



Sistem Pendukung Keputusan Evaluasi Kualitas Udara Kota Binjai Menggunakan Analytic Network Process dan Geostatistical Analysis

Alvin Octavian Kosasih^{1*}, Firahmi Rizky²

^{1*,2} Program Studi Sistem Informasi, Fakultas Ilmu Komputer dan Teknologi Informasi, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, Medan, Indonesia

Email: ^{1*}alvinoctaviank@gmail.com, ²firahmirizky@umsu.ac.id

Abstrak

Ketiadaan stasiun pemantau otomatis di Kota Binjai membatasi ketersediaan informasi spasial kualitas udara untuk pengambilan keputusan pengendalian pencemaran. Penelitian ini membangun Sistem Pendukung Keputusan (SPK) berbasis WebGIS untuk mengevaluasi kualitas udara Kota Binjai melalui pemetaan sebaran spasial kontinu dan rekomendasi penanganannya. Data lima parameter pencemar (NO₂, SO₂, CO, O₃, dan Aerosol Index) diekstraksi dari citra satelit Sentinel-5P TROPOMI via Google Earth Engine. Pembobotan multi-parameter dianalisis menggunakan metode Analytic Network Process (ANP) berbasis rasio Nilai Ambang Batas (NAB) resmi ISPU Kepdal 107/1997, sedangkan peta sebaran spasial dihasilkan melalui geostatistical analysis menggunakan metode Ordinary Kriging. Perhitungan ANP menghasilkan bobot AAI (41,16%), O₃ (26,28%), SO₂ (16,92%), NO₂ (15,44%), dan CO (0,21%) dengan Consistency Ratio konsisten sempurna (CR = 0,0000). Pengujian black box mengonfirmasi 100% fungsi sistem berbasis PHP Native dan Leaflet.js berjalan sesuai rancangan. SPK ini berhasil menyajikan zonasi kualitas udara interaktif beserta rekomendasi rule-based yang siap dimanfaatkan oleh Dinas Lingkungan Hidup Kota Binjai.

Kata Kunci: Sistem Pendukung Keputusan, WebGIS, Evaluasi Kualitas Udara, Analytic Network Process (ANP), Ordinary Kriging, Sentinel-5P TROPOMI, Kota Binjai.

PENDAHULUAN

Kualitas udara merupakan salah satu faktor lingkungan yang paling berpengaruh terhadap kesehatan masyarakat di kawasan perkotaan. Berbagai studi epidemiologi menunjukkan hubungan yang signifikan antara tingkat pencemaran udara dengan peningkatan risiko penyakit pernapasan seperti asma, bronkitis, dan pneumonia, serta penyakit kardiovaskular seperti stroke dan penyakit jantung koroner (Umah & Gusmira, 2024). Paparan jangka panjang terhadap polutan seperti PM_{2.5}, NO₂, dan O₃ juga berkontribusi terhadap penurunan fungsi paru dan peningkatan angka kematian di kawasan perkotaan (Dyana dkk., 2025). Kelompok rentan seperti anak-anak, lanjut usia, dan penderita penyakit penyerta cenderung mengalami dampak yang lebih besar akibat paparan polusi udara dibandingkan kelompok masyarakat lainnya (Kamalin, 2024). Temuan-temuan tersebut memperkuat urgensi tersedianya informasi kualitas udara yang akurat dan mudah diakses sebagai dasar mitigasi dini bagi masyarakat dan pemerintah daerah.

Kota Binjai dipilih sebagai wilayah kajian penelitian ini karena berdasarkan penelusuran pada jaringan *Air Quality Monitoring Station* (AQMS) Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (iku.menlhk.go.id), Kota Binjai belum memiliki stasiun pemantau kualitas udara otomatis. Kondisi tanpa stasiun pemantau tetap ini justru memperkuat urgensi pendekatan GIS pada penelitian ini: karena tidak tersedia titik-titik pengukuran darat yang tersebar, data spasial multi-parameter perlu diperoleh melalui penginderaan jauh menggunakan citra satelit Sentinel-5P TROPOMI (*Tropospheric Monitoring Instrument*), kemudian titik-titik grid hasil ekstraksi tersebut diinterpolasi menggunakan *geostatistical analysis* (Ordinary Kriging) untuk menghasilkan peta sebaran kontinu di seluruh wilayah kota. Pendekatan Sentinel-5P melalui platform Google Earth Engine (GEE) ini telah digunakan pada berbagai penelitian terpublikasi, di antaranya untuk memantau NO₂ di Eropa (Virghileanu dkk., 2020) dan deteksi emisi di Indonesia (Rushayati dkk., 2020), sehingga validitas metodanya sudah teruji secara ilmiah.

Ketiadaan stasiun pemantau tetap tersebut menegaskan persoalan mendasar yang menjadi fokus penelitian ini: sekalipun data pencemar udara berhasil diperoleh, data mentah multi-parameter (NO₂, SO₂,

CO, O₃, dan partikulat) tidak serta-merta menjadi informasi yang dapat digunakan untuk pengambilan keputusan, karena masing-masing parameter memiliki satuan, karakteristik pengukuran, dan tingkat pengaruh yang berbeda-beda, serta belum diolah menjadi satu kesatuan yang terstruktur secara spasial. Dari sudut pandang bidang ilmu komputer, kondisi ini pada dasarnya adalah persoalan pengolahan data multi-atribut berskala besar yang perlu diintegrasikan, dibobot, dan divisualisasikan secara otomatis; tanpa hal tersebut, pemerintah daerah maupun masyarakat akan kesulitan menerjemahkan data pencemar udara yang kompleks menjadi rekomendasi tindakan yang jelas. Data pada penelitian ini diperoleh dari citra satelit Sentinel-5P TROPOMI melalui platform Google Earth Engine, dipilih karena mampu menyediakan data multi-parameter secara periodik dan gratis untuk seluruh wilayah kajian tanpa memerlukan instrumentasi lapangan, sehingga dapat mengatasi ketiadaan data primer di Kota Binjai.

Data multi-parameter pencemar udara pada dasarnya memiliki dua karakteristik penting yang menentukan metode penyelesaiannya. Pertama, data tersebut bersifat keruangan (spasial) — nilai konsentrasi suatu parameter berbeda-beda antar lokasi dan tidak dapat diwakili oleh satu angka tunggal untuk seluruh wilayah kota. Kedua, antar parameter pencemar terdapat keterkaitan (*interdependency*), misalnya konsentrasi NO₂ memengaruhi pembentukan O₃ di atmosfer, sehingga bobot kepentingan satu parameter tidak dapat ditentukan secara independen dari parameter lainnya. Dua karakteristik inilah yang menjadi dasar pemilihan metode pada penelitian ini: *Geographic Information System* (GIS) dipilih karena mampu mengolah dan memvisualisasikan data yang bersifat keruangan, sedangkan *Analytic Network Process* (ANP) dipilih karena mampu mengakomodasi hubungan saling ketergantungan antar kriteria yang tidak dapat diselesaikan dengan metode pembobotan hierarkis biasa seperti *Analytic Hierarchy Process* (AHP) (Saaty, 1999). Metode AHP memiliki kelemahan berupa ketergantungan yang tinggi pada persepsi pakar serta kurang efektif digunakan pada kasus dengan jumlah kriteria yang banyak dan saling berkaitan (Narti, 2019). Jika AHP mengasumsikan struktur hierarkis yang bersifat satu arah dari tujuan menuju kriteria hingga alternatif, ANP memungkinkan hubungan yang lebih kompleks dalam bentuk jaringan (*network*), di mana suatu kluster kriteria dapat memengaruhi dan dipengaruhi oleh kluster lainnya (Saaty, 2005). Dengan kata lain, kombinasi GIS dan ANP bukan dipilih secara sembarangan, melainkan karena kedua karakteristik data pencemar udara di atas secara langsung menuntut kemampuan spasial dan kemampuan pembobotan berjejaring sekaligus.

Sebagai pembandingan dan bahan validasi, Dinas Lingkungan Hidup Kota Binjai melalui portal data terbuka daerah (dssd.binjaikota.go.id) mempublikasikan Indeks Kualitas Udara (IKU) resmi Kota Binjai tahun 2025 sebesar 76,56 (kategori "Baik"), yang dihitung berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor 27 Tahun 2021 tentang Indeks Kualitas Lingkungan Hidup. Angka ini bersifat agregat (satu nilai untuk seluruh kota per tahun) dan tidak menggambarkan variasi kualitas udara antar wilayah di dalam kota, sehingga tetap dibutuhkan pendekatan spasial berbasis GIS untuk menghasilkan informasi zonasi yang lebih rinci, sekaligus menjadikan angka resmi tersebut sebagai salah satu rujukan validasi hasil penelitian. Untuk menyederhanakan interpretasi hasil bagi pengguna non-teknis, keluaran sistem dikategorikan menggunakan skema warna resmi Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU) sesuai Keputusan Kepala Bapedal Nomor 107 Tahun 1997 — hijau (Baik), biru (Sedang), kuning (Tidak Sehat), merah (Sangat Tidak Sehat), dan hitam (Berbahaya) — sehingga peta zonasi yang dihasilkan dapat langsung dipahami tanpa perlu membaca nilai numerik parameter secara rinci.

Beberapa penelitian terdahulu telah mengkaji pemanfaatan citra satelit untuk pemantauan kualitas udara. Virghileanu dkk. (2020) memantau NO₂ menggunakan citra Sentinel-5P di Eropa pada masa pandemi, namun belum menggunakan ANP untuk pembobotan multi-parameter dan belum berbentuk SPK berbasis GIS. Rushayati dkk. (2020) mendeteksi emisi NO₂ secara spasio-temporal menggunakan Sentinel-5P dan Google Earth Engine, tetapi fokus pada satu parameter tanpa interpolasi geostatistik dan tanpa modul rekomendasi penanganan. Pramono (2008) membandingkan akurasi metode IDW dan Kriging untuk interpolasi sebaran polusi udara, namun tidak membahas integrasi dengan metode pembobotan multi-kriteria maupun sistem berbasis web. Pungkasanti dan Handayani (2017) menerapkan ANP pada sistem pendukung keputusan umum, tetapi diterapkan pada domain non-lingkungan dan tidak melibatkan komponen spasial/GIS. Malczewski (2006) mengkaji secara teoretis integrasi GIS dan *Multi-Criteria Decision Analysis* (GIS-MCDA), namun belum diterapkan pada kasus spesifik kualitas udara maupun metode ANP. Marbun dkk. (2023) membahas potensi dan tantangan penggunaan kendaraan listrik sebagai mitigasi polusi udara di Kota Medan, tetapi bersifat deskriptif kualitatif dan tidak menghasilkan pemetaan spasial maupun sistem pendukung keputusan. Muhtarom dkk. (2024) menerapkan WebGIS berbasis Leaflet.js untuk pemetaan destinasi wisata, namun diterapkan pada domain pariwisata tanpa komponen pembobotan kriteria maupun analisis geostatistik.

Berdasarkan tinjauan penelitian terdahulu tersebut, penelitian ini memiliki kebaruan pada aspek integrasi metode ANP untuk pembobotan multi-parameter pencemar udara yang saling berketerkaitan dengan pendekatan *geostatistical analysis* (Ordinary Kriging) untuk menghasilkan zonasi spasial kualitas udara secara menyeluruh di wilayah Kota Binjai, yang disajikan dalam bentuk sistem pendukung keputusan

berbasis GIS (*Geographic Information System*) lengkap dengan modul rekomendasi penanganan. Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini merancang sebuah Sistem Pendukung Keputusan (SPK) yang mengintegrasikan metode ANP untuk pembobotan multi-parameter pencemar udara dengan *geostatistical analysis* untuk pemetaan sebaran spasial berbasis GIS, sehingga dihasilkan zonasi kualitas udara Kota Binjai beserta rekomendasi penanganan yang sesuai dengan tingkat pencemaran pada masing-masing zona.

Adapun tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah: (1) menganalisis bobot kepentingan setiap parameter pencemar udara di Kota Binjai menggunakan metode *Analytic Network Process* (ANP) yang mempertimbangkan keterkaitan antar kriteria; (2) merancang dan membangun sistem pendukung keputusan berbasis GIS yang menyajikan zonasi kualitas udara beserta rekomendasi penanganan yang sesuai untuk setiap zona di Kota Binjai; dan (3) menghasilkan peta sebaran spasial kualitas udara Kota Binjai yang kontinu menggunakan pendekatan *geostatistical analysis* (Ordinary Kriging) berdasarkan data citra satelit Sentinel-5P. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat bagi Dinas Lingkungan Hidup Kota Binjai dalam merumuskan kebijakan pengendalian pencemaran udara berbasis data spasial, menjadi referensi tambahan bagi pengembangan penelitian sejenis di bidang sistem pendukung keputusan berbasis GIS, serta menjadi sarana penerapan ilmu dalam pengolahan data multi-parameter berskala besar menjadi sistem yang siap digunakan.

METODE

Penelitian ini merupakan penelitian pengembangan (*research and development*) yang menghasilkan produk berupa Sistem Pendukung Keputusan (SPK) berbasis WebGIS untuk evaluasi kualitas udara Kota Binjai. Pendekatan yang digunakan adalah pendekatan kuantitatif dengan memanfaatkan data penginderaan jauh dari citra satelit Sentinel-5P TROPOMI yang diakses melalui platform Google Earth Engine (GEE). Secara umum, alur penelitian ini terdiri atas sebelas tahapan yang saling berurutan, sebagaimana digambarkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Alur Penelitian

Tahap 1: Identifikasi Masalah dan Studi Literatur

Tahap ini mengkaji kondisi pemantauan kualitas udara Kota Binjai serta literatur terkait ANP, interpolasi spasial, dan WebGIS. Hasil yang diperoleh adalah teridentifikasinya bahwa Kota Binjai tidak memiliki AQMS resmi, dan ditetapkan kombinasi metode ANP untuk pembobotan kriteria serta Ordinary Kriging untuk interpolasi spasial sebagai pendekatan yang sesuai untuk mengatasi permasalahan penelitian.

Tahap 2: Penentuan Wilayah Kajian

Wilayah kajian ditetapkan menggunakan poligon batas administratif Kota Binjai, bukan sekadar *bounding box* sederhana. Geometri wilayah kajian diperoleh dari hasil simplifikasi data GADM v4.0 (dari 1.032 titik disederhanakan menjadi 72 titik koordinat), dengan *buffer* tambahan 2.000 meter di luar batas administratif untuk mengantisipasi efek tepi pada tahap interpolasi.

Tahap 3: Akuisisi Data Citra Satelit Sentinel-5P TROPOMI

Data lima parameter pencemar (NO_2 , SO_2 , CO , O_3 , dan *Aerosol Index*) diekstraksi dari koleksi Sentinel-5P TROPOMI melalui skrip Google Earth Engine, dengan citra komposit rata-rata untuk mengisi celah akibat tutupan awan, kemudian dikonversi menjadi grid titik pada resolusi native $\pm 1.113,2$ meter dan diekspor sebagai berkas CSV. Hasil yang diperoleh adalah berkas CSV grid mentah berisi 176 titik data satelit untuk wilayah kajian Kota Binjai, dengan struktur kolom *system:index*, AAI, CO , NO_2 , O_3 , SO_2 , dan *.geo* (koordinat).

Tahap 4: Pra-pemrosesan Data

Berkas CSV hasil Tahap 3 diunggah melalui panel admin, kemudian divalidasi (pengecekan kolom wajib dan koordinat), dipotong (*cropping*) sesuai batas wilayah kajian, dan disaring (*filtering*) untuk membuang baris yang tidak lengkap sebelum dibangun menjadi grid spasial pada resolusi yang dipilih admin (30×30 , 50×50 , atau 100×100 titik). Dari 176 titik data mentah, seluruhnya tervalidasi lolos (memenuhi ambang minimal 10 titik) dan berhasil dibangun menjadi grid keluaran; misalnya pada resolusi 50×50 dihasilkan 2.500 titik grid siap-interpolasi yang tersebar merata di seluruh wilayah kajian.

Tahap 5: Pembobotan Kriteria Parameter Pencemar dengan ANP

Bobot tiap kriteria dihitung secara otomatis dan objektif dari rasio Nilai Ambang Batas (NAB) resmi ISPU (Kepdal 107/1997), melalui tiga langkah: (1) tingkat bahaya $D_i = 1/\text{NAB}_i$; (2) matriks perbandingan berpasangan $A_{ij} = D_i/D_j$; (3) bobot akhir via *eigen vector* dominan yang diuji konsistensinya dengan *Consistency Ratio* (CR). Nilai NAB mengacu pada Gusdini (2021), yang merekapitulasi Nilai Ambang Batas NO_2 , SO_2 , dan CO dari PP No. 41 Tahun 1999, serta O_3 dan PM_{10} (sebagai basis proksi AAI) dari Kepdal 107/1997. Perhitungan tingkat bahaya tiap kriteria menggunakan rumus:

$$D_i = 1/\text{NAB}_i \quad (1)$$

dengan hasil perhitungan sebagaimana disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Perhitungan NAB dan D_i

Kode	Nama Kriteria	NAB ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Perhitungan	$D_i = 1/\text{NAB}$
NO_2	Nitrogen Dioksida	400	$1 / 400$	0,00250000
SO_2	Sulfur Dioksida	365	$1 / 365$	0,00273973
CO	Carbon Monoksida	30000	$1 / 30000$	0,00003333
O_3	Ozon	235	$1 / 235$	0,00425532
AAI	Aerosol Index	150	$1 / 150$	0,00666667

Matriks perbandingan berpasangan A berukuran 5×5 dibentuk dari rasio D_i/D_j , yang secara aljabar setara dengan:

$$A_{ij} = D_i/D_j = (1/\text{NAB}_i) / (1/\text{NAB}_j) = \text{NAB}_j/\text{NAB}_i \quad (2)$$

Matriks perbandingan berpasangan yang terbentuk disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Matriks Perbandingan Berpasangan (A)

Kriteria (i)	NO_2 (j)	SO_2 (j)	CO (j)	O_3 (j)	AAI (j)
NO_2	1,0000	0,9125	75,0000	0,5875	0,3750
SO_2	1,0959	1,0000	82,1918	0,6438	0,4110
CO	0,0133	0,0122	1,0000	0,0078	0,0050
O_3	1,7021	1,5532	127,6596	1,0000	0,6383
AAI	2,6667	2,4333	200,0000	1,5667	1,0000

Bobot akhir diperoleh melalui *eigen vector* dominan yang dihitung menggunakan *power iteration*. Uji konsistensi dilakukan dengan menghitung λ_{max} , *Consistency Index* (CI), dan *Consistency Ratio* (CR) menggunakan rumus:

$$CI = (\lambda_{\text{max}} - n) / (n - 1) \quad (3)$$

$$CR = CI / RI \quad (4)$$

dengan RI adalah *Random Index* untuk $n = 5$ sebesar 1,12. Bobot akhir tiap parameter disajikan pada Tabel 3 berikut ini.

Tabel 3. Bobot Akhir ANP

Kode	Nama Kriteria	Bobot (presisi penuh)	Bobot (dibulatkan)
AAI	Aerosol Index	0,411649	0,4116
O_3	Ozon	0,262754	0,2628
SO_2	Sulfur Dioksida	0,169171	0,1692
NO_2	Nitrogen Dioksida	0,154368	0,1544
CO	Carbon Monoksida	0,002058	0,0021

Tahap 6: Interpolasi Spasial (Geostatistical Analysis – Kriging)

Nilai grid hasil Tahap 4 diinterpolasi menggunakan Ordinary Kriging dengan model semivariogram *spherical* yang parameternya (*sill*, *range*, *nugget*) diestimasi otomatis dari data sampel, diselesaikan melalui dekomposisi matriks LU secara native dalam PHP. Model semivariogram *spherical* dirumuskan sebagai:

$$\gamma(h) = c_0 + c(1,5(h/a) - 0,5(h/a)^3), 0 < h < a \quad (5)$$

dengan c_0 adalah *nugget*, c adalah *sill*, dan a adalah *range*. Nilai prediksi pada titik grid dihitung menggunakan:

$$\hat{Z}(g) = \sum w_i \cdot Z(s_i) \quad (6)$$

Hasil yang diperoleh adalah lima lapisan (*layer*) nilai prediksi kontinu — satu untuk tiap parameter pencemar — pada seluruh titik grid keluaran, menggantikan data satelit yang semula hanya tersedia pada 176 titik diskret menjadi estimasi menerus di seluruh wilayah kajian.

Tahap 7: Overlay Berbobot dan Perhitungan Indeks Komposit

Nilai hasil interpolasi tiap parameter (Tahap 6) dinormalisasi ke skala 0–100, dikalikan dengan bobot ANP yang bersesuaian (Tahap 5), lalu dijumlahkan (*weighted overlay*) menjadi satu Indeks Kualitas Udara (IKU) komposit per titik grid menggunakan rumus:

$$IKU = \sum (W_i \times X_i) \quad (7)$$

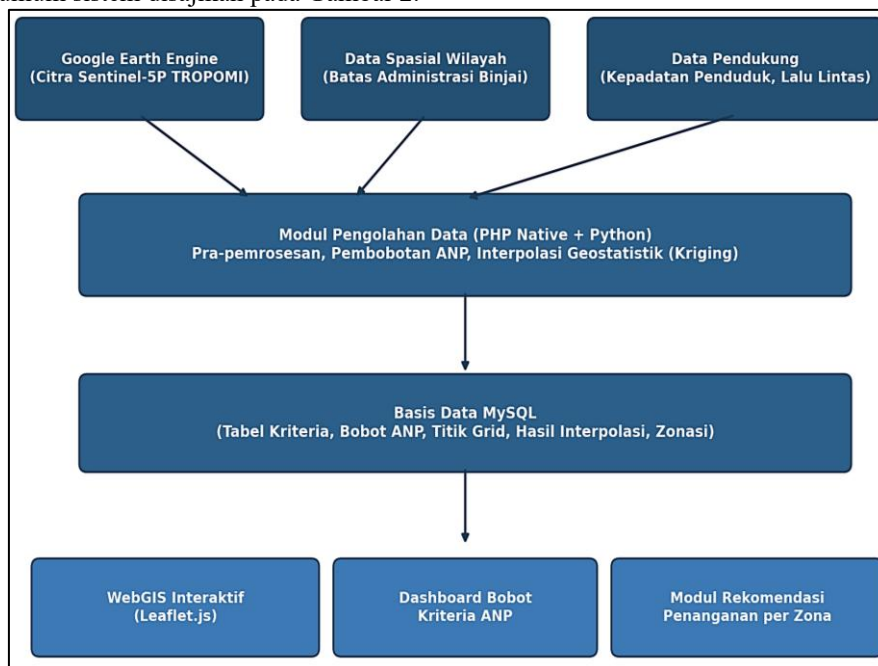
dengan W_i adalah bobot ANP parameter ke- i dan X_i adalah nilai parameter ke- i yang telah dinormalisasi. Hasil yang diperoleh adalah nilai IKU untuk setiap titik grid (misalnya 2.500 nilai pada resolusi 50×50), yang menjadi dasar tahap klasifikasi zona berikutnya.

Tahap 8: Klasifikasi Zona Kualitas Udara

Nilai IKU pada seluruh titik grid diurutkan dan dibagi menjadi lima kelompok kuantil (masing-masing 20%), kemudian diberi label dan warna sesuai skema kategori resmi ISPU (Baik, Sedang, Tidak Sehat, Sangat Tidak Sehat, Berbahaya). Hasil yang diperoleh adalah peta zonasi lima kategori untuk seluruh wilayah kajian; hasil ini langsung tersimpan pada tabel *hasil_interpolasi* beserta kategori dan kode warna ISPU-nya, siap ditampilkan pada WebGIS (Tahap 9).

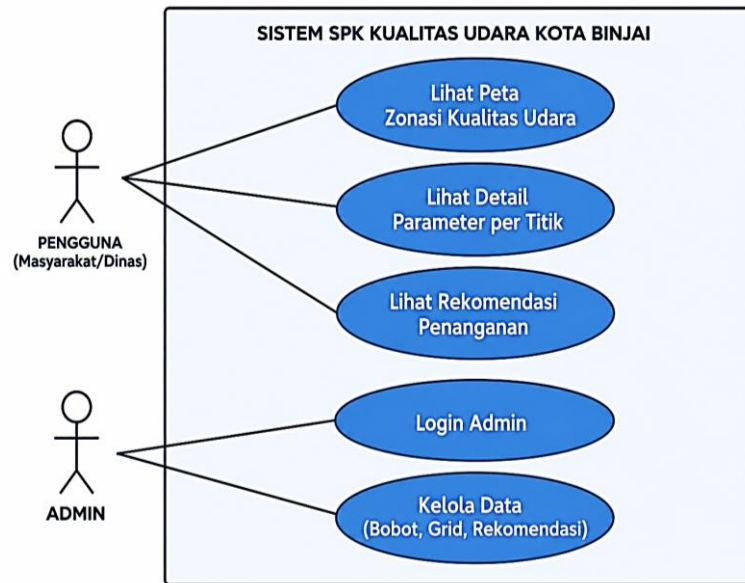
Tahap 9: Pemodelan dan Perancangan Sistem WebGIS

Hasil Tahap 1–8 diimplementasikan ke dalam sebuah sistem berbasis web menggunakan arsitektur empat lapisan: lapisan sumber data (citra satelit GEE dan poligon batas administratif GeoJSON), lapisan pengolahan data (*pipeline native* PHP yang menjalankan Tahap 4–8 secara otomatis), lapisan basis data (MySQL), dan lapisan penyajian (WebGIS Leaflet.js, *dashboard*, serta panel admin). Hasil yang diperoleh adalah sistem WebGIS yang berjalan penuh, terdiri atas 7 halaman publik (*Dashboard*, WebGIS, Parameter, Analisis ANP, Rekomendasi, Laporan, Panduan) dan 7 halaman admin (Login, Dashboard Admin, Proses Data GEE, Kelola Bobot, Kelola Rekomendasi, Kelola Pengguna, Update Sistem). Arsitektur umum sistem disajikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Arsitektur Umum Sistem

Perancangan sistem dimodelkan dengan menggunakan empat diagram standar *Unified Modeling Language* (UML): *Use Case*, *Activity*, *Class*, dan *Sequence Diagram*. *Use Case Diagram* menggambarkan interaksi antara pengguna (masyarakat/Dinas) dan admin dengan sistem, sebagaimana disajikan pada Gambar 3. *Class Diagram* menggambarkan struktur kelas Kriteria, BobotANP, HasilInterpolasi, Rekomendasi, Pengguna, dan UpdateLog, selaras dengan rancangan basis data. *Sequence Diagram* menggambarkan dua alur utama: (1) pengguna melihat zonasi — permintaan diteruskan ke server, data diambil dari basis data, lalu ditampilkan; dan (2) admin menjalankan *pipeline* — berkas CSV diunggah, divalidasi, diproses melalui Tahap 4–8, progres dikirim secara *real-time*, lalu hasil disimpan.



Gambar 3. Use Case Diagram Sistem

Struktur basis data sistem terdiri atas enam tabel yang saling berelasi: *kriteria*, *bobot_anp*, *hasil_interpolasi*, *rekomendasi*, *pengguna*, dan *update_log*. Relasi *one-to-one* antara *kriteria* dan *bobot_anp* adalah satu-satunya relasi yang diterapkan sebagai *foreign key* formal pada skema basis data, karena setiap parameter pencemar (5 kriteria tetap) hanya memiliki satu bobot ANP aktif yang diperbarui setiap kali *pipeline* dijalankan ulang, bukan riwayat berganda.

Tahap 10: Pengujian Sistem

Seluruh fungsi sistem diuji menggunakan metode *black box testing*, serta akurasi hasil interpolasi divalidasi menggunakan pendekatan *cross-validation*. Akurasi hasil interpolasi Ordinary Kriging diuji menggunakan pendekatan *leave-one-out cross-validation*: setiap titik sampel disisihkan satu per satu secara bergantian, diprediksi kembali nilainya menggunakan titik sampel yang tersisa, kemudian dibandingkan dengan nilai aktualnya. Akurasi diukur menggunakan *Root Mean Square Error* (RMSE):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (Z_{aktual} - Z_{prediksi})^2} \quad (8)$$

Nilai RMSE yang lebih kecil relatif terhadap rentang nilai data menunjukkan model semivariogram yang dipilih (*spherical*) cukup representatif terhadap pola spasial data pencemar udara pada wilayah kajian.

Tahap 11: Penarikan Kesimpulan

Seluruh hasil Tahap 1–10 dirangkum untuk menjawab permasalahan yang telah diidentifikasi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini menyajikan hasil penelitian yang mencakup implementasi sistem, hasil perhitungan bobot ANP, hasil interpolasi spasial, hasil klasifikasi zona kualitas udara, serta hasil pengujian sistem. Pembahasan diintegrasikan pada setiap subbagian untuk menafsirkan temuan dan mengaitkannya dengan penelitian terdahulu.

Implementasi Basis Data

Struktur basis data diimplementasikan sesuai rancangan pada bagian Metode, terdiri atas enam tabel (*kriteria*, *bobot_anp*, *hasil_interpolasi*, *rekomendasi*, *pengguna*, dan *update_log*). Skema basis data disimpan pada berkas *database/schema.sql* dan diimpor melalui phpMyAdmin atau halaman instalasi. Tampilan tabel-tabel yang telah dibangun pada *database* sistem disajikan pada Gambar 4.

Tabel	Field	Tipe
spk_kualitas_udara_binjai_update_log	id_log	int
	nama_file	varchar(255)
	jumlah_file	int
	status	varchar(20)
	keterangan	text
	created_at	timestamp
spk_kualitas_udara_binjai_kriteria	id_kriteria	int
	kode	varchar(10)
	nama	varchar(100)
	satuan	varchar(30)
	nab	float
	created_at	timestamp
spk_kualitas_udara_binjai_bobot_anp	id_bobot	int
	id_kriteria	int
	nilai_bobot	float
	metode	varchar(50)
	consistency_ratio	float
	updated_at	timestamp
spk_kualitas_udara_binjai_hasil_interpolasi	id_hasil	int
	latitude	double
	longitude	double
	no2	double
	so2	double
	co	double
	o3	double
	aqi	double
	iku	float
	kategori	varchar(30)
spk_kualitas_udara_binjai_rekomendasi	id_rekomendasi	int
	kategori	varchar(30)
	warna	varchar(10)
	ikon	varchar(30)
	ringkasan	varchar(255)
	updated_at	timestamp
spk_kualitas_udara_binjai_pengguna	id_user	int
	username	varchar(50)
	password	varchar(255)
	nama_lengkap	varchar(100)
	created_at	timestamp

Gambar 4. Tampilan Tabel-tabel Database Sistem

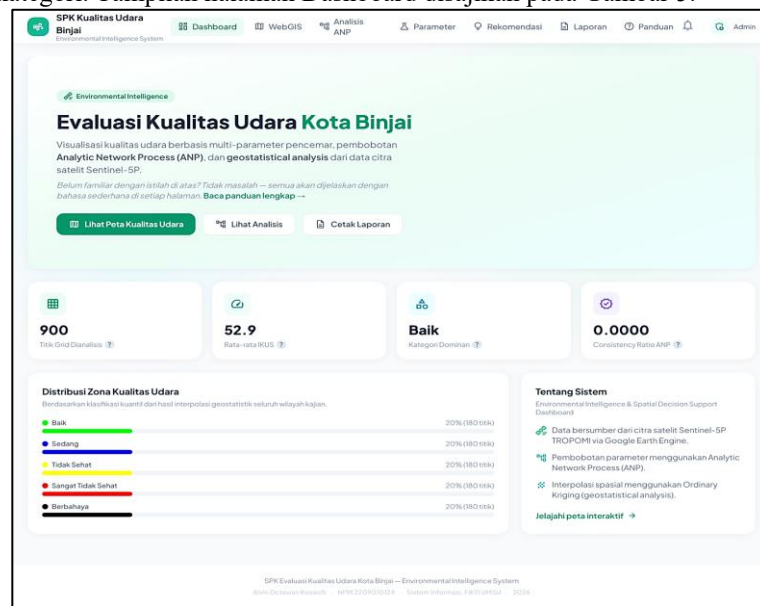
Koneksi basis data dikelola secara terpusat melalui satu fungsi agar dapat dipakai ulang di seluruh halaman tanpa membuka koneksi berganda. Pola static \$conn memastikan hanya satu koneksi yang dibuka per proses (*request*) meskipun fungsi getConnection() dipanggil berulang kali dari berbagai bagian kode pada halaman yang sama.

Implementasi Halaman Sistem

Sistem yang dibangun terdiri atas 7 halaman publik (*Dashboard*, WebGIS, Parameter, Analisis ANP, Rekomendasi, Laporan, Panduan) dan 7 halaman admin (Login, Dashboard Admin, Proses Data GEE, Kelola Bobot, Kelola Rekomendasi, Kelola Pengguna, Update Sistem). Berikut merupakan penjelasan dari masing-masing halaman utama pada sistem yang telah dibangun.

1. Halaman Dashboard (index.php)

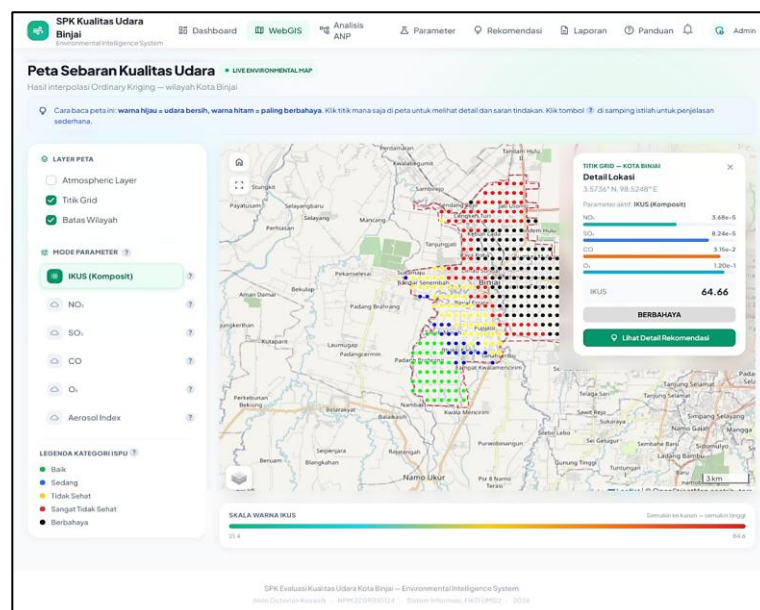
Halaman ini menyajikan ringkasan kondisi kualitas udara Kota Binjai secara sekilas ketika pengguna pertama kali membuka sistem. Saat halaman dimuat, sistem menjalankan beberapa *query* agregasi ke tabel *hasil_interpolasi* untuk menghitung rata-rata IKU, kategori zona yang paling dominan, dan jumlah total titik grid, kemudian menampilkannya sebagai kartu statistik beserta grafik distribusi proporsi tiap kategori. Tampilan halaman Dashboard disajikan pada Gambar 5.



Gambar 5. Tampilan Halaman Dashboard

2. Halaman WebGIS (webgis.php)

Halaman ini menampilkan peta sebaran spasial kualitas udara Kota Binjai secara interaktif menggunakan Leaflet.js, sebagai output utama sistem. Tampilan halaman WebGIS disajikan pada Gambar 6.

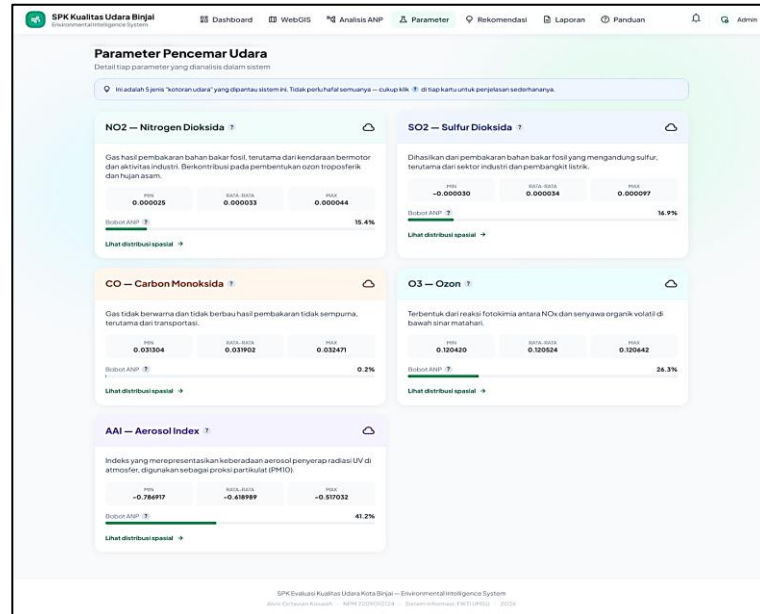


Gambar 6. Tampilan Halaman WebGIS

Ketika parameter yang ditampilkan dipilih (IKU, NO₂, SO₂, CO, O₃, atau AAI), *front-end* memanggil *endpoint* `api/get_grid_data.php` melalui Fetch API secara asinkron. *Endpoint* tersebut mengambil seluruh baris pada tabel *hasil_interpolasi* dan mengembalikannya dalam format JSON beserta nilai minimum/maksimum untuk kebutuhan legenda. Data yang diterima kemudian dirender sebagai *heatmap* (lapisan atmosferik), dipotong (*clip*) mengikuti bentuk poligon batas Kota Binjai, serta titik-titik grid individual yang dapat diklik untuk melihat detail nilai tiap parameter.

3. Halaman Parameter (`parameter.php`)

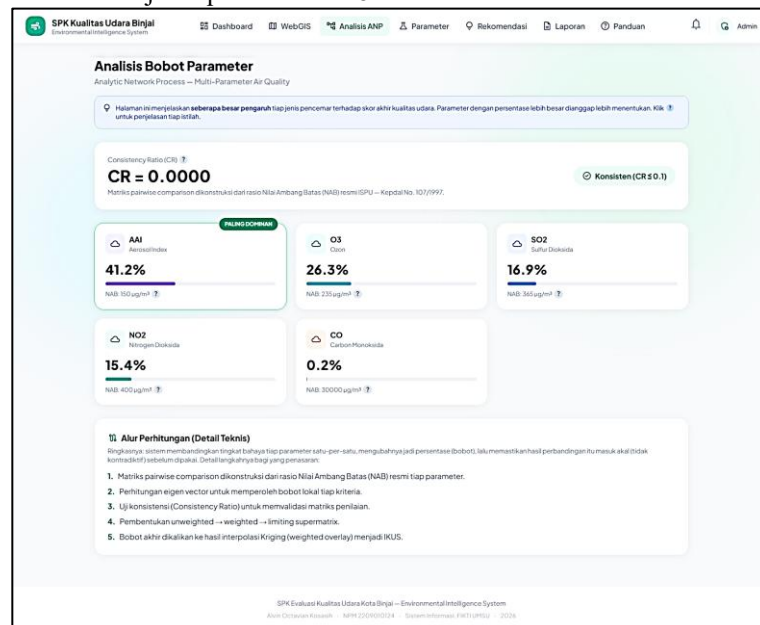
Halaman ini memberikan penjelasan edukatif serta statistik untuk tiap parameter pencemar yang dianalisis. Sistem menghitung statistik MIN, MAX, dan AVG untuk tiap kolom parameter pada tabel *hasil_interpolasi*, kemudian menggabungkannya dengan data deskriptif dan bobot ANP dari tabel *kriteria* dan *bobot_anp* untuk ditampilkan sebagai kartu per parameter. Tampilan halaman Parameter disajikan pada Gambar 7.



Gambar 7. Tampilan Halaman Parameter

4. Halaman Analisis ANP (`anp.php`)

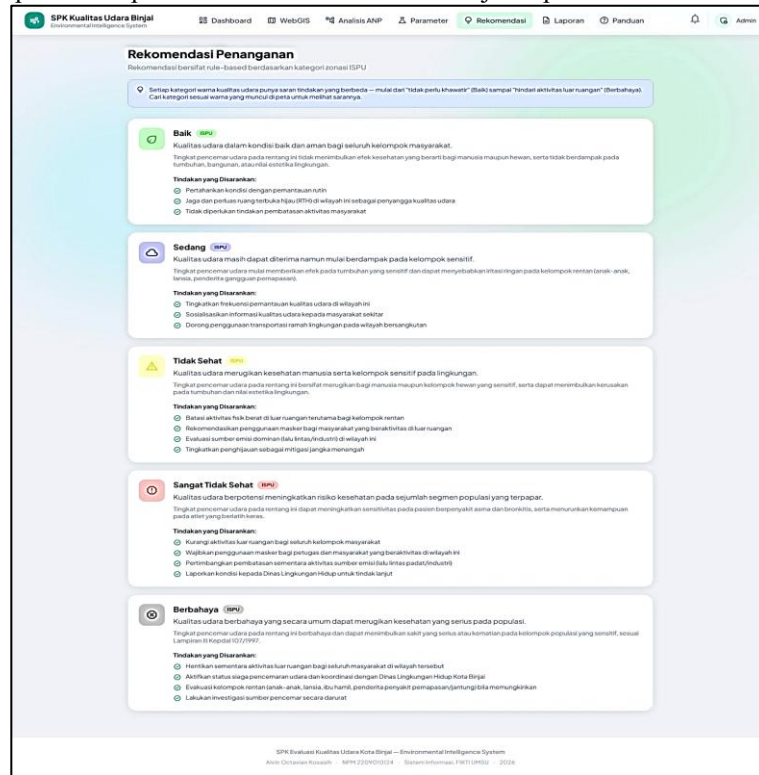
Pada halaman ini sistem menampilkan hasil dan transparansi proses pembobotan kriteria ANP kepada pengguna. Halaman ini murni menampilkan hasil yang sudah tersimpan (bukan menghitung ulang), diambil dari tabel *bobot_anp* yang di-join dengan tabel *kriteria*, diurutkan dari bobot terbesar. Nilai *Consistency Ratio* ditampilkan beserta indikator status (konsisten apabila $CR \leq 0,1$). Tampilan halaman Analisis ANP disajikan pada Gambar 8.



Gambar 8. Tampilan Halaman Analisis ANP

5. Halaman Rekomendasi (rekomendasi.php)

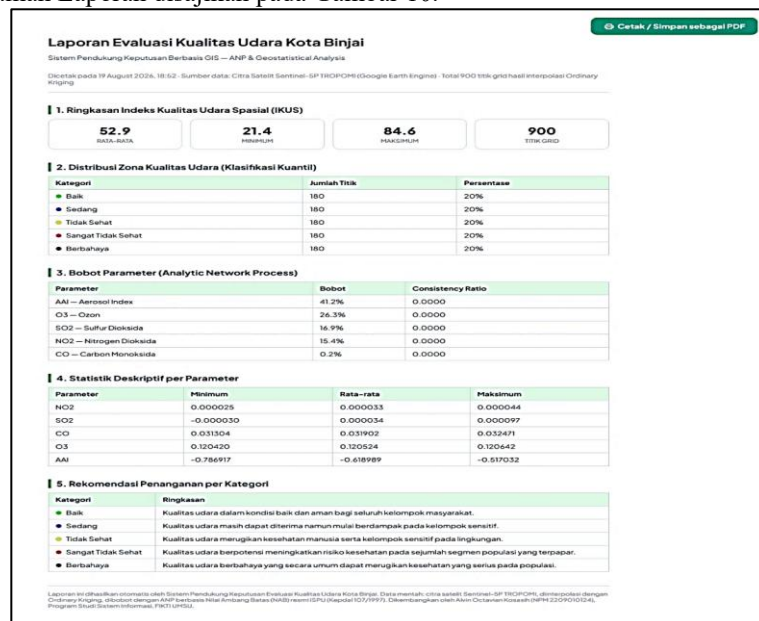
Fungsi halaman ini adalah untuk menyajikan panduan tindakan penanganan sesuai kategori zona kualitas udara. Halaman mengambil seluruh baris pada tabel *rekomendasi* (lima kategori) dan menampilkannya sebagai kartu, masing-masing memuat ikon, warna ISPU, ringkasan, deskripsi, dan daftar tindakan yang dipisahkan tanda "|" pada kolom *tindakan*, lalu dipecah (*explode*) menjadi poin-poin di sisi tampilan. Tampilan halaman Rekomendasi disajikan pada Gambar 9.



Gambar 9. Tampilan Halaman Rekomendasi

6. Halaman Laporan (laporan.php)

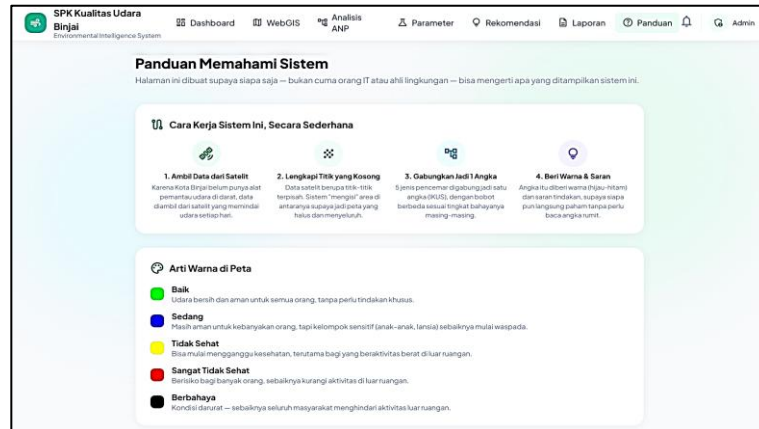
Halaman laporan digunakan untuk menyediakan ringkasan hasil analisis dalam format siap cetak/unduh PDF melalui fungsi cetak peramban. Halaman merangkum data dari tiga tabel sekaligus (*hasil_interpolasi*, *bobot_anp*, dan *rekomendasi*) ke dalam satu tampilan bergaya dokumen, dengan aturan CSS @media print yang menyembunyikan elemen non-esensial (misalnya tombol cetak itu sendiri) saat dokumen dicetak atau disimpan sebagai PDF melalui dialog cetak bawaan peramban. Tampilan halaman Laporan disajikan pada Gambar 10.



Gambar 10. Tampilan Halaman Laporan

7. Halaman Panduan (panduan.php)

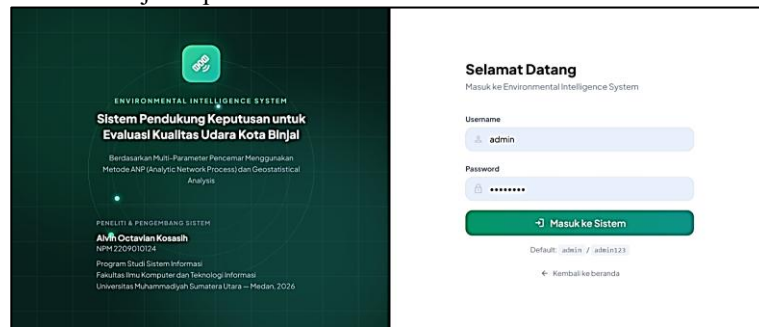
Halaman ini membantu pengguna awam memahami istilah teknis dan cara membaca peta zonasi. Seluruh istilah (ISPU, NAB, ANP, Kriging, dan parameter pencemar) disusun terpusat pada satu berkas kamus istilah agar konsisten dan mudah dipelihara, kemudian dipanggil ulang dari berbagai halaman yang membutuhkan tombol bantuan kontekstual. Tampilan halaman Panduan disajikan pada Gambar 11.



Gambar 11. Tampilan Halaman Panduan

8. Halaman Login Admin (admin/login.php)

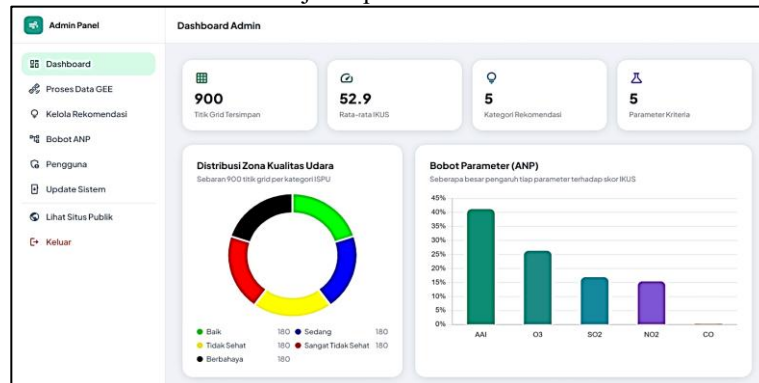
Halaman ini membatasi akses ke seluruh modul pengelolaan hanya kepada pengguna terotentikasi. Kata sandi tidak pernah disimpan maupun dibandingkan dalam bentuk teks biasa. Sistem menyimpan *hash* kata sandi menggunakan algoritma bcrypt (fungsi `password_hash()`), dan pada saat login memverifikasinya dengan `password_verify()`, lalu menyimpan sesi login pada `$_SESSION`. Tampilan halaman Login Admin disajikan pada Gambar 12.



Gambar 12. Tampilan Halaman Login Admin

9. Halaman Dashboard Admin (admin/dashboard.php)

Pada halaman ini, sistem memberikan ringkasan kondisi sistem dan akses cepat ke seluruh modul pengelolaan setelah admin login. Halaman ini menggunakan pola statistik yang sama dengan *dashboard* publik, ditambah menu navigasi khusus admin menuju kelima modul pengelolaan. Tampilan halaman Dashboard Admin disajikan pada Gambar 13.

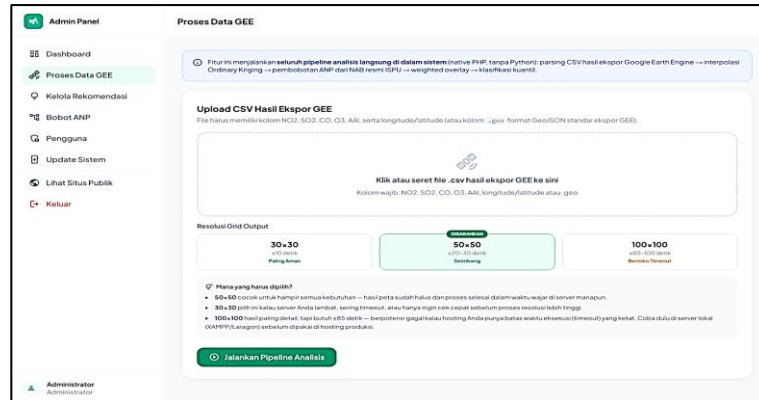


Gambar 13. Tampilan Halaman Dashboard Admin

10. Halaman Proses Data GEE (admin/proses_data_gee.php)

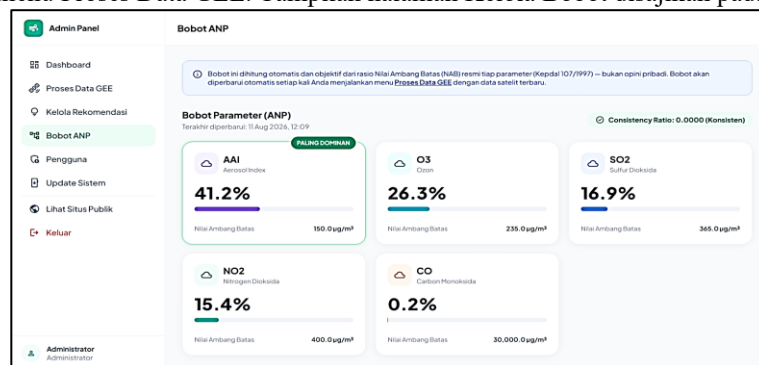
Halaman ini menjadi pusat kendali (*entry point*) seluruh *pipeline* analisis: admin mengunggah satu berkas CSV hasil ekspor GEE dan sistem menjalankan seluruh tahapan analisis secara otomatis hingga

tersimpan ke basis data. Berbeda dari halaman lain, modul ini menggunakan teknik *server-sent streaming* berformat NDJSON (satu objek JSON per baris) sehingga progres yang ditampilkan di antarmuka benar-benar mencerminkan tahapan asli di server, bukan animasi tiruan berbasis waktu tunggu. Proses berjalan melalui tujuh tahap berurutan: (1) *parsing* dan validasi CSV, (2) pembangunan grid spasial sesuai resolusi pilihan admin, (3) interpolasi Ordinary Kriging per parameter, (4) perhitungan bobot ANP dari NAB, (5) *weighted overlay* menjadi IKU, (6) klasifikasi kuantil ke 5 kategori, dan (7) penyimpanan hasil ke tabel *hasil_interpolasi*. Tampilan halaman Proses Data GEE disajikan pada Gambar 14.



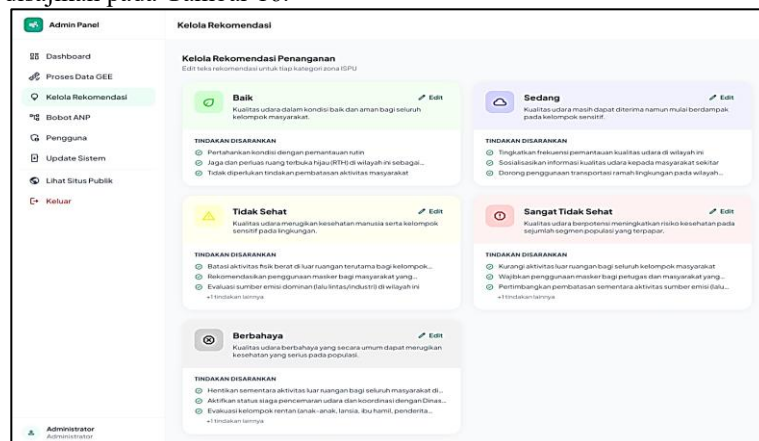
Gambar 14. Tampilan Halaman Proses Data GEE

11. Halaman Kelola Bobot (admin/kelola_bobot.php). Fungsi halaman ini memungkinkan admin meninjau bobot ANP dan *Consistency Ratio* terkini, serta memutakhirkan nilai NAB apabila terjadi perubahan regulasi. Halaman ini bersifat *read-mostly* — bobot ditampilkan dari hasil perhitungan terakhir yang tersimpan pada tabel *bobot_anp*, dan akan diperbarui otomatis kembali setiap kali admin menjalankan menu Proses Data GEE. Tampilan halaman Kelola Bobot disajikan pada Gambar 15.



Gambar 15. Tampilan Halaman Kelola Bobot

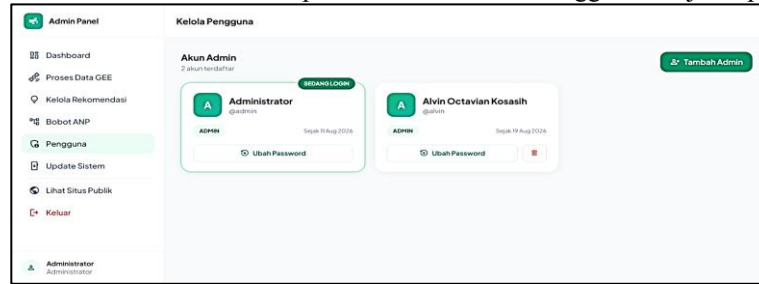
12. Halaman Kelola Rekomendasi (admin/kelola_rekomendasi.php) Pada halaman ini, memungkinkan admin memutakhirkan konten rekomendasi penanganan tiap kategori zona. Perubahan disimpan melalui permintaan POST ber-*action*='update' yang memperbarui kolom *ringkasan*, *deskripsi*, dan *tindakan* pada baris kategori terkait. Tampilan halaman Kelola Rekomendasi disajikan pada Gambar 16.



Gambar 16. Tampilan Halaman Kelola Rekomendasi

13. Halaman Kelola Pengguna (admin/kelola_pengguna.php)

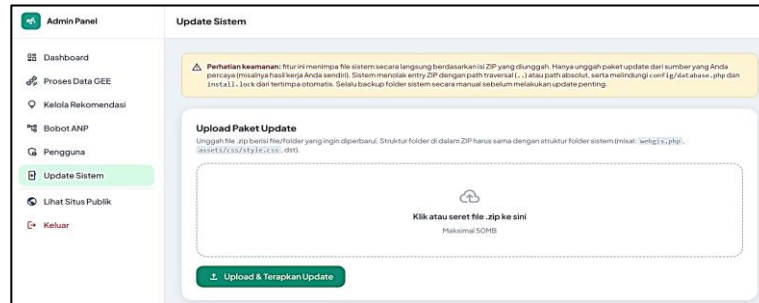
Halaman ini memungkinkan admin mengelola akun admin lain pada sistem, termasuk mengubah kata sandi. Sama seperti pada proses login, kata sandi baru selalu di-*hash* dengan *bcrypt* sebelum disimpan, tidak pernah dalam bentuk teks biasa. Tampilan halaman Kelola Pengguna disajikan pada Gambar 17.



Gambar 17. Tampilan Halaman Kelola Pengguna

14. Halaman Update Sistem (admin/updater.php)

Halaman ini berfungsi untuk admin memutakhirkan berkas sistem secara langsung melalui unggahan paket .zip, serta menampilkan riwayat pembaruan sebagai *audit trail*. Sebelum paket diekstraksi, sistem melakukan validasi keamanan terhadap tiap entri di dalam berkas ZIP untuk mencegah *path traversal* (entri berisi "." atau path absolut) serta menolak penimpaan berkas konfigurasi sensitif seperti *config/database.php*. Setiap percobaan pembaruan — baik berhasil maupun gagal — dicatat ke tabel *update_log* beserta nama admin yang melakukannya. Tampilan halaman Update Sistem disajikan pada Gambar 18.



Gambar 18. Tampilan Halaman Update Sistem

Implementasi Algoritma Inti

Dua algoritma inti — *Analytic Network Process* (ANP) dan Ordinary Kriging — diimplementasikan sebagai pustaka fungsi PHP murni yang dipakai bersama oleh Halaman Proses Data GEE. Kedua pustaka ini adalah realisasi langsung dari formula-formula pada bagian Metode.

1. Fungsi utama perhitungan bobot ANP

Fungsi *hitungBobotANPdariNAB()* menghitung tingkat bahaya ($1/NAB$), membentuk matriks perbandingan berpasangan dari rasio tingkat bahaya, menghitung *eigen vector* melalui *power iteration*, serta menghitung λ_{max} , CI, dan CR. Fungsi ini mengembalikan array berisi bobot, *consistency_ratio*, dan status konsisten ($CR \leq 0,1$).

2. Fungsi utama interpolasi Kriging

Fungsi *ordinaryKriging()* mengestimasi parameter variogram (*sill*, *range*, *nugget*) secara otomatis dari data sampel, membentuk matriks A ($(n+1) \times (n+1)$) dari semivariogram *spherical* antar tiap pasang titik sampel, melakukan dekomposisi LU sekali yang dipakai ulang untuk semua titik grid, kemudian menyelesaikan sistem persamaan untuk memperoleh bobot Kriging dan nilai prediksi.

Hasil Perhitungan Bobot ANP

Perhitungan bobot ANP menghasilkan bobot akhir tiap parameter pencemar sebagaimana disajikan pada Tabel 4. Bobot tertinggi diberikan kepada Aerosol Index (41,16%), diikuti oleh Ozon (26,28%), Sulfur Dioksida (16,92%), Nitrogen Dioksida (15,44%), dan Carbon Monoksida (0,21%).

Tabel 4. Hasil Bobot ANP dan Consistency Ratio

Kode	Nama Parameter	Bobot ANP	Consistency Ratio
AAI	Aerosol Index	0,4116	0,0000
O ₃	Ozon	0,2628	0,0000
SO ₂	Sulfur Dioksida	0,1692	0,0000
NO ₂	Nitrogen Dioksida	0,1544	0,0000
CO	Carbon Monoksida	0,0021	0,0000

Nilai CR = 0,0000 pada seluruh baris membuktikan bahwa pendekatan objektif berbasis rasio NAB menghasilkan matriks yang selalu konsisten secara matematis, sebagaimana dijelaskan pada bagian Metode, sehingga tahap uji konsistensi tidak pernah menggagalkan hasil perhitungan pada implementasi ini. Hasil ini sejalan dengan temuan Saaty (1999) bahwa matriks perbandingan berpasangan yang dibentuk dari rasio murni akan menghasilkan konsistensi sempurna karena elemen-elemennya memenuhi sifat transitif secara aljabar. Pendekatan ini berbeda dari ANP konvensional yang umumnya mengandalkan kuesioner *pairwise comparison* kepada pakar (Pungkasanti & Handayani, 2017), sehingga bobot yang dihasilkan bersifat *reproducible* dan tidak bergantung pada subjektivitas responden.

Hasil Interpolasi Spasial dan Klasifikasi Zona

Interpolasi Ordinary Kriging dengan model semivariogram *spherical* menghasilkan lima lapisan nilai prediksi kontinu — satu untuk tiap parameter pencemar — pada seluruh titik grid keluaran. Data satelit yang semula hanya tersedia pada 176 titik diskret berhasil diubah menjadi estimasi menerus di seluruh wilayah kajian. Pada resolusi 50×50, dihasilkan 2.500 titik grid yang tersebar merata di seluruh wilayah Kota Binjai.

Nilai hasil interpolasi tiap parameter kemudian dinormalisasi ke skala 0–100, dikalikan dengan bobot ANP yang bersesuaian, dan dijumlahkan menjadi Indeks Kualitas Udara (IKU) komposit per titik grid. Nilai IKU pada seluruh titik grid diurutkan dan dibagi menjadi lima kelompok kuantil (masing-masing 20%), kemudian diberi label dan warna sesuai skema kategori resmi ISPU. Distribusi zona kualitas udara Kota Binjai disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Distribusi Zona Kualitas Udara Kota Binjai

Kategori	Jumlah Titik	Persentase
Baik	180	20%
Sedang	180	20%
Tidak Sehat	180	20%
Sangat Tidak Sehat	180	20%
Berbahaya	180	20%

Peta zonasi lima kategori untuk seluruh wilayah kajian ditampilkan secara interaktif pada halaman WebGIS. Pengguna dapat memilih parameter yang ingin ditampilkan (IKU, NO₂, SO₂, CO, O₃, atau AAI), mengklik titik grid individual untuk melihat detail nilai tiap parameter, serta melihat legenda dan skala warna yang diperbarui secara otomatis. Hasil ini sejalan dengan temuan Pramono (2008) bahwa Ordinary Kriging menghasilkan estimasi yang lebih baik dibandingkan metode *Inverse Distance Weighted* (IDW) untuk data konsentrasi polutan udara, karena Ordinary Kriging memberikan ukuran *error* dan tingkat kepercayaan atas hasil estimasinya.

Hasil Pengujian Sistem

1. Pengujian Black Box

Pengujian *black box* dilakukan terhadap seluruh fungsi utama sistem tanpa meninjau struktur kode program secara internal, mengacu pada rancangan pengujian. Hasil pengujian disajikan pada Tabel 6.

Tabel 6. Hasil Pengujian Black Box

No.	Fitur Diuji	Skenario Pengujian	Hasil Diharapkan	Kesimpulan
1	Login admin	Masukkan username/password salah	Sistem menolak dan menampilkan pesan kesalahan	Sesuai
2	Login admin	Masukkan username/password benar	Sistem mengarahkan ke dashboard admin	Sesuai
3	Validasi CSV	Unggah CSV tanpa kolom NO ₂ /SO ₂ /CO/O ₃ /AAI	Sistem menolak dan menampilkan kolom yang hilang	Sesuai
4	Validasi CSV	Unggah CSV dengan titik data < 10	Sistem menolak dengan pesan titik data terlalu sedikit	Sesuai
5	Pipeline analisis	Jalankan pipeline dengan CSV valid, resolusi 50×50	Progres tampil bertahap dan hasil tersimpan ke basis data	Sesuai
6	Peta WebGIS	Pilih parameter NO ₂ , SO ₂ , CO, O ₃ , AAI, IKU	Layer heatmap dan legenda berganti sesuai parameter dipilih	Sesuai
7	Peta WebGIS	Klik salah satu titik grid pada peta	Popup menampilkan nilai tiap parameter dan kategori	Sesuai

No.	Fitur Diuji	Skenario Pengujian	Hasil Diharapkan	Kesimpulan
8	Halaman Analisis ANP	Buka halaman setelah pipeline dijalankan	Bobot dan Consistency Ratio tampil sesuai hasil terakhir	Sesuai
9	Halaman Rekomendasi	Buka halaman rekomendasi	Lima kategori tindakan tampil lengkap	Sesuai
10	Cetak laporan	Klik tombol cetak pada halaman laporan	Dialog cetak peramban terbuka, tombol tersembunyi saat print preview	Sesuai
11	Kelola pengguna	Tambah akun admin baru	Akun tersimpan dengan password ter-hash (bcrypt)	Sesuai
12	Update sistem	Unggah ZIP berisi entri path traversal (../)	Sistem menolak seluruh paket dan mencatat status gagal	Sesuai
13	Akses tanpa login	Akses langsung admin/dashboard.php tanpa sesi aktif	Sistem mengalihkan otomatis ke halaman login	Sesuai

Dari 13 skenario pengujian *black box*, seluruhnya (100%) dinyatakan sesuai rancangan. Hasil ini membuktikan bahwa fungsi-fungsi utama, baik pada sisi pengguna publik maupun admin, berjalan sesuai dengan rancangan yang telah disusun.

2. Pengujian Validasi Interpolasi (Cross-Validation)

Pada penelitian ini, akurasi hasil interpolasi Ordinary Kriging belum divalidasi menggunakan pendekatan *leave-one-out cross-validation* sebagaimana direkomendasikan dalam literatur (Pramono, 2008). Sebagai gantinya, karakteristik sebaran data hasil interpolasi disajikan secara deskriptif untuk memberikan gambaran mengenai rentang dan variasi nilai tiap parameter pencemar di seluruh wilayah kajian. Statistik deskriptif hasil interpolasi per parameter disajikan pada Tabel 7.

Tabel 7. Statistik Deskriptif Hasil Interpolasi per Parameter

Parameter	Minimum	Rata-rata	Maksimum	Rentang (Max – Min)
NO ₂	0,000025	0,000033	0,000044	0,000019
SO ₂	-0,000030	0,000034	0,000097	0,000127
CO	0,031304	0,031902	0,032471	0,001167
O ₃	0,120420	0,120524	0,120642	0,000222
AAI	-0,786917	-0,618989	-0,517032	0,269885

Berdasarkan Tabel 7, terlihat bahwa masing-masing parameter pencemar memiliki karakteristik sebaran yang berbeda-beda. Parameter AAI (*Aerosol Index*) memiliki rentang nilai terbesar (0,269885), yang menunjukkan variasi spasial paling signifikan di seluruh wilayah kajian. Hal ini konsisten dengan bobot ANP yang diberikan kepada AAI sebesar 41,16% sebagai parameter paling berpengaruh. Parameter O₃ (Ozon) dan CO (Carbon Monoksida) memiliki rentang nilai yang relatif kecil (0,000222 dan 0,001167), menunjukkan sebaran yang lebih homogen di seluruh wilayah Kota Binjai. Nilai negatif pada parameter SO₂ dan AAI merupakan karakteristik bawaan dari data satelit Sentinel-5P TROPOMI, di mana nilai negatif menunjukkan kondisi atmosfer yang sangat bersih atau di bawah ambang deteksi sensor. Nilai-nilai ini tetap valid secara ilmiah dan tidak perlu dikoreksi menjadi nol, karena normalisasi *min-max* yang dilakukan pada tahap *weighted overlay* akan mengubah rentang nilai aktual menjadi skala 0–100 secara proporsional. Ketidadaan validasi *cross-validation* pada penelitian ini menjadi salah satu keterbatasan yang telah diidentifikasi pada bagian Kelemahan Sistem (poin 6), dan direkomendasikan sebagai pengembangan lebih lanjut pada bagian Saran. Validasi terhadap data pengukuran darat sebaiknya dilakukan secara berkelanjutan apabila Kota Binjai di masa mendatang memiliki AQMS resmi, sehingga akurasi estimasi berbasis citra satelit dapat diketahui secara kuantitatif.

3. Pengujian Konsistensi Bobot ANP

Karena matriks perbandingan berpasangan dibentuk dari rasio murni 1/NAB, pengujian dilakukan dengan menjalankan *pipeline* berulang kali menggunakan data masukan yang sama untuk memastikan bobot yang dihasilkan *reproducible* (identik pada setiap pengulangan) dan nilai *Consistency Ratio* senantiasa berada pada kondisi konsisten sempurna (CR = 0). Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai CR = 0,0000 pada seluruh baris, membuktikan bahwa pendekatan objektif berbasis rasio NAB menghasilkan matriks yang selalu konsisten secara matematis.

Kelebihan dan Kelemahan Sistem

Berdasarkan hasil implementasi dan pengujian, sistem yang dikembangkan memiliki sejumlah kelebihan yang mendukung proses analisis kualitas udara secara terintegrasi. **Kelebihan** tersebut meliputi:

(1) *pipeline* analisis terintegrasi dalam satu sistem, mulai dari pembacaan data CSV, interpolasi Kriging, pembobotan ANP, hingga klasifikasi zona, tanpa ketergantungan terhadap pustaka geostatistik eksternal; (2) pembobotan ANP bersifat objektif dan *reproducible* karena dihitung otomatis dari rasio NAB resmi; (3) pemantauan proses analisis berlangsung secara aktual melalui mekanisme *streaming* NDJSON; (4) proses analisis dapat dijalankan melalui satu kali unggah data; (5) metodologi analisis disajikan secara transparan dan mudah dipahami melalui halaman Analisis ANP dan Panduan; (6) fleksibilitas dalam menentukan resolusi grid (30×30, 50×50, atau 100×100); (7) mekanisme keamanan pada proses pembaruan sistem; dan (8) mekanisme pencatatan aktivitas (*audit trail*) melalui tabel *update log*.

Meskipun demikian, sistem yang dikembangkan masih memiliki beberapa **keterbatasan** yang perlu dipertimbangkan dalam penggunaan dan interpretasi hasil. Keterbatasan tersebut meliputi: (1) klasifikasi zona bersifat relatif dan tidak menunjukkan ambang konsentrasi absolut, karena perbedaan karakteristik dan skala antara data hasil pengamatan satelit dengan konsentrasi ambien yang digunakan dalam standar ISPU; (2) model semivariogram yang tersedia masih terbatas pada model *spherical*, belum dilengkapi mekanisme pemilihan model secara otomatis; (3) peningkatan resolusi grid berpengaruh terhadap waktu dan beban komputasi, dengan risiko *timeout* pada lingkungan *hosting* dengan batas waktu eksekusi tertentu; (4) resolusi spasial analisis dibatasi oleh karakteristik sensor satelit Sentinel-5P ($\pm 1.113,2$ meter), sehingga belum mampu menangkap variasi kualitas udara pada skala yang sangat detail; (5) belum tersedia mekanisme *rollback* otomatis pada pembaruan sistem; dan (6) bobot ANP belum melalui validasi silang dengan penilaian pakar, sehingga sejauh mana bobot berbasis NAB mampu merepresentasikan pertimbangan kontekstual dalam penilaian kualitas udara masih perlu dikaji lebih lanjut.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis, perancangan, implementasi, dan pengujian sistem yang telah diuraikan, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Ketidadaan *Air Quality Monitoring Station* (AQMS) resmi di Kota Binjai berhasil diatasi dengan memanfaatkan citra satelit Sentinel-5P TROPOMI yang diakses dan diekstraksi melalui *Google Earth Engine*, mencakup lima parameter pencemar (NO₂, SO₂, CO, O₃, dan *Aerosol Index* sebagai proksi partikulat), sehingga sistem dapat berjalan sepenuhnya tanpa bergantung pada data pengukuran darat yang belum tersedia.
2. Kelima parameter pencemar yang berbeda satuan dan skala berhasil diintegrasikan secara objektif menjadi satu Indeks Kualitas Udara (IKU) komposit melalui algoritma *Analytic Network Process* (ANP) yang bobotnya dihitung otomatis dari rasio Nilai Ambang Batas (NAB) resmi Kepdal 107/1997, bukan dari penilaian subjektif pakar, sehingga bobot yang dihasilkan bersifat *reproducible* dan *Consistency Ratio* senantiasa memenuhi syarat konsisten (CR = 0,0000).
3. Data pencemar yang bersifat diskret pada titik-titik grid hasil ekstraksi citra satelit berhasil diubah menjadi peta sebaran yang kontinu di seluruh wilayah kajian melalui interpolasi *Ordinary Kriging* dengan model semivariogram *spherical*, yang diimplementasikan secara *native* dalam PHP tanpa dependensi terhadap perangkat lunak atau skrip pengolah data eksternal.
4. Seluruh *pipeline* analisis, mulai dari *parsing* data hasil ekspor *Google Earth Engine*, interpolasi Kriging, pembobotan ANP, *weighted overlay*, hingga klasifikasi zona ke dalam lima kategori berbasis kuantil berhasil diintegrasikan menjadi satu alur proses yang dapat dijalankan admin hanya melalui satu unggahan berkas CSV, dengan progres yang ditampilkan secara *real-time*.
5. Sistem WebGIS yang dibangun berhasil menyajikan hasil zonasi kualitas udara secara interaktif dan informatif bagi pengguna non-teknis, dilengkapi legenda, panduan cara membaca peta, kamus istilah kontekstual, serta rekomendasi penanganan per kategori zona, sehingga informasi yang kompleks dapat dipahami masyarakat umum maupun digunakan sebagai bahan pertimbangan oleh Dinas Lingkungan Hidup Kota Binjai.
6. Hasil pengujian *black box* terhadap seluruh modul sistem menunjukkan bahwa fungsi-fungsi utama, baik pada sisi pengguna publik maupun admin, berjalan sesuai dengan rancangan yang telah disusun, sehingga sistem layak digunakan sebagai alat bantu evaluasi kualitas udara Kota Binjai.

Beberapa saran diajukan sebagai bahan pertimbangan pengembangan sistem lebih lanjut, baik oleh penulis sendiri maupun oleh pihak lain yang hendak melanjutkan penelitian ini, sejalan dengan kelemahan sistem yang telah diidentifikasi:

1. Validasi hasil zonasi sistem terhadap data pengukuran darat sebaiknya dilakukan secara berkelanjutan apabila Kota Binjai di masa mendatang memiliki AQMS resmi, sehingga akurasi estimasi berbasis citra satelit dapat diketahui secara kuantitatif.
2. Pendekatan klasifikasi kuantil relatif yang digunakan pada sistem saat ini sebaiknya dikaji ulang secara berkala seiring bertambahnya cakupan data historis, agar batas antar kategori tetap merepresentasikan kondisi kualitas udara yang wajar dan tidak bias terhadap rentang nilai pada satu periode ekstraksi saja.

3. Penelitian lanjutan dapat mengembangkan analisis deret waktu (*time-series*) untuk mengamati tren kualitas udara antarperiode, mengingat sistem saat ini baru menyajikan kondisi pada satu periode ekstraksi (*snapshot*), belum mencakup perbandingan musiman atau tahunan.
4. Model semivariogram Kriging dapat dikembangkan lebih lanjut agar mendukung lebih dari satu pilihan model (*exponential* atau *gaussian*, selain *spherical* yang digunakan saat ini) dengan pemilihan otomatis berdasarkan kecocokan terbaik terhadap data.
5. Struktur *preset* multi-wilayah yang telah disiapkan pada skrip ekstraksi *Google Earth Engine* dapat dimanfaatkan untuk memperluas cakupan sistem ke kabupaten/kota lain di sekitar Kota Binjai, seperti Kabupaten Deli Serdang atau Kabupaten Langkat yang *preset*-nya sudah tersedia namun belum memiliki data poligon batas administratif presisi.
6. Mekanisme keamanan sistem dapat ditingkatkan lebih lanjut, misalnya dengan menambahkan autentikasi dua faktor (2FA) pada akun admin serta mekanisme *rollback* otomatis pada fitur Update Sistem, mengingat sistem mengelola data yang berpotensi dijadikan rujukan kebijakan publik.
7. Pengujian performa pada resolusi grid tinggi (100×100) perlu dilakukan lebih lanjut pada lingkungan *hosting* produksi (bukan hanya *localhost*), mengingat interpolasi Kriging bersifat komputasi intensif (kompleksitas $O(n^3)$ pada tahap dekomposisi matriks) sehingga berpotensi mengalami kendala waktu eksekusi atau alokasi memori pada *shared hosting* dengan spesifikasi terbatas.
8. Sistem dapat dikembangkan lebih lanjut dengan menambahkan notifikasi otomatis (misalnya melalui surel atau pesan instan) kepada pihak Dinas Lingkungan Hidup Kota Binjai apabila hasil klasifikasi menunjukkan kategori "Sangat Tidak Sehat" atau "Berbahaya" pada wilayah tertentu, sehingga informasi dapat ditindaklanjuti secara lebih cepat.

DAFTAR PUSTAKA

- Arifin, O., & Supriyatna, A. R. (2023). Sistem Informasi Geografis untuk Pemetaan Lahan Kakao Menggunakan Leaflet JS dan GeoJSON. *Jurnal Teknoinfo*, 17(1), 364–370.
- Aronoff, S. (1989). *Geographic Information Systems: A Management Perspective*. WDL Publications.
- Burrough, P. A. (1986). *Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment*. Clarendon Press.
- Chrisman, N. (1997). *Exploring Geographic Information Systems*. John Wiley & Sons.
- Dyana, J., Amelia, R., Davita, S., Arafah, Y., Sede, A., & Hidayati, A. (2025). Dampak Bahaya Pencemaran Udara terhadap Kesehatan Masyarakat di Perkotaan. *Jurnal Ilmiah Wahana Pendidikan*, 11(1), 132–140.
- Kamalin, M. (2024). Dampak Pencemaran Udara terhadap Kesehatan Masyarakat di Perkotaan. *Maliki Interdisciplinary Journal*, 2(12), 906–913.
- Keputusan Kepala Badan Pengendalian Dampak Lingkungan (Bapedal) Nomor 107 Tahun 1997 tentang Pedoman Teknis Perhitungan dan Pelaporan serta Informasi Indeks Standar Pencemar Udara. (1997). Bapedal.
- Kusrini. (2007). *Konsep dan Aplikasi Sistem Pendukung Keputusan*. Andi.
- Maharani, S. (2025). Analisis Dampak Pencemaran Udara terhadap Kesehatan Pernapasan Masyarakat Perkotaan. *Journal of Medical and Health Science*, 1(1), 10–15.
- Malczewski, J. (2006). GIS-Based Multicriteria Decision Analysis: A Survey of the Literature. *International Journal of Geographical Information Science*, 20(6), 703–726. <https://doi.org/10.1080/13658810600661508>
- Marbun, J., Sigiro, M., Purba, B. T. M., & Tamba, J. (2023). Potensi dan Tantangan Penggunaan Kendaraan Listrik di Kota Medan sebagai Bahan Ajar untuk Pendidikan Fisika. *Journal of Education Research*, 4(4), 2542–2548.
- Marimin. (2008). *Teknik dan Aplikasi Pengambilan Keputusan Kriteria Majemuk*. Grasindo.
- Muhtarom, M. R., Lutfi, A., & Susanto, A. (2024). Penerapan Sistem Informasi Geografis terhadap Pemetaan Letak Wisata Kabupaten Bondowoso. *Jurnal Teknoinfo*, 8(3), 2080–2090.
- Narti. (2019). Pengambilan Keputusan Memilih Sekolah dengan Metode AHP. *Jurnal Informatika*, 6(1), 143–150.
- Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 12 Tahun 2010 tentang Pelaksanaan Pengendalian Pencemaran Udara di Daerah. (2010). Kementerian Negara Lingkungan Hidup.
- Prahasta, E. (2009). *Sistem Informasi Geografis: Konsep-Konsep Dasar (Perspektif Geodesi & Geomatika)*. Informatika.
- Pramono, G. H. (2008). Akurasi Metode IDW dan Kriging untuk Interpolasi Sebaran Sedimen Tersuspensi. *Forum Geografi*, 22(1), 97–110. <https://doi.org/10.23917/forgeo.v22i1.4990>
- Pratiwi, H. (2016). *Buku Ajar Sistem Pendukung Keputusan*. Deepublish.

- Pungkasanti, P. T., & Handayani, T. (2017). Penerapan Analytic Network Process (ANP) pada Sistem Pendukung Keputusan. *Jurnal Transformatika*, 14(2), 66–71. <https://doi.org/10.26623/transformatika.v14i2.439>
- Rushayati, S. B., Alikodra, H. S., Dahlan, E. N., & Purnomo, H. (2020). Spasio-Temporal Emisi NO₂ saat Pandemi Covid-19 di Kuta, Bali: Deteksi pada Citra Sentinel-5P Menggunakan Google Earth Engine (GEE). *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 18(2), 235–243. <https://doi.org/10.14710/jil.18.2.235-243>
- Saaty, T. L. (1999). *Fundamentals of the Analytic Network Process*. Proceedings of the 5th International Symposium on the Analytic Hierarchy Process, Kobe, Japan.
- Saaty, T. L. (2005). *Theory and Applications of the Analytic Network Process: Decision Making with Benefits, Opportunities, Costs, and Risks*. RWS Publications.
- Turban, E., Aronson, J. E., & Liang, T. P. (2005). *Decision Support Systems and Intelligent Systems* (Sistem Pendukung Keputusan dan Sistem Cerdas) (Edisi 7 Jilid 1). Andi.
- Umah, R., & Gusmira, E. (2024). Dampak Pencemaran Udara terhadap Kesehatan Masyarakat di Perkotaan. *Profit: Jurnal Manajemen, Bisnis dan Akuntansi*, 3(3), 103–112.
- Virghileanu, M., Săvulescu, I., Mihai, B. A., Nistor, C., & Dobre, R. (2020). Nitrogen Dioxide (NO₂) Pollution Monitoring with Sentinel-5P Satellite Imagery over Europe during the Coronavirus Pandemic Outbreak. *Remote Sensing*, 12(21), 3575. <https://doi.org/10.3390/rs12213575>