

Digital Monitoring of Domestic Wastewater Quality to Support Sustainable Environmental Management in Residential Areas

Pemantauan Digital Kualitas Air Limbah Domestik untuk Mendukung Pengelolaan Lingkungan Berkelanjutan di Perumahan

Fitri Indriyani¹ , Endah Kurniyaningrum^{2*} 

^{1,2}Faculty of Civil Engineering and Planning, Universitas Trisakti, Indonesia

¹151012400019@std.trisakti.ac.id, ²kurniyaningrum@trisakti.ac.id

*Penulis Korespondensi

Article Info

Article History:

Penyerahan Juni 18, 2026

Revisi Agustus 24, 2026

Diterima Agustus 31, 2026

Diterbitkan September 15, 2026

Keywords:

Domestic Wastewater

Spatial Analysis

Linear Regression

Cisadane River

Wastewater Quality

Kata Kunci:

Air Limbah Domestik

Analisis Spasial

Regresi Linier

Sungai Cisadane

Kualitas Air Limbah



ABSTRACT

Rapid urban residential development in South Tangerang City demands strategic environmental governance driven by innovative digital technology to mitigate the impacts of domestic wastewater pollution. This study aims to **formulate strategic management** recommendations for domestic wastewater control by deploying spatial distribution modeling through the Inverse Distance Weighting (IDW) method within a Geographic Information System (GIS) framework to accelerate SDG 6 (Clean Water and Sanitation) and SDG 11 (Sustainable Cities and Communities) targets. A **comparative study** was conducted across two modern residential clusters with distinct structural attributes (Citra Garden and Asanna), utilizing primary wastewater quality parameters (BOD, COD, TSS) systematically monitored during Semesters I and II of 2024–2025. The IDW **geospatial simulation indicates** that pollutant concentrations are continuously distributed, establishing radial dispersion contours around discharge outlets (local influence zones). Empirical laboratory testing confirms that while current effluent quality physically complies with PerMenLH/BPLH No. 11 of 2025 standards, the digital spatial overlay reveals a notable expansion of regional pollution risk corridors heavily intensified by seasonal rainfall fluctuations. Furthermore, **linear regression tracking** points to a strong negative correlation between geometric distance and pollutant concentration (R^2 values ranging from 0.77 to 0.86), validating the dominance of natural hydrodynamic dilution processes within urban receiving streams. This paper recommends the Spatially Targeted Intervention (STI) model as an executive decision-making tool for corporate developers and municipal authorities to implement eco-efficient smart sanitation green technology infrastructure.

Ini adalah artikel akses terbuka di bawah [CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) license.



ABSTRAK

Pesatnya perkembangan kawasan hunian perkotaan di Kota Tangerang Selatan menuntut tata kelola lingkungan yang strategis berbasis teknologi digital inovatif untuk mengurangi dampak pencemaran air limbah domestik. Penelitian ini bertujuan **merumuskan rekomendasi manajemen** strategis untuk pengendalian air limbah domestik melalui penerapan pemodelan distribusi spasial menggunakan metode *Inverse Distance Weighting* (IDW) dalam kerangka *Geographic Information System* (GIS) guna mempercepat pencapaian SDG 6 (Air Bersih dan Sanitasi Layak) dan SDG 11 (Kota dan Permukiman yang Berkelanjutan). Studi komparatif dilakukan **pada dua klaster** perumahan modern dengan karakteristik struktural yang berbeda, yaitu Citra Garden dan Asanna, menggunakan parameter utama kualitas air limbah berupa

BOD, COD, dan TSS yang dipantau secara sistematis pada Semester I dan II tahun 2024–2025. Simulasi geospasial IDW **menunjukkan bahwa konsentrasi** polutan terdistribusi secara kontinu, membentuk kontur penyebaran radial di sekitar titik pembuangan sebagai zona pengaruh lokal. Pengujian laboratorium secara empiris mengonfirmasi bahwa meskipun kualitas efluen saat ini secara fisik telah memenuhi standar PerMenLH/BPLH No. 11 Tahun 2025, overlay spasial digital menunjukkan adanya perluasan yang signifikan pada koridor risiko pencemaran regional yang semakin dipengaruhi oleh fluktuasi curah hujan musiman. Selain itu, **analisis regresi linier** menunjukkan korelasi negatif yang kuat antara jarak geometris dan konsentrasi polutan dengan nilai R^2 berkisar antara 0,77 hingga 0,86, yang mengindikasikan dominannya proses pengenceran hidrodinamik alami pada badan air penerima di kawasan perkotaan. Penelitian ini merekomendasikan model *Spatially Targeted Intervention* (STI) sebagai alat pengambilan keputusan strategis bagi pengembang perumahan dan pemerintah daerah dalam menerapkan infrastruktur teknologi hijau sanitasi cerdas yang ramah lingkungan dan efisien.

Ini adalah artikel akses terbuka di bawah [CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) license.



DOI: <https://doi.org/10.33050/tmj.v11i2.2711>

Ini adalah artikel akses terbuka di bawah CC-BY license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

©Penulis memegang semua hak cipta

1. PENDAHULUAN

Dinamika ekspansi wilayah penyangga metropolitan DKI Jakarta telah mendorong akselerasi urbanisasi yang sangat masif di Kota Tangerang Selatan. Pertumbuhan ini dicirikan oleh pembangunan klaster permukiman modern skala besar oleh organisasi pengembang swasta yang tersebar secara heterogen di berbagai kecamatan. Dampak langsung dari tingginya kepadatan hunian perkotaan tersebut berimplikasi linear terhadap lonjakan konsumsi air bersih dan peningkatan volume produksi air limbah domestik perkotaan [1]. Dalam lanskap manajemen strategis bisnis digital (*digital business arena*), pelaku usaha pengembang tidak lagi hanya dituntut untuk mengoptimalkan skalabilitas profit ekonomi (SDG 8), melainkan wajib mengintegrasikan tata kelola lingkungan berbasis teknologi inovatif guna menekan potensi risiko degradasi kualitas ekosistem pada badan air penerima perkotaan, seperti Daerah Aliran Sungai (DAS) Cisadane [2, 3].

Hingga saat ini, pola tata kelola sanitasi air limbah domestik di wilayah perkotaan umumnya masih didominasi oleh sistem pengolahan setempat (*on-site system*) maupun sistem terpusat berskala komunal. Efektivitas operasional sistem tersebut sangat bergantung pada kepatuhan teknis, ketersediaan prasarana pendukung, serta manajemen risiko pengembang dalam mengendalikan efluen cair [4]. Adanya variasi karakteristik tata guna lahan, tingkat kepadatan populasi, serta disparitas model infrastruktur antarklaster perumahan memicu terjadinya variabilitas kondisi kualitas air limbah yang dilepaskan ke lingkungan. Oleh karena itu, pemahaman mendalam mengenai kondisi eksisting kualitas efluen merupakan langkah fundamental dalam merumuskan strategi pengendalian beban pencemaran yang adaptif bagi keberlanjutan wilayah [5, 6].

Namun demikian, mayoritas kajian kualitas air limbah di perkotaan yang ada saat ini masih bersifat deskriptif normatif dan hanya mengandalkan interpretasi berbasis titik sampling laboratorium tunggal (*point-source analysis*). Pendekatan konvensional tersebut dinilai kurang strategis bagi pengambil kebijakan karena tidak mampu menyajikan gambaran pola distribusi ruang serta visualisasi area risiko kontaminasi secara kontinu [7, 8]. Padahal, dispersi polutan di perairan perkotaan sangat dipengaruhi oleh variabel spasial, seperti jarak geometris hunian, pola hidrodinamika sistem drainase mikro, intensitas curah hujan musiman, dan kedekatan dengan sungai penerima. Konteks ini menuntut adanya lompatan inovasi tata kelola melalui pemanfaatan perangkat digital geospasial (*digital environmental tools*) [9, 10].

Pemanfaatan Sistem Informasi Geografis (SIG) memungkinkan integrasi data kualitas lingkungan dengan koordinat lokasi untuk menghasilkan visualisasi peta tematik berbasis spasial [11]. Salah satu metode andalan dalam analisis spasial digital untuk mengestimasi nilai pada parameter area yang tidak terukur langsung adalah teknik interpolasi deterministik *Inverse Distance Weighting* (IDW). IDW mengasumsikan bahwa bobot pengaruh lokal suatu fenomena lingkungan akan berkurang seiring dengan pertambahan jarak geografis dari titik sampel pengamatan. Pendekatan komputasi spasial ini sangat representatif untuk memodelkan karakteristik dispersi polutan biokimia cair di media air secara kontinu di seluruh zona kajian [12, 13].

Pemodelan sebaran kualitas air limbah berbasis IDW memiliki nilai strategis sebagai sistem pendukung keputusan berbasis wilayah. Peta spasial digital memungkinkan pengembang dan pemerintah daerah

mengidentifikasi zona risiko lingkungan serta mendukung perencanaan investasi green technology, pengembangan smart sanitation, dan intervensi sanitasi berbasis lokasi. Integrasi teknologi spasial ini juga mendukung pencapaian SDG 6 melalui peningkatan sanitasi dan pengurangan polutan, serta SDG 11 melalui pengembangan kawasan perkotaan yang tangguh, ramah lingkungan, dan berkelanjutan [14, 15].

Dengan mempertimbangkan dinamika tata ruang Kota Tangerang Selatan dan kebutuhan instrumen digital dalam manajemen lingkungan, penelitian ini membandingkan pengelolaan effluen pada Perumahan Asanna dan Citra Garden. Analisis dilakukan terhadap parameter *Biochemical Oxygen Demand* (BOD), *Chemical Oxygen Demand* (COD), dan *Total Suspended Solids* (TSS) selama periode 2024–2025. Penelitian berfokus pada empat aspek utama, yaitu evaluasi kepatuhan terhadap baku mutu air limbah domestik, pemodelan sebaran spasial polutan menggunakan metode IDW, penyusunan rekomendasi pengelolaan lingkungan berbasis zonasi spasial, serta analisis kontribusi teknologi digital dalam mendukung pencapaian SDGs 6 dan SDGs 11 [16].

Melalui pelaksanaan tujuan riset, penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi teoretis dan praktis. Berbeda dari studi terdahulu yang umumnya berfokus pada evaluasi pengolahan, kepatuhan baku mutu, dan analisis berbasis titik, penelitian ini mengisi kesenjangan melalui integrasi GIS, IDW, dan regresi linier dalam satu kerangka analisis. Kebaruan penelitian terletak pada integrasi ketiga metode tersebut untuk memetakan distribusi spasial BOD, COD, dan TSS secara kontinu sekaligus memvalidasi hubungan jarak terhadap penurunan konsentrasi polutan [17]. Studi komparatif Citra Garden dan Asanna selama periode 2024–2025 juga menunjukkan perbedaan kekuatan hubungan spasial berdasarkan karakteristik jarak menuju Sungai Cisadane. Secara praktis, hasil analisis diterjemahkan ke dalam *Spatially Targeted Intervention* (STI) sebagai kerangka pendukung keputusan untuk menentukan prioritas intervensi sanitasi berbasis risiko spasial. Model ini dapat mendukung pengembang dan pemerintah dalam pengelolaan IPAL, perencanaan sanitasi, dan pembangunan kota berkelanjutan.

2. PERMASALAHAN

2.1. Air Limbah Domestik dan Regulasi Mutu Lingkungan

Air limbah domestik didefinisikan sebagai air buangan hasil pemakaian dari aktivitas permukiman perkotaan dan kawasan komersial, yang secara spesifik diklasifikasikan ke dalam *black water* (limbah toilet) dan *grey water* (limbah dapur, mencuci, dan mandi). Tata kelola lingkungan yang strategis mewajibkan seluruh effluen cair dikumpulkan dan diolah secara terintegrasi guna mencegah degradasi ekosistem pada media air penerima [12, 18]. Pengolahan effluen skala klaster hunian umumnya bersandar pada unit *Sewage Treatment Plant* (STP).

Tabel 1. Baku Mutu Air Limbah Domestik untuk Pembuangan Ke Drainase/Irigasi

No	Parameter	Satuan	Kadar Tertinggi
1	Tingkat keasaman (pH)*	-	6-9
2	Kebutuhan oksigen biokimiawi (BOD)	mg/liter	12
3	Kebutuhan oksigen kimiawi (COD)	mg/liter	80
4	Total padatan tersuspensi (TSS)	mg/liter	30
5	Fecal coliform	MPN/100 ml	200
6	Residual klorin**	mg/liter	1

Sumber:

Lampiran I Peraturan Menteri Lingkungan Hidup/Badan Pengendalian Lingkungan Hidup Republik Indonesia No. 11 Tahun 2025 tentang Baku Mutu Air Limbah Domestik dan Standar Pengolahan Air Limbah Domestik [19].

Ket:

*) Diukur langsung pada titik penataan

**) Bila pengolahan air limbah domestik menggunakan klorin

Berdasarkan PerMenLH/BPLH No. 11 Tahun 2025, evaluasi kualitas effluen penelitian ini menggunakan baku mutu yang sesuai dengan kategori pembuangan air limbah domestik ke saluran drainase/irigasi sebagaimana disajikan pada Tabel 1, yaitu BOD 12 mg/L, COD 80 mg/L, dan TSS 30 mg/L. Kategori dan

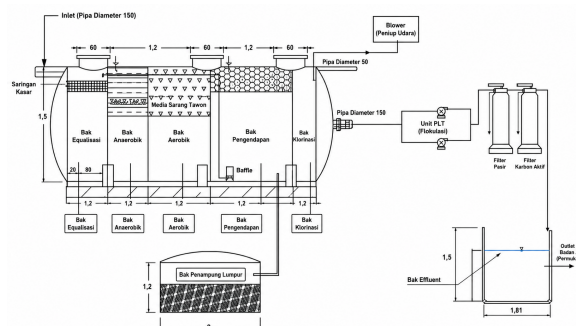
nilai baku mutu tersebut digunakan secara konsisten sebagai dasar evaluasi kepatuhan pada seluruh bagian penelitian. Penegasan kategori pembuangan ini diperlukan untuk menghindari perbedaan interpretasi terhadap status kepatuhan effluen. Di samping itu, pembuangan effluen cair wajib memiliki Persetujuan Teknis (PerTek) dan Surat Kelayakan Operasional (SLO) sesuai dengan mandat Pasal 3 PerMenLHK No. 5 Tahun 2021 bagi kegiatan wajib AMDAL atau UKL-UPL [20].

Aspirasi teoretis para ahli menempatkan BOD, COD, dan TSS sebagai indikator paling mutakhir dalam mengevaluasi kinerja operasional IPAL. Ketiga parameter ini sangat responsif terhadap variasi spasial tata guna lahan, memiliki efisiensi monitoring tinggi, serta berkorelasi langsung terhadap risiko penurunan oksigen terlarut (*Dissolved Oxygen*) dan sedimentasi fisik perairan kota [21].

2.2. Sistem Pengolahan Air Limbah dan Teknologi STP

Akselerasi perwujudan kota pintar yang berkelanjutan menuntut implementasi teknologi pengolahan air limbah terpercaya untuk mengendalikan beban polutan sebelum masuk ke drainase primer. Menurut prinsip dasar rekayasa lingkungan, proses pengolahan limbah di dalam STP dikelompokkan menjadi tiga tahapan struktural, yaitu pengolahan primer *primary treatment* berupa penyaringan fisik dan sedimentasi padatan kasar, pengolahan sekunder *secondary treatment* menggunakan mikroorganisme biologi untuk mengurai polutan organik, serta pengolahan tersier *tertiary treatment* sebagai tahap lanjut eliminasi nutrisi fosfor-nitrogen maupun senyawa berbahaya. Pilihan arsitektur teknologi perkotaan bervariasi mulai dari sistem setempat (septic tank individual), sistem ekologis (*constructed wetlands*), hingga sistem terpusat berskala komunal perkotaan [22, 23].

Pada objek penelitian yang berlokasi di Perumahan Citra Garden dan Perumahan Asanna, pihak manajemen pengembang menerapkan inovasi teknologi melalui penggunaan sistem Biofilter Anaerob-Aerob sebagai solusi pengelolaan lingkungan. Implementasi teknologi ini mencerminkan suatu keputusan strategis manajemen yang berorientasi pada efisiensi, mengingat sistem biofilter tersebut memiliki kemampuan tinggi dalam menurunkan parameter pencemar seperti BOD, COD, dan TSS secara signifikan. Selain itu, teknologi ini memiliki keunggulan berupa kebutuhan lahan yang relatif kecil, biaya operasional yang lebih ekonomis, serta produksi lumpur aktif yang lebih rendah dibandingkan dengan sistem pengolahan konvensional berbasis metode lumpur aktif [24].



Gambar 1. Layout STP yang Terdapat di Ketiga Lokasi Penelitian

Gambar 1 menjelaskan mekanisme pengolahan di dalam STP ini mengalir secara kontinu melalui serangkaian kompartemen teknis yang meliputi:

- *Bar Screen & Equalizing Tank*: Penyaringan fisik benda padat kasar berukuran besar dilanjutkan dengan stabilisasi homogenitas debit serta fluktuasi beban pencemar agar tidak mengganggu kinerja reaktor biologis di hilir.
- *Anaerobic Tank*: Berfungsi sebagai reaktor biologi tanpa oksigen untuk menumbuhkan bakteri anaerob guna mendegradasi senyawa organik kompleks sekaligus menginisiasi proses denitrifikasi nitrat (NO₃-) menjadi gas nitrogen (N₂) bebas.
- *Aerobic Tank*: Menyuplai oksigen secara masif melalui sistem blower dan diffuser untuk merangsang aktivitas bakteri aerob dalam mengoksidasi sisa bahan organik terlarut secara optimal.

- *Sedimentation, Chlorination & Filtration Tank*: Pemisahan gravitasi lumpur tersuspensi, disinfeksi patogen menggunakan senyawa klorin, serta filtrasi akhir melalui media sand-carbon filter bertekanan guna mengeliminasi bau, warna, dan residu padatan fisik sebelum effluen aman dilepaskan ke drainase terbuka.

2.3. Inverse Distance Weighting (IDW)

Dalam mengevaluasi sebaran risiko pencemaran air lingkungan, SIG menyediakan instrumen analisis deterministik melalui teknik interpolasi IDW. Prinsip dasar IDW bersandar pada asumsi geostatistika bahwa setiap titik input pengamatan memiliki pengaruh lokal yang bersifat linear negatif, di mana bobot pengaruhnya akan berkurang seiring dengan pertambahan jarak geografis ruang dari titik sampel yang diukur [25].

$$Z^* = \sum_{i=1}^N W_i Z_i \quad (1)$$

Dengan keterangan Z_i ($i = 1, 2, 3, \dots, N$) adalah suatu nilai ketinggian data yang ditentukan dengan sejumlah N sebagai titik. Sedangkan bobot atau *weight* (W_i) dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$W_i(x) = \frac{h_i^{-p}}{\sum_{j=1}^n h_j^{-p}} \quad (2)$$

Pada nilai p terdapat suatu nilai positif yang dapat dikatakan sebagai parameter *power*. Nilai p berfungsi untuk mengontrol tingkat pengaruh jarak terhadap bobot interpolasi, dimana semakin besar nilai p maka pengaruh titik pengamatan yang lebih dekat terhadap lokasi interpolasi akan semakin dominan. Sedangkan nilai h_i merupakan jarak antara titik pengamatan ke- i terhadap lokasi interpolasi yang dapat dirumuskan sebagai berikut:

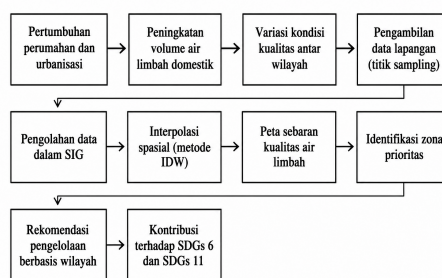
$$h_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \quad (3)$$

Pada (x, y) merupakan suatu titik koordinat interpolasi. Sedangkan pada x_i, y_i merupakan titik koordinat yang digunakan sebagai sebaran pada titik. Selain itu, adanya perubahan atau yang disebutkan dengan *weight* yang berfungsi sebagai sebaran titik pada data yang nilainya mendekati nol pada suatu pertambahan jarak terhadap persebaran titik [26].

Kelebihan dari metode interpolasi IDW adalah karakteristik interpolasi dapat dikontrol dengan membatasi titik-titik masukan yang digunakan dalam proses interpolasi. Titik-titik yang terletak jauh dari titik sampel dan yang memiliki korelasi spasial yang kecil atau bahkan tidak memiliki korelasi spasial dihapus dari perhitungan. Titik-titik yang digunakan dapat ditentukan secara langsung atau ditentukan berdasarkan jarak yang ingin diinterpolasi. Kelemahan dari metode interpolasi IDW adalah tidak dapat mengestimasi nilai diatas nilai maksimum dan di bawah nilai minimum dari titik-titik sampel [27].

2.4. Kerangka Berpikir

Kerangka berpikir penelitian pada Gambar 2 menghubungkan perkembangan kawasan permukiman di Kota Tangerang Selatan dengan kebutuhan pengelolaan kualitas air limbah berbasis analisis spasial. Pertumbuhan kawasan hunian meningkatkan volume air limbah domestik dengan karakteristik yang dipengaruhi oleh tata guna lahan, kepadatan penduduk, dan infrastruktur sanitasi. Untuk mengatasi keterbatasan pemantauan berbasis titik, penelitian ini mengintegrasikan SIG dan metode IDW guna memetakan distribusi konsentrasi pencemar secara kontinu [28].



Gambar 2. Kerangka Berpikir Penelitian

Komputasi spasial IDW memanfaatkan data kualitas efluen BOD, COD, dan TSS periode 2024–2025 untuk memetakan sebaran risiko pencemaran secara kontinu. Hasil pemodelan kemudian dianalisis menggunakan regresi linier untuk mengevaluasi pengaruh jarak hidrologis terhadap proses pemulihan alami (*self-purification*) menuju Sungai Cisadane. Data tersebut selanjutnya digunakan sebagai dasar STI dalam menentukan prioritas antara pengolahan biologis terpusat dan pengendalian sedimen lokal [29].

Secara makro-strategis, integrasi sistem informasi lingkungan cerdas ini tidak hanya berkontribusi pada penguatan sistem kendali mutu internal korporasi pengembang (*green real estate developer*), melainkan menjadi rujukan ilmiah bagi pemangku kebijakan publik dalam menyinkronkan dokumen perencanaan tata ruang sanitasi daerah [30]. Melalui kerangka kerja operasional yang terstruktur ini, luaran penelitian secara konkret mendukung akselerasi agenda pembangunan global PBB, khususnya dalam mereduksi beban polusi air pada target SDG 6 (*Clean Water and Sanitation*) serta mewujudkan ketahanan ekosistem kota pintar yang tangguh dan ramah lingkungan pada target SDG 11 (*Sustainable Cities and Communities*).

3. METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Desain Penelitian dan Sumber Data

Penelitian operasional ini dirancang menggunakan pendekatan deskriptif kuantitatif yang dikombinasikan dengan analisis pemodelan spasial digital. Alur pelaksanaan riset bergerak secara sistematis mulai dari identifikasi parameter mutu efluen aktual hingga visualisasi pemetaan zona risiko regional perkotaan. Kebutuhan data dalam penelitian ini secara terpadu dikelompokkan menjadi dua pangkalan data utama, yaitu data primer dan data sekunder [31].

Data primer dikumpulkan secara mandiri melalui kegiatan spatial tracking di lapangan, mencakup pencatatan titik koordinat geografis presisi (latitude dan longitude) stasiun sampling menggunakan perangkat *Global Positioning System* (GPS), dokumentasi karakteristik lingkungan fisik saluran, serta pengambilan sampel efluen air limbah domestik. Di sisi lain, data sekunder diperoleh melalui studi dokumentasi instansi berwenang, meliputi peta digital administrasi Kota Tangerang Selatan, peta tata guna lahan, serta dokumen demografis kepadatan penduduk dari Badan Pusat Statistik (BPS) Kota Tangerang Selatan guna memperkuat landasan interpretasi analisis geostatistika [32].

3.2. Deskripsi Lokasi Wilayah Studi

Studi komparatif ini dilaksanakan secara spesifik pada dua kawasan permukiman modern dengan karakteristik tipologi hunian dan manajemen infrastruktur sanitasi internal yang berbeda di Kota Tangerang Selatan, Provinsi Banten [33].

Tabel 2. Lokasi Penelitian

No	Lokasi Penelitian	Titik Koordinat Lokasi Penelitian	Luas Lahan (m ²)	Jumlah Unit Rumah	Metode Pengolahan Air Limbah
1	Perumahan Citra Garden	6°18'8,4708" S 106°42'34,5528" E	274.904	1.266	Biotank dan pengolahan lanjutan menggunakan IPAL
2	Perumahan Asanna	6°20'4,2684" S 106°41'34,8756" E	36.105	301	Biotank dan pengolahan lanjutan menggunakan IPAL

Berdasarkan Tabel 2, penelitian ini membandingkan dua kawasan perumahan dengan karakteristik berbeda. Perumahan Citra Garden yang dikembangkan Ciputra Group memiliki luas 274.904 m² dengan 1.266 unit hunian dan fasilitas komersial, serta berjarak sekitar 16,6 km dari Sungai Cisadane melalui saluran primer. Sementara itu, Perumahan Asanna yang dikembangkan Putra Soegama Group memiliki luas 36.105 m² dengan 301 unit rumah dan berjarak sekitar 8,67 km dari Sungai Cisadane. Kedua kawasan telah dilengkapi dokumen AMDAL serta menerapkan pengelolaan air limbah domestik berbasis biotank yang terintegrasi dengan jaringan IPAL komunal [34].

3.3. Metode Pengumpulan dan Pengujian Laboratorium

Pengumpulan data primer dilakukan dengan purposive sampling selama periode 2024–2025 pada outlet IPAL komunal dan koridor aliran menuju badan air penerima. Setiap model hubungan jarak–konsentrasi

menggunakan lima observasi ($n=5$), dengan koordinat titik pengamatan direkam menggunakan GPS untuk mendukung analisis spasial [35]. Sampel diuji oleh PT Itec Solution Indonesia pada Semester I dan II tahun 2024–2025 untuk parameter BOD, COD, dan TSS sesuai prosedur standar pengujian kualitas air [36].

3.4. Metode Komputasi Pengolahan Data Geospasial

Proses pengolahan data spasial digital dijalankan menggunakan core engine perangkat lunak SIG. Tahap awal dimulai dengan melakukan proyeksi koordinat layer titik stasiun sampling di atas peta dasar administrasi wilayah digital [37]. Luaran peta raster hasil interpolasi IDW kemudian diklasifikasikan ke dalam zona-zona tingkat risiko beban pencemaran. Untuk memperkuat analisis spasial tersebut, hubungan kuantitatif dampak redaman jarak geometris terhadap pelemahan konsentrasi polutan dianalisis menggunakan model statistik regresi linier komputerisasi untuk mengonfirmasi kapasitas asimilasi pemulihan alami (*self-purification*) badan air penerima [38].

3.5. Jadwal Pelaksanaan Riset

Penelitian ini dilaksanakan dalam rentang waktu terstruktur mulai dari bulan Juli 2025 hingga Februari 2026. Tahapan pengerjaan diawali dengan perumusan masalah dan studi regulasi lingkungan pada Juli–Agustus 2025, disusul penyusunan proposal dan pelaksanaan seminar proposal pada Oktober 2025. Kegiatan lapangan yang meliputi tracking koordinat, pengambilan sampel effluen, dan pengujian laboratorium diselesaikan pada periode November–Desember 2025. Tahap akhir riset yang mencakup komputasi interpolasi IDW, analisis regresi linier, penyusunan bab hasil pembahasan, hingga pelaksanaan sidang tesis dan finalisasi naskah dirampungkan secara berkala pada periode Januari hingga Februari 2026 [39].

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Kesesuaian Kualitas Air Limbah Domestik terhadap Baku Mutu

Analisis kepatuhan baku mutu lingkungan pada effluen air limbah domestik merupakan instrumen kendali mutu penting bagi pihak pengembang dalam mengevaluasi efisiensi operasional infrastruktur pengolahan berjenjang (biotank individual dan IPAL komunal). Berdasarkan hasil pengujian laboratorium berkala oleh PT Itec Solution Indonesia periode 2024–2025 lintas semester, data empiris pemantauan dikomparasikan langsung dengan Lampiran I Peraturan Menteri Lingkungan Hidup/Badan Pengendalian Lingkungan Hidup Republik Indonesia No. 11 Tahun 2025. Hasil pemantauan kualitas effluen dari kedua klaster hunian disajikan secara terpadu pada Tabel 3:

Tabel 3. Kualitas Air Limbah Domestik Perumahan Citra Garden

No.	Parameter Pengujian	Satuan	Hasil Pengujian				Baku Mutu*
			2024		2025		
			Semester 1	Semester 2	Semester 1	Semester 2	
1.	pH	-	7,21	7,38	6,51	7,22	6 – 9
2.	TSS	mg/liter	8	9	10	9	50
3.	COD	mg/liter	40,28	42	38,56	40	100
4.	BOD	mg/liter	10,16	9,1	8,26	9	50
5.	Amonia	mg/liter	0,5	0,5	0,5	0,5	20
6.	Minyak dan lemak	mg/liter	<0,37	<0,37	<0,37	<0,37	10
7.	Total coliform	MPN/100 ml	954	801	758	792	1.000

Sumber: PT Itec Solution Indonesia (Hasil pengujian kualitas air limbah domestik Perumahan Citra Garden Periode Semester 1 dan 2 Tahun 2024–2025)

Ket:

*) Lampiran I Huruf A Peraturan Menteri Lingkungan Hidup/Badan Pengendalian Lingkungan Hidup Republik Indonesia No. 11 Tahun 2025 tentang Baku Mutu Air Limbah Domestik dan Standar Teknologi Pengolahan Air Limbah Domestik [19].

Berdasarkan hasil pengujian kualitas air limbah domestik Perumahan Citra Garden periode 2024–2025, seluruh parameter yang dianalisis menunjukkan nilai yang masih memenuhi baku mutu air limbah domestik berdasarkan PerMenLH/BPLH No. 11 Tahun 2025, dengan pH berada dalam kisaran netral yang aman bagi

ekosistem perairan, serta konsentrasi TSS, COD, dan BOD yang relatif rendah sehingga menunjukkan efektivitas sistem biotank dan IPAL komunal dalam menurunkan beban pencemar organik [40].

Tabel 4. Kualitas Air Limbah Domestik Perumahan Asanna

No.	Parameter Pengujian	Satuan	Hasil Pengujian				Baku Mutu*
			2024		2025		
			Semester 1	Semester 2	Semester 1	Semester 2	
1.	pH	-	6,97	7,98	7,38	7,56	6 – 9
2.	TSS	mg/liter	12	17	10	15	50
3.	COD	mg/liter	44,5	48	42	38	100
4.	BOD	mg/liter	12	15	8	10	50
5.	Amonia	mg/liter	0,67	0,5	0,4	0,8	20
6.	Minyak dan lemak	mg/liter	<0,35	<0,35	<0,35	<0,35	10
7.	Total coliform	MPN/100 ml	789	876	694	687	1.000

Sumber: PT Itec Solution Indonesia (Hasil pengujian kualitas air limbah domestik Perumahan Asanna Periode Semester 1 dan 2 Tahun 2024–2025)

Ket:

*) Lampiran I Huruf A Peraturan Menteri Lingkungan Hidup/Badan Pengendalian Lingkungan Hidup Republik Indonesia No. 11 Tahun 2025 tentang Baku Mutu Air Limbah Domestik dan Standar Teknologi Pengolahan Air Limbah Domestik [19].

Berdasarkan Tabel 4, air limbah domestik Perumahan Asanna diolah melalui biotank individual sebelum dialirkan ke IPAL komunal dan sistem drainase. Hasil pengujian periode 2024–2025 menunjukkan bahwa parameter pH, TSS, COD, dan BOD secara umum masih memenuhi baku mutu PerMenLH/BPLH No. 11 Tahun 2025. Kondisi tersebut menunjukkan efektivitas pengolahan berjenjang dalam menurunkan beban pencemar organik dan padatan tersuspensi [41].

Ditinjau dari perspektif rekayasa lingkungan, pencapaian mutu efluen dari kedua perumahan modern ini membuktikan bahwa strategi pengolahan berjenjang mampu mereduksi parameter polutan secara signifikan [42, 43].

Untuk mengkaji secara kuantitatif mekanisme reduksi polutan di sepanjang koridor pembuangan menuju Sungai Cisadane, dilakukan analisis regresi linier yang mengorelasikan jarak geometris dari titik pelepasan efluen terhadap konsentrasi tiga parameter utama (BOD, COD, TSS). Evaluasi ini merepresentasikan kinerja proses pengenceran hidrolis, dispersi, serta pemulihan alami (*self-purification*) perairan perkotaan lintasan temporal Semester I dan II tahun 2024–2025. Hasil komputasi koefisien determinasi (R^2) disajikan secara terpadu pada tabel 4.

4.2. Beban Pencemar Air Limbah Domestik

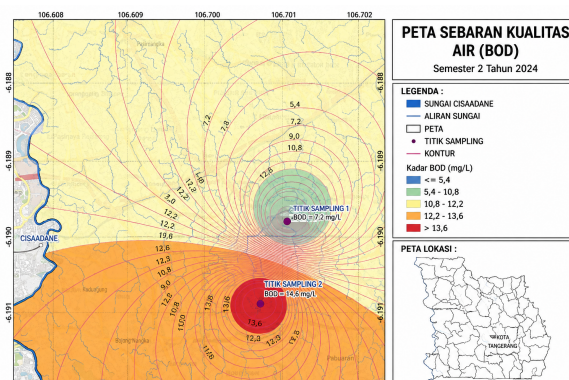
Kalkulasi beban pencemar dihitung menggunakan formula perkalian antara estimasi debit air limbah (m^3/jam) dengan konsentrasi hasil uji laboratorium (kg/m^3).

- Citra Garden: Berdasarkan AMDAL 2023, total kebutuhan air bersih dari 1.266 unit hunian dan area ruko mencapai $545,88 \text{ m}^3/\text{hari}$ dengan estimasi timbulan debit air limbah sebesar $436,7 \text{ m}^3/\text{hari}$. Parameter COD memberikan kontribusi beban pencemar fisik-kimia terbesar dengan nilai maksimal $0,7642 \text{ kg}/\text{jam}$ pada tahun 2024 [44].
- Perumahan Asanna: Total kebutuhan air bersih dari 301 unit rumah melintasi Blok A hingga R adalah $110,04 \text{ m}^3/\text{hari}$ dengan estimasi debit air limbah sebesar $88,32 \text{ m}^3/\text{hari}$. Selaras dengan pola Citra Garden, COD menjadi kontributor utama beban pencemar fisik-kimia dengan nilai puncak $0,1766 \text{ kg}/\text{jam}$ pada semester 2/2024 [45, 46].

4.3. Analisis Sebaran Spasial Temporal di Sungai Cisadane

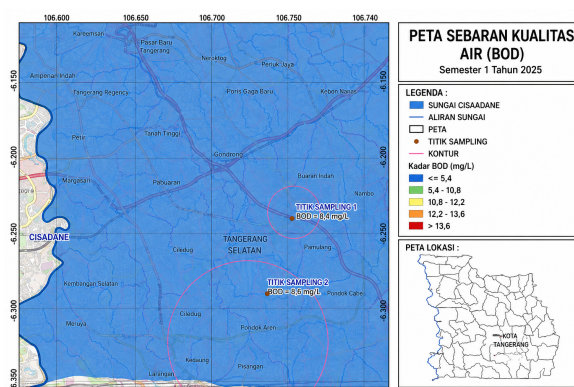
Pemetaan spasial kontinu menggunakan metode interpolasi IDW berbasis SIG berhasil mengidentifikasi pola distribusi temporal parameter kualitas air [47, 48].

- Parameter BOD: Pada semester 1/2024, pola sebaran bersifat moderat. Memasuki semester 2/2024, terlihat pada Gambar 3. Terjadi divergensi tajam di mana area selatan (sekitar Asanna) mengalami eskalasi zona risiko merah pekat dengan konsentrasi tertinggi mencapai ± 15 mg/L akibat intensifikasi aktivitas antropogenik dan fluktuasi curah hujan musiman [49, 50].



Gambar 3. Sebaran Kualitas Air BOD Periode Semester 2 Tahun 2024

Gambar 4 menunjukkan bahwa pada tahun 2025 terjadi tren pemulihan kualitas lingkungan hidrologis. Hilangnya titik konsentrasi ekstrem (*bull's-eye effect*) membuat peta IDW Semester I 2025 didominasi warna biru tua dengan konsentrasi rendah, yaitu $\leq 9,4$ mg/L. Temuan ini menunjukkan bahwa meskipun effluen memenuhi baku mutu laboratorium, pemetaan IDW tetap mampu mengidentifikasi dinamika risiko spasial-temporal akibat variasi musim.



Gambar 4. Sebaran Kualitas Air BOD Periode Semester 1 Tahun 2025

- Parameter COD & TSS: Pola sebaran kedua parameter ini menegaskan adanya kecenderungan konsisten arah pergerakan polutan (*pollutant movement trajectory*) ke wilayah bagian selatan zona kajian. Saluran terbuka Asanna yang mengalirkan TSS hingga 17 mg/L pada semester 2/2024 memicu terbentuknya efek lingkaran konsentris (*bull's-eye effect*) regional akibat gradien konsentrasi yang tajam.

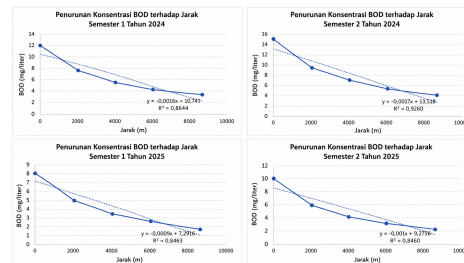
4.4. Analisis Hubungan Jarak terhadap Pelemahan Polutan

Model redaman sederhana hidrolis dinyatakan sebagai:

$$C(x) = C_0 e^{-kx} \quad (4)$$

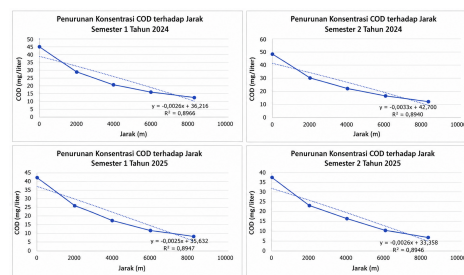
Dengan $k = 0,0003$ divalidasi menggunakan statistik regresi linier komputasi untuk mengukur kapasitas pemulihan alami (*self-purification*) badan air. Pada koridor pembuangan Perumahan Citra Garden, grafik menunjukkan korelasi linier negatif yang konsisten dan stabil pada rentang R^2 sebesar 0,7711–0,7755 untuk BOD dan 0,7719–0,7751 untuk COD. Kemiringan garis regresi yang landai dipengaruhi oleh koridor hidrologis saluran yang sangat panjang sejauh 16,6 km sebelum mencapai Sungai Cisadane.

Sebaliknya, regresi linier pada Perumahan Asanna menunjukkan hubungan negatif yang kuat, dengan nilai R^2 BOD sebesar 0,8643–0,8649. Hasil ini menunjukkan bahwa sekitar 86% variasi konsentrasi berkaitan dengan perubahan jarak, tetapi tidak membuktikan hubungan kausal. Penurunan konsentrasi juga dapat dipengaruhi oleh faktor hidrologis dan lingkungan lainnya, sehingga mekanisme self-purification masih memerlukan verifikasi melalui data hidrologi tambahan sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Grafik Regresi Linier Hubungan Jarak Terhadap Konsentrasi BOD Perumahan Asanna

Fenomena yang selaras juga ditemukan pada pengujian beban pencemar kimia total (COD) di kawasan Asanna. Keterjelasan hubungan linear jarak-COD menunjukkan nilai R^2 yang homogen di angka 0,8646 hingga 0,8647 lintas semester pada Gambar 6.



Gambar 6. Grafik Regresi Linier Hubungan Jarak Terhadap Konsentrasi COD Perumahan Asanna

Kemiringan garis regresi Asanna yang jauh lebih curam (*steep gradient slope*) pada kedua grafik tersebut secara spasial mengonfirmasi letak geografis proyek yang berada di zona sensitif perkotaan karena jaraknya yang sangat dekat (8,67 km) dengan sempadan aliran Sungai Cisdane.

4.5. Rekomendasi Pengelolaan Spasial dan Kontribusi SDGs

Hasil pemodelan melahirkan rumusan strategi intervensi tepat lokasi (*Spatially Targeted Intervention/STI*):

- **Source Control:** Manajemen Citra Garden (Prioritas Tinggi) wajib mengoptimalkan efisiensi reaktor IPAL komunal melalui pengurusan lumpur terjadwal untuk menekan beban organik hulu. Manajemen Asanna (Prioritas Menengah) wajib melakukan tata kelola fisik preventif berupa normalisasi vegetasi saluran dan pengendalian limpasan permukaan untuk mereduksi partikel padatan TSS.
- **Kontribusi SDGs:** Penerapan manajemen lingkungan digital berbasis SIG ini berkontribusi langsung pada akselerasi SDG 6 dalam menurunkan beban pencemaran pada badan air dan memperluas efektivitas sanitasi lokal. Pendekatan ini sekaligus mendukung pencapaian SDG 11 melalui penyediaan model tata ruang kota yang adaptif, berbasis data risiko, serta memperkuat ketahanan ekosistem urban (urban resilience).

5. IMPLIKASI MANAJERIAL

Hasil penelitian memberikan implikasi manajerial bagi pengembang perumahan dan pengelola IPAL. Peta risiko GIS-IDW dan kerangka STI dapat digunakan untuk menentukan prioritas investasi sanitasi, pemeliharaan drainase, dan pengendalian pencemaran sesuai karakteristik risiko kawasan. Data BOD, COD, dan TSS

juga dapat mendukung evaluasi operasional IPAL, penjadwalan pengurasan lumpur, serta deteksi dini perubahan kualitas effluen.

Bagi pemerintah daerah, peta GIS-IDW dan STI dapat dimanfaatkan sebagai dasar penyusunan prioritas program sanitasi, pengawasan kualitas effluen, dan alokasi infrastruktur berbasis zona risiko. Pendekatan ini mendukung perencanaan sanitasi dan drainase perkotaan yang lebih tepat sasaran, terukur, dan berbasis bukti.

6. KESIMPULAN

Penelitian pada Perumahan Citra Garden dan Asanna periode 2024–2025 menunjukkan bahwa kualitas effluen secara umum masih memenuhi baku mutu lingkungan untuk parameter BOD, COD, dan TSS. Pemodelan berbasis IDW dan SIG berhasil memvisualisasikan pola sebaran pencemar secara kontinu, yang cenderung menurun seiring bertambahnya jarak serta dipengaruhi oleh variasi debit musiman.

Hasil pemodelan memberikan implikasi strategis bagi pengembang dan pemerintah daerah dalam menerapkan spatially targeted intervention berdasarkan zona risiko. Integrasi peta risiko digital ke dalam sistem perencanaan sanitasi dapat meningkatkan ketepatan pengambilan keputusan, mendukung investasi green technology, serta berkontribusi terhadap pencapaian SDG 6 dan SDG 11.

Penelitian ini masih terbatas pada jumlah titik sampling dan parameter laboratorium. Penelitian selanjutnya disarankan memperluas titik pengamatan, menambahkan parameter mikrobiologi dan chemical tracers, serta mengintegrasikan IDW dengan Machine Learning untuk mengembangkan sistem prediksi kualitas air secara real-time dan mendukung ketahanan lingkungan perkotaan.

7. SARAN

Penelitian selanjutnya disarankan untuk memperluas cakupan pengamatan dengan menambah jumlah titik sampling, memperpanjang periode pemantauan, serta mengintegrasikan parameter hidrologi seperti debit aliran, curah hujan, karakteristik saluran, dan sumber pencemar tambahan untuk memperkuat interpretasi hubungan spasial antara jarak dan konsentrasi polutan. Selain itu, pengembangan metode dapat diarahkan pada kombinasi pemodelan GIS-IDW dengan pendekatan kecerdasan buatan atau machine learning untuk menghasilkan sistem prediksi kualitas air limbah secara lebih adaptif dan real-time. Bagi pengelola kawasan dan pemerintah daerah, implementasi model STI dapat dikembangkan lebih lanjut sebagai instrumen pendukung keputusan dalam menentukan prioritas pengelolaan IPAL, peningkatan infrastruktur sanitasi, serta perencanaan tata ruang perkotaan berbasis risiko lingkungan yang mendukung pencapaian SDG 6 dan SDG 11.

8. DEKLARASI

8.1. Tentang Penulis

Fitri Indriyani (FI)  <https://orcid.org/0009-0007-0003-8921>

Endah Kurniyaningrum (EK)  <https://orcid.org/0009-0006-0094-1208>

8.2. Kontribusi Penulis

Konseptualisasi: FI; Metodologi: EK; Perangkat Lunak: FI; Validasi: FI dan EK; Analisis Formal: FI dan EK; Investigasi: FI dan EK; Sumber daya: FI dan EK; Kurasi Data: FI dan EK; Penulisan Draf Awal: FI dan EK; Peninjauan dan Penyuntingan Tulisan: FI dan EK; Visualisasi: FI dan EK; Semua penulis, FI dan EK telah membaca dan menyetujui naskah yang telah diterbitkan.

8.3. Pernyataan Ketersediaan Data

Data yang disajikan dalam studi ini tersedia atas permintaan dari penulis terkait.

8.4. Pendanaan

Penulis tidak menerima dukungan finansial untuk penelitian, kepenulisan, dan/atau penerbitan artikel ini.

8.5. Deklarasi Konflik Kepentingan

Penulis menyatakan bahwa mereka tidak memiliki konflik kepentingan, konflik kepentingan finansial yang diketahui, atau hubungan pribadi yang dapat memengaruhi pekerjaan yang dilaporkan dalam makalah ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Amnan and D. N. Naelasari, "Pengaruh saluran pembuangan air limbah (spal) terhadap kualitas fisik air sumur gali di desa telagawaru wilayah kerja puskesmas labuapi," *Jambura Journal of Health Sciences and Research*, vol. 5, no. 2, pp. 512–518, 2023.
- [2] T. Djaafar, H. Hasanudin, N. Novarianti, R. Arianty *et al.*, "Saluran pembuangan air limbah (spal) sederhana di desa kabobona kecamatan dolo kabupaten sigi," *Jurnal Abdimas Indonesia*, vol. 4, no. 3, pp. 1051–1057, 2024.
- [3] U. Rahardja and Q. Aini, "Analyzing player performance metrics for rank prediction in valorant using random forest: A data-driven approach to skill profiling in the metaverse," *International Journal Research on Metaverse*, vol. 2, no. 2, pp. 102–120, 2025.
- [4] R. E. P. Djalumang and A. H. Makka, "Penyuluhan tentang pemanfaatan saluran pembuangan air limbah rumah tangga di desa rantau jaya kecamatan simpang raya, sulawesi tengah: Counseling on the utilization of household waste water channels in rantau jaya village, simpang raya district, central sulawesi," *Jurnal Pengabdian MALEO*, vol. 2, no. 1, pp. 6–11, 2023.
- [5] A. Harokan, A. Wahyudi, and E. J. Yansyah, "Analisis kepemilikan saluran pembuangan air limbah (spal) pada masyarakat di desa pusar wilayah kerja upkd puskesmas tanjung agung kabupaten ogan komering ulu tahun 2022," *HEALTH CARE: JURNAL KESEHATAN*, vol. 11, no. 2, pp. 238–245, 2022.
- [6] K. L. Hidup, "Peraturan menteri lingkungan hidup/badan pengendalian lingkungan hidup republik indonesia nomor 5 tahun 2025 tentang penyelenggaraan program adiwiyata," *Kementerian LHK*, 2025.
- [7] S. N. Sakati, M. Syahrir *et al.*, "Penyuluhan tentang pentingnya saluran pembuangan air limbah (spal) di desa doda bunta kecamatan simpang raya, sulawesi tengah: Counseling on the importance of waste water disposal channels (spal) in doda bunta village, simpang raya district, central sulawesi," *Jurnal Pengabdian MALEO*, vol. 2, no. 2, pp. 44–51, 2024.
- [8] J. Siswanto, Hendry, U. Rahardja, I. Sembiring, E. Sedyono, K. D. Hartomo, and B. Istiyanto, "Deep learning-based lstm model for number of road accidents prediction," in *AIP Conference Proceedings*, vol. 3234, no. 1. AIP Publishing LLC, 2025, p. 050004.
- [9] K. Samosir, A. Wulansari, and M. Yuhesti, "Pengetahuan dan sikap masyarakat membuang air limbah rumah tangga dan ketersediaan saluran pembuangan air limbah (spal) di desa tanjungberlian barat, karimun kepulauan riau: Description of knowledge and attitude of people to dispose of household waste water and availability of spal in tanjungberlian barat village, karimun riau islands," *JURNAL ILMU DAN TEKNOLOGI KESEHATAN TERPADU*, vol. 2, no. 1, pp. 55–63, 2022.
- [10] P. P. Sianita, Y. Harwani, D. Permana, and E. S. Imaningsih, "Driving hospital revisit intentions through a technopreneurship approach to ewom care quality and patient experience," *Aptisi Transactions on Technopreneurship (ATT)*, vol. 8, no. 2, pp. 469–477, 2026.
- [11] H. Salsabilah, "Rancang bangun sistem pemantauan dan kontrol air limbah berbasis iot pada pt graha sarana duta," Ph.D. dissertation, Politeknik Negeri Jakarta, 2025.
- [12] D. O. Sari, Y. Cikusin, and L. R. Putra, "Evaluasi kebijakan pengelolaan air limbah domestik (lokal) bagi masyarakat perkotaan (studi pada dinas pekerjaan umum, penataan ruang, perumahan dan kawasan permukiman kota malang)," *Respon Publik*, vol. 19, no. 1, pp. 26–31, 2025.
- [13] E. Sunarsih, A. Anggraini, A. A. Sanusi, A. Rosyada, A. W. Nurhaliza, J. Anggraini, and R. E. Putri, "Analisis menurunnya kualitas air sumur akibat pembuangan limbah rumah tangga yang tidak tepat," *Environmental Science Journal (Esjo): Jurnal Ilmu Lingkungan*, pp. 68–76, 2023.
- [14] M. Satria, A. Subagyo, and D. Permana, "Peran pemerintah dalam pengawasan instalasi pengolahan air limbah (ipal) melalui sistem pemantauan kualitas air limbah industri (sipetir) pada daerah aliran sungai (das) citarum di kabupaten bandung barat," *Prinsip: Jurnal Mahasiswa Magister Ilmu Pemerintahan*, vol. 1, no. 2, 2025.
- [15] A. A. Zainuddin, R. M. Nor, D. Handayani, M. I. M. Tamrin, K. Subramaniam, and S. F. N. Sadikan, "Smart attendance in classroom (cobot): Iot and facial recognition for educational and entrepreneurial impact," *Aptisi Transactions on Technopreneurship (ATT)*, vol. 6, no. 3, pp. 608–622, 2024.
- [16] M. Alfidyah, "Pemanfaatan internet of things (iot) untuk monitoring kualitas air sebagai upaya mendukung smart city," *Jurnal Sains dan Teknologi*, vol. 1, no. 1, pp. 8–14, 2025.
- [17] H. S. Hadi, S. Kom, and H. M. Kom, "Internet of things untuk lingkungan berkelanjutan konsep, teknologi, dan proyek pemantauan berbasis data," 2026.
- [18] A. S. Rafika, S. Baltasar, A. Adiwijaya, M. H. R. Chakim, Z. S. Rizky *et al.*, "Cybersecurity strategies for

- preventing ransomware attacks in cloud-based applications,” *Journal of Computer Science and Technology Application*, vol. 2, no. 2, pp. 1–11, 2025.
- [19] Kementerian Lingkungan Hidup/Badan Pengendalian Lingkungan Hidup, “Peraturan menteri lingkungan hidup/badan pengendalian lingkungan hidup nomor 11 tahun 2025 tentang baku mutu air limbah dan standar teknologi pengolahan air limbah untuk air limbah domestik,” Peraturan Menteri Lingkungan Hidup/Badan Pengendalian Lingkungan Hidup, Jakarta, Sep. 2025, ditetapkan 4 September 2025; diundangkan dan mulai berlaku 9 September 2025. [Online]. Available: <https://peraturan.bpk.go.id/Details/345620/permen-lhbplh-no-11-tahun-2025>
- [20] N. Syalluna, S. Aulia, D. Sulistyowati, D. Hannanto, and M. A. H. Fikri, “Optimalisasi pengelolaan sampah di indonesia: Integrasi teknologi digital, pengawasan hukum, dan mitigasi pencemaran lingkungan menuju pembangunan berkelanjutan,” *Jurnal Riset Multidisiplin Edukasi*, vol. 3, no. 5, pp. 593–616, 2026.
- [21] A. Indarto and E. S. Agustini, “Sistem internet of things (iot) untuk instalasi pengolahan air limbah (ipal) sebagai solusi smart building ramah lingkungan,” *JATI (Jurnal Mahasiswa Teknik Informatika)*, vol. 10, no. 3, pp. 4359–4369, 2026.
- [22] N. Z. Setyaningrum, “Ekonomi sirkular dan teknologi digital untuk pengolahan limbah rumah tangga yang baik,” in *Seminar Nasional Agribisnis*, vol. 3, no. 1, 2026, pp. 46–54.
- [23] S. Rahayu, N. Septiani, R. Z. Ikhsan, Y. M. Kareem, U. Rahardja *et al.*, “Revolutionizing renewable energy systems through advanced machine learning integration approaches,” *Journal of Computer Science and Technology Application*, vol. 2, no. 2, pp. 23–34, 2025.
- [24] E. H. Halawa *et al.*, “Strategi manajemen kualitas air di perairan umum untuk mendukung kehidupan akuatik,” *Jurnal Perikanan dan Kelautan*, vol. 2, no. 1, pp. 128–136, 2025.
- [25] I. Martias and R. Daswito, “Pemanfaatan kecerdasan buatan dibidang kesehatan lingkungan dalam upaya mencapai tujuan pembangunan yang berkelanjutan: Utilisation of artificial intelligence in environmental health to achieve sustainable development goals,” *JURNAL ILMU DAN TEKNOLOGI KESEHATAN TERPADU*, vol. 4, no. 2, pp. 47–53, 2024.
- [26] L. Muzaqi, F. Istiklaili, R. L. Khakim, M. Z. R. Arkan, Z. Ayuningsih, K. D. Pertiwi, I. E. Wirdati *et al.*, “Penguatan sanitasi dan pengelolaan limbah rumah tangga di kelurahan kalisegoro semarang,” *INDONESIAN JOURNAL OF COMMUNITY EMPOWERMENT (IJCE)*, vol. 7, no. 2, pp. 214–220, 2025.
- [27] M. Harefa, E. H. Halawa, and A. T. P. Telaumbanua, “Strategi manajemen kualitas air di perairan umum untuk mendukung kehidupan akuatik,” *Jurnal Perikanan dan Kelautan*, vol. 2, no. 1, pp. 47–54, 2025.
- [28] S. Triyono, A. Haryanto, M. Telaumbanua, F. K. Wisnu, and M. Martinus, “Pengembangan teknologi deteksi cepat kualitas air limbah pabrik pengolahan sawit berbasis iot untuk mendukung sustainability,” 2021.
- [29] A. Amaliah, R. W. Putri, N. U. Adawiah, and N. L. Alfiani, “Pemanfaatan teknologi digital dalam pengelolaan sumber daya air untuk meningkatkan ketersediaan air bersih di perkotaan,” in *Prosiding Seminar Rekayasa Teknologi (Semrestek)*, 2024, pp. 543–548.
- [30] I. Sudarmaji, D. Saepuloh, A. Sabur, R. Fahmi, and H. C. Ramdani, “Solusi berkelanjutan untuk lingkungan bersih melalui pengelolaan limbah organik rumah tangga,” *Jurnal Pengabdian Masyarakat Ilmu Pendidikan*, vol. 4, no. 2, pp. 326–342, 2025.
- [31] M. Anas, A. M. Sirajuddin, A. Bahari *et al.*, “Teba smart: Transformasi teba modern berbasis komposter rumah tangga dan monitoring digital sebagai solusi pengurangan sampah organik berbasis masyarakat,” *MALEBBI: JURNAL PENGABDIAN KEPADA MASYARAKAT*, vol. 6, no. 2, pp. 1–12, 2026.
- [32] P. Lestari, L. Sutiarmo, J. N. W. Karyadi, R. E. Masithoh, N. Ngadisih, R. Radi, A. P. Nugroho, M. Hajad, and A. M. Zahra, “Penerapan biodigester untuk pengolahan air limbah industri tapioka berbasis pemberdayaan masyarakat berkelanjutan di rumah produksi pangan selopamiro, yogyakarta,” *Jurnal Pusat Inovasi Masyarakat*, vol. 5, no. 1, pp. 43–60, 2023.
- [33] S. Setyawan, M. Marjan, R. Maadji, M. Baitullah, A. I. Karlinda, and A. Alricha, “Inovasi dalam pengelolaan lingkungan untuk pembangunan berkelanjutan instalasi pengolahan air kapasitas 2 x 30 lpd,” in *Jurnal Forum Pengabdian Ilmu Teknik*, vol. 2, no. 1, 2025.
- [34] G. J. Pederico, F. A. Putri, S. S. Asroor, H. A. Nabila, and U. Kamal, “Efektivitas penegakan hukum terhadap pencemaran kali cileungsi dalam perspektif pengelolaan sumber daya air berkelanjutan,” *Indonesian Journal of Innovation Multidiscipliner Research*, vol. 4, no. 3, pp. 3015–3042, 2026.
- [35] T. Wulandari, M. Rahmaniah, R. Erlangga, R. Munandar, M. Perkasa, and R. Rachmat, “Rancang bangun

- sistem pengolahan air limbah ekstraksi berbasis internet of things di pt sari alam sukabumi,” *Karimah Tauhid*, vol. 3, no. 11, pp. 12 779–12 795, 2024.
- [36] S. D. Anggraeni, N. Fitria, R. J. Abbas, M. F. A. Rachman, O. A. Permata, M. F. Aziz, and I. P. Permatasari, “Kapasitas kelembagaan pemerintah daerah dalam mencapai tujuan pembangunan berkelanjutan: Studi kasus instalasi pengolahan air limbah komunal di kota bogor,” *Indonesian Journal of Social Science*, vol. 2, no. 2, pp. 32–45, 2024.
- [37] A. Fadhil, A. A. M. Watenrigangka, L. S. Ema, A. A. Arifin, M. A. Syahrawan, M. R. Saputra, R. Ananda, S. S. Darto, L. Rahmianti, A. Aswadi *et al.*, “Digitalisasi data spasial: Pembuatan peta administrasi kelurahan cempniga berbasis sistem informasi geografis (sig),” *PEDAMAS (PENGABDIAN KEPADA MASYARAKAT)*, vol. 4, no. 03, pp. 815–822, 2026.
- [38] P. W. Sari and S. Wibowo, “Geocad bridge: Aplikasi desktop berbasis flutter untuk otomatisasi konversi data gis ke format cad dengan validasi spasial dan presisi koordinat,” in *Prosiding Seminar Nasional Informatika*, vol. 4, 2026, pp. 428–442.
- [39] S. Ulfah, M. Husen, and I. Kurniawan, “Pengembangan sistem informasi geografis obyek pariwisata kota jepara berbasis android,” *Journal of Information System and Computer*, vol. 6, no. 1, 2026.
- [40] S. Saifulloh, P. Susanti, M. A. Murtadlo, and M. R. Permana, “Peningkatan kompetensi digital melalui edukasi pengelolaan data geospasial bagi pemerintah desa wonoayu, kecamatan pilangkenceng,” *Dinamika Sosial: Jurnal Pengabdian Masyarakat dan Transformasi Kesejahteraan*, vol. 2, no. 4, pp. 281–291, 2025.
- [41] L. I. Uzliah, F. S. Toruntju, A. F. Ramadhan, A. Al Ambiyah, L. O. P. Aqsan, and J. Nangi, “Pengembangan webgis interaktif untuk pemetaan dan analisis spasial fasilitas umum di kota kendari menggunakan leaflet.js,” *JATI (Jurnal Mahasiswa Teknik Informatika)*, vol. 9, no. 5, pp. 7682–7689, 2025.
- [42] Organisation for Economic Co-operation and Development, “Digital monitoring of domestic wastewater quality to support sustainable environmental management in residential areas,” 2026, oECD. [Online]. Available: <https://www.oecd.org/content/oecd/en/search.html?orderBy=mostRelevant&page=0&facetTags=oecd-languages%3Aen&q=Digital+Monitoring+of+Domestic+Wastewater+Quality+to+Support+Sustainable+Environmental+Management+in+Residential+Areas>
- [43] S. Millah, A. Waskito, E. A. Natalia, S. H. Lase, and M. Rodriguez, “Decentralized solutions for intellectual property security using the interplanetary file system,” *Blockchain Frontier Technology*, vol. 5, no. 1, pp. 49–59, 2025.
- [44] S. Mardhotillah, “Analisis pengendalian balai prasarana permukiman wilayah jambi dalam proyek instalasi pengolahan air limbah di kota jambi,” Ph.D. dissertation, UNIVERSITAS JAMBI, 2025.
- [45] P. Cahyani *et al.*, “Kebijakan lingkungan dalam pengelolaan kualitas perairan di indonesia: Tinjauan kebijakan (2022–2025) dan implikasinya bagi permukiman padat,” *Integrative Perspectives of Social and Science Journal*, vol. 2, no. 06 November, pp. 8551–8557, 2025.
- [46] F. S. Putri, H. R. Ngemba, S. Hendra, and W. Wirdayanti, “Sistem layanan ujian psikotes sim menggunakan computer based test berbasis website: Sim psychological test service system using computer based test based on website,” *Technomedia Journal*, vol. 9, no. 1, pp. 92–104, 2024.
- [47] Y. A. S. Nasution, K. Ernawati, D. Rasyid, D. Budiman, and D. K. Sunjaya, “Strategi implementasi konsep green hospital melalui pengelolaan limbah cair non-medis untuk mendukung manajemen lingkungan di rumah sakit umum daerah koja,” *Journal of Syntax Literate*, vol. 11, no. 2, p. 1289, 2026.
- [48] S. L. Sitorus, R. T. H. Safariningsih, A. H. A. N. Karsa, M. A. Komara, and R. Evans, “Optimizing smart contracts and blockchain for sustainable digital fashionpreneurship,” *Blockchain Frontier Technology*, vol. 5, no. 1, pp. 37–48, 2025.
- [49] H. Septiandi, “Perancangan sistem pengelolaan layanan administrasi & publikasi desa pemali,” Ph.D. dissertation, Politeknik Manufaktur Negeri Bangka Belitung, 2025.
- [50] V. Azteria, “B prinsip dasar filtrasi air filtrasi merupakan suatu proses yang terjadi pada proses pengolahan air yang,” *TEKNIK LINGKUNGAN MODERN: SOLUSI INOVATIF UNTUK AIR, UDARA, DAN ENERGI*, p. 33, 2026.