celukan Bawang Coal-Fired Power Plant*. Artikel dapat diakses melalui DOI: **10.29303/jppipa.v12i8.15877**.