

Volume 9 Nomor 3 Tahun 2025
D e s e m b e r 2 0 2 5

JURNAL PENGELOLAAN LINGKUNGAN BERKELANJUTAN

(Journal of Environmental Sustainability Management)

Jurnal ini dikelola oleh :
Badan Kerjasama Pusat Studi Lingkungan (BKPSL) se-Indonesia dan
Pusat Penelitian Lingkungan Hidup (PPLH) IPB University

Sekretariat Jurnal Pengelolaan Lingkungan Berkelanjutan (JPLB)

Gedung Pusat Penelitian Lingkungan Hidup (PPLH-IPB) Lantai 4
Kampus IPB Dramaga Bogor 16680

Telp. 0251 – 8621262, 8621085; Fax. 0251 – 8622134

Homepage jurnal : <https://journal.bkpsl.org/index.php/jplb>

E-mail : jplb@bkpsl.org // jurnalbkpsl@gmail.com

JURNAL PENGELOLAAN LINGKUNGAN BERKELANJUTAN (JPLB)/ *Journal of Environmental Sustainability Management (JESM)*

Penanggung Jawab

Ketua Badan Kerjasama Pusat Studi Lingkungan (BKPSL) se-Indonesia

Dewan Editor

Lingkungan Geofisik dan Kimia

Prof. Tjandra Setiadi, Ph.D (ITB)

Dr. M. Pramono Hadi, M.Sc (UGM)

Lingkungan Sosial dan Humaniora

Prof. Dr.Ir. Emmy Sri Mahreda, M.P (ULM)

Andreas Pramudianto, S.H., M.Si (UI)

Lingkungan Biologi (Biodiversity)

Prof. Dr. Okid Parama Astirin, M.S (UNS)

Dr. Suwondo, M.Si (Unri)

Kesehatan Masyarakat dan Kesehatan Lingkungan

Dr. Drs. Suyud Warno Utomo, M.Si (UI)

Dr. Indang Dewata, M.Sc (UNP)

Pengelolaan Lingkungan Berkelanjutan

Dr. Ir. Agus Slamet, DiplSE, M.Sc (ITS)

Dr. Ir. Sri Utami, M.T (UB)

Ketua Editor Pelaksana

Prof. Dr. Ir. Hefni Effendi, M.Phil (IPB)

Asisten Editor

Gatot Prayoga, S.Pi (IPB)

Fikri Sakti Firmansyah, S.Hut (IPB)

Lasriama Siahaan, S.Si, M.Si (IPB)

Jauhar Zainalarifin, S.Pi (IPB)

Sekretariat

Dra. Nastiti Karliansyah, M.Si (UI)

Alamat Redaksi

Jurnal Pengelolaan Lingkungan Berkelanjutan (JPLB)

Gedung Pusat Penelitian Lingkungan Hidup (PPLH-IPB) Lantai 4

Kampus IPB Darmaga Bogor 16680

Telp. 0251 – 8621262, 8621085; Fax. 0251 – 8622134

Homepage jurnal : <https://journal.bkpsl.org/index.php/jplb>

<https://journal.bkpsl.org/index.php/jplb>

E-mail : jplb@bkpsl.org / jurnalbkpsl@gmail.com

Badan Kerjasama Pusat Studi Lingkungan (BKPSL) se-Indonesia bekerjasama dengan Pusat Penelitian Lingkungan, IPB *University* (PPLH-IPB) mengelola bersama penerbitan JPLB sejak tahun 2017, dengan periode terbit tiga nomor per tahun. Jurnal Pengelolaan Lingkungan Berkelanjutan (JPLB) menyajikan artikel ilmiah mengenai pengelolaan lingkungan yang berkelanjutan dari segala aspek. Setiap naskah yang dikirimkan ke Jurnal Pengelolaan Lingkungan Berkelanjutan ditelaah oleh mitra bestari.

Pengelolaan dan mitigasi dampak limbah masker di Kecamatan Rungkut, Surabaya

Face mask waste management and impact mitigation in Rungkut Sub-district, Surabaya

Tarikh Azis Ramadani^{1,3}, An'nisa Kurniawati^{1,3}, Ayu Nindyapuspa^{2,3*}

¹Program Studi Teknik Bangunan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Surabaya, Indonesia

²Program Studi Teknik Pengolahan Limbah, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Surabaya, Indonesia

³Laboratorium Pengolahan Limbah, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Surabaya, Indonesia

Abstrak.

Penggunaan masker akan memberikan dampak pada jumlah limbah yang dihasilkan. Masyarakat Indonesia menggunakan 159.214.791 masker setiap hari dan berkontribusi terhadap timbulan limbah sebanyak 420,03 ton per hari. Banyaknya limbah masker ini perlu diimbangi dengan pengelolaan yang baik. Jika tidak ditangani dengan benar, limbah masker dapat menimbulkan efek buruk bagi lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk memahami jumlah, distribusi, dan pemilihan cara pengelolaan yang paling efektif untuk limbah masker. Penelitian ini melibatkan pengisian kuesioner dengan metode *stratified random sampling* untuk mengukur pengetahuan, pengelolaan, dan distribusi limbah masker sehingga dapat dirumuskan metode pengelolaan limbah masker yang sesuai. Penelitian ini menunjukkan adanya hubungan antara faktor umur, pekerjaan dan tingkat pendidikan terhadap pengetahuan, pengelolaan, dan distribusi limbah masker dengan hasil *p-value* untuk semua variabel didapatkan kurang dari 0,05. Metode yang dirumuskan guna mengelola timbulan limbah masker yaitu demokratisasi informasi tentang pengelolaan limbah masker, serta penerapan tempat sampah khusus dan kantong atau tempat sampah yang diberi kode atau label warna.

Kata kunci: limbah masker, timbulan, sebaran, *stratified random sampling*, pengelolaan

Abstract.

The utilization of masks will exert an influence on the amount of waste generated. The daily utilization of masks by Indonesians amounts to 159,214,791, contributing to a daily waste generation of 420.03 tons. The generation of mask waste necessitates effective management to ensure optimal balance. In the absence of proper management, mask waste has the potential to exert deleterious effects on the environment. The objective of this study is to ascertain the quantity, dissemination, and selection of the most efficacious management method for mask waste. The study involved the administration of questionnaires, employing a stratified random sampling method to assess the knowledge, management, and distribution of mask waste. The objective of this assessment was to formulate a suitable mask waste management method. The present study demonstrates a correlation between the variables of age, occupation, and education level on knowledge management and the distribution of mask waste. The p-value results for all variables were obtained and are less than 0.05. The methods formulated to manage mask waste generation are the democratization of information on mask waste management, and the implementation of special bins and color-coded bags or bins.

Keywords: mask waste, volume, distribution, stratified random sampling, management

1. PENDAHULUAN

Masuknya virus COVID-19 ke Indonesia menjadikan masker sebagai kebutuhan penting bagi masyarakat (Lubriyana *et al.* 2022). Saat ini, penggunaan masker tidak hanya sebatas untuk tenaga kesehatan, tetapi juga untuk masyarakat yang sedang beraktivitas di luar rumah. Pemerintah mendorong warga untuk mengikuti protokol kesehatan, termasuk penggunaan masker sesuai dengan Instruksi Menteri Dalam Negeri (Inmendagri) Nomor 53 tahun 2022.

* Korespondensi Penulis
Email : ayunindyapuspa@ppns.ac.id

Pada tahun 2020, penggunaan masker di Indonesia mencapai sekitar 159.214.791 buah masker setiap hari dan menghasilkan limbah masker sebesar 420,03 ton per hari (Sangkham 2020). Jumlah limbah yang sangat besar tersebut menuntut adanya sistem pengelolaan yang memadai. Apabila tidak dikelola dengan baik, limbah masker berpotensi terbawa ke badan perairan dan menimbulkan pencemaran lingkungan. Hal ini tercermin dari temuan limbah masker di Sungai Marunda dan Cilincing, dengan jumlah sekitar \pm 432 buah per hari pada bulan Maret 2020 dan meningkat menjadi sekitar \pm 552 buah per hari pada bulan April 2020 (Cordova *et al.* 2021). Kondisi tersebut menunjukkan bahwa rendahnya pengetahuan dan kesadaran masyarakat mengenai pengelolaan limbah masker mendorong praktik pembuangan masker secara tidak semestinya (Ciawi *et al.* 2024).

Masker yang umum digunakan oleh masyarakat sebagian besar tersusun dari bahan polimer (Wang *et al.* 2021). Seiring waktu, material penyusun masker tersebut dapat terdegradasi menjadi partikel berukuran kurang dari lima milimeter yang diklasifikasikan sebagai mikroplastik (Chowdhury *et al.* 2021). Proses degradasi ini menyebabkan perubahan karakteristik permukaan polimer menjadi lebih kasar, yang menandai terbentuknya mikroplastik (Wang *et al.* 2021). Apabila masalah ini tidak diatasi dengan baik, maka berpotensi meningkatkan pencemaran mikroplastik di lingkungan (Chowdhury *et al.* 2021).

Limbah plastik yang dihasilkan selama pandemi COVID-19 dapat ditangani dengan beberapa metode, seperti penyusunan regulasi untuk pengelolaan limbah yang efisien, teknik pengolahan limbah seperti pirolisis, karbonisasi hidrotermal, dan teknologi konversi termal lainnya, pendidikan kepada masyarakat, penggunaan masker kain, serta pengelolaan limbah yang inovatif dan kreatif (Parashar and Hait 2021). Studi di Filipina menunjukkan bahwa pengelolaan limbah masker dapat ditingkatkan melalui pemanfaatan media sosial dan radio sebagai sarana edukasi, penyediaan fasilitas tempat sampah khusus, serta promosi penggunaan masker kain kepada masyarakat (Limon *et al.* 2022). Sementara itu, penelitian di kawasan perkotaan Bangkok mengungkap laju penyebaran dan tingkat pembuangan limbah masker, sekaligus merumuskan rekomendasi untuk meminimalkan dampak negatif akibat pembuangan masker secara tidak semestinya (Tsfaldet *et al.* 2022).

Pendataan limbah masker ini juga perlu dilakukan di Kota Surabaya, tepatnya di Kecamatan Rungkut yang merupakan salah satu wilayah dengan total populasi mencapai 123.757 jiwa dan luas area 21,02 km² (BPS 2021). Pemilihan Kecamatan Rungkut sebagai lokasi penelitian didasarkan pada tingginya densitas penduduk serta aktivitas luar rumah yang banyak menggunakan masker, sehingga berpotensi menghasilkan limbah masker dalam jumlah besar. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi pengelolaan limbah masker di Kecamatan Rungkut serta berperan dalam mengurangi polusi lingkungan yang diakibatkan oleh limbah tersebut.

2. METODOLOGI

2.1. Lokasi kajian dan waktu penelitian

Penelitian ini dilakukan di Kecamatan Rungkut, Kota Surabaya, Provinsi Jawa Timur. Jumlah penduduk Kecamatan Rungkut pada tahun 2022 adalah 123.841 jiwa (BPS 2021). Jumlah sampel yang diambil ditentukan menggunakan rumus Slovin seperti yang disajikan pada **Persamaan 1**.

$$n = \frac{N}{N \cdot e^2 + 1} \dots\dots\dots(1)$$

Keterangan

n = ukuran sampel

N = ukuran populasi

e = tingkat toleransi kesalahan (10%)

Setelah menentukan jumlah sampel dalam Kecamatan Rungkut, selanjutnya dilakukan penentuan jumlah sampel per kelurahan. Metode yang digunakan untuk menentukan jumlah sampel per kelurahan adalah dengan metode *stratified random*, dengan rumus yang tersaji pada **Persamaan 2**.

$$\text{Jumlah sampel} = \frac{\text{jumlah sub populasi}}{\text{jumlah populasi}} \times \text{jumlah sampel yang diperlukan} \dots\dots\dots(2)$$

Setelah menentukan jumlah sampel per kelurahan, selanjutnya dilakukan pengumpulan data melalui kuesioner. Kuesioner akan dibagikan kepada warga Kecamatan Rungkut yang berumur antara 20 hingga 59 tahun. Isi kuesioner tersebut meliputi data jenis kelamin, usia, kelurahan tempat domisili, pendidikan terakhir, penghasilan per bulan, serta daftar pertanyaan terkait pengetahuan dan pengelolaan limbah masker.

2.2. Prosedur analisis data

Setelah data kuesioner terkumpul, langkah selanjutnya adalah pengolahan data. Data dari kuesioner tersebut mencakup tingkat pemahaman responden terkait pengelolaan limbah masker. Pemilihan metode pengelolaan limbah masker berdasarkan pada tingkat pengetahuan dan praktik responden terhadap limbah masker. Pemilihan alternatif pengelolaan limbah masker yang tepat dapat mengurangi timbulan limbah masker yang besar.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Karakteristik sosio-demografis

Penelitian ini menggunakan responden berjumlah 100 orang yang dipilih secara acak di Kecamatan Rungkut Surabaya. **Tabel 1** menunjukkan karakteristik demografi dari responden yang terdiri dari umur, pekerjaan, dan pendidikan. Studi ini didominasi oleh responden dengan rentang umur 20-29 (54%), pekerjaan sebagai mahasiswa/pelajar (25%), dan pendidikan pada jenjang SMA sederajat (50%).

Tabel 1. Karakteristik responden.

Variabel	Kategori	Frekuensi	Persentase (%)
Umur	20-29	54	54%
	30-39	18	18%
	40-49	18	18%
	50-59	10	10%
Pekerjaan	Pegawai swasta	30	10%
	Pekerja tidak tetap	10	10%
	Pegawai negeri sipil	5	5%
	Mahasiswa/pelajar	25	25%
	Wiraswasta/pedagang	15	15%
	Lainnya	8	8%
	Tidak bekerja	7	7%
Pendidikan	Tidak sekolah	0	0
	SMP	3	3%
	SMA sederajat	50	50%
	D4/S1/S2/S3	47	47%

3.2. Pengetahuan dan praktik responden terhadap pengelolaan limbah masker

Pada **Tabel 2** menunjukkan bahwa 34,42% responden memiliki pengetahuan terkait pengelolaan limbah masker, sementara 9,17% responden menyatakan tidak mengetahui. Namun, hal ini tidak selaras dengan praktik pengelolaan limbah masker yang ditunjukkan oleh **Tabel 3**. Mayoritas responden belum menerapkan pengelolaan limbah masker, yaitu sebesar 50,6%, sedangkan responden yang telah melakukan pengelolaan hanya mencapai 25,8%.

Tabel 2. Profil pengetahuan responden terhadap limbah masker.

No.	Variabel	Respons				
		Sangat Tahu	Tahu	Cukup Tahu	Kurang Tahu	Tidak Tahu
1	Masker sekali pakai tidak dapat di daur ulang	21%	55%	16%	6%	2%
2	Masker sekali pakai tidak dapat digunakan kembali	28%	61%	9%	2%	0%
3	Masker sekali pakai terbuat dari bahan polimer	4%	16%	15%	43%	22%
4	Bahan yang digunakan masker dapat membahayakan lingkungan	27%	37%	21%	13%	2%
5	Masker dapat terurai menjadi mikroplastik	7%	9%	23%	39%	22%
6	Masker medis lebih efektif dari masker non medis	21%	49%	23%	6%	1%
7	Masker medis lebih efektif dari masker kain	25%	46%	23%	6%	0%
8	Masker kain lebih efektif dari masker non medis	0%	13%	14%	44%	29%
9	Masker non medis lebih efektif dari masker kain	1%	14%	26%	38%	21%
10	Masker yang dibuang sembarangan dapat membahayakan lingkungan	53%	40%	3%	3%	1%
11	Masker sekali pakai dapat digunakan satu kali saja, sedangkan masker kain dapat digunakan berulang/ dicuci kembali	52%	40%	7%	1%	0%
12	Saya mengetahui cara untuk mengelola limbah masker yang telah saya pakai	4%	33%	35%	18%	10%
Rekapitulasi		20,25%	34,42%	17,92%	18,25%	9,17%

Tabel 3. Profil praktik responden terhadap pengelolaan limbah masker.

No.	Variabel	Respons		
		Ya	Kadang-Kadang	Tidak
1	Saya membuang masker di tempat sampah bercampur dengan sampah lain	86%	11%	3%
2	Saya menyediakan tempat khusus untuk limbah masker	3%	10%	87%
3	Saya merobek masker yang telah dipakai agar tidak digunakan kembali	28%	52%	20%
4	Saya melakukan desinfeksi sebelum membuang masker	3%	22%	75%
5	Saya mengumpulkan masker bekas pakai menjadi satu lalu membuangnya	9%	23%	68%
Rekapitulasi		25,8%	23,6%	50,6%

3.3. Hubungan antara sosio-demografi dengan pengetahuan dan praktik terhadap pengelolaan limbah masker

Profil sosio-demografi responden dan aspek pengetahuan mengenai pengelolaan limbah masker diuji dengan persamaan *chi-square* guna mengetahui korelasinya dan hasilnya ditunjukkan pada **Tabel 4**. Hasil ini menunjukkan bahwa umur, pekerjaan dan pendidikan responden memiliki hubungan terhadap aspek pengetahuan tentang pengelolaan limbah masker. Hasil ini mengimplikasikan bahwa responden dengan umur, pekerjaan dan pendidikan yang berbeda menunjukkan tingkat pengetahuan yang berbeda dalam mengelola limbah masker. Hal yang serupa ditunjukkan pada aspek praktik tentang pengelolaan limbah masker yang ditunjukkan pada **Tabel 5**.

Pada penelitian ini, responden dengan kelompok umur 20-29 tahun memiliki tingkat pengetahuan dan praktik yang lebih baik dibandingkan dengan responden dengan kelompok umur lainnya. Umur responden akan memberikan dampak terhadap kemampuan untuk menangkap informasi sehingga mempengaruhi pola pikir seseorang (Limon et al. 2022; Beyuo et al. 2023; Douthi et al. 2023). Responden yang memiliki umur yang muda akan memiliki tingkat pengetahuan yang lebih baik dibandingkan dengan responden yang memiliki umur lebih tua dan berakibat pada pengelolaan limbah masker yang lebih baik (Beier and Ackerman 2003; Laor et al. 2018). Fenomena ini dapat dikaitkan dengan perolehan informasi yang luas mengenai limbah masker melalui pemanfaatan platform media sosial, sehingga meningkatkan tingkat pengetahuan mereka. Pengaruh media sosial terhadap kehidupan dan perkembangan pikiran manusia merupakan pertimbangan penting (Limon et al. 2022).

Temuan dari analisis korelasi lebih lanjut menunjukkan bahwa responden yang memiliki tingkat pendidikan D4/S1/S2/S3 menunjukkan tingkat pengetahuan dan praktik yang baik dibanding tingkat pendidikan lainnya. Responden yang memiliki tingkat pendidikan yang tinggi akan memiliki kecenderungan mempunyai pengetahuan untuk penanganan limbah masker dengan benar (Limon et al. 2022). Hasil ini mencapai kesimpulan yang sama pada penelitian terkait bahwa semakin tinggi tingkat pendidikan seseorang, semakin tinggi pula tingkat pengetahuannya dalam mengelola limbah masker (Laor et al. 2018; Kumar et al. 2020).

Selain umur dan pendidikan, penelitian ini juga menemukan bahwa faktor pekerjaan responden akan memberikan pengaruh terhadap pengelolaan limbah masker. Pekerjaan memiliki koneksi dengan tingkat penghasilan yang dimiliki oleh responden. Tingkat penghasilan akan berkorelasi dengan tingkat pengetahuan responden (Al-Hanawi *et al.* 2020). Temuan ini dapat dikaitkan dengan persepsi masyarakat mengenai biaya kesehatan yang mahal sehingga pengelolaan limbah masker yang tepat akan mereduksi potensi penyebaran penyakit berbahaya (Limon *et al.* 2022).

Tabel 4. Korelasi antara aspek pengetahuan dan sosio-demografi mengenai pengelolaan limbah masker.

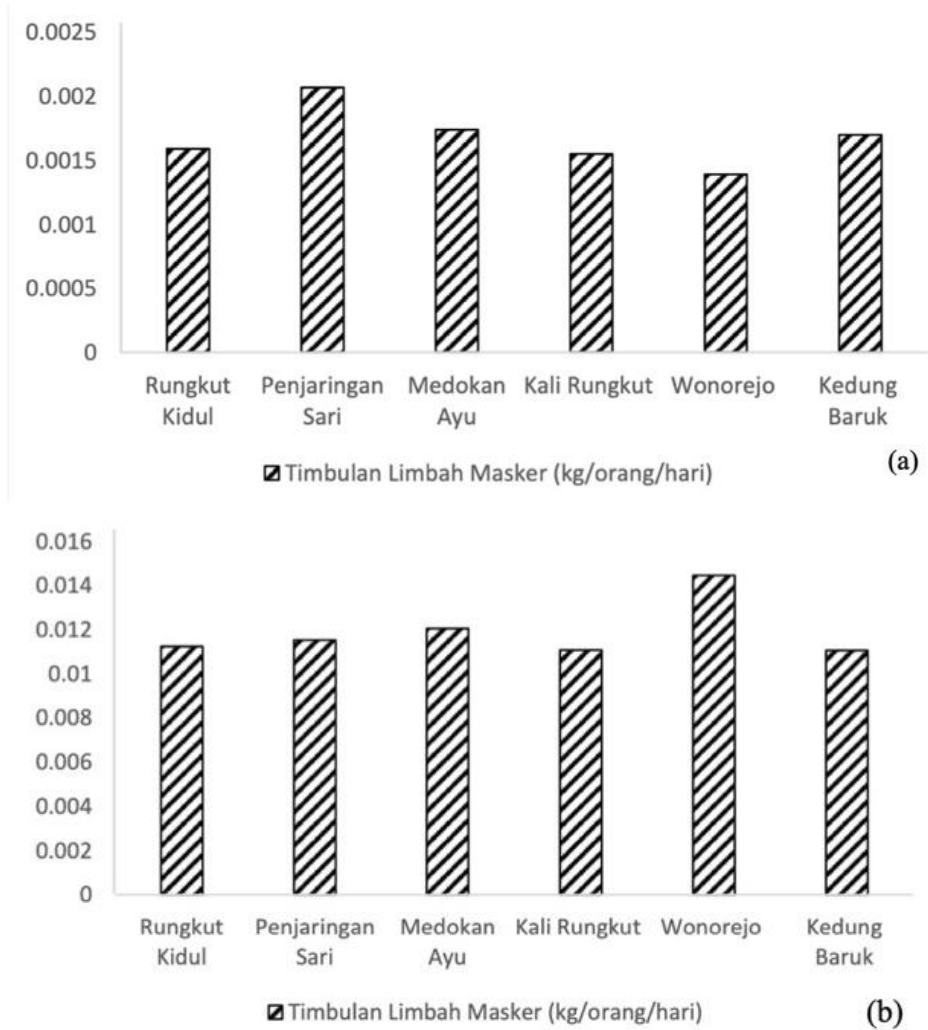
No	Variabel	Chi-square	P-value
1	Umur	15,91	0,014
2	Pekerjaan	21,76	0,040
3	Pendidikan	10,60	0,031

Tabel 5. Korelasi antara aspek praktik dan sosio-demografi mengenai pengelolaan limbah masker.

No	Variabel	Chi-square	P-value
1	Umur	23,81	0,000
2	Pekerjaan	15,18	0,019
3	Pendidikan	6,12	0,047

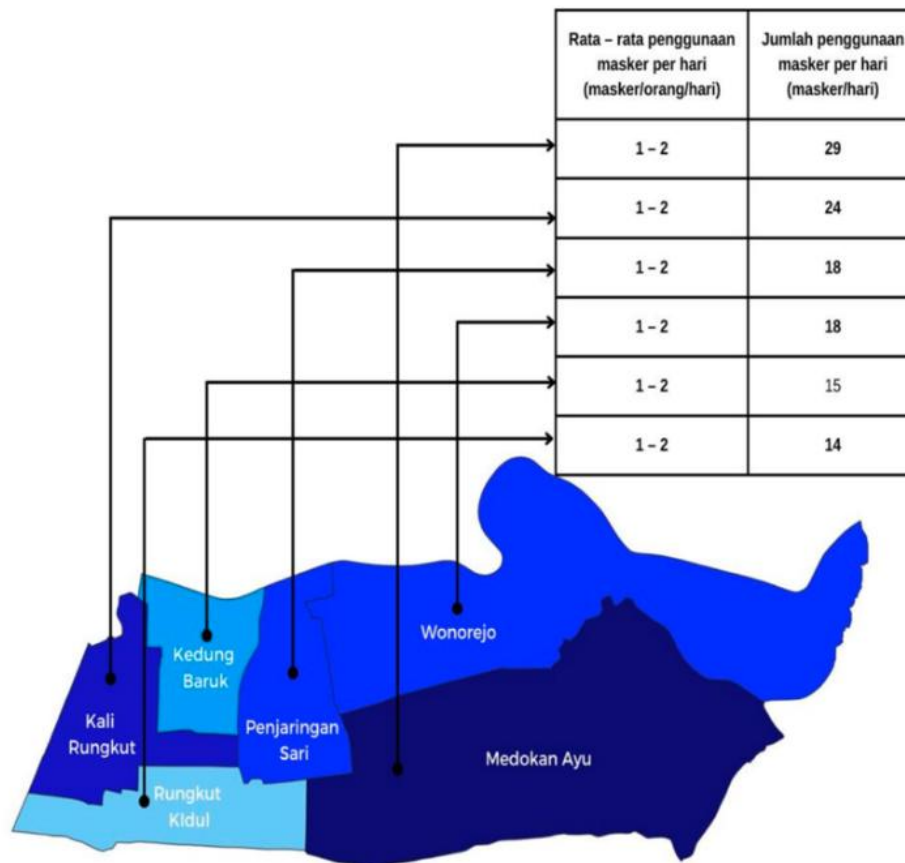
3.4. Laju timbulan, sebaran dan sumber limbah masker di Kecamatan Rungkut

Pengambilan limbah masker merujuk pada SNI 19-3964-1994 di rumah responden dengan membagi pemukiman menjadi dua jenis, yaitu rumah semi permanen dan rumah permanen. **Gambar 1a** dan **Gambar 1b** menunjukkan hasil timbulan limbah masker pada rumah permanen dan rumah semi permanen. Gambar ini menunjukkan bahwa timbulan limbah masker tertinggi terjadi di Kecamatan Penjaringan Sari (0,00207 kg/orang/hari) untuk rumah permanen dan Kecamatan Wonorejo (0,00181 kg/orang/hari) untuk rumah semi permanen. Tingkat pemakaian masker pada aktivitas responden akan memberikan dampak pada tinggi rendahnya timbulan limbah masker (Naziyah dan Arif 2023). Selain itu, faktor-faktor seperti jumlah penduduk dan tingkat pertumbuhannya, tingkat hidup, perbedaan musim, cara hidup dan mobilitas penduduk akan memberikan dampak pada jumlah timbulan limbah masker (Vitasari *et al.* 2024).



Gambar 1. Timbulan limbah masker pada rumah permanen (a) dan rumah semi permanen (b).

Gambar 2 menunjukkan bahwa rata-rata responden menggunakan 1-2 buah masker. Analisis distribusi masker menunjukkan perbedaan yang jelas antara masyarakat dengan tingkat penggunaan masker yang lebih tinggi dan lebih rendah. Kelurahan Medokan Ayu muncul sebagai komunitas dengan distribusi masker tertinggi, sementara Kelurahan Rungkut Kidul mengalami tingkat penggunaan masker terendah dengan masker *duck bill* yang sering digunakan oleh responden. Masker *duck bill* telah mendapatkan popularitas yang luas karena desainnya yang ergonomis, yang meningkatkan kenyamanan pengguna. Selain itu, keputusan untuk membeli masker paruh bebek dapat dipengaruhi oleh gaya hidup seseorang (Nur Islamiati *et al.* 2023). Responden umumnya mengganti masker ketika sudah kotor, setelah pemakaian selama 4-8 jam, atau bahkan lebih dari 8 jam. Sumber utama timbulan limbah masker di wilayah tersebut berasal dari kelompok karyawan swasta dan pelajar.



Gambar 2. Data sebaran penggunaan masker di Kecamatan Rungkut.

3.5. Upaya dalam pengelolaan limbah masker

Temuan penelitian menunjukkan bahwa terdapat kebutuhan mendesak untuk menyusun kebijakan yang komprehensif guna mengatasi kerusakan lingkungan akibat limbah masker, terutama di wilayah perkotaan yang rentan. Solusi kebijakan yang dirumuskan harus dipastikan dapat mengurangi dampak lingkungan tanpa mengorbankan kesehatan dan keselamatan masyarakat.

Pertama, inisiatif kesadaran masyarakat sangat penting untuk mengedukasi publik mengenai praktik aman dan pembuangan masker yang benar. Kegiatan edukasi dapat dilaksanakan melalui berbagai media, seperti media massa, media sosial, serta penyediaan informasi visual di ruang publik. Pemanfaatan video edukatif pada transportasi umum, misalnya, dinilai efektif dalam menyampaikan pesan kepada pengguna jasa. Selain itu, penyebaran informasi secara terdesentralisasi, seperti pemasangan spanduk atau poster di lokasi strategis, dapat memperluas jangkauan edukasi dan mendorong terbentuknya budaya kolektif terkait keselamatan, kebersihan, dan pencegahan penyebaran penyakit (Tsfaldet *et al.* 2022).

Upaya kedua adalah penyediaan tempat sampah khusus untuk limbah masker guna memisahkan limbah yang berpotensi terkontaminasi dari jenis limbah lainnya. Meskipun penerapan sistem ini dapat menghadapi kendala, terutama di negara berkembang dengan keterbatasan infrastruktur pengelolaan limbah, alternatif yang dapat diterapkan adalah penempatan tempat sampah masker di lokasi yang mudah diakses dan terlihat oleh masyarakat, seperti di depan minimarket. Tingginya visibilitas fasilitas tersebut terbukti dapat mengurangi praktik pembuangan sampah sembarangan (Limon et al. 2022).

Ketiga, kantong atau tempat sampah yang diberi kode atau label warna sedang dipertimbangkan untuk diterapkan di berbagai lingkungan. Pengaturan tersebut termasuk, tetapi tidak terbatas pada, rumah tangga, fasilitas medis dan kesehatan, area isolasi dan karantina, dan unit pemerintah daerah. Selain itu, ada rekomendasi yang kuat untuk penggunaan komposisi yang seragam dalam sampah kemasan, dibandingkan dengan bahan campuran atau berlapis. Penerapan strategi ini diharapkan dapat meningkatkan efisiensi pengumpulan dan pengangkutan sampah ke fasilitas daur ulang atau pembuangan akhir (Parashar and Hait 2021).

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini menunjukkan adanya korelasi antara sosio-demografi terhadap aspek pengetahuan dan praktik pengelolaan limbah masker. Faktor umur, pekerjaan dan tingkat pendidikan menunjukkan adanya korelasi terhadap pengelolaan limbah masker yang ditandai dengan nilai *p-value* yang didapatkan kurang dari 0,05. Timbulan limbah masker tertinggi terjadi di Kecamatan Penjaringan Sari (0,00207 kg/orang/hari) untuk rumah permanen dan Kecamatan Wonorejo (0,00181 kg/orang/hari) untuk rumah semi permanen. Kelurahan Medokan Ayu muncul sebagai komunitas dengan distribusi masker tertinggi, sementara Kelurahan Rungkut Kidul mengalami tingkat penggunaan masker terendah dengan masker *duck bill* yang sering digunakan. Metode yang dirumuskan guna mengelola timbulan limbah masker yaitu demokratisasi informasi tentang pengelolaan limbah masker, penerapan tempat sampah khusus dan kantong atau tempat sampah yang diberi kode atau label warna.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Al-Hanawi MK, Angawi K, Alshareef N, Qattan AMN, Helmy HZ, Abudawood Y, Alqurashi M, Kattan WM, Kadasah NA, Chirwa GC and Alsharqi O. 2020. Knowledge, Attitude and Practice Toward COVID-19 Among the Public in the Kingdom of Saudi Arabia: A Cross-Sectional Study. *Frontiers in Public Health* 8: 217.
- [BPS] Badan Pusat Statistik Kota Surabaya. 2021. Rungkut Subdistrict in Figures 2021. Badan Pusat Statistik Kota Surabaya. Kota Surabaya.
- Beier ME and Ackerman PL. 2003. Determinants of health knowledge: An investigation of age, gender, abilities, personality, and interests. *Journal of Personality and Social Psychology* 84(2):439-448.
- Beyuo J, Yidana ARI, Mustapha R, Amuah EEY and Sulemana A. 2023. Management of used face/nose masks in a higher learning institution: Lessons from the developing world. *Environmental Challenges* 13:100768.
- Chowdhury H, Chowdhury T and Sait SM. 2021. Estimating marine plastic pollution from COVID-19 face masks in coastal regions. *Marine Pollution Bulletin* 168, 112419.
- Ciawi Y, Dwipayanti NMU and Wouters AT. 2024. Pengelolaan limbah medis rumah sakit yang berkelanjutan: eksplorasi strategi ekonomis dan ramah lingkungan. *Jurnal Ilmu Lingkungan* 22(2):365-374.
- Cordova MR, Nurhati IS, Riani E, Nurhasanah and Iswari MY. 2021. Unprecedented plastic-made personal protective equipment (PPE) debris in river outlets into Jakarta Bay during COVID-19 pandemic. *Chemosphere* 268:129360.
- Douti NB, Amuah EEY, Acheampong E, Dankwa P, Kazapoe RW and Agyemang EP. 2023. Management of face masks driven by the COVID-19 pandemic, possible implications and proposed policies: A household perspective. *World Development Sustainability* 3:100093.
- Inmendagri (Instruksi Menteri Dalam Negeri) Nomor 53 Tahun 2022 tentang tentang Pencegahan dan Pengendalian Corona Virus Disease 2019 pada Masa Transisi Menuju Endemi.

- Kumar J, Katto MS, Siddiqui AA, Sahito B, Jamil M, Rasheed N and Ali M. 2020. Knowledge, attitude, and practices of healthcare workers regarding the use of face mask to limit the spread of the new coronavirus disease (COVID-19). *Cureus Journal of Medical Science* 12(4):e7737.
- Laor P, Suma Y, Keawdoungek V, Hongtong A, Apidechkul T and Pasukphun N. 2018. Knowledge, attitude and practice of municipal solid waste management among highland residents in Northern Thailand. *Journal of Health Research* 32(2):123-131.
- Limon MR, Vallente JPC, Cajigal ARV, Aquino MU, Aragon JA and Acosta RL. 2022. Unmasking emerging issues in solid waste management: knowledge and self-reported practices on the discarded disposable masks during the COVID-19 pandemic in the Philippines. *Environmental Challenges* 6:100435.
- Lubriyana T, Nurjazuli N dan Dewanti NAY. 2022. Gambaran pengelolaan limbah masker sekali pakai oleh rumah tangga pada masyarakat di Kota Semarang. *Jurnal Riset Kesehatan Masyarakat* 2(2):94-101.
- Naziyah FA and Arif L. 2023. peran dinas lingkungan hidup dalam pengelolaan sampah masker. *Jurnal Kebijakan Publik* 14(1):23-32.
- Nur Islamiati SA, Darpito SH dan Utomo H. 2023. Pengaruh gaya hidup, harga, kualitas produk dan e-wom terhadap keputusan pembelian masker sensi duckbill. *Jurnal Ilmiah Manajemen Kesatuan* 11(1):41-52.
- Parashar N and Hait S. 2021. Plastics in the time of COVID-19 pandemic: protector or polluter?. *Science of The Total Environment* 759:144274.
- Sangkham S. 2020. Face mask and medical waste disposal during the novel COVID-19 pandemic in Asia. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering* 2: 100052.
- Tesfaldet YT, Ndeh NT, Budnard J and Treeson P. 2022. Assessing face mask littering in urban environments and policy implications: the case of Bangkok. *Science of The Total Environment* 806:150952.
- Vitasari V, Syakti AD, Suryanti A, Viruly L, Jaaman SA, Lestari F, Nevrita N and Azizah D. 2024. Review of waste management in Indonesian small islands in the last five years (2018-2023). *Jurnal Wilayah Dan Lingkungan* 12(2):107-120.

Wang Z, An C, Chen X, Lee K, Zhang B and Feng Q. 2021. Disposable masks release microplastics to the aqueous environment with exacerbation by natural weathering. *Journal of Hazardous Materials* 417:126036.

Penerapan teknik *low impact development* (LID) untuk optimalisasi sistem drainase (studi kasus: Kecamatan Cianjur)

Implementation of low impact development (LID) techniques for drainage system optimization (case study: Cianjur District)

Moh. Ranga Sururi^{1*}, Lingga Rendragraha Badrukamal¹, Rachmawati Sugiharti Djembarmanah¹, Fauzi Fadlurrohman¹

¹Program Studi Teknik Lingkungan, Institut Teknologi Nasional, Bandung, Indonesia

Abstrak.

Kecamatan Cianjur sering mengalami banjir akibat tingginya curah hujan, terbatasnya lahan resapan air, dan ketidakseimbangan antara tingkat pembangunan dengan kapasitas drainase. Menyikapi tantangan ini, penelitian mengusulkan penerapan *Low Impact Development* (LID) sebagai solusi untuk mengurangi risiko banjir. Analisis hidrologi menggunakan data curah hujan dan debit limpasan dilakukan untuk menghitung volume aliran air pada kondisi eksisting dan skenario penerapan LID. Simulasi menggunakan perangkat lunak *Storm Water Management Model* (SWMM) versi 5.2 dengan 3 skenario, yaitu: 1) skenario tanpa LID yang menghasilkan debit limpasan sebesar 8.748,26 m³/s; 2) skenario penerapan *rain barrel* sebesar 7.318,28 m³/s; dan 3) skenario kombinasi *rain barrel* dan kolam retensi yang mampu mereduksi nilai menjadi 118,28 m³/s. Skenario ketiga merupakan opsi paling efektif sebagai strategi pengelolaan drainase di Kecamatan Cianjur.

Kata kunci: banjir, LID, SWMM, analisis hidrologi, Kecamatan Cianjur

Abstract

Cianjur District often experiences flooding caused by high rainfall, limited water infiltration in catchment areas, and imbalance between development rate and inadequate drainage system capacity. To address this challenge, this study proposes the application of Low Impact Development (LID) as a solution to reduce flood risk. Hydrological analysis was carried out using rainfall and runoff data to calculate the volume of water flow in existing conditions and LID application scenarios. The simulation used Storm Water Management Model (SWMM) software version 5.2 with 3 scenarios; 1) scenario without LID which produces a runoff discharge of 8,748.26 m³/s; 2) scenario using rain barrel produces 7,318.28 m³/s; and 3) scenario combination of rain barrel and retention ponds which reduce the value to be 118, 28 m³/s. The third scenario is the most effective option as a drainage management strategy in Cianjur District.

Keywords: flooding, LID, SWMM, hydrological analysis, Cianjur District

1. PENDAHULUAN

Curah hujan tinggi dan keterbatasan area resapan air di Kabupaten Cianjur, khususnya Kecamatan Cianjur sering menyebabkan banjir sebagai masalah utama pengelolaan lingkungan perkotaan. Penataan ruang yang kurang efektif mengakibatkan ketidakseimbangan dalam pemanfaatan ruang dan berdampak pada penurunan kualitas lingkungan, kerugian ekonomi, serta kesehatan masyarakat (Pratama dan Nugroho 2021; Haryono *et al.* 2022). Pemerintah menetapkan target ruang terbuka hijau (RTH) sebesar 15% dari luas wilayah kota, namun realisasi saat ini baru mencapai 8%. Kesenjangan ini berpotensi mempengaruhi keseimbangan daya dukung dan daya tampung lingkungan seperti dinyatakan dalam RPJMD Kabupaten Cianjur Tahun 2021-2025 (Pemerintah Kabupaten Cianjur 2021).

* Korespondensi Penulis
Email : rangga@itenas.ac.id

Kabupaten Cianjur, dengan luas wilayah 1.705,641 Ha dan terdiri dari 32 kecamatan, memiliki intensitas curah hujan bervariasi antara 1.120,4 mm/tahun hingga 3.543 mm/tahun, serta kemiringan lahan sekitar 0-8% (RPJMD Kabupaten Cianjur 2021; BPS Kabupaten Cianjur 2023). Kecamatan Cianjur sebagai pusat administratif mengalami masalah banjir yang cukup serius akibat pertumbuhan penduduk yang tidak diimbangi oleh jaringan drainase yang memadai (Susanti dan Widodo 2022). Kondisi tersebut merupakan hal yang biasa terjadi pada perkembangan kota, dan menjadi sebuah tantangan tersendiri guna mengurangi dampak dan risiko terjadinya banjir terhadap masyarakat (GebreEgziabher dan Demissie 2020).

Banjir besar yang terjadi di Daerah Aliran Sungai (DAS) Cisokan, Kecamatan Cianjur, pada tahun 2023 lalu menyebabkan dampak negatif terhadap lingkungan, di antaranya ratusan rumah terendam dan puluhan keluarga terpaksa mengungsi. Fenomena ini dipicu oleh hujan deras yang berlangsung berjam-jam dan disertai angin kencang sehingga menyebabkan Sungai Cisokan meluap. Kondisi tersebut diperburuk oleh perubahan penggunaan lahan dan tata ruang yang kurang efektif (BPBD Kabupaten Cianjur 2023). Ketiadaan perencanaan yang komprehensif dan terintegrasi turut menyebabkan kegagalan sistem drainase (Ibrahim dan Nugraha 2023). Fakta ini mengindikasikan bahwa pengelolaan limpasan air hujan masih bersifat tradisional. Sistem jaringan drainase tradisional umumnya menitikberatkan pada pengumpulan limpasan air hujan dan pengaliran cepat menuju sungai atau danau terdekat sebagai badan air penerima (Ahiablame *et al.* 2012). Pendekatan pengelolaan air hujan ini juga dikenal sebagai prosedur *end-of-pipe* yang menggabungkan pengelolaan terpusat (Eckart *et al.* 2017).

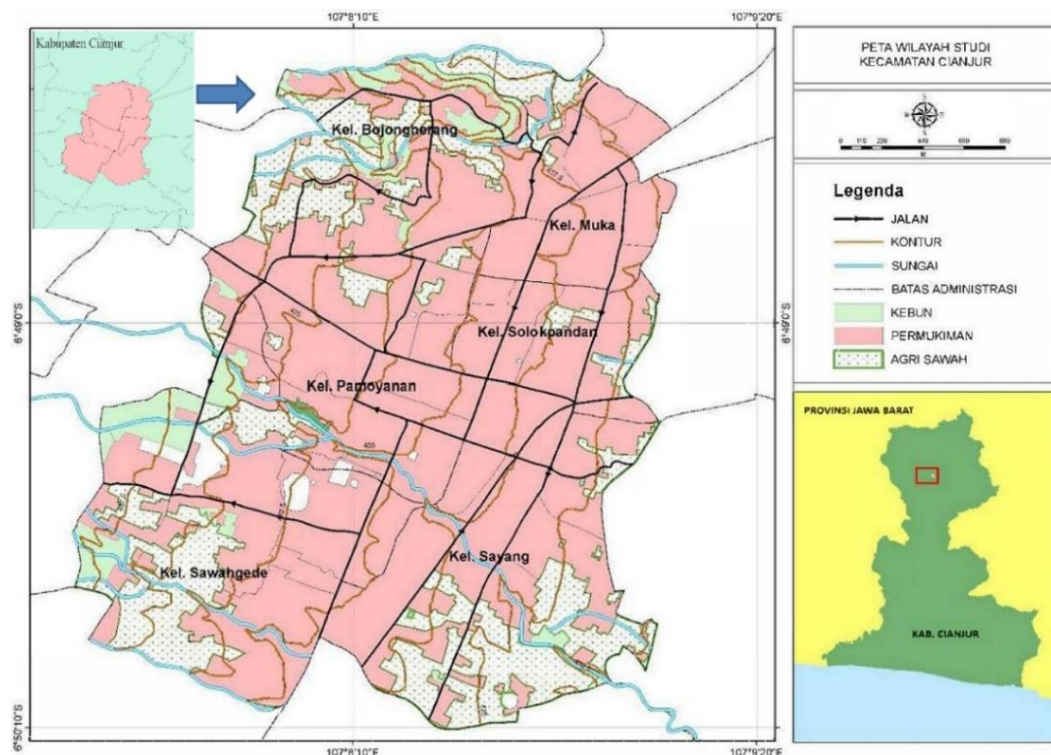
Untuk mencegah banjir perkotaan yang semakin sering terjadi, diperlukan penyesuaian sistem drainase air hujan melalui peninjauan dan pembaruan teknik serta standar desain, perbaikan infrastruktur yang ada, dan pembangunan infrastruktur tambahan (Burns *et al.* 2012). Salah satu upaya yang dapat dilakukan adalah penerapan *Low Impact Development* (LID) yang berfokus pada pengelolaan air hujan secara lokal melalui peningkatan infiltrasi dan perlambatan aliran permukaan (Syafitri dan Wibowo 2021; Marwati *et al.* 2022). *Storm Water Management Model* (SWMM) versi 5.2 adalah alat yang efektif untuk simulasi dan evaluasi sistem drainase berbasis LID (Rossman dan Simon 2022).

Penelitian ini bertujuan untuk merencanakan penerapan dan mengevaluasi sistem drainase berbasis SWMM 5.2 di Kecamatan Cianjur dengan fokus pada optimalisasi pengendalian air limpasan dan pengurangan risiko banjir, serta memberikan rekomendasi desain sistem drainase yang lebih efisien dan berkelanjutan. Terdapat tiga skenario yang digunakan, yaitu: 1) skenario tanpa penerapan LID yang berfungsi sebagai kontrol; 2) skenario dengan adanya penerapan *rain barrel* guna menampung air hujan; dan 3) skenario dengan penggunaan kombinasi *rain barrel* dan kolam retensi untuk pengendalian lebih lanjut.

2. METODOLOGI

2.1. Lokasi kajian dan waktu penelitian

Kecamatan Cianjur memiliki luas wilayah sebesar 25,10 km² dengan ketinggian rata-rata ±700 mdpl. Wilayah ini berbatasan dengan Kecamatan Mandeh di bagian utara, Kecamatan Karang Tengah di bagian timur, Kecamatan Warung Kondang di bagian selatan, dan Kecamatan Cugenang di bagian barat. Kecamatan Cianjur terbagi menjadi enam kelurahan, yaitu Bojongherang, Muka, Pamoyanan, Sawahgede, Sayang, dan Solokpandan (**Gambar 1**). Penelitian dilaksanakan pada periode April-Juli 2024.



Gambar 1. Peta lokasi studi di Kecamatan Cianjur.

2.2. Analisis hidrologi

Analisis hidrologi dilakukan melalui serangkaian tahapan baku, dimulai dengan pengumpulan data hidrologi dan klimatologi, mencakup penggunaan data curah hujan dari BMKG (2023). Data hasil kompilasi dianalisis menggunakan metode distribusi statistik, seperti Gumbel untuk menganalisis data maksimum (**Persamaan 1** dan **Persamaan 2**) dan Log-Pearson untuk menganalisis data dengan jumlah yang minimum (**Persamaan 3, Persamaan 4, dan Persamaan 5**) (Te Chow et al. 2010).

$$K = \frac{Y_t - Y_n}{S_N} \dots\dots\dots(1)$$

$$X_t = \bar{X} + k \times s \dots\dots\dots(2)$$

$$SLog \bar{X} = \sqrt{\frac{\sum(\log X - \log \bar{X})^2}{n-1}} \dots\dots\dots(3)$$

$$Log X_t = \overline{Log \bar{X}} + K_t \times \overline{SLog \bar{X}} \dots\dots\dots(4)$$

$$X_t = 10^{\log X_t} \dots\dots\dots(5)$$

Keterangan:

K = Nilai faktor frekuensi

S = Nilai standar deviasi

X_t = Nilai curah hujan dalam periode ulang tahun (T)

Hasil dari perhitungan persamaan tersebut akan disesuaikan dengan periode ulang hujan (PUH) tertentu untuk keperluan perencanaan hidrologi (Te Chow et al. 2010). Selanjutnya, dilakukan proses menghitung debit puncak, menggunakan metode rasional atau model hidrologi dengan **Persamaan 6** berikut.

$$Q = C \times A \times I \dots\dots\dots(6)$$

Keterangan:

Q = Nilai debit air terukur (m³/detik)

C = Nilai koefisien dasar limpasan

A = Luas area (m²)

U = Intensitas hujan (m/detik)

Metode rasional atau model hidrologi ini merupakan dasar dari perhitungan pada model SWMM dengan memperhatikan karakteristik daerah tangkapan air. Simulasi aliran permukaan dilakukan untuk mengestimasi limpasan air berdasarkan kondisi topografi dan tipe tutupan lahan (Ward dan Robinson 2000). Kemudian hasil analisis dievaluasi dan divalidasi melalui perbandingan dengan data historis untuk memastikan akurasi prediksi limpasan dan debit air sesuai dengan kondisi aktual di lapangan (DID Malaysia 2010).

2.3. Evaluasi kondisi eksisting menggunakan *storm water management model (SWMM)*

Evaluasi sistem drainase eksisting merupakan langkah awal yang menjadi dasar untuk menilai kapasitas saluran dalam menampung dan mengalirkan debit air hasil curah hujan berdasarkan hasil analisis hidrologi. Proses evaluasi ini mempertimbangkan luas area *sub-catchment* dan karakteristik penggunaan lahannya, yang mempengaruhi jumlah limpasan. Secara detail, proses ini meliputi identifikasi *catchment*, pembagian *sub-catchment* area, pengukuran volume limpasan yang dihasilkan, serta penilaian kemampuan saluran drainase eksisting dalam mengelola debit limpasan tersebut.

Selain itu, SWMM diterapkan dengan beberapa pendekatan utama: metode *non-linear reservoir* untuk menghitung limpasan permukaan berdasarkan intensitas hujan dan area kedap air; metode *Horton*, *Green-Ampt*, atau *Curve Number (CN)* untuk menghitung infiltrasi sesuai jenis tanah; pendekatan *dynamic wave*, *kinematic wave*, atau *steady flow* untuk memodelkan aliran dalam saluran; rumus *Manning* untuk menghitung kehilangan akibat gesekan; penguapan dari area terbuka; dan penyimpanan air pada setiap *node* aliran. Simulasi SWMM ini memungkinkan pemodelan respons hidrologi dan hidraulik secara akurat, memberikan data penting dalam evaluasi kapasitas drainase yang efektif.

2.4. Skenario SWMM 5.2 dengan model LID

Perencanaan ini menggunakan perangkat lunak SWMM 5.2 untuk simulasi dinamika air limpasan di wilayah perencanaan. SWMM yang dikembangkan oleh *Environmental Protection Agency (EPA)* merupakan *software* yang dirancang khusus untuk memodelkan limpasan air hujan dan sistem drainase di lingkungan urban. SWMM mengelola sistem drainase perkotaan ke dalam empat modul utama yaitu: atmosfer, permukaan tanah, air tanah, dan transportasi air. Modul atmosfer mencakup parameter terkait curah hujan dan evaporasi, modul permukaan tanah menangani limpasan dari berbagai jenis permukaan lahan, sementara modul air tanah mengelola aliran air yang masuk ke dalam tanah. Modul transportasi air, di sisi lain, berfungsi untuk mengatur aliran air melalui jaringan drainase yang ada.

Proses pemodelan maka wilayah penelitian dibagi menjadi beberapa sub-wilayah atau *sub-catchment*. Setiap *sub-catchment* diidentifikasi berdasarkan jenis permukaan lahan atau tata guna lahan, sehingga dikelompokkan menjadi permukaan *impervious* (tidak dapat menyerap air) dan *pervious* (dapat menyerap air). Proses perhitungan limpasan permukaan pada setiap *sub-catchment* dilakukan dengan mempertimbangkan intensitas curah hujan yang spesifik untuk setiap area. Peningkatan akurasi model dilakukan dengan pemecahan setiap *sub-catchment* menjadi tiga *sub-area*: area hulu, area tengah, dan area hilir. Langkah ini memungkinkan analisis lebih mendetail mengenai aliran permukaan dengan mempertimbangkan karakteristik hidrologi dan penggunaan lahan yang berbeda di setiap *sub-area* (Sururi dan Fadlurrohman 2024). Teknik ini dapat memastikan estimasi volume limpasan dilakukan dengan lebih tepat, mencerminkan kondisi nyata dari area yang diteliti.

Perencanaan ini menggunakan model LID sebagai solusi untuk mengatasi masalah limpasan air di DAS Cisokan, Kecamatan Cianjur. Perencanaan LID dengan konsep pengurangan dan penyimpanan air diupayakan untuk dapat menangani kondisi dan karakteristik hidrologi yang terjadi (Bai et al. 2018). Model LID disimulasikan menggunakan SWMM 5.2 untuk menilai efektivitasnya dalam mengurangi limpasan air permukaan. Terdapat berbagai teknologi LID yang dapat diterapkan pada SWMM 5.2, yaitu: *green roofs* (atap hijau), saluran infiltrasi, *rain barrel* (tong hujan), *rain garden*, kolam retensi, dan perkerasan mudah meresap (Abi Aad et al. 2010). Pada perencanaan ini, diterapkan tiga skenario LID, yaitu: (1) skenario tanpa penerapan LID yang akan berfungsi sebagai kontrol, (2) skenario penerapan *rain barrel* dengan menampung air hujan, dan (3) skenario gabungan antara *rain barrel* dan kolam retensi untuk pengendalian lebih lanjut.

Pemilihan teknologi LID berupa *rain barrel* sebagai upaya pengelolaan air hujan didasarkan pada kemudahan pengaplikasian, biaya yang murah, dan dapat diterapkan pada area padat penduduk (Ahiablame et al. 2012). Secara konsep pengaplikasian, *rain barrel* beroperasi dengan menampung limpasan air hujan dari atap rumah/bangunan guna memotong volume limpasan air hujan pada saat jam puncak (Liu et al. 2015). Selain itu, penggunaan *rain barrel* dapat dimanfaatkan sebagai alternatif sumber air bersih (non minum) yang berasal dari air hujan yang ditampung (Walsh et al. 2014).

Selain penerapan *rain barrel*, diterapkan juga teknologi kolam retensi dalam upaya pengelolaan limpasan air hujan. Teknologi ini banyak digunakan di berbagai daerah di Indonesia sebagai upaya mitigasi banjir. Konsep pengelolaan limpasan air hujan dengan kolam retensi adalah dengan menampung sementara limpasan air hujan untuk memotong volume limpasan saat jam puncak, sehingga debit air yang masuk ke sungai dapat dikurangi dan meminimalkan risiko banjir (Permanasari et al. 2025). Penerapan teknologi *rain barrel* dan kolam retensi sebagai metode LID diharapkan dapat menurunkan potensi banjir dan meningkatkan pengelolaan limpasan air.

2.5. Penentuan stasiun hujan

Stasiun utama curah hujan ditentukan melalui metode *Poligon Thiessen* yang mempertimbangkan variasi jarak antar pos pengamatan hujan untuk mengetahui area pengaruh yang lebih akurat. Tahapan metode ini meliputi: 1) identifikasi dan pemetaan seluruh stasiun hujan; (2) penyusunan jaringan segitiga yang menghubungkan setiap stasiun; dan (3) pembuatan garis tegak lurus di tengah tiap sisi segitiga untuk membentuk poligon pengaruh masing-masing stasiun. Berdasarkan luas poligon yang dihasilkan, stasiun Cisokan ditetapkan sebagai stasiun utama karena mencakup area terbesar dibandingkan Citeko, Cikundul, dan Cibalagung (**Gambar 2**).



Gambar 2. Metode *poligon thiessen* pada penelitian ini.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Analisis data curah hujan

Perencanaan menggunakan data curah hujan selama 25 tahun terakhir (1999-2023) yang diperoleh dari BMKG (2023). Intensitas curah hujan dihitung menggunakan distribusi Gumbel untuk menentukan curah hujan desain dengan periode ulang 5, 10 dan 20 tahun sebagai dasar pemodelan limpasan permukaan. **Tabel 1** menunjukkan data curah hujan maksimum pada setiap stasiun klimatologi pada kurun waktu tahun 2018-2023.

Tabel 1. Curah hujan maksimum pada setiap stasiun klimatologi.

No	Tahun	Stasiun Klimatologi			
		Cisokan	Cikundul	Cibalagung	Pacet, Puncak, Citeko
1	2018	59	100	89	64
2	2019	100	84	93	78
3	2020	66	66	66	66
3	2021	164	164	164	164
4	2022	121	121	121	121
5	2023	119	119	119	119

Selanjutnya dilakukan perhitungan curah hujan harian maksimum menggunakan metode Hasper dan der Weduwen untuk memperoleh hujan rencana berdasarkan data historis (Soemarto 1987), dengan asumsi bahwa distribusi hujan bersifat simetris untuk durasi kurang dari 1 jam hingga 24 jam. Metode ini mengompilasi curah hujan harian maksimum dan menggunakan persamaan tertentu untuk menganalisis distribusi hujan dalam perencanaan hidrologi dan pengelolaan air hujan (PPKSDA 2020). Rekapitulasi hasil perhitungan curah hujan harian maksimum dengan metode Hasper dan Der Weduwen dapat dilihat pada **Tabel 2**.

Berdasarkan hasil analisis frekuensi curah hujan harian maksimum, diperoleh perbandingan nilai dari tiga metode yang tercantum dalam **Tabel 3**. Perbandingan tersebut menunjukkan perbedaan hasil antar metode dan menjadi dasar dalam pemilihan metode yang paling tepat untuk memperkirakan curah hujan maksimum pada perencanaan drainase dan pengelolaan air hujan.

Tabel 2. Rekapitulasi curah hujan harian maksimum.

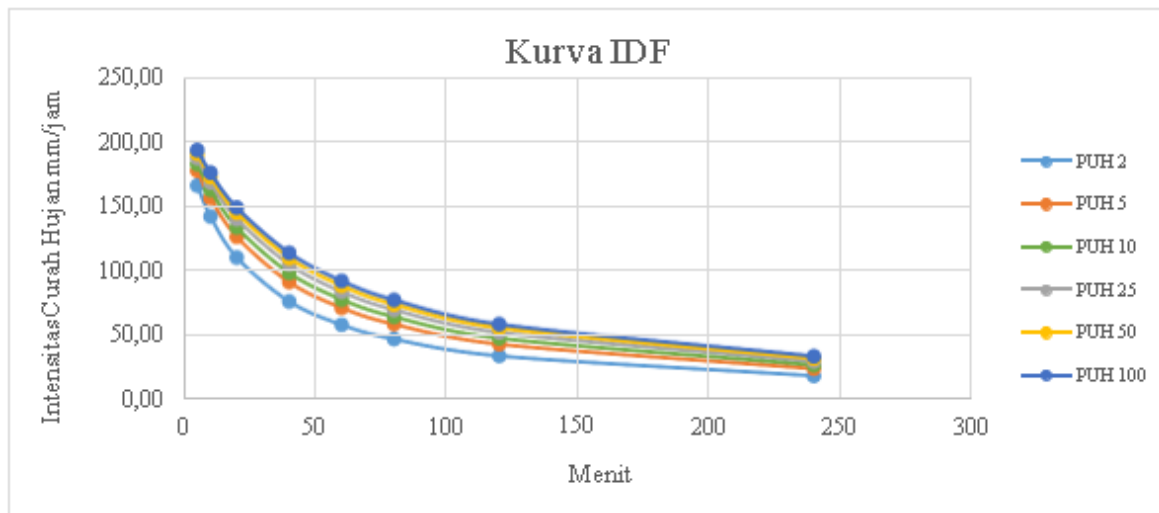
No	Durasi (menit)	Periode ulang hujan (tahun) mm/ 24jam					
		2	5	10	25	50	100
1	5	576,98	632,01	657,18	632,01	696,31	709,2
2	10	318,18	360,63	381,04	360,63	414,13	425,4
3	20	168,55	196,65	210,75	196,65	234,48	242,83
4	40	84,81	100,96	109,31	100,96	123,77	128,98
5	60	55,28	66,33	72,12	66,33	82,24	85,93
6	80	40,29	48,55	52,9	48,55	60,57	63,37
7	120	25,32	30,64	33,47	30,64	38,48	40,32
8	240	10,85	13,2	14,45	13,2	16,69	17,52

Tabel 3. Rekapitulasi analisis frekuensi curah hujan harian maksimum.

No.	Periode ulang hujan	Gumbel	Log Person	Distribusi Normal
1	2	101,7772	103,99	105,56
2	5	127,8552	126,84	126,65
3	10	145,1211	140,4	137,7
4	25	161,683	156,24	148,5
5	50	166,9366	167,24	157,04
6	100	183,1206	177,65	164,07

3.2. Penggambaran kurva IDF

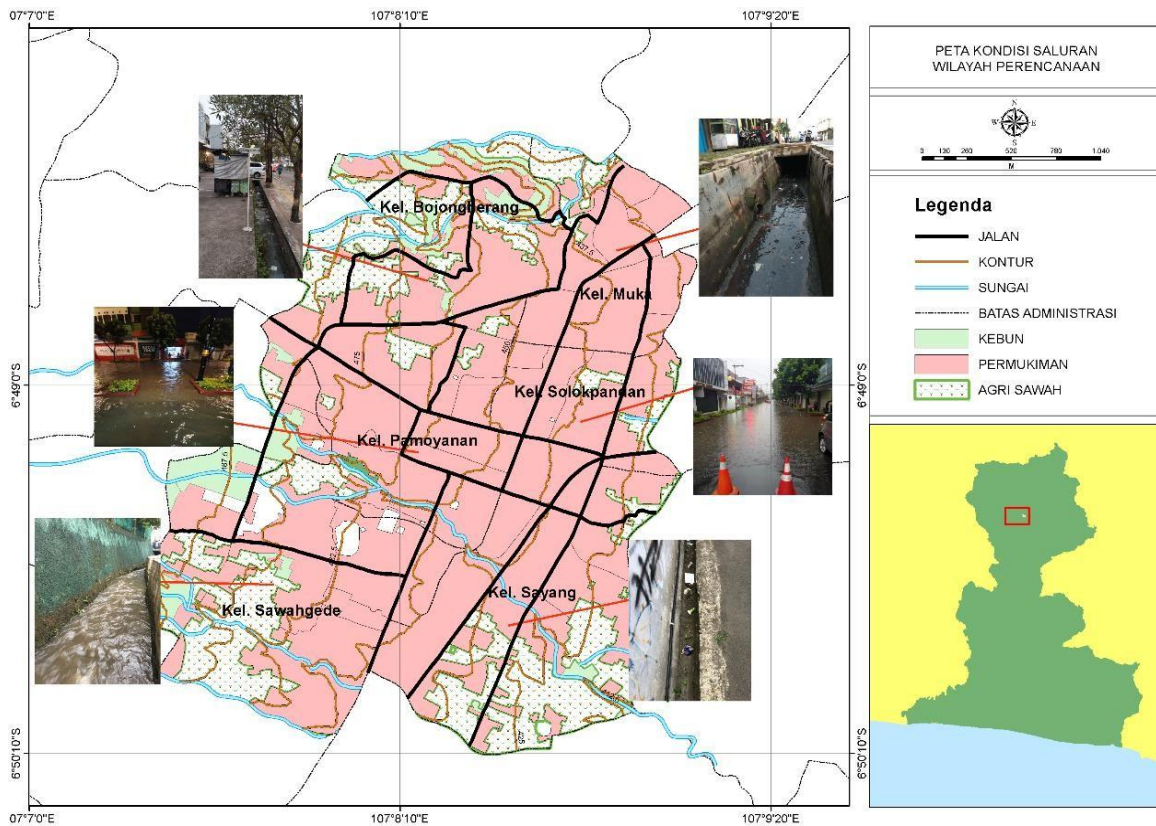
Kurva IDF (*intensity, duration, frequency*) menggambarkan hubungan antara intensitas hujan, durasi, dan periode ulang, yang digunakan untuk memperhitungkan debit puncak dengan metode rasional. Berdasarkan kurva IDF pada **Gambar 3**, intensitas hujan meningkat seiring bertambahnya periode ulang, dan cenderung lebih tinggi di awal durasi hujan sebelum menurun. Hubungan antara parameter kunci yaitu periode ulang, durasi, serta intensitas hujan sangat penting untuk perencanaan dimensi saluran drainase. Pengabaian hubungan parameter tersebut berpotensi menyebabkan saluran tidak mampu menampung debit air selama hujan intens, yang dapat menyebabkan genangan atau banjir di perkotaan.



Gambar 3. Kurva IDF (*intensity, duration, frequency*).

3.3. Evaluasi kondisi eksisting dan skenario 1 tanpa LID

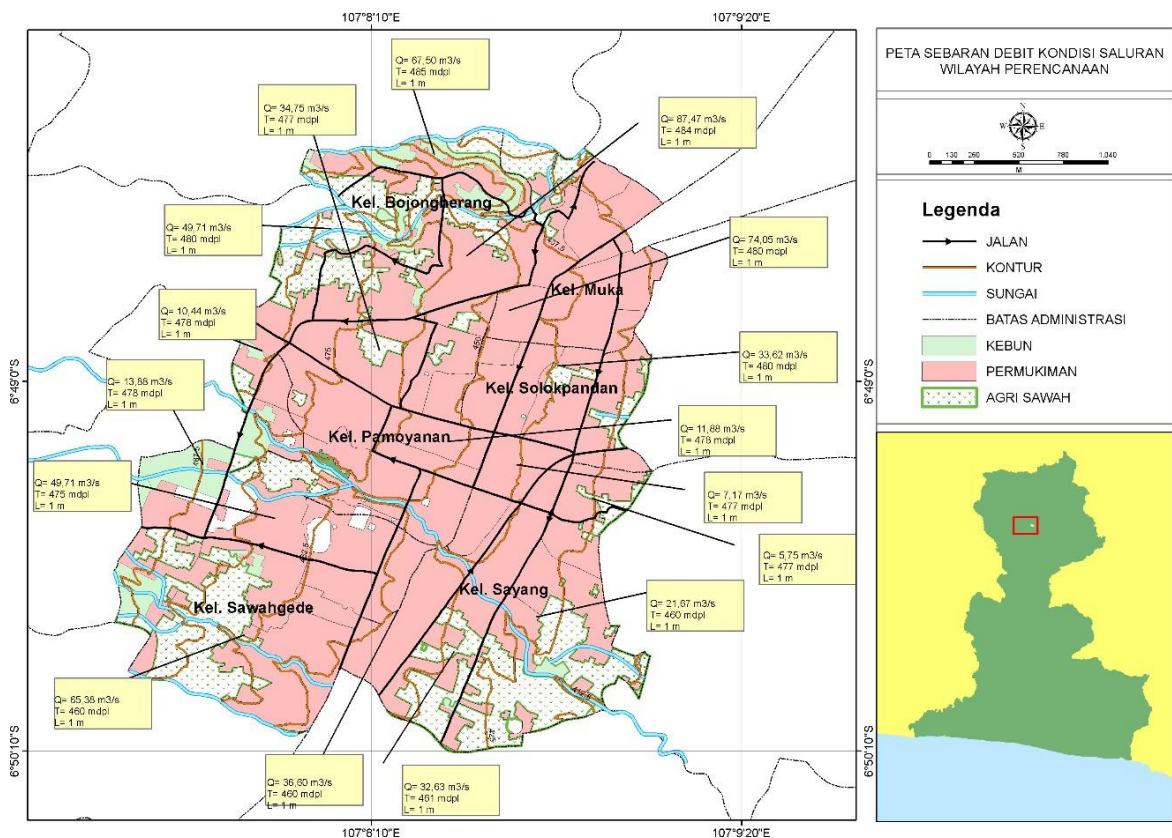
Seperti ditunjukkan **Gambar 4**, banjir besar tahun 2023 di Kecamatan Cianjur berdampak signifikan pada enam kelurahan, yaitu Pamoyanan, Bojongherang, Muka, Sawahgede, Sayang, dan Solokpandan. Kejadian banjir di Kelurahan Pamoyanan menyebabkan genangan di area pemukiman karena kurang optimalnya sistem drainase dalam mengalirkan air hujan. Kondisi ini diperburuk oleh tumpukan sedimen dan sampah yang menyumbat saluran, sehingga air tidak dapat mengalir dengan baik. Sementara itu, Kelurahan Bojongherang dan Muka dengan kondisi padat penduduk, mengalami keterbatasan kapasitas saluran drainase sehingga terjadi genangan di fasilitas umum dan jalan utama. Kemudian di Kelurahan Sawahgede dan Kelurahan Sayang menghadapi tantangan serius akibat konversi lahan hijau menjadi kawasan permukiman dan komersial yang mengakibatkan berkurangnya area resapan air secara drastis, sehingga berpotensi meningkatkan risiko banjir saat hujan lebat. Selanjutnya di Kelurahan Solokpandan yang didominasi lahan pertanian mengalami banjir dan erosi akibat limpasan air berlebih serta kurangnya integrasi antara saluran irigasi pertanian dan sistem drainase perkotaan.



Gambar 4. Peta kondisi saluran di Kecamatan Cianjur.

Evaluasi ini menunjukkan perlunya peningkatan infrastruktur drainase di semua kecamatan yang terdampak serta penerapan teknologi berbasis LID. Hal ini dilakukan untuk mengurangi volume limpasan permukaan dan memperkuat area resapan air. Upaya mitigasi banjir yang lebih komprehensif harus mencakup tata kelola ruang yang lebih baik, pemeliharaan rutin saluran drainase, dan peningkatan area resapan di kawasan perkotaan maupun lahan pertanian. Dalam rangka mendukung evaluasi dan perencanaan tersebut, seperti telah diinformasikan pada metodologi dilakukan pembagian *catchment* area dimulai dengan mengidentifikasi batas wilayah tangkapan berdasarkan data topografi, kemudian membaginya menjadi *sub-catchment* yang lebih kecil sesuai dengan kemiringan dan penggunaan lahan. Setiap *sub-catchment* di-input dengan parameter luas, kemiringan, persentase kedap air, dan panjang jalur aliran. Aliran antar *sub-catchment* dihubungkan melalui *node* dan *link* yang merepresentasikan titik dan jalur aliran. Setelah *input* data, kalibrasi dilakukan untuk memastikan hasil simulasi mencerminkan kondisi nyata, sehingga dapat digunakan untuk evaluasi dan perencanaan pengelolaan limpasan yang akurat.

Pada **Gambar 5**, skenario 1 tanpa penerapan LID menunjukkan debit limpasan terbesar tercatat di wilayah Kelurahan Bojongherang, yang merupakan area dengan kepadatan penduduk tinggi, yaitu mencapai 87,47 m³/s. Besarnya debit tersebut mencerminkan tingginya beban pada sistem drainase, yang dipengaruhi oleh kapasitas saluran yang terbatas sehingga tidak mampu menampung limpasan dari area padat aktivitas dan luas daerah aliran. Luas wilayah aliran dan tingginya intensitas aktivitas penduduk, serta limpasan permukaan yang besar, menyebabkan saluran drainase tidak optimal dalam mengalirkan debit air. Kondisi ini meningkatkan risiko terjadinya genangan dan banjir, terutama saat curah hujan tinggi. Sebaliknya, debit terkecil tercatat di wilayah Kelurahan Sayang, dengan besaran 5,75 m³/s. Hal ini terjadi karena daerah tersebut merupakan ruang terbuka hijau, yang memungkinkan penyerapan air lebih optimal, sehingga volume limpasan yang dihasilkan pun jauh lebih rendah. Kondisi ini menggambarkan pentingnya ruang terbuka hijau dalam mendukung sistem drainase dan mengurangi potensi banjir di area permukiman padat penduduk.



Gambar 5. Sebaran debit di Kecamatan Cianjur.

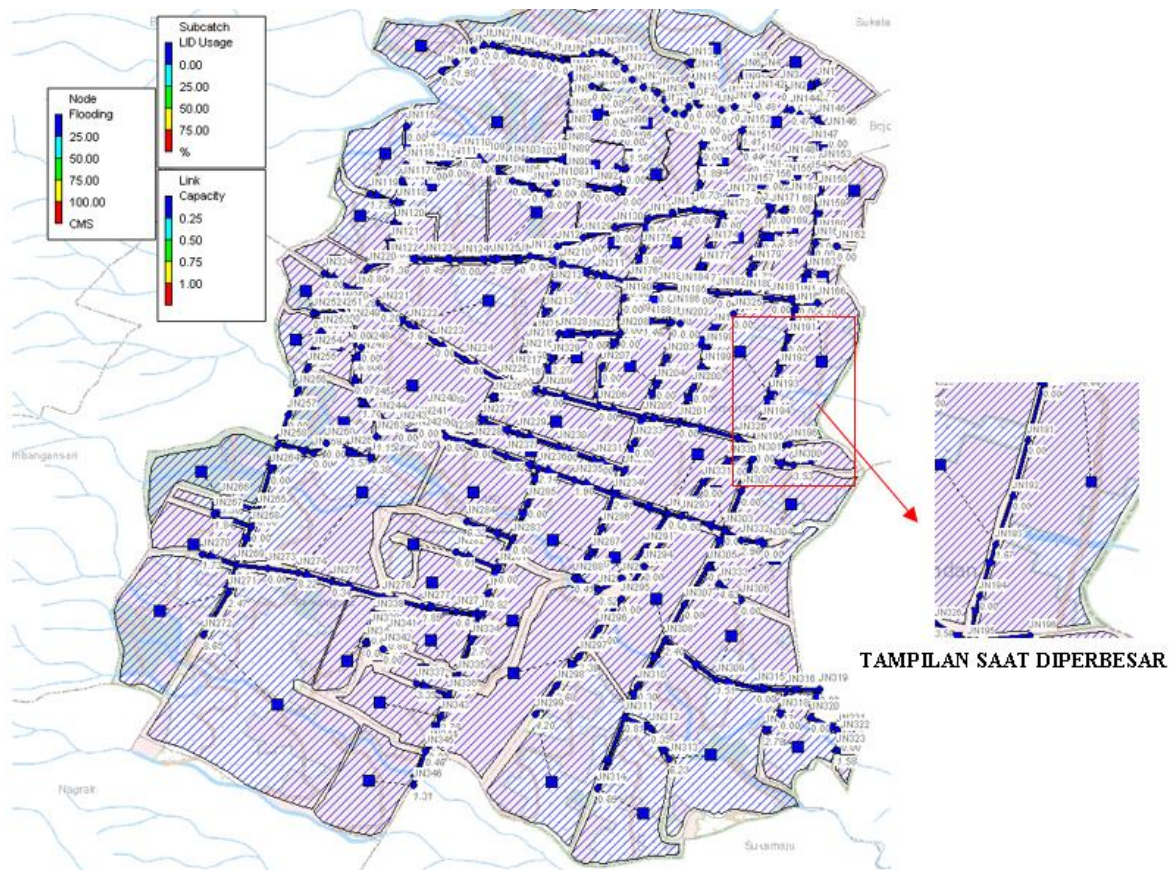
3.4. Skenario 2 dan 3 model *Low Impact Development* di Kecamatan Cianjur

Perencanaan LID berfokus pada pengelolaan air hujan menggunakan infrastruktur hijau serta ruang terbuka hijau, sehingga jumlah limpasan dapat dikurangi dengan adanya upaya penampungan dan pemanfaatan air hujan. Pada penelitian ini setiap skenario akan dianalisis dan dibandingkan berdasarkan volume limpasan yang dihasilkan, di mana skenario yang paling efektif akan diterapkan dalam perencanaan sistem drainase di Kecamatan Cianjur.

Pada skenario ke-2 digunakan *rain barrel* sesuai penerapan konsep LID untuk mengurangi limpasan permukaan di kawasan padat dengan lahan terbatas seperti Kelurahan Bojongherang. *Rain barrel* atau tong penampung air hujan ditempatkan di berbagai titik strategis (di dekat bangunan permukiman) untuk mengumpulkan air hujan yang dapat digunakan kembali seperti untuk menyiram tanaman. Pada skenario ke-3, penerapan *rain barrel* dikombinasikan dengan kolam retensi berfungsi untuk menampung air hujan dalam kuantitas yang cukup besar. Melalui infrastruktur ini, limpasan permukaan ke sistem drainase atau lahan sekitar dapat dikendalikan dan pelepasan air di *outlet* dapat dilakukan perlahan (Sururi dan Fadlurrohman 2024).

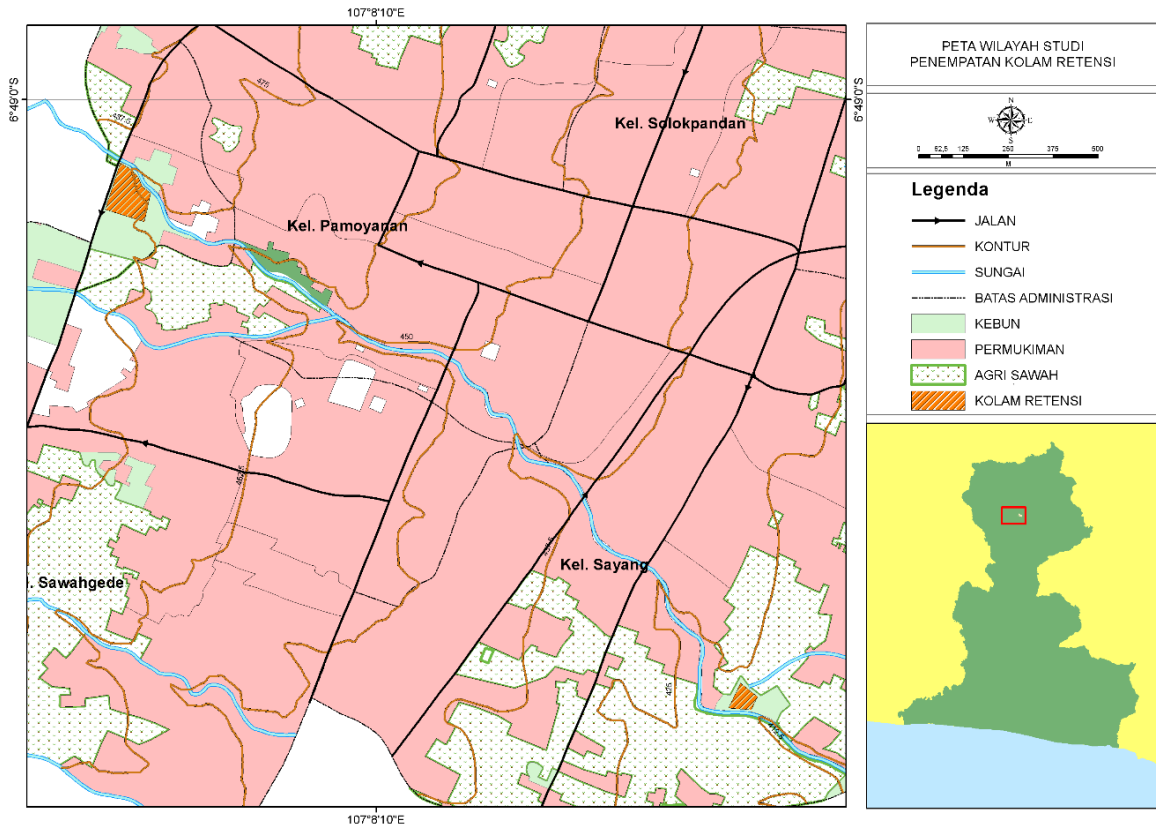
Pada skenario 2 dan 3, saluran drainase yang dirancang adalah berupa saluran terbuka dengan material beton yang ditetapkan memiliki nilai kekasaran Manning sebesar 0,011. Dimensi saluran pada jalan lokal ditetapkan sebesar 0,4 m x 0,5 m, sedangkan untuk jalan arteri ukurannya ditingkatkan menjadi 1 m x 1 m. Peningkatan dimensi bertujuan untuk menampung seluruh limpasan yang berasal dari jalan lokal, memastikan bahwa aliran air dapat mengalir dengan lancar menuju sungai tanpa menyebabkan genangan di sepanjang jalan arteri.

Efektivitas dari sistem drainase yang direncanakan dikaji dengan simulasi menggunakan perangkat lunak SWMM 5.2 yang ditampilkan dalam bentuk warna pada setiap *node*, sehingga memudahkan penilaian kondisi aliran. *Node* biru mengindikasikan tidak adanya luapan dan saluran drainase berfungsi dengan baik, sedangkan *node* merah mengindikasikan potensi luapan dapat terjadi. Berdasarkan hasil simulasi (**Gambar 6**), semua *node* menunjukkan warna biru setelah pengaliran limpasan air selama 6 jam. Dengan demikian, sistem drainase yang direncanakan efektif dalam mengelola aliran air tanpa menghadapi masalah luapan/ancaman banjir.



Gambar 6. Hasil simulasi menggunakan *software* SWMM 5.2.

Berdasarkan hasil simulasi pada **Gambar 6**, penggunaan *rain barrel* sebagai komponen LID dapat mengurangi jumlah limpasan air hujan yang mengalir menuju sungai sebanyak 1.429,98 m³ atau 16,35% dari total limpasan air hujan yang dihasilkan. Jumlah tersebut masih cukup besar dan dapat menjadi potensi banjir. Oleh karena itu, dilanjutkan menggunakan skenario ke-3, yaitu dengan penambahan kolam retensi. Kolam retensi yang akan ditambahkan pada skenario ke-3 berjumlah 2 (dua) unit, dengan kapasitas 3.600 m³/unit. Masing-masing kolam retensi akan ditempatkan pada bagian hulu dan hilir sungai Cisokan seperti ditampilkan pada **Gambar 7**.

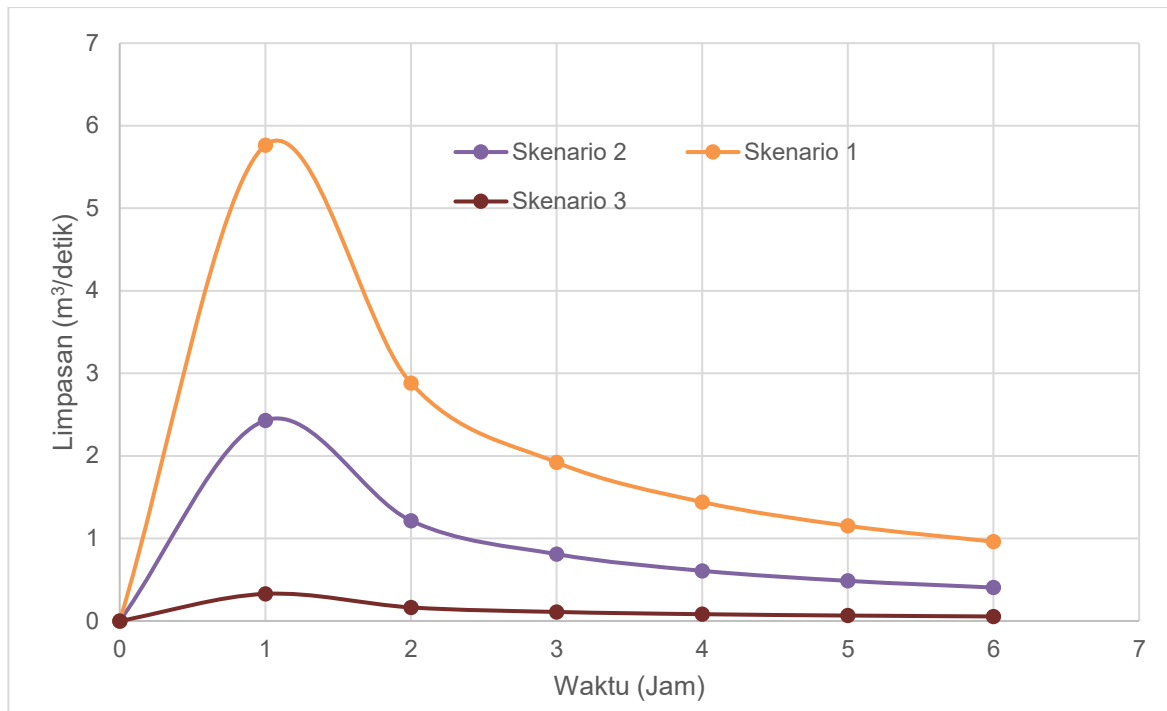


Gambar 7. Lokasi perencanaan kolam retensi.

Berdasarkan hasil simulasi penggunaan *rain barrel* dan 2 unit kolam retensi, jumlah limpasan air hujan yang dapat dikelola sebanyak 8.629,98 m³/hari atau 98,65% dari total limpasan air hujan yang dihasilkan, sehingga jumlah limpasan air hujan yang akan mengalir ke sungai Cisokan sebanyak 118,28 m³/hari. Pengurangan sebesar 98,65% ini menunjukkan bahwa skenario pengelolaan limpasan air hujan yang menggabungkan *rain barrel* dan kolam retensi sangat efektif dalam mengurangi risiko genangan dan banjir di wilayah tersebut. Selanjutnya, hasil simulasi dan efektivitas pengelolaan limpasan air hujan dari ketiga skenario tersebut akan dibandingkan pada **Tabel 4** berikut dan diilustrasikan pada **Gambar 8**.

Tabel 4. Curah hujan maksimum pada setiap stasiun klimatologi.

Skenario	Debit Limpasan Air Hujan (m ³ /hari)		Efisiensi Pengurangan (%)
	Awal	Akhir	
1	8.748,26	8.748,26	0,00
2	8.748,26	7.318,28	16,35
3	8.748,26	118,28	98,65



Gambar 8. Hidrograf jumlah limpasan per satuan waktu.

Berdasarkan **Gambar 8** di atas, dapat dilihat bahwa skenario ke-3 dalam pengelolaan limpasan air hujan yang memanfaatkan pendekatan LID berupa *rain barrel* dan kolam retensi, dapat mengurangi debit limpasan puncak hingga 98,65%. Sedangkan pengelolaan limpasan air hujan tanpa memanfaatkan pendekatan LID, menghasilkan debit puncak yang sangat tinggi dan dapat menjadi potensi terjadinya banjir.

Mengacu pada hasil simulasi tersebut, dapat disimpulkan bahwa melalui respons dengan pendekatan LID ini baik skenario 2 dan 3, tekanan pada sistem drainase di Kelurahan Bojongherang dapat dikurangi, dan potensi banjir dapat diminimalkan secara signifikan. Selain itu, pelestarian ruang terbuka hijau di wilayah seperti Kelurahan Sayang juga penting untuk menjaga efektivitas area resapan alami, sehingga mengoptimalkan kapasitas drainase alami dan mengurangi risiko limpasan berlebih.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil pengkajian terhadap perencanaan sistem drainase di Kecamatan Cianjur, diketahui bahwa jumlah limpasan rata-rata di Kecamatan Cianjur selama periode hujan 6 jam tercatat sebesar 8.748,26 m³/s. Angka ini menunjukkan besarnya volume air yang harus ditangani oleh sistem drainase dalam periode tersebut dan memberikan gambaran atas kondisi aktual di lapangan. Efektivitas skenario ketiga yaitu kombinasi penerapan *rain barrel* dan kolam retensi, terbukti paling efektif untuk diterapkan sebagai metode pengelolaan limpasan di Kecamatan Cianjur. Melalui skenario ini, limpasan dapat berkurang secara signifikan dari 8.748,26 m³/s menjadi 118,28 m³/s atau berkisar 98,65% dan telah sesuai dengan hasil perencanaan.

Sebagai tindak lanjut dari perencanaan dan kajian sistem drainase berkelanjutan di Kecamatan Cianjur, disarankan agar dilakukan studi lebih mendalam mengenai penerapan infrastruktur hijau tambahan. Infrastruktur hijau seperti *rain garden*, *trottoar permeabel*, dan *bio-retensi* dapat menjadi solusi efektif untuk mengatasi permasalahan drainase, terutama di area dengan tingkat kedap air yang tinggi, seperti kawasan pemukiman dan jalan nasional. Selain itu, kajian mendalam mengenai pengelolaan sampah di wilayah perkotaan Kecamatan Cianjur juga sangat diperlukan. Pengelolaan sampah yang efektif dapat mendukung peningkatan kinerja sistem drainase yang telah direncanakan dengan mengurangi potensi penyumbatan dan meningkatkan kapasitas penyerapan air.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Abi Aad MP, Suidan MT and Shuster WD. 2010. Modeling techniques of best management practices: Rain barrels and rain gardens using EPA SWMM-5. *Journal of hydrologic engineering* 15(6):434-443.
- Ahiablame LM, Engel BA and Chaubey I. 2012. Effectiveness of low impact development practices: literature review and suggestions for future research. *Water, Air, & Soil Pollution* 223:4253-4273.
- Ahiablame LM, Engel BA and Chaubey I. 2013. Effectiveness of low impact development practices in two urbanized watersheds: Retrofitting with rain barrel/cistern and porous pavement. *Journal of Environmental Management* 119:151-161.

- [BMKG] Badan Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika. 2023. Data curah hujan wilayah Kabupaten Cianjur. BMKG. Jakarta.
- [BPBD] Badan Penanggulangan Bencana Daerah Kabupaten Cianjur. 2023. Laporan kejadian banjir di Daerah Aliran Sungai Cisokan Tahun 2023. BPBD Kabupaten Cianjur. Cianjur.
- [BPS] Badan Pusat Statistik Kabupaten Cianjur. 2023. Kabupaten Cianjur dalam Angka 2023. BPS Kabupaten Cianjur. Cianjur.
- Bai Y, Zhao N, Zhang R and Zeng X. 2018. Storm water management of low impact development in urban areas based on SWMM. *Water* 11(1):33.
- Burns MJ, Fletcher TD, Walsh CJ, Ladson AR and Hatt BE. 2012. Hydrologic shortcomings of conventional urban stormwater management and opportunities for reform. *Landscape and urban planning* 105(3):230-240.
- [DID Malaysia] Department of Irrigation and Drainage Malaysia. 2010. *Urban Stormwater Management Manual for Malaysia*. DID Malaysia. Kuala Lumpur.
- Eckart K, McPhee Z and Bolisetti T. 2017. Performance and implementation of low impact development - a review. *Science of the total environment* 607:413-432.
- GebreEgziabher M and Demissie, Y. 2020. Modeling urban flood inundation and recession impacted by manholes. *Water* 12(4):1160.
- Haryono A, Setiawan R and Putri DR. 2022. Penataan ruang perkotaan dan dampaknya terhadap kualitas lingkungan dan risiko banjir. *Jurnal Perencanaan Wilayah dan Kota* 33(2):145-158.
- Ibrahim A and Nugraha R. 2023. Pengaruh perencanaan tata ruang dan sistem drainase terhadap kejadian banjir perkotaan. *Jurnal Teknik Lingkungan* 29(1): 65-74.
- Liu Y, Bralts VF and Engel, B. A. 2015. Evaluating the effectiveness of management practices on hydrology and water quality at watershed scale with a rainfall-runoff model. *Science of the total environment* 511:298-308.
- Marwati S, Pratomo D and Lestari E. 2022. Efektivitas Low Impact Development dalam meningkatkan infiltrasi dan mengurangi limpasan permukaan. *Jurnal Sumber Daya Air* 18(1):45-56.
- Pemerintah Kabupaten Cianjur. 2021. Rencana Pembangunan Jangka Menengah Daerah (RPJMD) Kabupaten Cianjur Tahun 2021-2025. Bappeda Kabupaten Cianjur. Cianjur.

- Permanasari E, Wijaya M, Feliren V, Khikmah F, Lechner A, Virani A and Saputra R. 2025. Enhancing urban resilience through integrated flood policy and planning: a mixed-methods evaluation of retention ponds for flood mitigation in South Bandung. *AQUA-Water Infrastructure, Ecosystems and Society* 72(2):267-282.
- Pratama A and Nugroho B. 2021. Pengaruh curah hujan dan perubahan penggunaan lahan terhadap kejadian banjir di wilayah perkotaan. *Jurnal Teknik Lingkungan* 27(1):45-54.
- [PPKSDA] Pusat Pengembangan Kompetensi Sumber Daya Air dan Permukiman. 2020. Modul 5: Pengukuran Hidrologi. Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. Bandung.
- Rossman LA and Simon MA. 2022. Storm water management model user's manual version 5.2. United States Environmental Protection Agency. Cincinnati.
- Sururi MR and Fadlurrohman F. 2024. Perencanaan Sistem Drainase Berkelanjutan di Daerah Aliran Sungai Cinambo dengan Konsep Low Impact Development. *Jurnal Ilmu Lingkungan* 22(6):1626-1636.
- Syafitri N and Wibowo A. 2021. Penerapan konsep Low Impact Development dalam pengelolaan limpasan air hujan di kawasan perkotaan. *Jurnal Teknik Lingkungan* 27(2):89-98.
- Soemarto CD. 1987. Hidrologi teknik. Erlangga. Jakarta.
- Susanti R and Widodo T. 2022. Pengaruh pertumbuhan penduduk terhadap kinerja sistem drainase perkotaan. *Jurnal Teknik Lingkungan* 28(2):101-110.
- Te Chow V, Maidment DR and Mays LW. 2010. *Applied Hydrology*. McGraw-Hill Education.
- Walsh TC, Pomeroy CA and Burian SJ. 2014. Hydrologic modeling analysis of a passive, residential rainwater harvesting program in an urbanized, semi-arid watershed. *Journal of hydrology* 508:240-253.
- Ward RC and Robinson M. 2000. *Principles of Hydrology*. McGraw-Hill. Maidenhead.

Assessing wastewater treatment performance in small island contexts: a multi-aspect evaluation of Tidung Besar Island, Indonesia

Penilaian kinerja pengolahan limbah cair di konteks pulau kecil: evaluasi multi-aspek Pulau Tidung Besar, Indonesia

Gatot Prayoga^{1,2,3*}, Gatot Yulianto², Hefni Effendi²,

¹Coastal and Marine Resources Management Study Program, Faculty of Fisheries and Marine Sciences, IPB University, Bogor, Indonesia

²Department of Aquatic Resources Management, Faculty of Fisheries and Marine Sciences, IPB University, Bogor, Indonesia

³Center for Environmental Research, IPB University, Bogor, Indonesia

Abstrak.

Pulau-pulau kecil menghadapi tantangan keberlanjutan yang unik dalam pengelolaan air limbah domestik akibat keterbatasan sumber daya, ruang, dan tingginya kerentanan ekologi, di sisi lain penilaian komprehensif multi-dimensi masih jarang dilakukan. Studi ini mengatasi kesenjangan tersebut melalui penilaian multi-aspek sistem pengelolaan air limbah domestik di Pulau Tidung Besar, Indonesia, dengan mengintegrasikan aspek teknis, kelembagaan, lingkungan, dan sosial di pulau kecil yang padat penduduk dan berbasis pariwisata tersebut. Pendekatan eksploratif-deskriptif diterapkan dengan menggabungkan teknik observasi, wawancara *stakeholder*, kuesioner, dan analisis data sekunder selama periode Maret 2024 hingga Agustus 2025. Data dianalisis menggunakan metode triangulasi, statistik deskriptif, dan sintesis kualitatif. Studi ini mengungkap paradoks kritis bahwa meskipun terdapat penerimaan masyarakat yang kuat dan infrastruktur yang mapan berupa empat instalasi pengolahan air limbah yang melayani 831 sambungan rumah, sistem masih menghadapi tantangan lingkungan yang serius. Konsentrasi amonia dan *total coliform* masing-masing mencapai 163 dan 137 kali lipat dari baku mutu yang diprasyaratkan. Tantangan teknis meliputi kelebihan kapasitas di zona padat, kerusakan peralatan, dan cakupan layanan yang belum menyeluruh, serta pemantauan yang masih lemah. Secara sosial, rendahnya pemahaman masyarakat tentang pengelolaan air limbah domestik kontras dengan tingkat kepuasan yang tinggi. Temuan ini menegaskan bahwa penerimaan masyarakat saja tidak cukup dan diperlukan solusi terintegrasi lintas dimensi.

Kata kunci: pulau kecil, limbah domestik, kinerja pengolahan, kapasitas kelembagaan, penilaian multi-aspek

Abstract.

Small islands face unique sustainability challenges in domestic wastewater management (DWM) due to limited resources, confined space, and high ecological vulnerability, yet comprehensive multi-dimensional assessments remain scarce. This study addresses this gap through a multi-aspect assessment of the DWM system on Tidung Besar Island, Indonesia, integrating technical, institutional, environmental, and social dimensions in a densely populated tourism-based small island. An exploratory-descriptive approach was employed, combining field observations, stakeholder interviews, questionnaires, and secondary data analysis from March 2024 to August 2025. Data were analyzed through triangulation methods, descriptive statistics, and qualitative synthesis. The study reveals a critical paradox that despite strong community acceptance and established infrastructure comprising four wastewater treatment plants serving 831 house connections, the system faces severe environmental challenge. Ammonia and total coliform exceed quality standards by up to 163 and 137 times. Technical challenges include overcapacity in high-demand zones, equipment failures, and incomplete service coverage, while institutional monitoring remains weak. Socially, most residents lack wastewater knowledge yet report high satisfaction based on visible improvements. This reveals that community acceptance alone cannot serve as a reliable indicator of system success. The study also demonstrates that small island wastewater management requires integrated solutions addressing interconnected challenge across all dimensions simultaneously.

Keywords: small island, domestic wastewater, treatment performance, institutional capacity, multi-aspect assessment

* Korespondensi Penulis
Email : gatotprayoga@apps.ipb.ac.id

1. INTRODUCTION

Small Island Developing States (SIDS) and small island communities face critical sustainability challenges stemming from their unique geographic, economic, and demographic characteristics. Indonesia, as the world's largest archipelagic nation with over 17,000 islands (Geospatial Information Agency 2024; Indonesian Central Statistics Agency 2024), exemplifies these challenges particularly in islands with high population density and tourism-dependent economies. According to Law Number 27 of 2007, small islands in Indonesia are defined as islands with an area of less than 2,000 km² along with their entire ecosystem (President of Republic of Indonesia 2007). While these islands possess high coastal and marine biodiversity (Kurniawan *et al.* 2016) and unique ecological value, they are simultaneously constrained by limited resources, geographic isolation, and heightened vulnerability to both natural disasters and anthropogenic pressures (Nunn and Kumar 2018; Thomas *et al.* 2020).

Among these challenges, domestic wastewater management (DWM) emerges as a critical yet inadequately addressed issue in small island contexts. Domestic wastewater is a primary contributor to aquatic pollution (Widyarani *et al.* 2022), and inadequate management systems on small island can severely affect marine ecosystem health (Wear and Thurber 2015; Prost-Boucle *et al.* 2023; Maliga *et al.* 2025). The urgency is amplified in islands with dense residential populations and intensive tourism activities, where seasonal wastewater strains existing infrastructure (Rodríguez-Alcántara *et al.* 2024). Despite this recognized importance, research on wastewater management in small island settings remains scarce, with most studies focusing on solid waste management (Willmott and Graci 2016) or water resource sustainability (Crisman and Winters 2023; Mycoo and Roopnarine 2024).

Tidung Besar Island, located in the Seribu Islands Administrative Regency of DKI Jakarta Province, Indonesia, represents a critical case study for small island DWM. With a total area of 50.13 ha (Fauzanabri *et al.* 2021), the island is characterized by relatively high residential density and intensive tourism activities. The population has increased from 4,587 in 2015 to 5,978 in 2025 (Hayati *et al.* 2020; Jakarta Provincial Population and Civil Registration Agency 2025; Tidung Island Village Administration 2025), representing a 30.32% growth over ten years and is the most populous island in Seribu Islands.

Beyond its residential function, Tidung Besar Island serves as a major tourist destination, attracting 65,258 visitors in 2024 (Seribu Islands Kominfotik Sub-Agency 2025), making it the second-largest tourist destination in Seribu Islands. Ecologically, the island possesses valuable coastal and marine resources, including mangroves, seagrass beds, and coral reefs that support diverse marine life (Hayati *et al.* 2020). This combination of population growth, tourism intensity, and ecological sensitivity creates a complex management scenario where inadequate wastewater treatment threatens both marine ecosystem integrity and the tourism-dependent economy.

Despite the establishment of DWM infrastructure on Tidung Besar Island in recent years, infrastructure presence alone does not guarantee sustainability or effectiveness. Existing research on wastewater treatment sustainability emphasizes the necessity of multi-dimensional assessment frameworks encompassing technical, environmental, social, and institutional dimensions (Muga and Mihelcic 2008; Kalbar *et al.* 2012; Molinos-Senante *et al.* 2014; Omran *et al.* 2021; Rahimzade *et al.* 2025). However, previous studies have largely emphasized technical assessments and energy efficiency (Liu *et al.* 2013; Garfí *et al.* 2017; Onyeka Eleweuwa *et al.* 2025), and indicator-based evaluations (Muga and Mihelcic 2008; Kalbar *et al.* 2012; Molinos-Senante *et al.* 2014; Omran *et al.* 2021; Rahimzade *et al.* 2025), which fail to capture the integrated complexity of wastewater systems.

More critically, while sustainability assessment frameworks have been widely developed, their application to small island contexts remains minimal. Recent small island research has increasingly emphasized developing island nations (Robinson and Gilfillan 2017; Poinen and Bokhoree 2022; Crisman and Winters 2023), whereas studies specifically addressing Indonesian small islands remain limited. This leaves a significant knowledge gap regarding how DWM systems perform within Indonesia's island-specific constraints of confined space, limited financial and technical resources, and dependence on external supplies (Prost-Boucle *et al.* 2023; SMILO 2023).

This study aims to assess the performance of the domestic wastewater management system on Tidung Besar Island by integrating technical, institutional, environmental and social dimensions into a comprehensive multi-aspect framework. The novelty lies in examining the interconnections between these dimensions, revealing how infrastructure adequacy, institutional capacity, environmental compliance, and community acceptance compound to affect overall system performance within a densely populated Indonesian small island context where such research remains scarce.

Methodologically, the study employs a rigorous multi-reference quality standard approach, evaluating effluent quality against domestic wastewater standards, seawater quality for maritime tourism, and marine biota protection criteria. Thus, addressing the institutional disconnect where operational management typically references only domestic wastewater standards while ecological reality necessitates comprehensive seawater quality protection. The findings are intended to serve as foundational knowledge for enhancing domestic wastewater management on Tidung Besar Island and to provide transferable lessons for other small islands globally facing similar sustainability challenges.

2. METHODOLOGY

2.1. Research time and location

This research is a case study conducted on domestic wastewater management (DWM) in Tidung Besar Island, which is located to the north of Java Island or Jakarta Capital City of Indonesia, specifically within the Seribu Islands area. The research focuses on Tidung Besar Island among many small islands in the Seribu Islands, as it is considered to have adequate conditions for this study, namely the largest population, intensive tourism activity, and a large number and capacity of DWM infrastructure. This study adopts an exploratory-descriptive approach, well-suited for investigating and characterizing domestic wastewater management (DWM) in small island contexts, where prior research remains scarce (Creswell 2014). This aligns with previous research (Al-Khatib *et al.* 2010) employing similar methods in assessing municipal solid waste management systems.

2.2. Research method

The primary data were collected through field observations and social surveys. The observations examined the DWM infrastructure (wastewater treatment plant/WWTP, pipe network, and supporting facilities), wastewater sources (residential, lodging or homestay, public facilities, and government offices), and the island's environmental conditions. Semi-structured interview by applying in-depth interview techniques (DiCicco-Bloom and Crabtree 2006; Ahlin 2019; Ruslin *et al.* 2022) were conducted with key respondents, consisting of WWTP managers and local community leaders. Questionnaires were administered to all respondents, including both key and general respondents (residents), to assess perceptions of DWM on Tidung Besar Island and to identify attitudes, knowledge gaps, and behavioural intentions (Wilson 2014; Brace 2018). Respondents included 6 WWTP managers from the Seribu Islands Water Resources Sub-Agency, 5 local community leaders (up to the village level), and 45 residents representing various types of wastewater sources. They were selected through purposive sampling based on the study objectives and stakeholder relevance. This approach ensured that information on DWM was obtained from multiple perspectives, providing a balanced and comprehensive representation of all stakeholder views. To facilitate the presentation of results, each respondent group was coded as [A] for WWTP managers, [B] for local community leaders, and [C] for residents.

The secondary data used is WWTP internal documents, such as managerial information, technical information, and monitoring report. Other than that, literature review also applied for supporting the study including scientific articles journals, theses, government or local databases/documents, government regulation, etc.

The various process of data collection and sources of data is intended as a method triangulation and data source triangulation to examine the accuracy of information and obtain reliable information, as described by Rahardjo (Rahardjo 2010). Additionally, inter-researcher triangulation involving multiple enumerators was also conducted under shared guidelines ensured consistent, objective-aligned results and enriched the data with findings closer to the truth (Rahardjo 2010). This set of triangulation approaches was applied to validate findings before proceeding with the data analysis.

After data validated, the data were processed through the following steps, including data reduction, display data, data presentation, and continue to conclusion drawing and verification (Bungin 2003). During the data display and presentation stages, data analysis was conducted using approaches tailored to the type of data. Qualitative analysis was applied to non-numerical data, producing narrative descriptions, illustrative photographs, and explanatory diagrams. In contrast, quantitative analysis was performed on numerical data using descriptive statistical methods, including frequencies, percentages, comparisons, and ratios. The data were processed and visualized using Microsoft Excel and the results presented in the form of charts, graphs, and matrices or tables. Integrating qualitative and quantitative analyses provided a comprehensive understanding of domestic wastewater management (DWM), encompassing technical, institutional, environmental, and social aspects, particularly regarding system performance and stakeholder perspectives. The entire methodological framework, covering data collection and analysis from March 2024 to August 2025, is summarized in the research flow diagram in **Figure 1**.

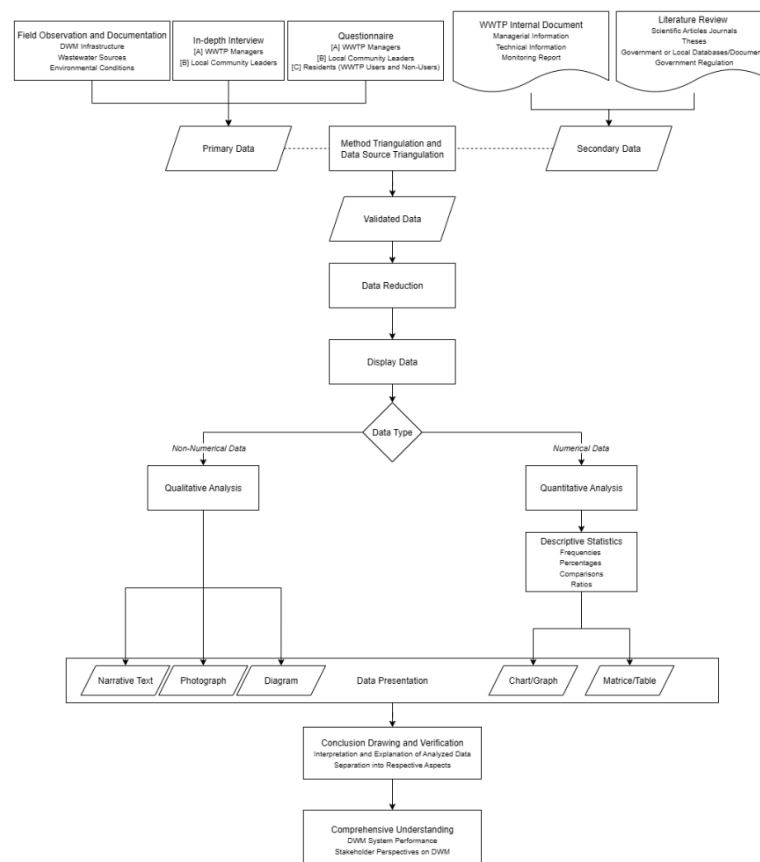


Figure 1. Research flow diagram.

3. RESULT AND DISCUSSION

3.1. Result

3.1.1. Technical and institutional aspect

Currently, Tidung Besar Islands already have the infrastructure of DWM with the existence of 4 domestic WWTPs (east, north, west, and south zones) (**Figure 2**). WWTP east and north zones were built by the Water Resources Agency of DKI Jakarta Province in 2016, followed by the west and south zones in the following year. The technical basis for the construction of these WWTPs refers to Regulation of the Minister of Public Works and Public Housing No. 4 of 2017 concerning the Implementation of Domestic Wastewater Management Systems (Minister of Public Works and Public Housing 2017).



Figure 2. Distribution of WWTP facilities in Tidung Besar Island, Seribu Islands, Jakarta, Indonesia (Source: Water Resources Agency of DKI Jakarta Province (2024))

The DWM system on Tidung Besar Island operates as a communal WWTP with an extensive piping network that connects to various buildings and activities, including residential areas or houses, lodgings/homestays, public facilities (school, mosque, sports hall, park, health center, dock, etc.), and government offices (**Figure 3**). Each building is equipped with a control tank (*“bak kontrol”*/BK) to accommodate grey water and black water.

The domestic wastewater from each BK is subsequently conveyed through a series of manholes, which serve as primary conduits for channelling the flow toward the WWTP. Assisted by a lift pump, the wastewater is transferred to the WWTP, where it initially accumulates in the sump pit before entering the subsequent anaerobic-aerobic treatment processes. This integrated treatment configuration ensures gradual and stable pollutant removal, resulting in improved effluent quality (Kassab *et al.* 2010; Englande *et al.* 2015).

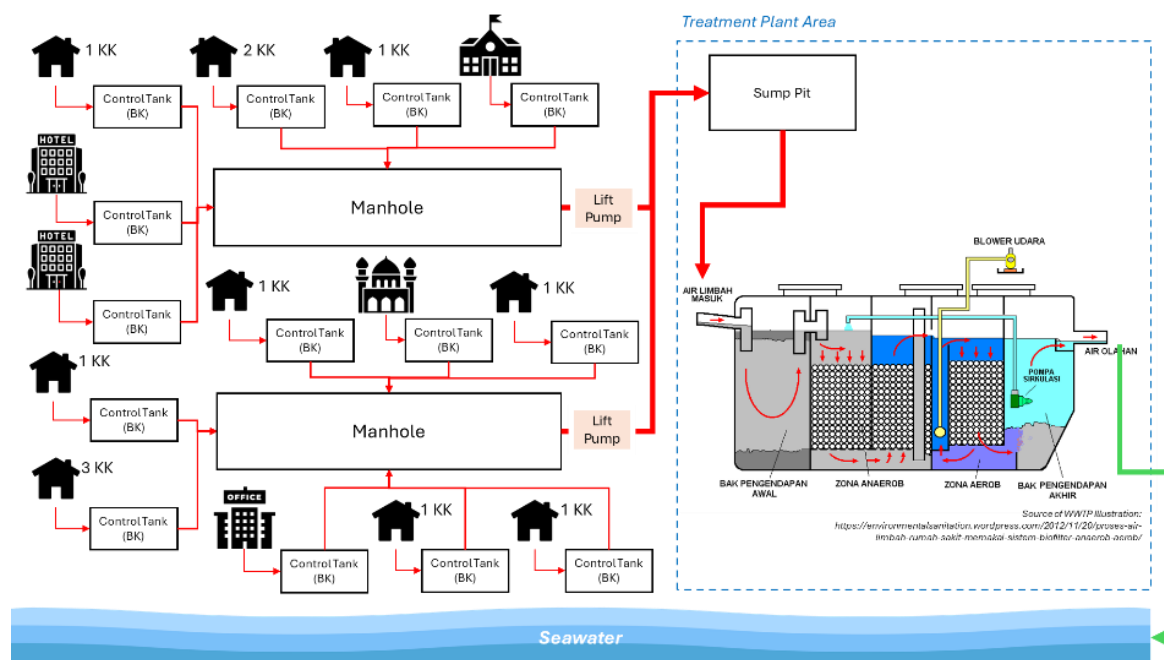


Figure 3. Flow chart of DWM system in Tidung Besar Island, Seribu Islands, Jakarta, Indonesia

(Source: Personal visualisation based on research results 2025)

The four WWTP collectively have a total design capacity of 650 m³/day, currently serving 831 house connections (*"sambungan rumah"/SR*). The capacities and service coverages of each WWTP are as follows: east (150 m³/day; 204 SRs), north (200 m³/day; 155 SRs), west (200 m³/day; 449 SRs), and south (100 m³/day; 23 SRs). From an institutional perspective, the system is managed by the Water Resources Agency of DKI Jakarta Province through its Seribu Islands Water Resources Sub-Agency, which oversees operation, maintenance, and monitoring activities. Based on standard design practices, the ratio between treatment capacity and house connections can be estimated from domestic wastewater generation rates and household size. Domestic wastewater production typically ranges from 100-200 L/person/day (Tchobanoglous *et al.* 2014; Badan Standardisasi Nasional (BSN) 2017).

Regarding Seribu Islands's average household size of 3.4 persons/household (Jakarta Provincial Population and Civil Registration Agency 2025), each house connection contributes approximately 0.34-0.68 m³/day. Thus, a WWTP with a nominal capacity of 200 m³/day (north and west zones) can theoretically serve 290-590 households, depending on water use and infiltration factors. This estimation aligns with common design practices in small-scale wastewater systems, where empirical adjustments accommodate variability in inflow, infiltration, and service expansion (Tchobanoglous *et al.* 2014). Notably, a local government news report quotes managers stating that planned plants will provide 150 m³/day for south zone and 200 m³/day for north zone (Surapati and Suparni 2016), implying 0.5 m³/house/day (\approx 147 L/person/day at 3.4 persons/house). It means that the maximum service capacity reaches twice the nominal capacity is aligns with the technical range above and corresponds roughly to a mid-range per-capita assumption. Accordingly, service targets for the study area are set at 300 SR (east), 400 SR (north), 400 SR (west), and 200 SR (south). Based on these criteria, the West Zone WWTP has already exceeded its service capacity, with 449 SRs connected in 2025, equivalent to 112% of the designated maximum (Figure 4). Compared to the initial condition in 2016/2017, the number of SRs in the West Zone has increased significantly over the past decade. The East Zone also shows relatively high utilization at 68% of its maximum capacity, whereas the South Zone remains underutilized with limited additional connections (Figure 4).

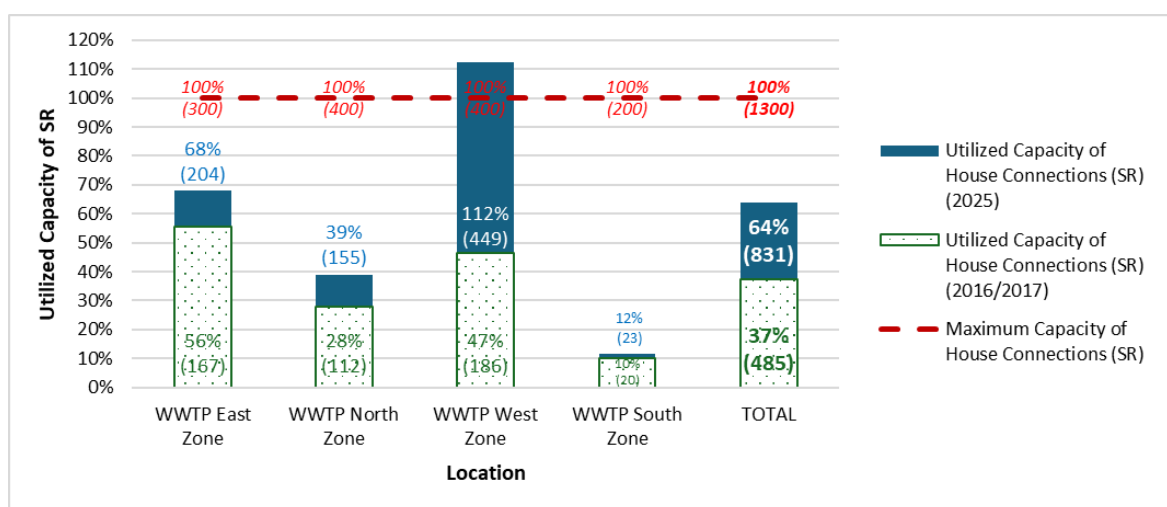


Figure 4. Evaluation of WWTP capacity based on the number of house connection (SR)

(Source: Data analysis and personal visualisation by author (2025))

Despite the established infrastructure, several technical challenges have been identified. Critical equipment failures include non-functional flow meters and inoperative recirculation units at WWTP installations, preventing accurate load measurement and compromising treatment efficiency. The pipe network experiences periodic clogging from user-generated solid waste disposal, and manholes occasionally flood during high rainfall or tides, raising aesthetic and safety concerns. In service coverage side, it is also persists incomplete due to residents' reluctance, limited awareness, and landowner access restrictions. From an institutional perspective, WWTP monitoring is conducted only annually, substantially below the monthly frequency required by PermenLHK No. 5/2021, Article 103 paragraph (2) (Minister of Environment and Forestry 2021). Weak managerial follow-up to monitoring results and limited operator understanding of system principles further constrain operational effectiveness. In addition, user awareness and maintenance of control tank (BK) by user remain inadequate, contributing to system performance issues.

Regarding effluent quality standards, the institutional framework primarily refers to the Regulation of the Minister of Environment and Forestry No. P.68/2016 on Domestic Wastewater Quality Standard (Minister of Environment and Forestry 2016), which focuses on wastewater characteristics for operational management. However, for a more comprehensive environmental assessment beyond the system's internal performance and consider its receiving environment, effluent quality was evaluated against three national regulatory references: (1) Regulation of the Minister of Environment and Forestry No. P.68/2016 (Minister of Environment and Forestry 2016); (2) Government Regulation No. 22/2021 on Environmental Protection and Management - Seawater Quality Standard for Maritime Tourism (President of the Republic of Indonesia 2021); and (3) Government Regulation No. 22/2021 on Environmental Protection and Management - Seawater Quality Standard for Marine Biota (President of the Republic of Indonesia 2021). Following common practice in environmental assessment studies in Indonesia, the strictest threshold value for each parameter across these three references was adopted as the reference standard, ensuring the most stringent environmental protection criteria. This approach provides a robust basis for evaluating the environmental performance of the system, as presented in the following subsection.

3.1.2. Environmental aspect

The environmental performance of the DWM system was evaluated based on effluent quality compliance with the reference standards described above. According to three years of WWTP monitoring data (Seribu Islands Water Resources Sub-Agency 2024), four parameters remained non-compliant with the applicable quality standards (QS) despite treatment (*italic text* on the outlet column of **Table 1**). Biochemical Oxygen Demand (BOD) and oil and grease exceeded the QS by approximately 2-5 times (QS = 10 mg/L) and 2-6 times (QS = 1 mg/L), respectively. More critically, ammonia and total coliform exhibited substantially higher exceedances, reaching 72-163 times (QS = 0.02 mg/L) and 26-137 times (QS = 1,000 MPN/100 mL), respectively. These results are consistent with the characteristics of domestic wastewater, which typically contains high concentrations of organic matter, fats, oils, grease (Huang *et al.* 2010; Parwin and Paul 2019), and proteins (Huang *et al.* 2010), along with coliform bacteria indicative of fecal contamination.

The persistent non-compliance of these parameters, particularly the extreme exceedances in ammonia and total coliform levels, indicates that the current anaerobic-aerobic treatment configuration may be insufficient to achieve the stringent quality standards. The non-compliance is compounded by several operational factors identified in the technical assessment. The inoperative recirculation units limit microbial biomass maintenance and wastewater dilution, both critical for treatment efficiency (Tchobanoglous *et al.* 2014; Santín *et al.* 2020). Infrequent monitoring (annual rather than monthly) allows performance degradation to accumulate undetected. BOD and oil and grease exceedances also suggest inadequate source control from poor BK maintenance practices. These findings reveal potential limitations in treatment process design and operational conditions that prevent adequate contaminant removal. While environmental performance metrics reveal significant technical challenges, the system's overall sustainability also depends on community acceptance and social dimensions, which are examined in the following subsection.

Table 1. Tidung Besar Island WWTP monitoring data during 2022-2024.

No.	Parameter	Unit	Strictest Quality Standard (QS) ^a	Average values							
				East zone		North zone		West zone		South zone	
				Inlet	Outlet	Inlet	Outlet	Inlet	Outlet	Inlet	Outlet
1	pH	-	7-8.5	7.1	7.4	7.0	7.3	7.1	7.3	7.2	7.7
2	BOD ₅	mg/L	10	196	43	149	24	163	48	123	20
3	COD	mg/L	100	259	60	199	34	214	67	164	30
4	TSS	mg/L	20	18	10	22	11	18	10	23	13
5	Oil and grease	mg/L	1	8	6	8	5	8	5	7	2
6	Ammonia	mg/L	0.02	22	3	16	2	16	2	19	1
7	Total coliform	MPN/100 mL	1,000	203,233	54,810	176,842	83,217	193,067	136,942	119,335	25,779
8	Discharge	m ³ /s	-	0.0006	0.0008	0.0006	0.0007	0.0010	0.0011	0.0004	0.0008

Source: Primary data from Seribu Islands Water Resources Sub-Agency (Seribu Islands Water Resources Sub-Agency 2024) and Data analysis by author (2025)

^aStrictest quality standard (QS) refers to the most stringent threshold for each parameter, selected from among the following (3) three references:

- (1) Regulation of the Minister of Environment and Forestry No P.68 Year 2016 on Domestic Wastewater Quality Standard (App. I. Domestic Wastewater Quality Standard) (Minister of Environment and Forestry 2016)
- (2) Government Regulation No 22 of 2021 on the Implementation of Environmental Protection and Management (App. VIII. Seawater Quality Standard for Maritime Tourism) (President of the Republic of Indonesia 2021)
- (3) Government Regulation No 22 of 2021 on the Implementation of Environmental Protection and Management (App. VIII. Seawater Quality Standard for Marine Biota) (President of the Republic of Indonesia 2021)

3.1.3. Social aspect

The social dimension of DWM implementation reveals an interesting paradox between community knowledge and attitudes. The understanding of DWM among the residents and local community leaders remains relatively low, with over 60% not knowing or understanding what domestic wastewater is (**Figure 5a**). However, despite this limited technical understanding, the majority (over 80%) considered DWM to be important to very important is (**Figure 5b**). This tendency is likely shaped by their direct experience with the DWM systems that have been operational on the island since 2016, which has provided tangible benefits even without comprehensive technical knowledge.

Community satisfaction with the overall performance of DWM was generally positive, with the most dominant response categorized as "good" (**Figure 5c**). This favourable perception aligns with stakeholder assessments, where most community leaders and approximately half of the WWTP managers perceived the system as successful (**Figure 5d**). The relatively high social acceptance and satisfaction levels, despite limited technical understanding and the environmental challenges, suggest that the community primarily evaluates system performance based on visible improvements and service availability.

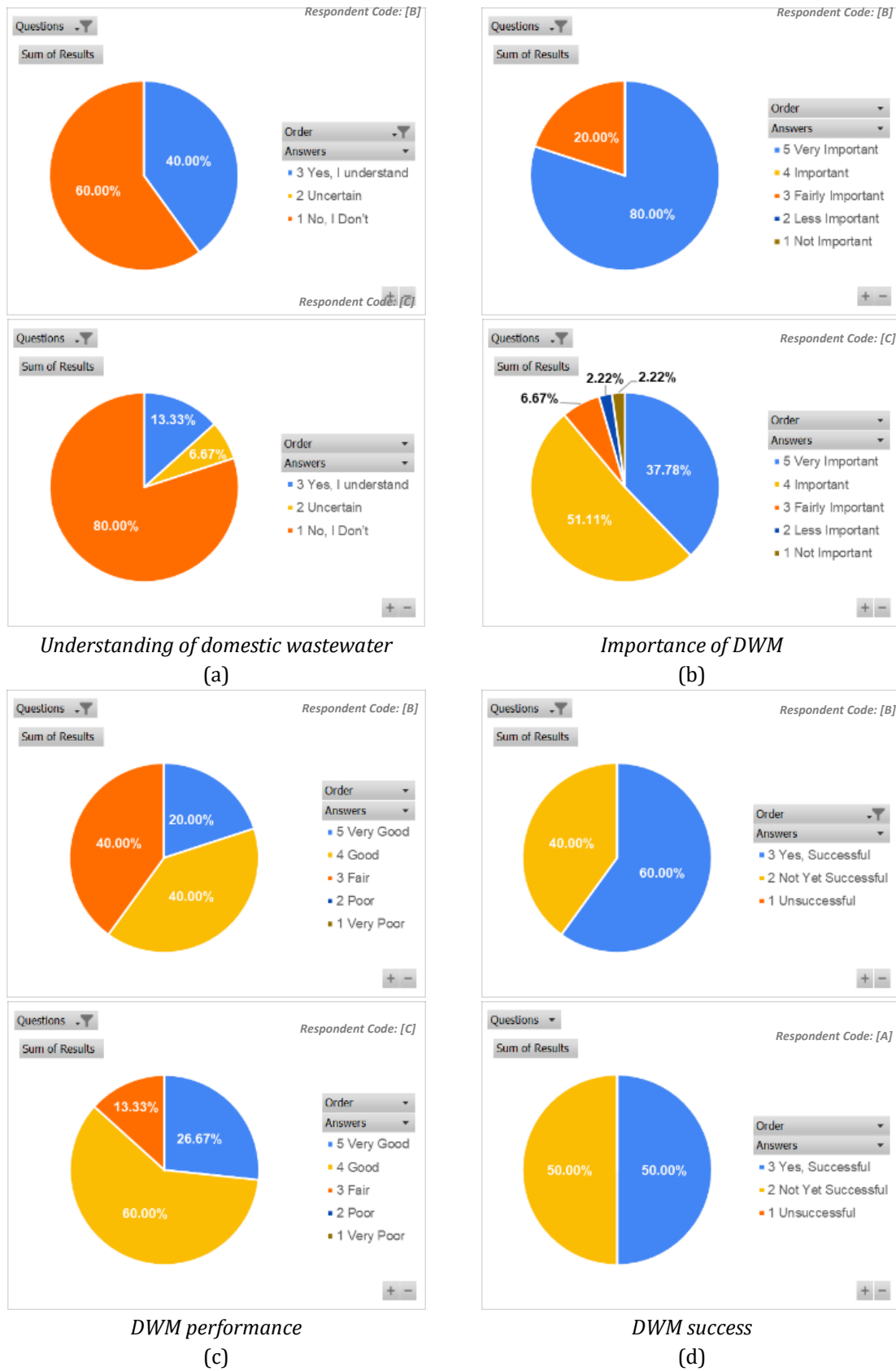


Figure 5. Research questionnaire results.

However, this limited understanding manifests in behavioral challenges affecting system performance. Users' awareness and maintenance of control tanks (BK) remain inadequate, with irregular cleaning and poor upkeep. Improper solid waste disposal into the system causes pipe network clogging. There are also challenges from residents to expand connections and achieve complete service coverage due to misunderstandings about liquid waste management and, in some cases, landowners' refusal to provide network access. These behavioural factors indicate that while overall satisfaction is high, enhanced community education is needed to improve user practices and achieve complete service coverage. This social acceptance is crucial for long-term sustainability, as community support influences maintenance compliance, willingness to pay for services, and opportunities for future improvement.

3.2. Discussion

The multi-aspect assessment reveals a critical paradox that Tidung Besar Island's DWM system demonstrates strong social acceptance and established infrastructure yet faces severe environmental challenge and institutional capacity gaps. This contributes to limited research on small island wastewater management context, where communities face unique challenges of poor sewerage systems, financial constraints, inadequate managerial training, and geographic isolation (Willmott and Graci 2016; Prost-Boucle *et al.* 2023; SMILO 2023). While four WWTPs serving 831 connections represent significant achievement, the West Zone's 112% capacity exceedance, persistent equipment failures (flow meters, recirculation units), and annual rather than required monthly monitoring indicate fundamental institutional weaknesses. Similar capacity constraints have been documented in island contexts where tourism-dependent economies strain infrastructure and sustainable resource management proves particularly challenging (Willmott and Graci 2016; Rodríguez-Alcántara *et al.* 2024).

The severe non-compliance that is ammonia (72-163 times the QS) and total coliform (26-137 times the QS) indicates treatment inadequacies beyond typical domestic wastewater characteristics. While anaerobic-aerobic systems effectively remove organic matter, achieving stringent ammonia and pathogen removal often requires operational optimization or tertiary treatment (Kassab *et al.* 2010; Englande *et al.* 2015). The non-functional recirculation unit contributes to these deficiencies, as

recirculation it is critical for maintaining adequate microbial biomass in the aerobic stage and for diluting incoming high-strength wastewater, both essential for treatment efficiency (Tchobanoglous *et al.* 2014; Englande *et al.* 2015; Santín *et al.* 2020). This situation mirrors Pacific islands where inadequate wastewater treatment has caused serious environmental and health problems due to contamination of water supplies and damage to natural resources (Rouse 2015; Nelson *et al.* 2024). Given the high ecological sensitivity of coastal waters, applying the strictest national standards (P.68/2016; PP 22/2021) represents methodological rigor appropriate for marine tourism areas and supports the protection of marine ecosystems.

Most striking is the paradox between environmental challenges and high social acceptance. Despite severe non-compliance and 60% not understanding domestic wastewater, over 80% considered DWM important with predominantly "good" satisfaction. Communities assess visible improvements (eliminated open sewers, service availability) rather than invisible water quality parameters. This pattern is common not only in small-island contexts where limited environmental literacy and lack of monitoring transparency constrain communities' capacity for critical evaluation (Domnech and Saurí 2010; Jones *et al.* 2011; United Nations 2017). Research shows those with higher environmental concern have more positive attitudes toward wastewater treatment (Gómez-Román *et al.* 2021; Gómez-Román *et al.* 2024), suggesting awareness-raising could transform passive acceptance into active improvement demand. That most of local leaders and half of WWTP managers also perceive the system as successful despite non-compliance indicates normalization of inadequate performance, reflecting insufficient monitoring data access, insufficient technical or environmental literacy, and institutional weaknesses that remains prioritizing continuity over optimization. This perception of 'success' is inherently biased, reflecting assessments that prioritize system functionality over effluent quality.

The multi-aspect assessment reveals that challenges across technical, institutional, environmental, and social dimensions are deeply interconnected, creating a complex web of causality that requires integrated solutions. West Zone overcapacity results from population growth outpacing infrastructure planning and service expansion efforts without regard to carrying capacity, compromising treatment efficiency. Pipe blockages stem from inappropriate user disposal due to

limited awareness within perceived system success. The persistence of essential equipment from a complex maintenance budgeting process prevents accurate measurement and treatment effectivity, undermining capacity and quality management while remaining invisible to users. This demonstrates isolated technical fixes will fail without simultaneous institutional strengthening and social engagement. A holistic approach that recognises sociological factors, including community participation, public engagement, and social perceptions, is required and is expected to bring improvements in wastewater management practice (Saad *et al.* 2017).

Immediate interventions must address West Zone capacity through expansion or redistribution, repair essential equipment, increase disinfection intensity, and establish monthly monitoring. Medium-term improvements should explore advanced technology in WWTPs, such as ozonation and other advanced oxidation processes (AOPs) for enhanced pathogen and ammonium removal, UV-irradiation systems for disinfection and polishing, membrane filtration (UF/NF/RO or membrane-bioreactor hybrids) to achieve high-quality effluent, and nitrogen-specialised processes (e.g., Anammox or SHARON) to address excessive ammonia loads. Such technologies have been demonstrated in recent literature to markedly increase removal of pathogens, organic and inorganic nitrogen species, and recalcitrant contaminants under challenging conditions (Bray *et al.* 2021; Clem and Mendonça 2022; Zagklis and Bampos 2022; Zahmatkesh *et al.* 2022; Fernandes *et al.* 2024; Parulekar *et al.* 2024; Ugwuanyi *et al.* 2024). Careful consideration must apply in the selection of the advanced technologies relating the constraints typical of small islands and another inherent challenges, such as geographic isolation, higher financial requirements for operation and maintenance, and limited local capacity in terms of energy availability and operator technical skills.

Beyond technical measures, institutional protocols must ensure monitoring data translates into corrective actions, supported by operator training addressing system principles and ecological functions. At a broader policy level, the institutional framework should formalize multi-reference quality standards for island contexts, aligning operational targets with ecological protection. Equally important, community education through local leaders should emphasize connections between DWM performance and tangible interests (tourism quality, fisheries, public health).

Portraying wastewater treatment as a community initiative with pro-environmental social identity framing generates more positive and fewer negative emotions, positively influencing acceptance (Gómez-Román *et al.* 2024). These measures will foster the community's sense of belonging, which has been proven to increase participation in conservation (García-Llorente *et al.* 2012). To sustain these efforts, budget allocation must prioritize integrated maintenance, monitoring, training, and education.

This study addresses knowledge gaps in small island wastewater management where this such research remains scarce. The paradox that social acceptance despite environmental challenges may be common where communities lack critical evaluation capacity, suggests acceptance alone is insufficient for sustainability or success assessment. The multi-reference quality standard approach provides a model for island contexts with marine ecosystem dependencies. The interconnected challenge framework linking technical, institutional, environmental, and social aspects offers conceptual tools for integrated management approaches. For Tidung Besar specifically and small islands globally, transforming passive acceptance into sustainable performance requires simultaneous technical upgrades, institutional strengthening, and strategic social engagement protecting human health, marine ecosystems, and tourism-dependent livelihoods.

4. CONCLUSION

This assessment reveals Tidung Besar Island's DWM system faces critical sustainability challenges despite infrastructure achievement and community acceptance. Severe environmental non-compliance (ammonia and coliform exceeding standards up to 163 and 137 times), institutional capacity gaps, and technical constraints are the challenges in question. The paradox of high satisfaction despite poor environmental performance demonstrates that sustainable small island domestic wastewater management requires integrated solutions addressing interconnected technical, institutional, environmental, and social dimensions simultaneously. The study contributes methodological value of multi-reference quality standards for island with marine ecosystem dependencies contexts and an interconnected challenge framework applicable beyond this case and offering transferable lessons for small islands globally balancing development, tourism, and environmental protection.

5. ACKNOWLEDGEMENT

The author would like to express the sincere gratitude to collaboration agency of AIS Forum, UNDP, and Department of Aquatic Resources Management, IPB University which provided full financial support for this study through the AIS Innovator Scholarship Program. The author also extends appreciation to all parties who contributed to the research activities, including stakeholders and research team colleagues

6. REFERENCES

- Ahlin ME. 2019. Semi-structured interviews with expert practitioners: their validity and significant contribution to translational research. Sage Publication. London.
- Al-Khatib IA, Monou M, Abu Zahra ASF, Shaheen HQ and Kassinos D. 2010. Solid waste characterization, quantification and management practices in developing countries. A case study: Nablus district - Palestine. *Journal of Environmental Management* 91(5):1131–1138. doi:10.1016/j.jenvman.2010.01.003.
- Badan Standardisasi Nasional (BSN). 2017. SNI 2398:2017 - Tata cara perencanaan tangki septik dengan pengolahan lanjutan (sumur resapan, bidang resapan, up flow filter, kolam sanita). Badan Standarisasi Nasional (BSN). Jakarta.
- Brace I. 2018. Questionnaire design: how to plan, structure and write survey material for effective market research. Kogan Page Publishers. London.
- Bray RT, Jankowska K, Kulbat E, Łuczkiwicz A and Sokołowska A. 2021. Ultrafiltration process in disinfection and advanced treatment of tertiary treated wastewater. *Membranes* 11(3):Page 221. 11(3):221-238.
- Bungin B. 2003. Analisis data penelitian kualitatif: pemahaman filosofis dan metodologis ke arah penguasaan model aplikasi. PT. Raja Grafindo Persada. Jakarta.
- Clem V and Mendonça HV de. 2022. Ozone reactor combined with ultrafiltration membrane: A new tertiary wastewater treatment system for reuse purpose. *Journal of Environmental Management* 315: 115166. doi:10.1016/j.jenvman.2022.115166.
- Creswell JW. 2014. Research design: qualitative, quantitative, and mixed methods approaches. SAGE Publications. California.

- Crisman TL and Winters ZS. 2023. Caribbean small island developing states must incorporate water quality and quantity in adaptive management of the water-energy-food nexus. *Frontiers in Environmental Science* 11:1212552. doi:10.3389/FENVS.2023.1212552/BIBTEX.
- DiCicco-Bloom B and Crabtree BF. 2006. The qualitative research interview. *Med Educ*. 40(4):314–321. doi:10.1111/J.1365-2929.2006.02418.X.
- Domnech L and Saurí D. 2010. Socio-technical transitions in water scarcity contexts: Public acceptance of greywater reuse technologies in the Metropolitan Area of Barcelona. *Resources, Conservation and Recycling* 55(1):53–62. doi:10.1016/J.RESCONREC.2010.07.001.
- Englande AJJ, Krenkel P and Shamas J. 2015. Wastewater treatment & water reclamation. Reference module in earth systems and environmental sciences. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.09508-7>
- Fauzanabri R, Manembu I, Schaduw J, Manengkey H, Sinjal C dan Ngangi E. 2021. Status terumbu karang di perairan Pulau Tidung Kepulauan Seribu Provinsi DKI Jakarta berbasis analisis underwater photo transect. *Jurnal Ilmiah Platax*. 9:247–261.
- Fernandes J, Ramísio PJ and Puga H. 2024. A comprehensive review on various phases of wastewater technologies: trends and future perspectives. *Eng* 2024 5(4):2633-2661. doi:10.3390/ENG5040138.
- García-Llorente M, Martín-López B, Iniesta-Arandia I, López-Santiago CA, Aguilera PA and Montes C. 2012. The role of multi-functionality in social preferences toward semi-arid rural landscapes: An ecosystem service approach. *Environmental Science & Policy* 19–20:136–146. doi:10.1016/J.ENVSCI.2012.01.006.
- Garfí M, Flores L and Ferrer I. 2017. Life cycle assessment of wastewater treatment systems for small communities: activated sludge, constructed wetlands and high rate algal ponds. *Journal of Cleaner Production* 161:211–219. doi:10.1016/J.JCLEPRO.2017.05.116.
- Geospatial Information Agency. 2024. Pulau Indonesia bertambah jadi 17.380, mengapa angkanya berubah setiap tahun? [internet]. Available at: https://www.big.go.id/uploads/downloads/Dokumen/Rilis_Jumlah_Pulau.pdf.

- Gómez-Román C, Jans L, Steg L, Vila-Tojo S and Sabucedo J-M. 2024. "Yes, we care": pro-environmental social identity framing to promote acceptance of decentralized wastewater treatment systems. *Water Reuse* 14(4):510-526.
- Gómez-Román C, Sabucedo JM, Alzate M, Medina B. 2021. Environmental concern priming and social acceptance of sustainable technologies: the case of decentralized wastewater treatment systems. *Frontier in Psychology* 12:647406. doi:10.3389/FPSYG.2021.647406/BIBTEX.
- Hayati Y, Adrianto L, Krisanti M, Pranowo WS and Kurniawan F. 2020. Magnitudes and tourist perception of marine debris on small tourism island: Assessment of Tidung Island, Jakarta, Indonesia. *Marine Pollution Bulletin* 158:111393. doi:10.1016/j.marpolbul.2020.111393.
- Huang MH, Li YM, Gu GW. 2010. Chemical composition of organic matters in domestic wastewater. *Desalination* 262(1-3):36-42. doi:10.1016/J.DESAL.2010.05.037.
- Indonesian Central Statistics Agency. 2024. Luas daerah dan jumlah pulau menurut provinsi 2023 [Internet]. Available at: <https://www.bps.go.id/id/statistics-table/3/VUZwV01tSlpPVLpsWIRKbmMxcFhhSGhEVjFoUFFUMDkjMw==/luas-daerah-dan-jumlah-pulau-menurut-provinsi.html?year=2023>.
- Jakarta Provincial Population and Civil Registration Agency. 2025. Profil perkembangan kependudukan DKI Jakarta [Internet]. Available at: https://kependudukancapil.jakarta.go.id/profile_perkembangan_adminduk/.
- Jones N, Evangelinos K, Gaganis P and Polyzou E. 2011. Citizens' perceptions on water conservation policies and the role of social capital. *Water Resources Management* 25(2):509-522. doi:10.1007/S11269-010-9711-Z/METRICS.
- Kalbar PP, Karmakar S and Asolekar SR. 2012. Selection of an appropriate wastewater treatment technology: a scenario-based multiple-attribute decision-making approach. *Journal of Environmental Management* 113:158-169. doi:10.1016/j.jenvman.2012.08.025.
- Kassab G, Halalsheh M, Klapwijk A, Fayyad M and van Lier JB. 2010. Sequential anaerobic-aerobic treatment for domestic wastewater - A review. *Bioresource Technology* 101(10):3299-3310. doi:10.1016/j.biortech.2009.12.039.
- Kurniawan F, Adrianto L, Bengen DG and Prasetyo LB. 2016. Vulnerability assessment of small islands to tourism: The case of the Marine Tourism Park of the Gili Matra

- Islands, Indonesia. *Global Ecology and Conservation* 6:308–326. doi:10.1016/j.gecco.2016.04.001.
- Liu B, Wei Q, Zhang B and Bi J. 2013. Life cycle GHG emissions of sewage sludge treatment and disposal options in Tai Lake Watershed, China. *Science of The Total Environment* 447:361–369. doi:10.1016/J.SCITOTENV.2013.01.019.
- Maliga I, Purwono S and Harini R. 2025. Marine pollution in small island ecosystems and the impact of domestic wastewater. *Global Journal of Environmental Science and Management*. 11(1):177–192. doi:10.22034/gjesm.2025.01.11.
- Minister of Environment and Forestry. 2016. Regulation of the Minister of Environment and Forestry No P.68 Year 2016 on domestic wastewater quality standard.
- Minister of Environment and Forestry. 2021. Regulation of the Minister of Environment and Forestry No. 5 of 2021 on procedures for issuing technical approval and operational feasibility letters in the field of environmental pollution control.
- Minister of Public Works and Public Housing. 2017. Regulation of the Minister of Public Works and Public Housing No. 4 of 2017 on implementation of domestic wastewater management systems.
- Molinos-Senante M, Gómez T, Garrido-Baserba M, Caballero R and Sala-Garrido R. 2014. Assessing the sustainability of small wastewater treatment systems: A composite indicator approach. *Science of The Total Environment* 498:607–617. doi:10.1016/J.SCITOTENV.2014.08.026.
- Muga HE and Mihelcic JR. 2008. Sustainability of wastewater treatment technologies. *Journal of Environmental Management* 88(3):437–447. doi:10.1016/J.JENVMAN.2007.03.008.
- Mycoo MA and Roopnarine RR. 2024. Water resource sustainability: Challenges, opportunities and research gaps in the English-speaking Caribbean Small Island Developing States. *PLOS Water* 3(1):e0000222. doi:10.1371/JOURNAL.PWAT.0000222.
- Nelson N, Bair R, Coleman S, Comfort C, Gasteyer S, Huang J, McKay C, Smith A, Wang Z, Yan T, Young P and Yeh D. 2024. The pressing need for resilient, equitable, safe,

- and sustainable decentralized wastewater solutions for the pacific islands. *Visions & Voices* 1(2):1-4.
- Nunn P and Kumar R. 2018. Understanding climate-human interactions in Small Island Developing States (SIDS): Implications for future livelihood sustainability. *International Journal of Climate Change Strategies and Management* 10(2):245–271. doi:10.1108/IJCCSM-01-2017-0012.
- Omran II, Al-Saati NH, Al-Saati HH, Hashim KS and Al-Saati ZN. 2021. Sustainability assessment of wastewater treatment techniques in urban areas of Iraq using multi-criteria decision analysis (MCDA). *Water Practice & Technology* 16(2):648–660. doi:10.2166/WPT.2021.013.
- Onyeka Eleweuwa H, Oghenesuvwe Udele N, Bakare-Abidola T, Goodness Ezeifegbu C, Destiny Okejevwa G and Olaoye J. 2025. Analysis of energy efficiency in water treatment plants: Present conditions and future directions. *World Journal of Advanced Research and Reviews*. 25 (3):1717–1723. doi:10.30574/wjarr.2025.25.3.0893.
- Parulekar PJ, Sahasrabudhe I, Hegiste M and Gupte S. 2024. Review of advanced oxidation processes for waste water treatment. *International Journal of Engineering Research & Technology* 13(2):1-8. doi:10.17577/IJERTV13IS020100.
- Parwin R and Paul KK. 2019. Overview of applications of kitchen wastewater and its treatment. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste* 24(2):04019041. doi:10.1061/(ASCE)HZ.2153-5515.0000482.
- Poinen P and Bokhoree C. 2022. Sludge management practices: Drivers, opportunities and implications for small island developing states. *Journal of Water Process Engineering* 48(5):102860. doi:10.1016/j.jwpe.2022.102860.
- President of Republic of Indonesia. 2007. Law Number 27 of 2007 concerning management of coastal areas and small islands.
- President of the Republic of Indonesia. 2021. Government Regulation Number 22 of 2021 on the implementation of environmental protection and management.
- Prost-Boucle S, Wepierre N, Barbier C and Dubois V. 2023. Wastewater Treatment in Island Locations [Internet]. Available at:

https://www.pseau.org/outils/ouvrages/arbe_smilo_wastewater_treatment_in_island_locations_2023.pdf.

- Rahardjo M. 2010. Triangulasi dalam penelitian kualitatif [Internet]. Available at: <https://uin-malang.ac.id/r/101001/triangulasi-dalam-penelitian-kualitatif.html>.
- Rahimzade S, Alavi Moghaddam MR, Shafiei M and Namavar M. 2025. Sustainability assessment of urban wastewater management (collection, treatment, and reuse): Developing a multi-dimensional indicator-based framework. *Sustainable Cities and Society* 130:106646. doi:10.1016/J.SCS.2025.106646.
- Robinson SA and Gilfillan D. 2017. Regional organisations and climate change adaptation in small island developing states. *Regional Environmental Change* 17(4):989–1004. doi:10.1007/s10113-016-0991-6.
- Rodríguez-Alcántara JS, Cruz-Pérez N, Rodríguez-Martín J, García-Gil A and Santamarta JC. 2024. Effect of tourist activity on wastewater quality in selected wastewater treatment plants in the Balearic Islands (Spain). *Environmental Science and Pollution Research* 31(10):15172–15185. doi:10.1007/S11356-024-32173-9/FIGURES/10.
- Rouse JD. 2015. Development of environmentally sustainable methods for treatment of domestic wastewater and handling of sewage sludge on Yap Island. *Sustainability* 7(9):12452–12464. doi:10.3390/SU70912452.
- Ruslin R, Mashuri S, Alhabsyi F, Sarib M and Rasak A. 2022. Semi-structured interview: a methodological reflection on the development of a qualitative research instrument in educational studies ruslin. *Journal of Research & Method in Education* 12(1):22–29. doi:10.9790/7388-1201052229.
- Saad D, Byrne D, Drechsel P, Saad D, Byrne D and Drechsel P. 2017. *Social Perspectives on the Effective Management of Wastewater on Physico-Chemical Wastewater Treatment and Resource Recovery*. INTECH. London.
- Santín I, Vilanova R, Pedret C and Barbu M. 2020. Global internal recirculation alternative operation to reduce nitrogen and ammonia limit violations and pumping energy costs in wastewater treatment plants. *Processes* 8(12):1606. doi:10.3390/PR8121606.

- Seribu Islands Kominfotik Sub-Agency. 2025. Informasi data kunjungan wisatawan [Internet]. Available at: <https://pulauseribu.jakarta.go.id/pariwisata>.
- SMILO. 2023. Water and sanitation [Internet]. Available at: <https://smilo-program.org/freshwater-and-sanitation/>.
- Surapati BF dan Suparni. 2016. Rp 10,2 M dianggarkan untuk pembangunan IPAL Pulau Tidung [Internet]. Available at: <https://www.beritajakarta.id/read/32043/rp-102-m-dianggarkan-untuk-pembangunan-ipal-pulau-tidung>.
- Tchobanoglous George, Stensel HDavid, Tsuchihashi Ryujiro, Burton FL, Abu-Orf Mohammad, Bowden Gregory and Pfrang William. 2014. *Wastewater engineering : treatment and resource recovery*. McGraw-Hill Education. Ohio.
- Thomas A, Baptiste A, Martyr-Koller R, Pringle P and Rhiney K. 2020. Climate change and small island developing states. *Annual Review of Environment and Resources* 45:1–27. doi: 10.1146/annurev-environ-012320-083355.
- Ugwuanyi ED, Nwokediegwu ZQS, Dada MA, Majemite MT and Obaigbena A. 2024. Review of emerging technologies for nutrient removal in wastewater treatment. *World Journal of Advanced Research and Reviews* 21(2):1737-1749.
- United Nations. 2017. *Wastewater: the untapped resource*. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. Paris.
- Water Resources Agency of DKI Jakarta Province. 2024. Data sistem pengolahan air limbah domestik (SPALD) [Internet]. Available at: <https://portaldatadsda.jakarta.go.id/ipal/list/view>.
- Wear SL and Thurber RV. 2015. Sewage pollution: Mitigation is key for coral reef stewardship. *Annals of the New York Academy of Sciences* 1355(1):15–30. doi:10.1111/nyas.12785.
- Widyarani, Wulan DR, Hamidah U, Komarulzaman A, Rosmalina RT and Sintawardani N. 2022. Domestic wastewater in Indonesia: generation, characteristics and treatment. *Environmental Science and Pollution Research* 29(22):32397–32414. doi:10.1007/s11356-022-19057-6.
- Willmott L and Graci SR. 2016. Solid Waste management in small island destinations. *Téoros* 31(3):71-76.

- Wilson J. 2014. *Essentials of business research a guide to doing your research project*. SAGE Publications Ltd. New Delhi.
- Zagklis DP and Bampos G. 2022. Tertiary wastewater treatment technologies: a review of technical, economic, and life cycle aspects. *Processes* 10(11):2304-2323.
- Zahmatkesh S, Amesho KTT and Sillanpää M. 2022. A critical review on diverse technologies for advanced wastewater treatment during SARS-CoV-2 pandemic: What do we know?. *Journal of Hazardous Materials Advances* 7:100121. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2022.100121>.

Status keberlanjutan keramba jaring apung di Danau Rawa Pening pada dimensi ekologi berdasarkan pendekatan RAPFISH

Sustainability of floating net cages in Rawa Pening Lake at ecological dimension based on the RAPFISH approach

Tesalonika Putri Kinanti¹, Djohan², Desti Christian Cahyaningrum^{1*}

¹Program Studi S1 Biologi, Universitas Kristen Satya Wacana, Salatiga, Indonesia

²Program Studi S2 Biologi, Universitas Kristen Satya Wacana, Salatiga, Indonesia

Abstrak.

Budidaya perikanan keramba jaring apung (KJA) merupakan sumber mata pencaharian penting bagi masyarakat, namun juga berkontribusi terhadap eutrofikasi di Danau Rawa Pening. Oleh karena itu, perlu dipastikan bahwa pengelolaan KJA dilakukan berdasarkan prinsip pembangunan berkelanjutan untuk meminimalkan dampak lingkungan. Penelitian ini bertujuan mengkaji status keberlanjutan pengelolaan KJA di Danau Rawa Pening pada dimensi ekologi. Pengumpulan data dilakukan melalui wawancara, observasi, pengukuran langsung, serta studi pustaka terkait atribut kualitas perairan, kesuburan perairan, kondisi lingkungan, biosekuritas dan kesehatan ikan. Data hasil *scoring* dianalisis secara *Multi-Dimensional Scaling* (MDS) menggunakan aplikasi RAPFISH yang berbasis Ms. Excel. Hasil penelitian menunjukkan Indeks keberlanjutan KJA sebesar 49,567 yang termasuk kategori kurang berkelanjutan. Atribut paling signifikan terhadap keberlanjutan KJA adalah kesuburan perairan (*leverage* = 4,129). Disimpulkan bahwa pengelolaan KJA di Danau Rawa Pening belum sepenuhnya dilakukan berdasarkan prinsip pengelolaan yang berkelanjutan. Oleh karena itu, diperlukan perumusan strategi pengelolaan yang berfokus pada pengendalian kesuburan perairan untuk mendukung keberlanjutan KJA.

Kata kunci: KJA, RAPFISH, perikanan berkelanjutan, Rawa Pening, eutrofikasi

Abstract.

Floating net cages (KJA) aquaculture is an important livelihood source for local community, but it also contributes to eutrophication in Rawa Pening Lake. So, it is necessary to ensure that KJA management is carried out based on the sustainable development principles to minimize the environmental impacts. This study aims to assess the sustainability status of KJA management in Rawa Pening Lake from the ecological dimension. Data were collected through interviews, direct observation, direct measurement and literature study based on following attributes; water quality, water fertility, environmental conditions, biosecurity and fish health. Then, data that has been scored were analyzed by Multi-Dimensional Scaling (MDS) using the RAPFISH application embedded in Ms. Excel). The results showed the KJA sustainability index is 49,567 (poor sustainability category). The most significant attribute of KJA sustainability is water nutrient content, i.e. N:P ratio (leverage = 4,129). It is concluded that the management of KJA in Rawa Pening Lake has been not carried out based on sustainable aquaculture management principles. Therefore, management strategies focusing on controlling water nutrient levels are urgently required to ensure the sustainability of KJA in Rawa Pening Lake.

Keywords: KJA, RAPFISH, sustainable aquaculture, Rawa Pening, eutrophication

1. PENDAHULUAN

Danau Rawa Pening merupakan ekosistem air tawar lentik semi alami yang terletak di Kabupaten Semarang. *Inlet* Danau Rawa Pening adalah 16 sungai yang terletak di 9 sub Daerah Aliran Sungai dengan satu *outlet* di Sungai Tuntang (Soeprbowati dan Suedy 2010). Danau tersebut secara geografis terletak di 7°04' LS-7°30' LS dan 110°24'46" BT-110°49'06" BT. Danau Rawa Pening mempunyai kedalaman minimal 65 cm dan kedalaman maksimal 550 cm.

* Korespondensi Penulis
Email : desti.cahyaningrum@uksw.edu

Daya tampung maksimal danau adalah sekitar 65 juta m³ dan minimal sekitar 25 juta m³, serta luas genangan maksimum sekitar 2.770 Ha dan minimum 1.760 Ha (Utomo 2015). Fungsi utama Danau Rawa Pening yaitu untuk menahan dan menampung laju aliran air permukaan yang kemudian digunakan untuk berbagai keperluan masyarakat antara lain: (1) pasokan air untuk Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) Jelok yang merupakan bagian dari jaringan listrik Jawa-Bali; (2) irigasi pertanian bagi Kabupaten Semarang, Demak dan Grobogan; (3) kegiatan pariwisata; (4) kegiatan perikanan darat baik perikanan alami maupun perikanan budidaya; (5) penyedia air baku dan air untuk industri (Machbub *et al.* 2012). Oleh karena itu danau Rawa Pening menjadi sangat krusial bagi kehidupan masyarakat di sekitarnya.

Meskipun demikian, terdapat permasalahan eutrofikasi di Danau Rawa Pening. Eutrofikasi merupakan proses pengayaan perairan oleh unsur hara, khususnya nitrogen (N) dan fosfor (P) yang mengakibatkan pertumbuhan tidak terkontrol dari organisme fotosintetik danau (Sulastri *et al.* 2016). Tingginya populasi organisme fotosintetik seperti alga dan makrofit pada akhirnya akan meningkatkan beban cemaran organik di badan perairan yang memerlukan oksigen untuk dekomposisinya. Hal ini dapat menyebabkan penurunan oksigen terlarut yang memicu terjadinya kematian massal organisme heterotrof serta meningkatkan laju sedimentasi di badan air. Akibatnya, ekosistem danau akan mengalami suksesi dari danau autotrof yang didominasi oleh fitoplankton menjadi danau heterotrofik yang didominasi oleh mikroorganisme seperti protozoa (Qin *et al.* 2013).

Akinnawo (2023) menjelaskan bahwa salah satu sumber pencemar N dan P di ekosistem danau adalah limbah budidaya perikanan, termasuk aktivitas Keramba Jaring Apung (KJA). Hasil penelitian Kurniati *et al.* (2021) menunjukkan bahwa 84,20% beban cemaran total N dan 91,83% beban cemaran total P di Danau Maninjau berasal dari aktivitas KJA. Adhar *et al.* (2023) juga melaporkan bahwa aktivitas KJA di Danau Laut Tawar menyebabkan adanya cemaran P sebesar 5,25 ton/tahun dan telah melebihi daya tampung beban cemaran P di lokasi tersebut yang hanya sebesar 1,04 ton/tahun. Sementara itu, potensi beban cemaran limbah KJA di Danau Rawa Pening berupa sisa pakan mencapai 4,07 kg N/hari, 37,88 kg P/hari, dan 95,01 kg BOD/hari yang seluruhnya telah melebihi daya tampung beban cemaran maksimal Danau Rawa Pening (Machbub *et al.* 2012).

Berdasarkan permasalahan tersebut, solusi yang telah diupayakan oleh pemerintah adalah dengan melaksanakan revitalisasi Danau Rawa Pening pasca penetapannya sebagai Danau Prioritas Nasional (DPN). Aktivitas revitalisasi masih terus berlangsung hingga saat ini di bawah koordinasi BBWS Pemali Juana. Sodikin (2024) menyebutkan bahwa tindak lanjut BBWS Pemali Juana dalam rangka revitalisasi Danau Rawa Pening pada aras kebijakan adalah menyediakan sarana dan prasarana untuk pengendalian sedimen di bagian hulu danau, menetapkan sempadan danau, serta penataan aset melalui sertifikasi. Pada aras operasional, beberapa hal yang sudah dilakukan adalah pembangunan cekdam, pengerukan sedimen, pembersihan eceng gondok, penertiban KJA, serta penertiban batas sempadan. Menurut Wulandari (2022), revitalisasi telah berhasil menertibkan KJA yang awalnya menyebar di seluruh area Danau Rawa Pening dengan luas mencapai 55 hektar menjadi terlokalisasi di tepi danau di setiap kecamatan dengan luasan yang berhasil dikurangi sebesar 35 hektar.

Solusi lain yang perlu dipertimbangkan dalam menangani permasalahan lingkungan di Danau Rawa Pening adalah penerapan prinsip pengelolaan berkelanjutan pada aktivitas budidaya sistem KJA di lokasi tersebut. Pengelolaan KJA secara berkelanjutan merupakan solusi preventif jangka panjang yang bertujuan untuk memastikan bahwa sistem perikanan budidaya dijalankan dengan cara yang berwawasan lingkungan dan berkelanjutan. Pengelolaan KJA yang berkelanjutan dapat diwujudkan melalui manajemen pakan yang baik, penataan dan perencanaan luasan KJA maupun padat tebar yang sesuai dengan daya tampung maksimal beban cemaran, serta tata laksana budidaya yang ramah lingkungan.

Pada kasus ini, pengelolaan berkelanjutan salah satunya dapat diwujudkan dengan memastikan bahwa KJA yang beroperasi di Danau Rawa Pening telah sesuai dengan hasil kajian mengenai Alokasi Daya Tampung Beban Pencemaran Air (DTBPA) untuk aktivitas budidaya ikan. Berdasarkan kajian tersebut, DTBPA Danau Rawa untuk kegiatan budidaya perikanan meliputi batas maksimal cemaran fosfat sebesar 4.060 kg P/tahun, jumlah maksimum 189 petak KJA (0,08% dari luas danau), produksi ikan sebesar 1 ton ikan/petak/tahun, serta asumsi manajemen kebutuhan pakan sebanyak 245 ton/tahun dengan *Feed Conversion Ratio* (FCR) 1,3 (Machbub *et al.* 2012).

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengkaji seberapa jauh prinsip pengelolaan berkelanjutan sudah diterapkan pada aktivitas budidaya sistem KJA di Danau Rawa Pening melalui parameter indeks keberlanjutan. Indeks keberlanjutan merupakan suatu nilai yang dirumuskan melalui proses ordinasi hasil *scoring* dari kondisi yang ada yang menggambarkan status keberlanjutan suatu objek kajian. Indeks keberlanjutan dapat ditentukan melalui pendekatan analisis *Rapid Appraisal for Fisheries* (RAPFISH). Fauzi dan Anna (2005) menjelaskan bahwa RAPFISH merupakan metode yang dikembangkan untuk mengevaluasi keberlanjutan suatu perikanan tangkap secara multidisipliner berdasarkan teknik ordinasi *Multi-Dimensional Scaling* (MDS).

Pada penelitian ini, indeks keberlanjutan KJA di Danau Rawa Pening dirumuskan melalui pendekatan RAPFISH yang modifikasi. Modifikasi dilakukan pada atribut yang digunakan untuk melakukan penilaian terhadap berbagai kondisi *existing* KJA, yaitu kualitas perairan, kesuburan perairan, kondisi lingkungan, penerapan biosekuritas, serta kesehatan ikan. Informasi mengenai status keberlanjutan KJA Danau Rawa Pening pada dimensi ekologi dapat bermanfaat dalam meninjau ulang pengelolaan yang ada serta sebagai dasar perumusan strategi pengelolaan yang lebih baik.

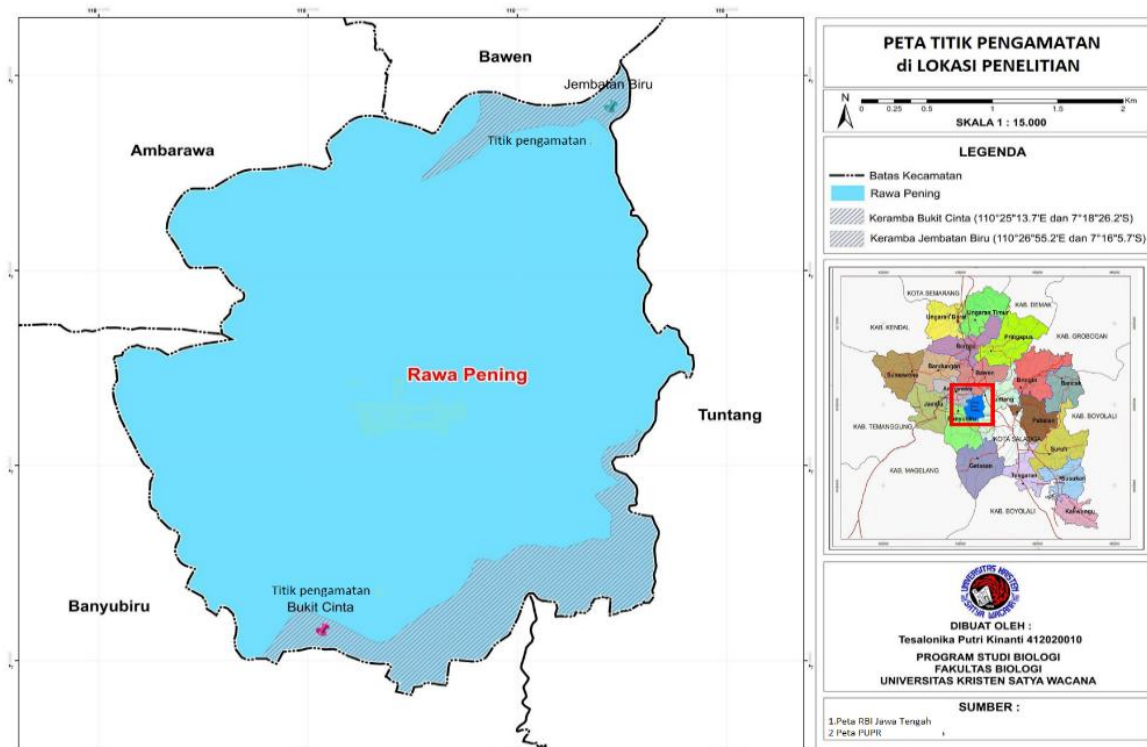
2. METODOLOGI

2.1. Lokasi kajian dan waktu penelitian

Penelitian dilaksanakan pada Bulan September-November 2023. Penelitian dilakukan di Danau Rawa Pening Kabupaten Semarang, dengan sampel penelitian adalah unit KJA di sekitar daerah Jembatan Biru (Desa Sumurup-Kecamatan Bawen) dan Bukit Cinta (Desa Kebondowo-Kecamatan Banyubiru) (**Gambar 1**). Penentuan unit KJA sampel dilakukan menggunakan metode *purposive random sampling* berdasarkan lokasi KJA, dengan total unit KJA sampel adalah sejumlah 240 petak KJA yang ditentukan berdasarkan metode Slovin (Riyanto dan Hatmawan 2020) seperti yang disajikan pada **Persamaan 1**.

$$n = \frac{N}{(1+N(e)^2)} \dots\dots\dots(1)$$

Keterangan:
n = ukuran sampel/jumlah responden,
N= ukuran populasi,
e = 0,05.



Gambar 1. Lokasi sampel penelitian KJA Danau Rawa Pening.

2.2. Prosedur analisis data

Penelitian ini merupakan penelitian survei dengan pendekatan analisis deskriptif kuantitatif. Status keberlanjutan KJA pada dimensi ekologi disimpulkan melalui indeks keberlanjutan berdasarkan hasil ordinasasi MDS menggunakan pendekatan metode RAPPFISH yang dimodifikasi. Modifikasi pada metode ini dapat dilakukan pada atribut dan indikator yang digunakan (Pitcher and Preikshot 2001). Tahap pengumpulan data pada metode RAPPFISH yaitu meliputi penentuan atribut dan indikator penilaian pada dimensi ekologi serta penilaian setiap indikator pada atribut menggunakan skala *likert* (proses *scoring*). Atribut dan indikator yang digunakan dalam penelitian ini ditentukan berdasarkan studi literatur terkait KJA berkelanjutan. Data kemudian dikumpulkan melalui metode wawancara, observasi langsung, serta pengukuran secara *ex situ* maupun *in situ* berdasarkan atribut dan indikator yang telah dikembangkan (**Tabel 1**).

Tabel 1. Atribut dan indikator beserta metode pengumpulan data.

Atribut	Indikator	Metode pengukuran	Penilaian			Sumber acuan
			Skor 1 (Buruk)	Skor 2 (Sedang)	Skor 3 (Baik)	
Kualitas perairan	<i>Biological Oxygen Demand</i> (BOD)	Metode titrasi	>6 mg/L	6 mg/L	<6 mg/L	PP No. 22 2021*
	<i>Dissolved Oxygen</i> (DO)	Metode titrasi	<3 mg/L	3 mg/L	>3 mg/L	PP No. 22 2021*
	Nitrogen (N)	Pengukuran langsung	>1,9 mg/L	1,9 mg/L	< 1,9 mg/L	PP No. 22 2021*
	Fosfat (P)	Pengukuran langsung	>0,1 mg/L	0,1 mg/L	<0,1 mg/L	PP No. 22 2021*
	pH	Pengukuran langsung	>6-9	<6-9	6-9	PP No. 22 2021*
	<i>Total Dissolved Solid</i> (TDS)	Pengukuran langsung	>1000 ppm	1000 ppm	<1000 ppm	PP No. 22 2021*; Safitri <i>et al.</i> 2022
	Kedalaman	Pengukuran langsung	<2 m	2-3 m	>3m	Harmilia <i>et al.</i> 2022
	Kecerahan / Transparansi	Pengukuran langsung	<2,5m	2,5m	>2,5m	PP No. 22 2021*
Kesuburan Perairan	Perbandingan nilai P dan N	Pengukuran langsung	N:P < 5:1	N:P > 5:2	N:P =16:1	Permatasari 2017; Hoa and Nhi 2020
Kondisi Lingkungan	Frekuensi Kejadian <i>Upwelling</i>	Wawancara /observasi langsung	> 1 kali/tahun	1 kali /tahun	Tidak pernah	Putri <i>et al.</i> 2019
	Masuknya sumber pencemar	Observasi langsung	Berasal dari KJA dan sumber lain yang signifikan	Berasal dari KJA itu sendiri	Tidak ada limbah yang masuk	FAO 2010
	Kejadian kekeringan	Observasi langsung	Sering (>2 kali)	Kadang-kadang (1 kali)	Tidak pernah	FAO 2010
Biosekuritas	Pengendalian kegiatan budidaya	Observasi langsung	Tinggi (Kegiatan tidak terkendali)	Rendah (Kegiatan lebih terkendali)	Tidak ada ancaman (terkendali)	Wibowo <i>et al.</i> 2015; Can <i>et al.</i> 2023
	Pengolahan limbah budidaya	Observasi langsung	Tidak lakukan	Dilakukan tapi tidak dengan baik	Dilakukan dengan baik	Wibowo <i>et al.</i> 2015
Kesehatan ikan	Kejadian serangan penyakit	Wawancara/ observasi	Tinggi (gagal panen/ >50% ikan)	Sedang <50 %	Tidak terserang	Sutisna <i>et al.</i> 2020
	Tingkat Keberlangsungan Hidup Ikan (SR)	Wawancara/ Observasi perhitungan langsung	<75%	75%	>75%	Mokoginta <i>et al.</i> 2022

*Baku mutu air danau dan sejenisnya (kelas 3)

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Kondisi umum pengelolaan unit KJA sampel

Hasil observasi dan wawancara menunjukkan bahwa KJA yang beroperasi di Danau Rawa Pening, tepatnya di sekitar wilayah Jembatan Biru dan Bukit Cinta, dibangun dengan teknologi sederhana rakit bambu (**Gambar 2**). Pemeliharaan yang dilakukan adalah dengan mengganti bambu yang digunakan jika telah lapuk, rata-rata dalam selang waktu sekali setiap tahun. Luasan petak keramba umumnya berukuran 4 x 6 m hingga 8 x 8 m. Ikan yang dibudidayakan dalam KJA adalah ikan konsumsi, antara lain ikan nila (*Oreochromis niloticus*), ikan mujair (*Oreochromis mossambicus*) dan ikan bawal (*Colossoma macropomum*) dengan padat tebar rata-rata 1.500 benih per petak KJA. Lama waktu pemeliharaan ikan sekitar 3-6 bulan yang bergantung pada keinginan nelayan untuk memanen ikan. Pemanenan ikan dilakukan secara insidental ketika nelayan memerlukan penghasilan tambahan, biasanya pada tahun baru dan hari raya Idul Fitri.



Gambar 2. Kondisi unit KJA sampel di Danau Rawa Pening.

Manajemen pakan pada unit KJA sampel belum mengikuti prinsip pengelolaan berkelanjutan. Pemberian pakan dilakukan dengan frekuensi satu hingga dua kali per hari, umumnya pada pagi dan sore hari, bahkan beberapa pembudidaya menyatakan bahwa pakan diberikan secara tidak terjadwal sesuai ketersediaan waktu. Jenis pakan yang digunakan berupa pelet komersial dengan merek *Ruby HG-3*, *Onyx* dan *Hiprofit 781* (**Gambar 3**). Selain itu, beberapa nelayan juga memberikan pakan berupa sisa nasi dan sayuran (seperti kembang kol dan daun pepaya).

Penentuan jumlah pakan yang diberikan hanya berdasarkan perkiraan tanpa mengacu pada ketentuan *feeding rate*. *Feeding rate* merupakan persentase jumlah pakan yang diberikan berdasarkan biomassa ikan. Pencatatan jumlah pakan dan waktu pemberian pakan setiap hari juga tidak dilakukan. Padahal, kuantitas pakan (*feeding rate*) dan frekuensi pakan (*feeding frequency*) merupakan faktor utama yang mempengaruhi efisiensi dan keberhasilan budidaya perikanan. El-Hack *et al.* (2022) menjelaskan bahwa *feeding frequencies* yang lebih sering dan teratur dapat menurunkan perilaku agresif ikan sehingga menghasilkan pertumbuhan ikan yang lebih cepat dan seragam, sedangkan *feeding rate* yang optimal dapat meningkatkan efisiensi pertumbuhan baik dari aspek biaya produksi maupun dampak lingkungan. Selain itu, Akbar *et al.* (2020) melaporkan bahwa pemberian pakan ikan gabus (*Channa striata*) dengan *feeding frequency* 4 kali/hari dan *feeding rate* 7% mampu menghasilkan pertumbuhan ikan yang paling efisien yaitu dengan FCR sekitar 2,20 dan bobot ikan yang mencapai sekitar 114 gram.



Gambar 3. Pakan yang digunakan pada unit KJA sampel di Danau Rawa Pening: (A) merk *Ruby Hg-3*, (B) merk *Onyx*, (C) merk *Hiprofit 781*.

3.2. Indeks keberlanjutan KJA di Danau Rawa Pening

Hasil *scoring* menunjukkan bahwa sebagian indikator dalam atribut kualitas perairan pada unit KJA sampel mendapat skor tinggi (3), kecuali pada indikator kadar nitrogen (N), fosfat (P), kecerahan dan kedalaman perairan. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa rata-rata nilai DO, BOD, pH dan TDS masih memenuhi standar baku mutu air kelas 3 kategori danau dan sejenisnya berdasarkan Lampiran VI

Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan, Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup. Namun demikian, indikator fosfat memperoleh skor rendah karena rata-rata konsentrasi P pada unit KJA sampel mencapai 0,51 mg/L dan telah melampaui baku mutu yang ditetapkan (0,1 mg/L), sehingga mengindikasikan terjadinya pencemaran fosfat.

Hal ini sejalan dengan hasil penelitian yang menunjukkan bahwa potensi jumlah cemaran P yang berasal dari limbah budidaya ikan di Danau Rawa Pening sebesar 13.826,2 kg/tahun dan telah melebihi daya tampung beban cemaran P di danau tersebut yang hanya sebesar 6.930 kg/tahun (Machbub *et al.* 2012; Samudra *et al.* 2013). Tingginya cemaran P diduga merupakan penyebab terjadinya eutrofikasi di Danau Rawa Pening yang pada akhirnya mengakibatkan pendangkalan danau. Sejalan dengan hal tersebut, kedalaman perairan di lokasi KJA sampel hanya mencapai rata-rata 1,75 m, sehingga memperoleh skor rendah, sedangkan kedalaman ideal perairan untuk aktivitas budidaya berkisar antara 2–3 m dengan kedalaman optimal 5–7 m (Harmilia *et al.* 2022).

Penelitian ini juga mengkaji tingkat kesuburan perairan yang mendukung kelimpahan fitoplankton melalui pendekatan rasio N dan P (Rasio *Redfield*). Hasil penelitian Tambaru *et al.* (2022) menunjukkan bahwa sebesar 50,7% perubahan kelimpahan fitoplankton di ekosistem mangrove Lantebung Makassar dipengaruhi oleh perubahan rasio *Redfield*. Rasio *Redfield* yang optimal bagi pertumbuhan fitoplankton adalah N:P=16:1 (Liu *et al.* 2011). Tingginya kelimpahan fitoplankton di suatu badan perairan, yaitu >15.000 ind/L mengindikasikan bahwa badan perairan tersebut telah berada pada kondisi eutrofik (Tyas *et al.* 2017). Di sisi lain, kelimpahan fitoplankton dapat menguntungkan bagi sistem budidaya karena menyediakan sumber pakan alami bagi ikan. Hasil penelitian Permatasari (2017) menunjukkan perlakuan dengan rasio N:P = 16:1 menyebabkan melimpahnya pertumbuhan *Chlorophyta* yang merupakan pakan alami bagi ikan. Sebaliknya, rasio N:P ≤ 5 menyebabkan adanya dominansi *cyanobacteria* yang justru merugikan bagi lingkungan maupun budidaya perikanan (Hoa and Nhi 2020). Pada unit KJA sampel dalam penelitian ini nilai N:P = 3,9 : 1, sehingga diduga kelimpahan plankton di lokasi tersebut didominasi oleh *cyanobacteria*. Dengan tingkat kesuburan dan kualitas air yang demikian, rata-rata kelangsungan hidup ikan (SR) yang dipelihara dalam unit KJA

sampel hanya mencapai 74% dan tergolong sedang (**Tabel 2**). Menurut Badan Standarisasi Nasional, SR untuk produksi ikan nila (*Oreochromis niloticus*) yang baik adalah $\geq 75\%$ (SNI 6141:2009).

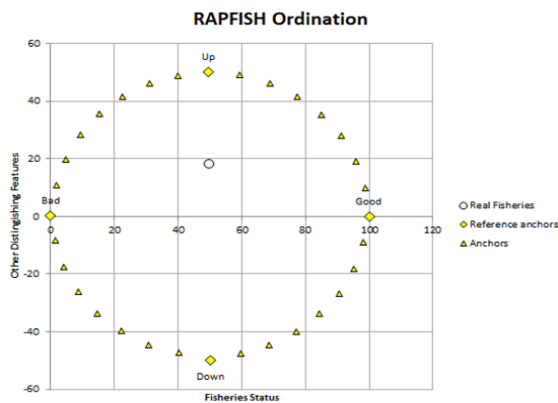
Hasil pengamatan dan wawancara juga menunjukkan bahwa unit KJA sampel belum memiliki sistem pengelolaan kualitas air dan limbah secara khusus, belum menerapkan biosekuritas, penanganan terhadap penyakit dilakukan dengan pemberian obat antibiotik super tetra, serta pemberian pakan yang masih berdasarkan insting dan pengalaman nelayan. Oleh karena itu, skor pada atribut yang terkait dengan berbagai hal tersebut berada pada kategori rendah hingga sedang.

Tabel 2. Hasil *scoring* setiap indikator pada atribut penelitian.

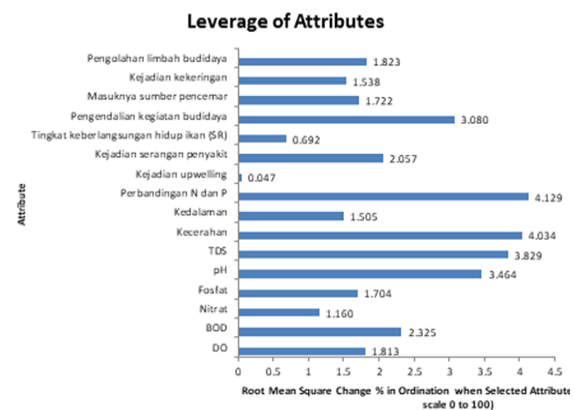
No.	Indikator	Rata-Rata Nilai Hasil Penelitian	Baku Mutu*	Hasil Scoring
A. Atribut Kualitas Air				
1	DO (mg/L)	3,652 mg/L	> 3 mg/L	3
2	BOD (mg/L)	0,783 mg/L	< 6 mg/L	3
3	N (mg/L)	2,10 mg/L	< 1,9 mg/L	1
4	P (mg/L)	0,51 mg/L	<0,1 mg/L	1
5	pH	7,97	6-9	3
6	TDS	152 ppm	<1000ppm	3
7	Kecerahan (meter)	0,382 m	>2,5 m	1
8	Kedalaman (meter)	1,75 m	>3 m	1,66
B. Atribut Kesuburan Perairan				
9	Perbandingan N dan P	N:P = 3,9 : 1	N:P =16:1	1
C. Atribut Kondisi Lingkungan				
10	Frekuensi kejadian <i>upwelling</i>	1 kali/tahun	Tidak pernah	2
11	Masuknya sumber pencemar	Berasal dari KJA itu sendiri	Tidak ada limbah yang masuk	1,66
12	Kejadian kekeringan	1 kejadian/tahun	Tidak pernah	2
D. Atribut Biosekuritas				
13	Pengendalian kegiatan budidaya	Tidak dikendalikan (tidak ada penerapan <i>biosecurity</i> secara spesifik)	Tidak ada ancaman (terkendali)	1
14	Pengolahan limbah budidaya	Tidak ada	Dilakukan dengan baik	1
E. Atribut Kesehatan Ikan				
15	Kejadian serangan penyakit	1,5%	Tidak terserang	1,5
16	Tingkat keberlangsungan hidup ikan (SR- %)	74%	>75%	2,3

*Baku mutu mengacu pada baku mutu air danau dan sejenisnya (kelas 3).

Hasil ordinasasi MDS terhadap keseluruhan skor indikator pada setiap atribut menunjukkan nilai 49,567 yang mengartikan bahwa pengelolaan pada unit KJA sampel ditinjau pada dimensi ekologi berada pada kategori kurang berkelanjutan (**Gambar 4**). Model MDS yang dibangun dalam penelitian ini adalah baik, kesalahan analisis kecil dan dapat mewakili kondisi sebenarnya. Hal ini terlihat dari nilai *stress* = 0,129 dan nilai koefisien determinasi (R^2) = 0,955. Kategori kurang berkelanjutan pada aktivitas budidaya perikanan di Danau Rawa Pening terutama disebabkan karena atribut kesuburan perairan (perbandingan N:P) yang memiliki skor rendah. Hal ini didukung dengan hasil analisis sensitivitas (*leverage analysis*) yang menunjukkan bahwa atribut paling sensitif dalam model MDS yang dibangun adalah atribut kesuburan perairan, yaitu perbandingan N dan P dengan nilai *leverage* 4,129 (**Gambar 5**).



Gambar 4. Hasil ordinasasi MDS keberlanjutan KJA di Danau Rawa Pening.



Gambar 5. Hasil analisis sensitivitas pada model MDS keberlanjutan KJA di Danau Rawa Pening.

Selain itu, perlu dicermati bahwa indikator kadar N, P, dan kedalaman telah menunjukkan adanya permasalahan eutrofikasi di KJA sampel. Berbagai atribut lain yang menunjukkan kondisi pengelolaan KJA juga mendapat skor yang relatif rendah. Oleh karena itu, hasil indeks keberlanjutan dalam penelitian ini mengindikasikan bahwa pengelolaan KJA di Danau Rawa Pening belum dapat mewujudkan budidaya perikanan yang berkelanjutan. Masih terdapat ancaman kerusakan ekosistem yang akhirnya dapat membuat KJA tidak lagi beroperasi apabila sistem pengelolaan KJA yang ada saat ini tetap dipertahankan. Hal ini dapat dicegah dengan upaya peningkatan sistem pengelolaan menjadi lebih ramah lingkungan.

Budidaya perikanan berkelanjutan sendiri merupakan aktivitas budidaya perikanan yang dikelola sedemikian rupa sehingga bersifat ramah lingkungan dalam rangka memperoleh hasil produksi secara optimal tanpa harus menyebabkan dampak buruk bagi lingkungan pada masa sekarang hingga pada masa mendatang (Lowanshi *et al.* 2023). Kadarusman (2019) menyebutkan suatu aktivitas budidaya perikanan dinilai berkelanjutan jika tidak merusak lingkungan, sesuai secara teknis, memberi keuntungan ekonomi, serta dapat diterima oleh masyarakat. Kedua konsep tersebut sejalan dengan definisi pembangunan berkelanjutan yang bertujuan untuk memenuhi kebutuhan masa kini tanpa mengorbankan kemampuan generasi mendatang.

Dalam konteks Danau Rawa Pening, pengelolaan keramba jaring apung (KJA) masih memerlukan peningkatan agar selaras dengan prinsip perikanan berkelanjutan, karena saat ini umumnya masih menerapkan sistem pembesaran ikan tradisional. Menurut Kadarusman (2019), pembesaran ikan sistem tradisional ditandai dengan luasan lahan (dalam hal ini petak keramba) yang tidak teratur, konstruksi sederhana, keterbatasan sarana budidaya, padat tebar rendah, pakan alami, sistem aerasi alami, tidak tersedianya sistem pengolahan limbah, tidak ada pengaturan secara khusus terhadap sumber air dan kualitas air, tidak ada penerapan sistem biosekuritas, penanganan terhadap penyakit dilakukan dengan antibiotik, serta panen dilakukan berdasarkan musim budidaya. Berdasarkan hasil observasi dan wawancara, disimpulkan bahwa tidak adanya sistem pengelolaan kualitas air dan limbah, tidak adanya penerapan biosekuritas, penanganan penyakit menggunakan antibiotik, serta pemberian pakan yang hanya berdasarkan insting dan pengalaman nelayan, merupakan hal yang perlu diperbaiki dalam pengelolaan KJA di Danau Rawa Pening agar semakin berkelanjutan.

Menurut Padhan (2022), budidaya perikanan berkelanjutan dapat tercapai dengan adanya penerapan sistem pengelolaan yang mencakup penyusunan strategi mitigasi pencemaran dan identifikasi sumbernya, pemanfaatan energi terbarukan, pengurangan ketergantungan terhadap pakan berbasis tepung ikan, promosi praktik budidaya berkelanjutan, penerapan budidaya perikanan organik, serta investasi pada teknologi ramah lingkungan seperti *Integrated Multi-Trophic Aquaculture* (IMTA), *In-Pond Raceway System* (IPRS), *Recirculating Aquaculture System* (RAS) dan *Biofloc Technology* (BFT).

Salah satu contoh alternatif teknologi ramah lingkungan pada budidaya dengan sistem KJA adalah *Integrated Multi-Trophic Aquaculture* (IMTA) yang dipadukan dengan *Stratified Double Net Rounded Cage* (SDFNC). Pada prinsipnya, IMTA menggabungkan budidaya beberapa spesies akuatik pada tingkat trofik berbeda di suatu lokasi yang sama agar limbah yang dihasilkan oleh spesies tertentu dapat menjadi masukan nutrisi bagi spesies lain pada tingkat trofik yang berbeda (Sukhdhane *et al.* 2018). Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem IMTA pada budidaya ikan nila (*Oreochromis niloticus*), ikan lele (*Clarias sp.*) dan tanaman mata lele (*Lemna perpusilla*) dapat mengurangi limbah budidaya hingga >70% serta meningkatkan efisiensi biaya produksi ikan Nila sebesar 20% dan ikan Lele sebesar 30% sehingga lebih berkelanjutan (LIPI 2020). Sementara itu, SDFNC adalah desain keramba bertingkat yang memungkinkan untuk membudidayakan beberapa jenis spesies berbeda dalam suatu lokasi yang sama. Triarso dan Putro (2019) menyatakan bahwa penerapan prinsip IMTA pada sistem budidaya kerapu cantang (*Epinephellus fuscoguttatus-lanceolatus*), rumput laut, kakap putih (*Lates calcarifer*), teripang dan bintang laut yang dikembangkan menggunakan desain keramba SDFNC di Kepulauan Karimunjawa, Jepara, terbukti mampu meningkatkan produktivitas budidaya sekaligus menekan dampak lingkungan, sehingga mendukung keberlanjutan sistem budidaya.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Status keberlanjutan KJA di Danau Rawa Pening termasuk kategori kurang berkelanjutan (indeks keberlanjutan 49,567). Faktor yang paling mempengaruhi status keberlanjutan KJA di Danau Rawa Pening adalah kesuburan perairan (perbandingan nilai N dan P). Dengan demikian, pengelolaan KJA di Danau Rawa Pening belum sepenuhnya dilakukan berdasarkan prinsip pengelolaan yang berkelanjutan. Perlu dirumuskan strategi-strategi pengelolaan yang menjamin keberlanjutan KJA Danau Rawa Pening tersebut, terutama dalam memonitor dan mengelola kesuburan perairan.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Adhar S, Erlangga E, Rusydi R, Mainisa M, Prasetya YA dan Zaitun U. 2023. Analisis daya tampung beban pencemaran fosfor dan dampak keramba jaring apung di danau laut tawar, Aceh Tengah. *Jurnal Riset Akuakultur* 18(2):117–127.
- Akbar C, Utomo DSC, Hudaidah S dan Setyawan A. 2020. Manajemen waktu dan jumlah pemberian pakan dalam meningkatkan pertumbuhan dan sintasan ikan gabus, *Channa striata* (Bloch,1793). *Journal of Aquatropica Asia* 5(1):1-8.
- Akinnowo SO. 2023. Eutrophication: causes, consequences, physical, chemical and biological techniques for mitigation strategies. *Environmental Challenges* 12(100733):1–18.
- Can E, Austin B, Steinberg CEW, Carboni C, Sağlam N, Thompson K, Yiğit M and Can SS. 2023. Best practices for fish biosecurity , well-being and sustainable aquaculture. *Sustainable Aquatic Research* 2 (3):221–267.
- El-Hack MEA, El-Saadony MT, Nader MMS, El-Tahan AM, Soliman SM and Khafaga AF. 2022. Effect of environmental factors on growth performance of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *International Journal of Biometeorology* 66(11):2183–2194.
- [FAO] Food And Agriculture Organization. 2010. Aquaculture development: Ecosystem approach to aquaculture in FAO technical guidelines for responsible fisheries (Vol. 5 Suppl. 4.). FAO. Rome.
- Fauzi A dan Anna S. 2005. Permodelan sumber daya perikanan dan kelautan : untuk analisis kebijakan. Gramedia Pustaka Utama. Jakarta
- Harmilia ED, Ma'ruf I dan Meiwinda ER. 2022. Analisis kesesuaian lokasi budidaya ikan menggunakan keramba jaring apung di Anak Sungai Komering Banyuasin. *Jurnal Akuakultur Rawa Indonesia* 10(1):1–13.
- Hoa NV and Nhi DT. 2020. Determination of an appropriate ratio of N : P for optimisation of algal development in fertilizer ponds. *Bioflux* 13(6):3727–3742.
- Kadariusman, Rachmawati R, Setyawidati NAR, Sektiana SP, Albasri, Erfind Nurdin RFTH, Saputra RSH, Muhammad DN, Nursid dan Purbani D. 2019. Buku besar maritim Indonesia: sumber daya hayati maritim. Amafrad Press. Jakarta.

- Kurniati RI, Komala PS dan Zulkarnaini. 2021. Analisis beban pencemar total nitrogen dan total fosfat akibat aktivitas antropogenik di Danau Maninjau. *Jurnal Ilmu Lingkungan* 19(2):355–364.
- [LIPI] Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia. 2020. Integrated multi trophic aquaculture (IMTA): budidaya ikan dan tumbuhan air dalam sistem perikanan terpadu [internet]. Tersedia di: https://lipindonesia.com/limnologi-sub/newsdetail_id-1019/.
- Liu Y, Li L and Jia R. 2011. The optimum resource ratio (N:P) for the growth of *Microcystis aeruginosa* with abundant nutrients. *Procedia Environmental Sciences* 10(Part C): 2134–2140.
- Lowanshi A, Lal J, Brar KS, SahilS, Mogalekar HS, Nayak SK and Singh SK. 2023. Periphyton-based aquaculture system. *Journal of Experimental Zoology India* 26(2):1569–1574.
- Machbub B, Suwanto A, Harahap TN, Manurung H, Retnowati I, Rachmiati S dan Rustadi WC. 2012. Daya tampung beban pencemaran dan zonasi Danau Rawa Pening. Kementerian Lingkungan Hidup. Jakarta.
- Mokoginta FL, Singjal J, Hengky dan Pangemanan NP. 2022. Pertumbuhan dan kelangsungan hidup ikan Nila (*Oreochromis niloticus*) yang diberi pakan komersil dengan penambahan effective microorganism-4. *Budaya Perairan* 10(2):166–176.
- Padhan B. 2022. Importance of sustainable aquaculture and its practices. *Agriallis* 3(5):13–19.
- Permatasari DI .2017. Pengaruh perbedaan rasio N dan P terhadap struktur komunitas fitoplankton [Undergraduate Thesis]. Department of Aquatic Resources Management, Faculty of Fisheries and Marine Sciences, IPB University. Bogor.
- Pitcher TJ and Preikshot D. 2001. RAPFISH: a rapid appraisal technique to evaluate the sustainability status of fisheries. *Fisheries Research* 49(3):255–270.
- PP (Peraturan Pemerintah) Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 Tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup.

- Putri MA, Affandi R, Setyobudiandi I dan Yulianto G. 2019. Status keberlanjutan perikanan budidaya keramba jaring apung (KJA) di waduk Jatiluhur, Kabupaten Purwakarta. *Journal of Natural Resources and Environmental Management* 9(3): 771-786.
- Qin B, Gao G, Zhu G, Zhang Y, Song Y, Tang X, Xu H and Deng J. 2013. Lake eutrophication and its ecosystem response. *Chinese Science Bulletin* 58(9):961-970.
- Riyanto S dan Hatmawan AA. 2020. Metode riset penelitian kuantitatif: penelitian di bidang manajemen, teknik, pendidikan dan eksperimen. Deepublish. Yogyakarta.
- Safitri RN, Ningtyas SRA, Hermawan WG, Pramitasari TA dan Rachmawati S. 2022. Dampak kualitas air pada kawasan keramba budidaya ikan air tawar di waduk cengklik, Boyolali. *Envoist Journal* 2(2):84-91.
- Samudra SR, Soeprobawati TR dan Izzati M. 2013. Daya tampung beban pencemaran fosfor untuk budidaya perikanan Danau Rawa Pening. [Prosiding]. Prosiding dalam Simposium Nasional Penyelamatan Ekosistem Danau Rawapening Kementerian Lingkungan Hidup dan Universitas Diponegoro.
- Standar Nasional Indonesia (SNI) 6141:2009 tentang produksi benih ikan nila hitam (*Oreochromis niloticus* Bleeker) kelas benih sebar.
- Sodikin MA. 2024. Revitalisasi Rawa Pening: danau prioritas nasional & perlawanan masyarakat [Internet]. Tersedia di: <https://www.kompasiana.com/maulanaakbar7829/65a3e66412d50f0c504f7684/revitalisasi-rawa-pening-danau-prioritas-nasional-perlawanan-masyarakat>.
- Soeprobawati TR dan Suedy SWA. 2010. Status trofik Danau Rawa Pening dan solusi pengelolaannya. *Jurnal Sains & Matematika* 18(2005):158-169.
- Sukhdhane KS, Kripa V, Divu D, Vase VK and Mojjada SK. 2018. Integrated multi-trophic aquaculture systems: a solution for sustainability. *Aquaculture Asia Magazine* 22(4):26-29.
- Sulastri, Henny C dan Handoko U. 2016. Kondisi lingkungan dan status trofik Danau Rawa Pening di Jawa Tengah. *Oseanologi Dan Limnologi Di Indonesia* 1(3):23-38.
- Sutisna E, Affandi R, Kamal MM dan Yulianto G. 2020. Penilaian status dan penyusunan strategi pengelolaan perikanan budidaya ikan jelawat (*Leptobarbus hoeveni*, Bleeker, 1851) berkelanjutan di Kota Jambi. *Journal of Natural and Environmental Management* 10(3):524-532.

- Tambaru R, Saru A, Syafiuddin, Amri K, Hatta M dan Febrianti. 2022. Analisis rasio Redfield terhadap kesesuaian pertumbuhan fitoplankton di ekosistem Mangrove Lantebung Kota Makassar. *Jurnal Aquatik* 5(2):188–195.
- Triarso I dan Putro SP. 2019. Pengembangan budidaya perikanan produktif berkelanjutan sistem IMTA (*Integrated Multi-Trophic Aquaculture*) (studi kasus di Kep. Karimunjawa, Jepara). *Life Science* 8(2):192–199.
- Tyas EA, Hutabarat S dan Ain C. 2017. Struktur komunitas plankton pada perairan yang ditumbuhi eceng gondok sebagai bioindikator kualitas perairan di Danau Rawa Pening Semarang. *Jurnal of Maquares* 6(2): 111–119.
- Utomo DAW. 2015. Komodifikasi eceng gondok studi kasus pemanfaatan eceng gondok di sekitar Danau Rawa Pening [Postgraduate Thesis]. Program Pasca Sarjana Magister Studi Pembangunan, Fakultas Inter Disipliner, Universitas Kristen Satya Wacana. Salatiga.
- Wibowo BA, Anggoro S dan Yulianto B. 2015. Status keberlanjutan dimensi ekologi dalam pengembangan kawasan minapolitan berkelanjutan berbasis perikanan budidaya air tawar di Kabupaten Magelang. *Jurnal Saintek Perikanan* 10(2): 107–113.
- Wulandari SS. 2022. Revitalization as a regulatory strategy in Rawa Pening Lake Management (case study in Dusun Sido Makmur, Sumber Rejo, Semarang Regency). *Endogami: Jurnal Ilmiah Kajian Antropologi* 6(1):16-31.

Life cycle assessment of coal-based power plants: impacts on urban carbon footprint and externality costs

Analisis daur hidup pembangkit listrik berbasis batu bara: dampaknya terhadap jejak karbon perkotaan dan biaya eksternal

Zahidah Mahroini^{1*}, Feneubrina Bainirad²

¹Department of Geography Education, State University of Surabaya, Surabaya, Indonesia

²Department of Urban Governance, National Taipei University, Taiwan

Abstrak.

Pertumbuhan ekonomi Indonesia bertumpu pada industri di kota-kota besar yang menyebabkan tingginya permintaan energi. Sekitar 40-70% energi nasional berasal dari pembakaran batu bara, yang berkontribusi besar terhadap emisi karbon dan pemanasan global. Batu bara diprediksi tetap menjadi sumber utama energi masa depan Indonesia, terutama di kota-kota besar. Studi ini mengestimasi emisi karbon dan biaya lingkungan (EC) dari siklus hidup pembangkit listrik menggunakan metode transfer manfaat, sembari memperhitungkan pencemaran udara dan air. Pada periode 2010-2020, biaya lingkungan akibat emisi gas rumah kaca berkisar US\$ 9-19 miliar, sementara biaya akibat polusi udara mencapai US\$ 1,56-5,37 miliar. Pencemaran air rata-rata tercatat sebesar 0,0027 g/TWh (fenol) dan 9,16 g/TWh (total COD), dengan penipisan air sekitar 4,9 miliar m³/MWh. Jakarta memiliki jejak karbon sebesar 25.755 ton CO₂ dan menghasilkan biaya eksternal sebesar US\$ 3.249.506. Studi ini menekankan pentingnya pengurangan emisi karbon melalui inovasi teknologi, penguatan kebijakan energi, dan peningkatan literasi energi masyarakat, dengan kota-kota sebagai penggerak utama transisi menuju energi bersih.

Kata kunci: jejak karbon, biaya eksternal, analisis daur hidup, pembangkit listrik batu bara

Abstract.

Indonesia's economic growth is strongly driven by industrial activities concentrated in large urban areas, resulting in high energy demand. Approximately 40-70% of Indonesia's energy is supplied by coal combustion, contributing significantly to carbon emissions and accelerated global warming. The coal used would still be main source in the future energy of Indonesia especially in cities. This study proposes to estimate the carbon emission and environmental cost (EC) of power plant life cycle use benefits transfer method, while also accounting air and water pollution. The results show that during 2010-2020, the EC for GHG emission is about 9 to 19 billion US\$, while EC for air pollution is about 1.56-5.37 billion US\$. Water pollution averaged 0.002658049 g/TWh for phenol and 9.16425 g/TWh for total COD. Then, the total water depletion is estimated to be an average of around 4.9 billion m³/MWh. Jakarta itself has a carbon footprint of 25,755 tons of CO₂ and produces external cost of US\$ 3,249,506. This study highlights the urgency of reducing carbon emissions through technological innovation, strengthened energy policies and enhanced public energy literacy, with positioning cities as key drivers of the transition toward cleaner energy systems.

Keywords: carbon footprint, externalities cost, life cycle assessment, coal based powerplant

1. INTRODUCTION

Rising concentrations of greenhouse gases (GHGs), particularly CO₂ have exacerbated global warming and climate change. Manabe (2019) clearly explained the process of CO₂ concentration contributing to global warming, highlighting that CO₂ increases surface and stratospheric temperatures, affects the water cycle and enhances infrared opacity, thereby increasing absorption of longwave radiation. Bengtsson (1996) revealed that the most common gases in the atmosphere, oxygen and nitrogen occupying more than 99% of the total volume, are almost completely transparent to solar and terrestrial radiation, underscoring CO₂'s dominant role.

* Korespondensi Penulis
Email : zahidahmahroini@unesa.ac.id

Major emitters derive from the energy sector, with the global CO₂ emissions originating from the power industry, including public and auto-producer power and heat generation plants, reached significant levels, at 0.284 t CO₂ per GDP unit and 126,635 USD in 2020 (European Commission 2021). China contributed 32.5% of world emissions, the US 12.6% and Indonesia 1.6%, with China's power generation (41%) and industrial combustion (28%) driving 508 kg CO₂ per 1000 PPP yr.

Indonesian national GHG emissions in 2014 were dominated by forest fires (979,422 Gg CO₂e), energy (602,458 Gg CO₂e) and agriculture (113,440 Gg CO₂e), with the energy sector increasing annually by about 5.2% (Government of Republic Indonesia 2017). Energy supply remains dominated by coal for electricity (40-70% (HEESI 2019), as Indonesia hosts vast coal resources formed by Cenozoic rift tectonics in southern Sundaland (Friederich *et al.* 2016). Coal demand in power plants rising from 90 to 150-160 million tons by 2028-2030, with coal generating 65% of electricity (140 thousand Gg Watt) in 2019, fuelled by the 35,000 MW coal-fired project (PLN 2019). Economic growth amplifies emissions, as Raihan *et al.* (2022) showed that a 1% increase in economic growth and fossil fuel energy use raises CO₂ by 0.36% and 0.67%, respectively, creating a dilemma with net-zero targets delayed to 2070.

Urban areas, especially dense cities like Jakarta, consume substantial electricity from fossil fuels, emitting SO₂ and NO₂ that cause acid rain and diseases, with energy use deemed wasteful (Listyarini 2012). In Indonesia, urban households consume significantly more electricity, often due to more appliances and higher living standards, leading to elevated carbon emissions from power generation. Additionally, urban transport with dense vehicle networks contributes substantially to GHG emissions. Household consumption patterns in urban settings tend to be carbon-intensive, given greater access to energy services and consumer goods, which amplifies emissions from multiple sources including transportation, electricity use and waste disposal.

Indonesia faces rising temperatures (0.01-0.06°C post-1950), altered rainfall patterns and vulnerabilities in coastal, agricultural, urban and health sectors, compounded by El Niño/La Niña (Government of Republic Indonesia 2017). Northern Java cities, like Jakarta (Surya *et al.* 2019), Semarang (Marfai and King 2008), Gresik (Handoko *et al.* 2022) and Demak (Prasetyo *et al.* 2019), risk subsidence and sea-level rise, displacing communities (Setyowati *et al.* 2017).

Environmental costs stem from resource depletion, air pollution and ecosystem degradation (Pirmana 2021) during coal's lifecycle from mining, transport to powerplant. One of the most significant impacts of underground coal mining is acid mine drainage (AMD) contamination from both past and ongoing mining activities (Ojonimi et al. 2021). Coal distribution could impact benthic flora and fauna, especially those that are vulnerable to coal dust and potential anoxic conditions by coal oxidation within a short distance (0-100 m) of the coal-loading terminal (Ryan & Bustion 2006). Coal power contributes 741-1022 g CO₂/kWh globally, worsening urban footprints in Indonesia's cities. Despite global LCA studies, Indonesia lacks comprehensive cradle-to-grave analyses linking coal power to urban carbon footprints and externalities.

This study aims (1) to estimate externality costs of coal power plants across their lifecycle (from establishment to disposal) and explore GHG reduction potentials, as well as (2) to quantify urban electricity use impacts on carbon footprints, urging independent clean energy generation in cities.

2. METHODOLOGY

2.1. Data collection

This study utilizes electricity consumption and coal-fired power generation data from the *Handbook of Energy and Economic Statistics of Indonesia* (HESSI) for the period 2000–2020. Environmental costs are estimated using a benefit transfer approach based on valuation results from existing life cycle assessment (LCA) studies of coal power plants. This approach enables the application of non-market environmental values for the study area, while LCA provides a systematic framework to assess environmental impacts across the entire life cycle of power generation.

2.2. Analysis procedure

This study focuses on two main stages: power generation and electricity use. The assessed impact categories include greenhouse gas (GHG) emissions (kg CO₂-eq), air pollutants (AP) and water pollutants (kg SO₂-eq). Total GHG emissions from coal-fired power plants were calculated by multiplying coal-based electricity generation by the emission factor per GWh. Based on Arsyad & Setiadi (2020), 1 GWh of electricity produced from coal power plant in Indonesia is equivalent to 800 tons of CO₂eq. Thus, the total of GHG emission to SCC (125 US\$/tCO₂eq) with this **Equation 1**.

$$(EC_{GHGEM})_{t-n} \text{ from coal powerplant} = \Sigma \text{electricity}(Gwh) \times 800 \text{tonne } CO_{2eq} \times 125 \left(\frac{US\$}{tCO_2} \right) \times IER \times \frac{IP_{t-n}}{IP_t} \div IER_{t-n} = \dots US_{t-n} \$ \dots \dots \dots (1)$$

To account for annual variability in US dollar values, price adjustments were incorporated using the Indonesia Price Index (IPI) and Indonesia Exchange Rate (IER) for the period 2011-2020, as summarized in **Table 1**. Air pollutant emissions from coal-fired power plants were estimated based on Widiyanto *et al.* (2003), who quantified emissions per 1 kWh of electricity generation, including SO₂ (0.00417 kg/kWh), NO_x (0.00429 kg/kWh), suspended particulate matter/SPM (0.000641 kg/kWh) and CO (0.00014 kg/kWh). Then, we estimate the cost by **Equation 2**.

Table 1. Indonesia price index and Indonesia exchange rate during years 2011-2020.

Years	Indonesia Price Index	Indonesia Exchange Rate	Years	Indonesia Price Index	Indonesia Exchange Rate
2011	105.4	8,770	2016	137	13,308
2012	109.9	9,386	2017	142.2	13,380
2013	116.9	10,461	2018	146.7	14,236
2014	124.4	11,865	2019	151.2	14,147
2015	132.3	13,389	2020	154.1	14,582

Source: World Bank (2021).

$$(EC_{AP})_{t-n} \text{ from coal powerplant} = \text{Total Electricity (kWh)} \times AP \text{ (kg (AP)}_2\text{eq)} \div 1000 \times AP \text{ cost} \left(\frac{US\$}{\text{kg AP}} \right) \times IER_t \times \frac{IP_{t-n}}{IP_t} \div IER_{t-n} = US_{t-n} \$ \dots \dots \dots (2)$$

Another method used to provide emission images generated from cities in Indonesia. We focus on the most densely populated cities in Indonesia that is DKI Jakarta. By using secondary data issued by BPS with a range of 2020 to 2022. Also, it will be supported by journals, documents and city government reports. Finally, the calculation will use the **Equation 1**.

3. RESULT AND DISCUSSION

3.1. GHG emission and external cost from powerplant

Accompanying economic growth and population, coal usage in power plants increased annually, from about 34 million tonnes in 2010 to 104 million in 2020. This data was highly echoed by the report of Ministry of Environment and Forestry that primarily sources of GHG emission in Indonesia come from coal powerplant. Indonesia's coal powerplant use two different technologies.

There are 1) subcritical coal-fired power plants (CF-SUB) that use sub-bituminous coal as fuel with a share of 59% and 2) Supercritical coal-fired power plant (CF-SUPERs) that use more brown coal or lignite, with share of 41 % (Nugroho *et al.* 2022). However, some of them only calculate lifecycles of powerplant processes. Some calculated more than the life cycle but also calculated social cost or damage that community will receive, such as the impact of GHG emission or non-GHG emission, landscape and noise impact, ecosystem and biodiversity impact another coal can release hazardous elements that negatively impact the environment (Tozsin 2014; Samadi 2017).

The coal consumption for powerplant showed a consistent upward trend, from about 45 in 2011 to 112 million tonnes in 2021 and coal consumption increases by about 10 million tonnes for every year, which was synchronous with uptrend of total electricity produced. The higher the coal consumption, the more considerable amount of CO₂eq. in 2020, the highest amount of CO₂eq was about 144 million tonnes and the external cost was about 18 billion US\$ (see **Table 2**).

Table 2. Amount of coal burning in power plant and its EC in Indonesia 2011-2021.

Years	Total Amount (tonne)	Total Electricity Production (GWh)	Total CO ₂ eq (tonne)	Total EC GHG (US\$)
2011	45,118,519	81,090	64,872,000	9.3
2012	52,815,519	102,166	81,732,800	11.3
2013	61,860,000	111,252	89,001,600	11.7
2014	63,054,000	119,532	95,625,600	11.8
2015	70,080,000	124,657	99,725,600	11.6
2016	75,400,000	135,381	108,304,800	13.1
2017	83,000,000	147,964	118,371,200	14.8
2018	91,140,000	160,013	128,010,400	15.6
2019	98,550,260	174,493	139,594,400	17.6
2020	104,829,892	180,869	144,695,200	18.0

Source: this research estimations.

From comparable, a study of external cost of one of the coal power plants in Indonesia, namely Suralaya powerplant by Sugiyono (2005) revealed that resulting exterior prices are 0.18-2.34 percent \$/kWh. This cost does not include maintenance, investment and fuel cost but health cost that community needs because of the dangerous pollutant water produced. Moreover, because of these external costs, generating electricity will increase the cost by 15 percent. Wijaya and Limmeechokchai

(2010) applied life cycle assessment and first calculated the external cost of electricity fossil fuel by various types of powerplant technology. The result was the environmental cost of energy in Indonesia was about 11.6 billion US and will increase to 42 billion US\$ 2025.

Moreover, Karkour *et al.* (2020) appraised the current external charge of electricity production in G20 nations by employing a global life cycle assessment (LCIA) based on final point modeling (LIME3). This research indicated that India and Indonesia have top external values about 0,172 \$/kWh and 0,135 \$/kWh respectively. So, If Indonesia consumed about 264.028.912 kWh in 2020 from coal. The external expense would be over 543 million US\$. Study from Wang *et al* 2015, coal power-plant in Northeast China produced external cost 0.072 US \$/kWh. Still, in China, the externalities of coal in Southwestern China are estimated at USD 73.5 billion or 284.3 USD/t (Wang *et al.* 2020).

3.2. Air pollutant and external cost from coal powerplant

The amounts and the external cost of air pollutants emitted from Indonesia's domestic coal power plants during 2010-2020 are calculated by **Equation 2**. The estimations shows that the total emissions produced in the last ten years are around 1,56-5,37 million US\$ and in 2019 and 2020 has the highest coal about 5,24 and 5,37 million US\$ due to electricity produced increase (**Table 3** and **Table 4**). For SO₂ about 0.06-1.34, NO_x about 1.19-3.02, for SPM about 0.31-0.79 and CO about 0.00029-0,00073 million US\$ (**Table 4**). Other study revealed that when pulverized coal is burned, most of the mercury (Hg) vaporizes, some are captured by fly ash, while almost none was retained in the bottom ash. Hg was released into the atmosphere primarily as a gas and, to a lesser extent, as solid-phase pollutants (Yudovich & Ketris 2005).

The total external cost of GHG emission and air pollutant from coal powerplant has 84 to over 100% from total revenue of electricity sales in the last ten years (PLN 2019), and it does not include the water pollutions cost. Indonesia has an economic and population growth year by year, so electricity consumption will also increase. Electricity consumption in Indonesia is divided into four: household, industry, business and others. This increase in electricity consumption is supported by a government program that will realize electricity target of 35,000 MW for all Indonesia.

Table 3. Air pollutants emitted from domestic coal power plants in Indonesia 2010-2020.

Years	Total Electricity Production (kWh)	SO ₂ kg/kWh	NO _x kg/kWh	SPM kg/kWh	CO kg/kWh
2010	6.8477E+10	28,554,909	293,766,330	43,893,757	9,586,780
2011	8.1090E+10	338,145,300	347,876,100	51,978,690	11,352,600
2012	1.02166E+11	426,032,220	438,292,140	65,488,406	14,303,240
2013	1.11252E+11	463,920,840	477,271,080	71,312,532	15,575,280
2014	1.19532E+11	498,448,440	512,792,280	76,620,012	16,734,480
2015	1.24657E+11	519,819,690	534,778,530	79,905,137	17,451,980
2016	1.35381E+11	564,538,770	580,784,490	86,779,221	18,953,340
2017	1.47964E+11	617,009,880	634,765,560	94,844,924	20,714,960
2018	1.60013E+11	667,254,210	686,455,770	102,568,333	22,401,820
2019	1.74493E+11	727,635,810	748,574,970	111,850,013	24,429,020
2020	1.80869E+11	754,223,730	775,928,010	115,937,029	25,321,660

Source: this research estimates.

Table 4. The external cost of AP from domestic coal power plants in Indonesia 2010-2020 (million US\$).

Years	External cost SO ₂	External cost NO _x	External cost SPM	External cost CO	Total external cost of air pollutants
2010	0.06	1.19	0.31	0.00029	1.56
2011	0.79	1.54	0.40	0.00037	2.74
2012	0.97	1.89	0.50	0.00046	3.36
2013	1.01	1.96	0.52	0.00047	3.49
2014	1.02	1.98	0.52	0.00048	3.52
2015	1.00	1.95	0.51	0.00047	3.46
2016	1.14	2.20	0.58	0.00053	3.92
2017	1.28	2.48	0.65	0.00060	4.42
2018	1.34	2.60	0.68	0.00063	4.63
2019	1.52	2.95	0.77	0.00071	5.24
2020	1.56	3.02	0.79	0.00073	5.37

Source: this research estimates.

For consumption in the industrial sector, coal will be an alternative fuel that is cheap and widely available in Indonesia while oil and gas fuel prices are getting more expensive, therefore, electricity consumption in the household sector is not much different from the amount consumed by industry (Ministry of Energy and Mineral Resources 2020). In the industrial sector, 90% of coal is consumed by cement factories. As for coal imports have so far been very small because they are only used for special purposes such as reducing agents in the metallurgical industry (Ministry of Energy and Mineral Resources 2016).

3.3. Water pollution and consumption from coal powerplant

A study by Widiawaty *et al* (2020) stated that two powerplants in Cirebon Regency, Indonesia affected the water quality in Mundu Bay, where the concentration of total suspended solids (TSS) and sea surface temperatures (SST) values increased. Water consumption depends significantly on the powerplant technology needed in the coal power plant process. The power plant also produces water which contains many pollutants and it returns to the environment. A study from Dincă *et al* (2010) revealed that combustion of coal has polluted the water such as phenol about 0.000019143 g/TWh and COD about 0.066 g/TWh.

An LCA study of water use and wastewater from coal-fired power plants in China show the water footprint of electricity generation is approximately 6.60 m³/MWh. From the total, blue water footprint contributes 24.8%, while the grey water footprint represents the dominant share at 75.2% (Zhu *et al* 2020). Sabubu (2020) states that the effect of wastewater from this coal powerplant caused the temperature of sea water around the coast to rise and causes fisherman around the coast to have fish far away to find fish, in other word, hot waste water causes ecosystem in water to be disrupted and even extinct. **Table 5** showed the estimations result of the water pollution and water depletion of coal power plants.

Table 5. Total water pollution and depletion from coal powerplant.

Years	Total Electricity Production (GWh)	Total Phenol g/TWh	Total COD g/TWh	Total water depletion m ³ /MWh
2011	81,090	0.001552306	5.35194	2,890,047,600
2012	102,166	0.001955764	6.742956	3,641,196,240
2013	111,252	0.002129697	7.342632	3,965,021,280
2014	119,532	0.002288201	7.889112	4,260,120,480
2015	124,657	0.002386309	8.227362	4,442,775,480
2016	135,381	0.002591598	8.935146	4,824,978,840
2017	147,964	0.002832475	9.765624	5,273,436,960
2018	160,013	0.003063129	10.560858	5,702,863,320
2019	174,493	0.003340319	11.516538	6,218,930,520
2020	180,869	0.003462375	11.937354	6,446,171,160

Source: this research estimates.

From the estimations results, water pollution has an average of 0.002658049 g/TWh for phenol and 9.16425 g/TWh for total COD. Then, the total water depletion is estimated to be an average of around 4.9 billion m³/MWh.

3.4. Urban electricity consumption

This research selects Jakarta as a representative of electricity consumption in highly populated urban areas. **Table 6** presents the estimated external cost data from electricity consumption in Jakarta for three years, from 2020 to 2022. This data included total electricity production in kilowatt-hours (KWh) and gigawatt-hours (GWh), total carbon dioxide (CO₂e) emissions in tons and total environmental costs in millions of US dollars. Electricity consumption is divided into six categories: social, household, enterprise, industry, office and others.

Table 6. Estimation of external cost from electricity consumption in Jakarta.

Years	Categories	Total Electricity Production (KWh)	Total Electricity Production (GWh)	Total CO ₂ e (tonne)	Total External Cost GHG (million US\$)
2020	Social	1.221.742.008	1,22	977,393	123.313
	Household	14.604.749.545	14,60	11.683,799	1.474.093
	Business	10.525.716.850	10,53	8.420,573	1.062.386
	Industry	3.831.806.986	3,83	3.065,445	386.754
	Offices	1.550.620.228	1,55	1.240,496	156.508
	Others	460.232.131	0,46	368,185	46.452
	Total	32.194.867.748	32,19	25755,894	3.249.506
2021	Social	1.286.813.881	1,29	1.029,451	134.518
	Household	14.724.520.787	14,72	11.779,616	1.539.234
	Business	10.583.416.787	10,58	8.466,733	1.106.342
	Industry	4.184.303.379	4,18	3.347,442	437.408
	Offices	1.519.119.920	1,52	1.215,295	158.802
	Others	1.482.916.704	0,41	328,903	42.978
	Total	32.709.304.744	32,71	26167,443	3.419.281
2022	Social	1.482.916.704	1,48	1.186,333	148.292
	Household	14.823.996.394	14,82	11.859,197	1.482.400
	Business	12.085.066.135	12,09	9.668,052	1.208.507
	Industry	4.140.339.703	4,14	3.312,271	414.034
	Offices	1.591.810.878	1,59	1.273,448	159.181
	Others	454.161.897	0,45	363,329	45.416
	Total	34.578.291.711	34,58	27662,633	3.457.829

Source: this research estimates.

In 2020, total electricity production in Jakarta reached 32.19 GWh, resulting in CO₂e emissions of 25.755 tonnes, with total environmental costs reaching 3.249.506 million US dollars. And it is clear that the leading sources of emission are from household and businesses in all given years. The household sector was the largest

contributor to electricity consumption, followed by the enterprise and industry sectors. In 2021, there was an increase in total electricity production to 32.71 GWh with CO₂e emissions of 26.167 tonnes and total environmental costs of 3.419.281 million US dollars. This increase indicated growth in electricity consumption in Jakarta year over year. In 2022, total electricity production reached 34.58 GWh, with CO₂e emissions of 27.662 tonnes and total environmental costs of 3.457.829 million US dollars. Overall, the data showed an increasing trend in electricity consumption and CO₂e emissions in Jakarta from 2020 to 2022. This indicates the need for efforts to reduce energy consumption and greenhouse gas emissions in densely populated urban areas such as Jakarta.

4. CONCLUSION AND RECOMMENDATION

This study estimates the external costs of coal-fired power plants in Indonesia and their implications for environmental economics. The results show that coal power generation imposes substantial and increasing external costs across its life cycle. The external cost of GHG emissions increased from about 9 billion US\$ in 2011 to 18 billion US\$ in 2020. External costs from air pollutants ranged from 1.56 to 5.37 billion US\$, with NO_x, SPM, and SO₂ as the main contributors. While in 2015 total external costs were nearly equal to electricity revenue, since 2016 these costs have risen significantly relative to profits.

Coal power plants also contribute to water pollution and high water consumption. Average phenol and COD concentrations were 0.00265 g/TWh and 9.16425 g/TWh, respectively, while total water depletion reached around 4 billion m³ over the past decade. Overall, external electricity costs ranged between 3.2 and 3.4 million US\$, with household and business sectors experiencing the highest impacts and a consistent upward trend.

These findings indicate the need for stronger energy policies to reduce emissions from coal-based power generation in line with Indonesia's net-zero target for 2060. Emission reduction efforts should focus on cleaner power plant technologies, increased renewable energy shares (particularly in urban areas), and improved energy efficiency. At the community level, clean energy awareness and energy-saving practices can further support the transition toward low-carbon electricity.

5. ACKNOWLEDGMENT

I would like to express my deepest gratitude to my academic supervisor, Dr. Chien, Yu-Lan for their guidance, support and insightful feedback throughout this research. The expertise and encouragement have been invaluable in shaping this research. I also express my appreciation to Dr. Bor, Yunchang Jeffrey and Dr. Wey, Kwo-Dong for their constructive criticism and valuable suggestions, which significantly contributed to the improvement of this work.

6. REFERENCES

- Arsyad M and Setiadi. 2020. Gate to gate life cycle assessment coal power plant in Indonesia. APCORISE '20: Proceedings of the 3rd Asia Pacific Conference on Research in Industrial and Systems Engineering:333-338. <https://doi.org/10.1145/3400934.3400995>.
- Bengtsson L. 1996. The climate response to the changing greenhouse gas concentration in the atmosphere, chapter, decadal climate variability. NATO ASI Series vol 44:293-332
- Dincă C, Badea A and Apostol T. 2010. Life cycle impact assessment of fossil fuels. In U.P.B. Scientific Bulletin Series C 71(1):115-126.
- European Commission Report. 2021. GHG emission of all world countries. European commission. Luxembourg. doi: 10.2760/ 173513
- Friederich MC, Moore TA and Flores RM. 2016. A regional review and new insights into SE Asian Cenozoic coal-bearing sediments: Why does Indonesia have such extensive coal deposits?. *International Journal of Coal Geology* 166:2-35, <https://doi.org/10.1016/j.coal.2016.06.013>.
- Handoko EY, Naibaho LK, Saptarini D and Yuwono. 2021. Sea level variability around the Java Sea (study Area: Northern of Gresik and Surabaya) using Cryosat-2 Altimeter. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 731(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/731/1/012013>
- Karkour S, Ichisugi Y, Abeynayaka A and Itsubo N. 2020. External-cost estimation of electricity generation in G20 countries: case study using a global life-cycle impact-assessment method. *Sustainability* 12(5):2002

- Listyarini S. 2012. penggunaan goal programming untuk menganalisis pemborosan listrik di DKI Jakarta. *Jurnal Sains MIPA Universitas Lampung* 6(3):1-10.
- Manabe S. 2019. Role of greenhouse gas in climate change. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography* 71(1):1620078.
- Marfai MA and King L. 2008. Potential vulnerability implications of coastal inundation due to sea level rise for the coastal zone of Semarang city, Indonesia. *Environment* 54(6):1235-1245. <https://doi.org/10.1007/s00254-007-0906-4hn>.
- Ministry of Energy and Mineral Resources. 2016. *Indonesia Energy Outlook 2016*. Ministry of Energy and Mineral Resources. Jakarta.
- Ministry of Environment and Forestry. 2017. *Third national communication under UNFCCC*. Ministry of Environment and Forestry. Jakarta.
- Ministry of Energy and Mineral Resources Republic of Indonesia. 2000. *Handbook of energy and economic statistic of indonesia*. Center for Data and Information Technology on Energy and Mineral Resources. Jakarta.
- Nugroho R, Hanafi J, Shobatake K, Chun YY, Tahara K and Purwanto WW. 2022. Life cycle inventories and life cycle assessment for an electricity grid network: case study of the Jamali grid, Indonesia. *International Journal of Life Cycle Assessment* 27(8):1081-1091. <https://doi.org/10.1007/s11367-022-02082-5>
- Ojonimi TI, Chanda TP and Ameh EG. 2021. Acid mine drainage (AMD) contamination in coal mines and the need for extensive prediction and remediation: a review. *Journal of Degraded and Mining Lands Management* 9(1):3129-3136
- Pirmana V, Alisjahbana AS, Yusuf AA, Hoekstra R and Tukker A. 2021. Environmental costs assessment for improved environmental-economic account for Indonesia. *Journal of Cleaner Production* 280 124521. [doi:10.1016/j.jclepro.2020.124521](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124521).
- Prasetyo Y, Bashit N, Sasmito B and Setianingsih W. 2019. Impact of land subsidence and sea level rise influence shoreline change in the coastal area of Demak. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 280(1):012006). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/280/1/012006>

- [PLN] Perusahaan Listrik Negara. 2019. Statistic PLN [internet]. Tersedia di: <https://web.pln.co.id/statics/uploads/2020/08/Statistik-2019-4-8-20-rev.pdf>
- [PLN] Perusahaan Listrik Negara. 2019. Rencana usaha penyediaan tenaga listrik (RUPTL) PT. PLN (Persero) 2019-2028 PT. PLN (Persero), [Internet] Tersedia di (<https://web.pln.co.id/media/siaran-pers/2019/04/rencana-usaha-penyediaan-tenaga-listrik-atau-ruptl>)
- Raihan A, Muhtasim DA, Pavel MI, Faruk O and Rahman M. 2022. An econometric analysis of the potential emission reduction components in Indonesia. *Cleaner Production Letters* 3:100008.
- Sabubu TAW. 2020. Pengaturan pembangkit listrik tenaga uap batubara dalam peraturan perundang-undangan (analisis dari perspektif hak atas lingkungan yang baik dan sehat) [Tesis]. Departemen Ilmu Hukum. Fakultas Hukum. Universitas Islam Indonesia
- Samadi S. 2017. The social costs of electricity generation categorising different types of costs and evaluating their respective relevance. *Energies* 10(3):356. <https://doi.org/10.3390/en10030356>
- Setyowati DL, Amin M, Astuti TMP and Ishartiwi. 2012. Community efforts for adaptation and anticipate to flood tide (ROB) in Bedono Village, District Sayung Demak, Central Java, Indonesia. *Man In India* 97(5):241-252.
- Sugiyono A. 2005. Biaya eksternal dari pembangkit listrik Batubara [Prosiding]. Seminar Akademik Ilmu Ekonomi. Paralel Session IIA Energy and Environment: 1-13 <https://www.researchgate.net/publication/275652228>
- Tozsın G. 2014. Hazardous elements in soil and coal from the Oltu coal mine district, Turkey, *International Journal of Coal Geology* 131:1-6. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2014.05.011>.
- Wang X, Wang L, Chen J, Zhang S, & Tarolli P. 2020. Assessment of the external costs of life cycle of coal: the case study of Southwestern China. *Energies* 13:4002. doi:10.3390/en13154002
- Widiawaty MA, Nurhanifah N, Ismail A and Dede M. 2020. The impact of Cirebon coal-fired power plants on water quality in Mundu Bay, Cirebon Regency. *Sustinere: Journal of Environment and Sustainability* 4(3):189-204. <https://doi.org/10.22515/sustinere.jes.v4i3.114>

- Widiyanto A, Kato S and Maruyama N. 2003. Environmental impact analysis of Indonesian electric generation systems (development of a life cycle inventory of Indonesian electricity). *JSME International Journal Series B Fluids and Thermal Engineering* 46(4):650-659.
- Wijaya ME and Limmeechokchai B. 2010. The hidden costs of fossil power generation in Indonesia: A reduction approach through low carbon society. *Songklanakarin Journal of Science & Technology* 32(1):81-89.
- World Bank. 2021. Indonesia price index and Indonesia exchange rate during years 2011-2020 [Internet]. Tersedia di <https://data.worldbank.org/>
- Yudovich YE and Ketris MP. 2005. Mercury in coal: a review Part 2. Coal use and environmental problems. *International journal of coal geology* 62(3):135-165., <https://doi.org/10.1016/j.coal.2004.11.003>.
- Zhu, Y, Jiang S, Zhao Y, Li H, He G and Li L. 2020. Life-cycle-based water footprint assessment of coal-fired power generation in China. *Journal of Cleaner Production* 254:120098.

Elektrokoagulasi dalam pengelolaan air gambut: studi komparatif elektroda aluminium dan besi

Electrocoagulation in peat water management: comparative study of aluminium and iron electrodes

Stevin Carolius Angga^{1,3*}, Muh Supwatul Hakim¹, Samsul Arifin², Syahrani Riana Dewi¹, Enjel Elya Resha¹, Tety Wahyuningsih Manurung¹

¹Program Studi Kimia, Universitas Palangka Raya, Palangka Raya, Indonesia

²Program Studi Fisika, Universitas Palangka Raya, Palangka Raya, Indonesia

³Pusat Pengembangan IPTEK dan Inovasi Gambut (PPIIG), Universitas Palangka Raya, Palangka Raya, Indonesia

Abstrak.

Air merupakan kebutuhan utama bagi kehidupan manusia, tetapi beberapa wilayah di Kalimantan Tengah masih kesulitan mengakses air bersih dan hanya memanfaatkan air gambut untuk kebutuhan sehari-hari. Air gambut umumnya tidak layak digunakan untuk air minum maupun sanitasi karena kualitasnya yang buruk dan dapat memicu berbagai masalah kesehatan, mulai dari gangguan pencernaan hingga keracunan logam berat. Salah satu metode yang efektif untuk meningkatkan kualitas air gambut adalah elektrokoagulasi. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh variasi elektroda Al dan Fe dalam mengolah air gambut. Sampel air gambut diambil dari Kecamatan Sebangau, Palangka Raya, Kalimantan Tengah pada Juni 2024. Hasil penelitian menunjukkan bahwa elektrokoagulasi meningkatkan pH air mendekati netral serta menurunkan kekeruhan, warna, COD, dan Fe terlarut, kecuali pada kombinasi elektroda Fe-Fe yang justru meningkatkan TDS, warna, dan Fe terlarut. Kombinasi elektroda Al-Al terbukti paling efektif dalam meningkatkan kualitas air gambut.

Kata kunci: air gambut, elektrokoagulasi, kualitas air, Sebangau, Kalimantan Tengah

Abstract.

Water is essential for human life, yet several regions in Central Kalimantan face difficulties in accessing clean water and rely on peat water for daily needs. Peat water is generally unsuitable for drinking and sanitation purposes due to its poor quality. Its usage can lead to various health issues, such as digestive disorders skin diseases, tooth damage, and severe risks of heavy metal poisoning. One effective method to improve the quality of peat water is electrocoagulation. This study aims to investigate the effect of electrode variations using Al and Fe in treating peat water. Peat water samples were collected from Sebangau District, Palangka Raya, Central Kalimantan, in June 2024. The study analyzed water quality parameters, including TDS, pH, turbidity, color, COD, and dissolved Fe. The results showed that electrocoagulation increased pH to near-neutral levels and reduced turbidity, color, COD, and dissolved Fe, except for the Fe-Fe electrode combination, which caused an increase in TDS, color, and dissolved Fe. The Al-Al electrode combination proved to be the most effective in improving peat water quality.

Keywords: peat water, electrocoagulation, water quality, Sebangau, Central Kalimantan

1. PENDAHULUAN

Air merupakan kebutuhan dasar manusia untuk berbagai aktivitas sehari-hari. Pada tahun 2023, Provinsi Kalimantan Tengah menempati urutan ke-7 dalam hal akses air bersih, dengan sebesar 77,72% masyarakat terpenuhi kebutuhan air bersihnya (BPS 2024). Hal tersebut menunjukkan lebih dari 20% masyarakat di Kalimantan Tengah kekurangan akses air berkualitas dan masih mengandalkan air gambut sebagai sumber air utama. Sementara itu, Rencana Pembangunan Jangka Menengah Nasional (RPJMN) 2020-2024 mengamanatkan pencapaian akses air bersih sebesar 100%.

*Korespondensi Penulis
Email : stevin.carolius@mipa.upr.ac.id

Penelitian sebelumnya melaporkan bahwa terdapat hubungan antara penggunaan air gambut dengan munculnya berbagai masalah kesehatan di masyarakat (Suhendra *et al.* 2013; Angga *et al.* 2024). Air gambut umumnya tidak layak untuk digunakan sebagai air minum maupun keperluan sanitasi karena kualitasnya yang buruk. Penggunaan air gambut dapat menyebabkan berbagai masalah kesehatan, baik dalam jangka pendek maupun panjang, seperti gangguan pencernaan berupa muntah dan diare, penyakit kulit seperti dermatitis, kerusakan atau kehilangan gigi, hingga risiko yang lebih serius seperti keracunan akibat keberadaan logam berat yang bersifat toksik (Bashir *et al.* 2020).

Salah satu metode yang efektif untuk mengolah air gambut adalah elektrokoagulasi. Pada teknik ini terjadi proses koagulasi akibat penggunaan arus listrik melalui proses elektrolisis yang bekerja berdasarkan mekanisme reaksi reduksi dan oksidasi untuk menurunkan kandungan ion logam serta partikel di dalam air. Teknik ini memiliki beberapa keunggulan, di antaranya menggunakan peralatan yang sederhana, mudah dioperasikan, dan membutuhkan waktu reaksi yang relatif singkat. Selain itu, elektrokoagulasi mampu menghilangkan berbagai jenis polutan dalam air, seperti partikel tersuspensi, logam berat, zat pewarna, serta berbagai senyawa berbahaya lainnya (Wiyanto *et al.* 2017).

Pada penelitian ini dilakukan studi dampak penggunaan variasi elektroda Al dan Fe sebagai pemicu reaksi oksidasi senyawa organik pada air gambut. Pemilihan variasi elektroda Al dan Fe didasarkan pada pertimbangan ketersediaannya yang mudah diperoleh di pasaran, biaya yang relatif rendah, serta karakteristik elektrokimia yang berbeda sehingga memungkinkan evaluasi konfigurasi elektroda yang aplikatif untuk pengolahan air gambut. Sementara itu, parameter yang dianalisis untuk mengevaluasi efektivitas pengolahan air gambut adalah total padatan terlarut (TDS), pH, kekeruhan, warna, COD, dan Fe terlarut. Penelitian ini diharapkan dapat menunjukkan hasil aplikasi elektrokoagulasi dalam meningkatkan kualitas air gambut, sehingga dapat menjadi alternatif teknologi pengolahan air yang aplikatif dan berkelanjutan dalam mendukung peningkatan akses air di Provinsi Kalimantan Tengah.

2. METODOLOGI

2.1. Lokasi kajian dan waktu penelitian

Sampel air gambut diperoleh dari Kecamatan Sebangau, Palangka Raya, Kalimantan Tengah pada titik koordinat 2°17'50" S 113°53'56" T. Dokumentasi lokasi sampling ditampilkan pada **Gambar 1**. Proses sampling dilakukan pukul 09:00-11:00 WIB pada Juni 2024. Penelitian dilakukan pada Laboratorium Analitik PPIIG, Universitas Palangka Raya. Analisis karakteristik sampel air dilakukan di UPT Laboratorium Kesehatan dan Kalibrasi Provinsi Kalimantan Tengah.



Gambar 1. Lokasi sampling air gambut.

2.2. Prosedur analisis data

Untuk proses elektrokoagulasi, sebanyak 1500 ml air gambut ditambahkan dengan 150 ml larutan NaCl 1% b/v lalu diaduk dengan pengaduk magnet. Sistem elektrokoagulasi dirancang dengan menghubungkan masing-masing elektroda pada *power supply* dengan tegangan 10 volt selama 10 menit. Adapun variasi elektroda disajikan pada **Tabel 1**. Larutan yang telah dielektrokoagulasi kemudian dilakukan analisis meliputi TDS, pH, kekeruhan, warna, COD dan Fe terlarut.

Tabel 1. Variasi elektroda yang digunakan.

No	Kode Elektroda	Elektroda	
		Anoda (+)	Katoda (-)
1	A	Al	Fe
2	B	Fe	Al
3	C	Fe	Fe
4	D	Al	Al

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian ini dilakukan elektrokoagulasi sampel air gambut dengan variasi elektroda yaitu Al dan Fe. Beberapa karakteristik parameter air gambut yang dilakukan elektrokoagulasi dengan variasi tersebut kemudian dibandingkan dengan air gambut sebelum pengolahan. Parameter yang dianalisis yaitu total padatan terlarut (TDS), pH, kekeruhan, warna, kebutuhan oksigen kimia (COD), dan Fe terlarut. Hasil elektrokoagulasi air gambut dengan variasi elektroda ditampilkan pada **Tabel 2**.

Tabel 2. Hasil analisis pengolahan air gambut.

Kode	Elektroda		TDS (mg/L)	pH	Kekeruhan (NTU)	Warna (Pt.Co)	COD (ppm)	Fe terlarut (ppm)
	Anoda	Katoda						
0 (Air Gambut)	-	-	35	4,0	27	852	127	0,092
A	Al	Fe	799	6,9	8	19,4	19,3	<0,041
B	Fe	Al	902	6,9	16	152	82,8	0,598
C	Fe	Fe	902	6,3	92	1.934	64,5	28,2
D	Al	Al	949	6,3	3	<1,77	18	<0,041

3.1. Keunggulan elektrokoagulasi terhadap air gambut

Pada ekosistem lahan gambut, tumbuhan seperti lumut hidup berdampingan dalam lingkungan yang tergenang air, sisa-sisa tumbuhan mati menumpuk dan mengalami proses dekomposisi yang lambat akibat minimnya oksigen, sehingga menghasilkan endapan gambut. Saat hujan, air meresap melalui endapan tersebut membawa serta zat humat yang terlarut di dalamnya. Proses pencucian antara air hujan dan endapan gambut di ekosistem tropis menghasilkan air gambut yang akhirnya membentuk area genangan air yang luas (Girkin *et al.* 2022). Mempertimbangkan proses tersebut, air gambut berpotensi menjadi sumber air bersih, terutama bagi masyarakat lokal (Wenten *et al.* 2020).

Meskipun berpotensi sebagai air bersih, air gambut memiliki kandungan mineral rendah, pH sedikit asam karena keberadaan asam organik, mengandung bahan organik terlarut dalam jumlah besar, terutama asam humat yang memiliki berat molekul tinggi, sehingga sulit diolah menggunakan sistem membran konvensional (Rahman *et al.* 2023). Keberadaan partikel koloid dan material tersuspensi dalam air gambut juga dapat menyebabkan endapan pada permukaan membran, yang lama-kelamaan menyumbat pori-pori dan mengurangi tingkat permeabilitas membran (Rahman *et al.* 2021). Gao *et al.* (2019) menyebutkan bahwa penggunaan air gambut dapat mengganggu kinerja membran yang berujung pada penurunan produktivitas air dan peningkatan biaya energi operasional.

Sistem elektrokoagulasi memiliki mekanisme fisikokimia yang mirip dengan proses elektrolisis, terutama dalam menghasilkan kation, anion, gas, zat flokulan, destabilisasi kontaminan, serta koagulasi kontaminan (Garcia-Segura *et al.* 2017). Meskipun mirip dengan mekanisme koagulasi kimia, elektrokoagulasi berbeda karena koagulan hidroksida logam dihasilkan secara langsung selama proses berlangsung (AlJaberi *et al.* 2020; Rahman *et al.* 2022). Proses ini juga dilengkapi dengan elektroflotasi, yaitu gelembung gas halus membantu membawa mikroflokk ke permukaan air, membentuk flok elektrokoagulasi (Lu *et al.* 2021). Dalam elektrokoagulasi, ion Al atau ion Fe dilepaskan dari anoda yang terkorosi, sedangkan ion hidroksida dihasilkan pada katoda. Koagulan yang terbentuk melalui proses elektrokimia ini akan mengalami hidrolisis spontan, menciptakan spesies monomerik dan polimerik yang kemudian berubah menjadi (oksi)hidroksida yang tidak larut (Rahman *et al.* 2020; Tegladza *et al.* 2021).

3.2. Studi variasi elektroda dalam proses elektrokoagulasi

Berdasarkan hasil elektrokoagulasi yang dilakukan, terjadi perubahan terhadap 6 parameter yang dianalisis. Secara garis besar, parameter kekeruhan, warna, dan COD mengalami penurunan, sementara pH cenderung menjadi netral. Namun, TDS oleh seluruh elektroda mengalami peningkatan. Sementara itu, parameter Fe terlarut pada variasi C mengalami peningkatan. Pada proses elektrokoagulasi terjadi reaksi pembentukan ion oleh anoda sebagai proses oksidasi sebagaimana yang ditunjukkan pada **Persamaan 1** dan **Persamaan 2**.



Ion-ion logam (Fe^{2+} , Fe^{3+} , atau Al^{3+}) yang terbentuk dianoda akan bereaksi dengan air dan menghasilkan hidroksida logam seperti $\text{Fe}(\text{OH})_3$ atau $\text{Al}(\text{OH})_3$. Hidroksida ini berfungsi sebagai koagulan yang mengikat partikel koloid dan zat terlarut pada air (Al-Marri *et al.* 2023). Sementara itu, pada katoda terjadi reduksi air yang menghasilkan gas hidrogen dan ion hidroksida. Ion OH^- yang terbentuk di katoda (**Persamaan 3**) ini yang kemudian meningkatkan pH air menuju netral serta membantu mengikat Al^{3+} atau Fe^{3+} membentuk flok $\text{Al}(\text{OH})_3$ dan $\text{Fe}(\text{OH})_3$.

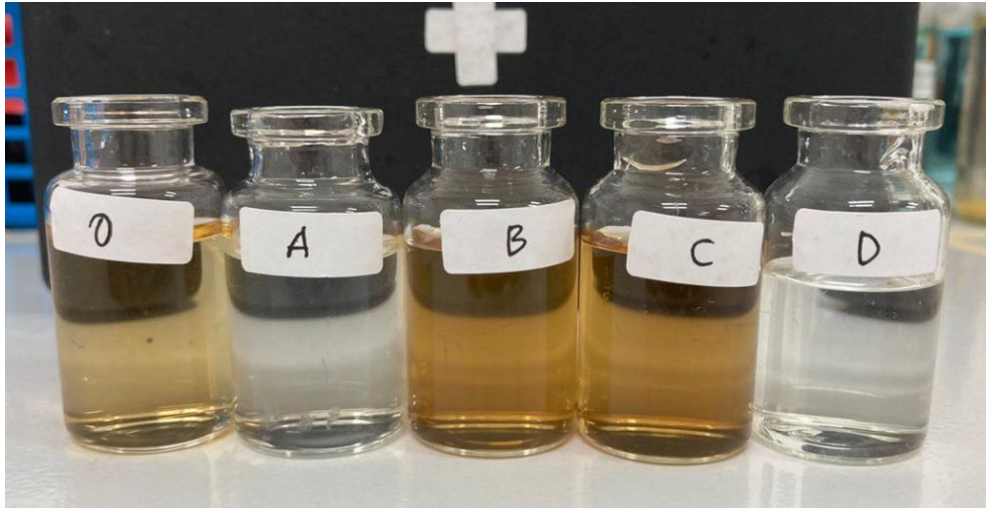


Secara garis besar, kombinasi reaksi pada anoda dan katoda menciptakan sistem yang mendukung pembentukan flok logam hidroksida yang efektif untuk menjernihkan air. Reaksi keseluruhan dituliskan sebagai **Persamaan 4** dan **Persamaan 5** (Mouedhen *et al.* 2008; Hashem *et al.* 2024).



Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan kombinasi elektroda yang berbeda pada metode elektrokoagulasi menghasilkan variasi yang signifikan terhadap parameter kualitas air gambut. Secara umum, elektrokoagulasi mampu meningkatkan kualitas air, dengan indikator utama berupa kenaikan pH mendekati netral dan penurunan kadar kekeruhan, warna, COD, serta besi (Fe) terlarut dibandingkan air gambut awal. Visualisasi perbandingan hasil elektrokoagulasi dengan variasi elektroda ditampilkan pada **Gambar 2**.

Pada variasi elektroda kode A, TDS meningkat menjadi 799 mg/L, sementara pH naik menjadi 6,9. Adapun kekeruhan, warna, COD, dan Fe masing-masing menurun menjadi 8 NTU, 19,4 Pt.Co, 19,3 ppm, dan <0,041 ppm. Variasi ini menunjukkan efisiensi yang baik dalam menurunkan parameter air pada kekeruhan dan warna. Variasi Fe sebagai anoda dan Al sebagai katoda (kode B) menghasilkan hasil serupa dengan pH 6,9 dan TDS 902 mg/L, namun penurunan kekeruhan 16 NTU dan warna 152 Pt.Co masih kurang optimal dibandingkan kode A. COD dan Fe terlarut juga mengalami penurunan, meskipun tidak lebih efisien dari variasi elektroda Al-Fe.



Gambar 2. Perbandingan hasil elektrokoagulasi dengan variasi elektroda.

Variasi elektroda Fe-Fe (kode C) menghasilkan pH 6,3 dan TDS 902 mg/L, namun kekeruhan 92 NTU dan warna 1934 Pt.Co masih sangat tinggi, menunjukkan bahwa variasi ini kurang efektif dalam menghilangkan partikel tersuspensi dan zat warna dalam air gambut. Variasi Al-Al (kode D) memberikan hasil terbaik dengan pH 6,3, TDS 949 mg/L, kekeruhan 3 NTU, warna <1,77 Pt.Co, COD 18 ppm, dan Fe terlarut <0,041 ppm. Variasi ini menunjukkan kemampuan paling efektif dalam menghilangkan kekeruhan, warna, dan Fe terlarut, sehingga dapat dianggap sebagai konfigurasi elektroda yang optimal untuk pengolahan air gambut menggunakan elektrokoagulasi.

Di sisi lain, terjadi peningkatan parameter TDS pada seluruh variasi kombinasi elektroda. Peningkatan TDS pada proses elektrokoagulasi diakibatkan oleh pelepasan ion-ion dari elektroda ke dalam larutan. Pada kombinasi elektroda Fe-Fe, anoda Fe mengalami korosi dan melepaskan ion Fe^{2+} atau Fe^{3+} . Demikian juga dengan elektroda kombinasi lainnya seperti Al yang melepaskan ion Al^{3+} . Ion-ion ini kemudian meningkatkan konsentrasi total zat terlarut, yang tercermin dalam kenaikan nilai TDS. Dengan demikian, meskipun terjadi proses penghilangan polutan tertentu, pelepasan ion logam dari elektroda turut berkontribusi pada peningkatan TDS.

Khusus pada elektroda kode C, terdapat peningkatan warna dan Fe terlarut. Warna air gambut setelah proses elektrokoagulasi pada kode C mengalami peningkatan signifikan menjadi 1.934 Pt.Co. Hal ini dapat disebabkan oleh pembentukan kompleks ion logam dengan zat organik dalam air gambut, seperti asam humat atau fulvat. Kompleks ini dapat memberikan warna lebih gelap pada air, sehingga meningkatkan nilai warna yang terukur.

Selain itu, proses elektrokoagulasi pada elektroda Fe diduga tidak cukup efektif dalam menghilangkan zat organik berwarna, sehingga terjadi akumulasi atau transformasi zat organik yang justru memperburuk parameter warna. Lalu tingginya parameter konsentrasi Fe terlarut pada kombinasi elektroda Fe-Fe 28,2 ppm dapat dijelaskan oleh korosi anoda Fe yang berlebihan, terutama jika arus listrik yang digunakan terlalu tinggi atau proses berlangsung terlalu lama. Ion Fe^{2+} atau Fe^{3+} yang dilepaskan ke larutan mungkin tidak sepenuhnya mengalami koagulasi atau presipitasi menjadi senyawa (oksi)hidroksida yang tidak larut, sehingga tetap berada dalam bentuk terlarut. Selain itu, ketidakseimbangan dalam proses elektrokimia, seperti kurang optimalnya pH untuk presipitasi $Fe(OH)_3$, juga dapat menyebabkan Fe tetap dalam larutan.

Terjadinya peningkatan TDS, warna, dan Fe terlarut pada variasi Fe-Fe Kode C menunjukkan bahwa jenis elektroda, parameter operasional, dan kondisi lingkungan seperti pH sangat memengaruhi efektivitas proses elektrokoagulasi. Variasi tersebut, meskipun efektif dalam menghasilkan ion koagulan, dapat menyebabkan masalah tambahan jika ion logam yang dilepaskan tidak sepenuhnya terendapkan atau justru membentuk kompleks baru yang lebih sulit dihilangkan. Untuk mengatasi hal ini, diperlukan optimasi arus, waktu operasi, atau modifikasi penggunaan elektroda untuk meningkatkan efisiensi proses.

3.3. Evaluasi kualitas air hasil elektrokoagulasi terhadap baku mutu Permenkes nomor 2 tahun 2023

Baku mutu sebagai pembanding kualitas air dalam penelitian ini mengacu pada Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 2 Tahun 2023 yang mengatur standar parameter air minum serta keperluan higiene dan sanitasi. Meskipun peraturan tersebut mencakup sejumlah parameter yang luas, penelitian ini hanya menganalisis enam parameter utama, yaitu pH, total padatan terlarut (TDS), kekeruhan, warna, Fe terlarut, dan *chemical oxygen demand* (COD) karena parameter-parameter tersebut merupakan karakteristik dominan air gambut dan paling relevan terhadap mekanisme proses elektrokoagulasi.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa proses elektrokoagulasi dengan variasi kombinasi elektroda Al dan Fe mampu meningkatkan kualitas air gambut pada beberapa parameter. Nilai pH pada variasi A dan B telah memenuhi standar air minum dan higiene sanitasi (6,5–8,5), sedangkan parameter warna pada variasi D telah memenuhi baku mutu yang ditetapkan dengan nilai maksimum 10. Namun demikian, parameter total padatan terlarut (TDS) dengan standar <300 mg/L serta kekeruhan dengan standar <3 NTU pada seluruh variasi perlakuan masih belum memenuhi baku mutu. Selain itu, konsentrasi Fe terlarut pada air gambut yang semula telah berada di bawah ambang batas baku mutu ($\leq 0,2$ mg/L) justru meningkat dan melampaui standar pada variasi B dan C. Hal ini mengindikasikan bahwa air hasil pengolahan belum dapat dikategorikan sebagai air siap minum maupun untuk keperluan higiene dan sanitasi.

Meskipun parameter COD tidak tercantum secara langsung dalam baku mutu Permenkes Nomor 2 Tahun 2023, parameter ini dapat digunakan sebagai indikator beban senyawa organik air gambut. Penurunan nilai COD yang signifikan setelah proses elektrokoagulasi menunjukkan efektivitas metode ini dalam mereduksi senyawa organik terlarut. Berdasarkan hasil tersebut, elektrokoagulasi berpotensi digunakan sebagai proses pengolahan awal (*pre-treatment*) air gambut di Kalimantan Tengah. Peningkatan kualitas pada parameter kunci menunjukkan bahwa teknologi ini dapat mendukung upaya penyediaan air bersih apabila dikombinasikan dengan proses pengolahan lanjutan guna memenuhi baku mutu yang dipersyaratkan.

Secara keseluruhan, variasi elektroda yang digunakan dalam proses elektrokoagulasi sangat memengaruhi efektivitas pengolahan air gambut. Variasi elektroda aluminium sebagai anoda dan katoda (Al–Al) menunjukkan kinerja paling unggul dalam meningkatkan beberapa parameter kualitas air, khususnya penurunan warna dan beban senyawa organik. Meskipun belum seluruh parameter memenuhi baku mutu air minum dan higiene sanitasi sebagaimana diatur dalam Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 2 Tahun 2023, peningkatan kualitas yang dicapai menunjukkan bahwa elektrokoagulasi berpotensi digunakan sebagai proses pengolahan awal (*pre-treatment*) air gambut. Dengan demikian, konfigurasi elektroda Al–Al dapat direkomendasikan sebagai alternatif teknologi yang aplikatif untuk mendukung upaya peningkatan akses air bersih di Provinsi Kalimantan Tengah apabila dikombinasikan dengan proses pengolahan lanjutan.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan penelitian yang dilakukan, penggunaan variasi Al sebagai anoda dan katoda merupakan elektroda yang paling baik bila dibandingkan dengan variasi lainnya dalam meningkatkan kualitas air gambut untuk mendekati standar baku mutu. Terjadi perubahan parameter pH dari 4 menjadi 6,3, kekeruhan 7 NTU menjadi 3 NTU, warna 852 Pt.Co menjadi <1,66 Pt.Co, COD 127 ppm menjadi 18 ppm dan Fe terlarut 0,092 ppm menjadi <0,041 ppm. Namun demikian, parameter TDS mengalami peningkatan dari 35 mg/L menjadi 949 mg/L. Secara keseluruhan, elektrokoagulasi berpotensi digunakan sebagai salah satu metode pengolahan awal air gambut dalam upaya peningkatan kualitas air bersih.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Peneliti mengucapkan terima kasih atas pendanaan oleh PNBPN LPPM Universitas Palangka Raya melalui Hibah Penelitian Dosen Pemula dengan Nomor Kontrak: 2187/UN24.13/AL.04/2024.

6. DAFTAR PUSTAKA

- AlJaberi FY, Ahmed SA and Makki HF. 2020. Electrocoagulation treatment of high saline oily wastewater: evaluation and optimization. *Heliyon* 6(6):e03988. doi:10.1016/j.heliyon.2020.e03988.
- Al-Marri JS, Abouedwan AB, Ahmad MI and Bensalah N. 2023. Electrocoagulation using aluminum electrodes as a sustainable and economic method for the removal of kinetic hydrate inhibitor (*polyvinyl pyrrolidone*) from produced wastewaters. *Front Water* 5:1305347. doi:10.3389/frwa.2023.1305347.
- Angga SC, Rahman S, Toepak EP and Patrix F. 2024. Preliminary monitoring of water quality at Banturung Village, Bukit Batu District, Palangka Raya City. *Eduproxima* 6(3):766–773. doi:10.29100/.v6i3.6001.
- Bashir I, Lone FA, Bhat RA, Mir SA, Dar ZA and Dar SA. 2020. Concerns and threats of contamination on aquatic ecosystems. *Bioremediation and Biotechnology*:1-26.
- Badan Pusat Statistik. 2024. Indikator perumahan dan kesehatan lingkungan 2023. BPS. Jakarta.

- Gao Y, Qin J, Wang Z and Østerhus SW. 2019. Backpulsing technology applied in MF and UF processes for membrane fouling mitigation: A review. *Journal of Membrane Science* 587:117136. doi:10.1016/j.memsci.2019.05.060.
- Garcia-Segura S, Eiband MMSG, De Melo JV and Martínez-Huitle CA. 2017. Electrocoagulation and advanced electrocoagulation processes: A general review about the fundamentals, emerging applications and its association with other technologies. *Journal of Electroanalytical Chemistry* 801:267–299. doi:10.1016/j.jelechem.2017.07.047.
- Girkin NT, Cooper HV, Ledger MJ, O'Reilly P, Thornton SA, Åkesson CM, Cole LES, Hapsari KA, Hawthorne D and Roucoux KH. 2022. Tropical peatlands in the Anthropocene: The present and the future. *Anthropocene*. 40:100354. doi:10.1016/j.ancene.2022.100354.
- Hashem SAM, Gaber GA, Hussein WA and Ahmed ASI. 2024. Electrocoagulation process with Fe/Al electrodes to eliminate pollutants from real and synthetic wastewater. *Results in Materials*.23:100606. doi:10.1016/j.rinma.2024.100606.
- Lu J, Zhang P and Li J. 2021. Electrocoagulation technology for water purification: An update review on reactor design and some newly concerned pollutants removal. *Journal of Environmental Management* 296:113259. doi:10.1016/j.jenvman.2021.113259.
- Mouedhen G, Feki M, Wery MDP and Ayedi HF. 2008. Behavior of aluminum electrodes in electrocoagulation process. *Journal of Hazardous Materials* 150(1):124–135. doi:10.1016/j.jhazmat.2007.04.090.
- PerMenKes RI (Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia) Nomor 2 Tahun 2023 tentang Peraturan Pelaksanaan Peraturan Pemerintah Nomor 66 Tahun 2014 tentang Kesehatan Lingkungan.
- PerPres RI (Peraturan Presiden Republik Indonesia) Nomor 18 Tahun 2020 tentang rencana pembangunan jangka menengah nasional 2020-2024.
- Rahman NA, Jol CJ, Linus AA, Ismail V. 2021. Emerging application of electrocoagulation for tropical peat water treatment: a review. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*. 165:108449. doi:10.1016/j.cep.2021.108449.

- Rahman NA, Albania L, Gilan UJ, Jihed EE, Kumar NKMF, Yassin A and Philip A. 2020. Experimental study of batch electrocoagulation treatment of peat water in Sarawak with aluminium electrodes. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering* 778(1):012126. doi:10.1088/1757-899X/778/1/012126.
- Rahman NA, Jose Jol C, Albania Linus A, Dampam FL, Abdul Jalal NS, Baharudin N and Wan Borhan WWS. 2022. Desalination of Borneo tropical brackish peat water with adsorption process in continuous electrocoagulation treatment. *Desalination*. 527:115574. doi:10.1016/j.desal.2022.115574.
- Rahman NA, Albania LA, Jose JC, Abdul JNS, Kwong Ming C, Wan BWWS, Baharuddin N, Samsul SNA and Abdul MN. 2023. Kinetic modelling of peat water treatment with continuous electrocoagulation using aluminium electrodes. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 11(3):109559. doi:10.1016/j.jece.2023.109559.
- Suhendra DS, Marsaulina I dan Santi DN. 2013. Analisis kualitas air gambut dan keluhan kesehatan pada masyarakat di Dusun Pulo Gambut Desa Suka Rame Baru Kecamatan Kuala Hulu Kabupaten Labuhan Batu Utara tahun 2012. *Jurnal Lingkungan dan Kesehatan Kerja* 2(3):1–10.
- Tegladza ID, Xu Q, Xu K, Lv G and Lu J. 2021. Electrocoagulation processes: A general review about role of electro-generated flocs in pollutant removal. *Process Safety and Environmental Protection* 146:169–189. doi:10.1016/j.psep.2020.08.048.
- Wenten IG, Khoiruddin K, Wardani AK, Aryanti PTP, Astuti DI and Komaladewi AAIAS. 2020. Preparation of antifouling polypropylene/ZnO composite hollow fiber membrane by dip-coating method for peat water treatment. *Journal of Water Process Engineering*. 34:101158. doi:10.1016/j.jwpe.2020.101158.
- Wiyanto E, Harsono B, Makmur A, Pangputra R, Julita J dan Kurniawan MS. 2017. Penerapan elektrokoagulasi dalam proses penjernihan limbah cair. *Jurnal Ilmiah Teknik Elektro* 12(1):19–36. doi:10.25105/jetri.v12i1.1449.

Trajektori perubahan tutupan vegetasi di Pulau Sumatra berbasis analisis spasio-temporal

Trajectory of vegetation cover change on Sumatra Island based on spatio-temporal analysis

Yudi Setiawan^{1,2*}, Kustiyo³, Sahid Agustian Hudjimartsu⁴

¹Departemen Konservasi Sumberdaya Hutan dan Ekowisata, IPB University, Bogor, Indonesia

²Pusat Penelitian Lingkungan Hidup, IPB University, Bogor, Indonesia

³Pusat Riset Geoinformatika, Badan Riset dan Inovasi Nasional, Bogor, Indonesia

⁴Program Studi Teknik Informatika, Universitas Ibn Khaldun, Bogor, Indonesia

Abstrak.

Perubahan tutupan lahan di Pulau Sumatra berlangsung sangat cepat dalam beberapa dekade terakhir, ditandai oleh adanya deforestasi hutan tropis, gangguan ekosistem lahan gambut dan peningkatan kejadian bencana. Analisis spasio-temporal dengan data satelit multi-temporal memberikan wawasan mengenai trajektori perubahan tutupan vegetasi di wilayah ini. Penelitian ini mensintesis temuan terkait pola konversi hutan menjadi penggunaan lain (perkebunan, pertanian, infrastruktur) dan pola pemulihan vegetasi pasca kebakaran, terutama pada lahan gambut. Hasil kajian menunjukkan beberapa trajektori perubahan utama: (1) deforestasi yang diikuti konversi menjadi lahan pertanian/perkebunan, (2) siklus perubahan hutan tanaman, meliputi: penanaman, penebangan, dan penanaman ulang, serta (3) pemulihan sekunder alami pada lahan yang ditinggalkan pasca deforestasi. Selain itu, pada kasus kejadian deforestasi yang disebabkan oleh kebakaran lahan, frekuensi kebakaran berpengaruh signifikan pada jalur suksesi vegetasi. Vegetasi di area yang terbakar satu kali mampu tumbuh kembali mendekati kondisi awal setelah beberapa tahun, sedangkan area yang terbakar berulang kali mengalami pemulihan lebih lambat dan cenderung didominasi semak belukar. Studi ini merekomendasikan perlunya strategi pengelolaan lanskap berkelanjutan berbasis data spasio-temporal, seperti penghentian laju deforestasi tak terkendali dan restorasi ekosistem gambut (*rewetting* dan rehabilitasi vegetasi), untuk mencegah trajektori degradasi lebih lanjut dan mendukung pemulihan tutupan vegetasi jangka panjang.

Kata kunci: perubahan tutupan vegetasi, analisis spasio-temporal, restorasi ekosistem, satelit multi-temporal

Abstract

Land cover change on Sumatra Island has accelerated rapidly over recent decades, marked by extensive tropical forest deforestation, widespread peatland degradation, and increasing disaster occurrences. Spatio-temporal analysis using multi-temporal satellite data provides valuable insights into the trajectories of vegetation cover change in this region. This study synthesizes findings on patterns of forest conversion to other land uses (plantations, agriculture, and infrastructure), as well as vegetation recovery patterns following fire events, particularly in peatland areas. The results reveal several dominant change trajectories: (1) deforestation followed by conversion to agricultural and plantation land, (2) cyclical changes in plantation forests, including planting, harvesting, and replanting phases, and (3) natural secondary regeneration on abandoned land after deforestation. Furthermore, in cases where deforestation is driven by land and forest fires, fire frequency plays a significant role in shaping vegetation succession pathways. Areas burned only once are able to recover toward near-original conditions after several years, whereas areas subjected to repeated fires exhibit slower recovery and tend to be dominated by shrub vegetation. These findings highlight the importance of sustainable landscape management informed by spatio-temporal data, including controlling deforestation and restoring peatlands through rewetting and vegetation rehabilitation, to prevent further degradation and support long-term ecosystem recovery.

Keywords: vegetation cover change, spatio-temporal analysis, ecosystem restoration, multi-temporal satellite

* Korespondensi Penulis
Email : setiawan.yudi@apps.ipb.ac.id

1. PENDAHULUAN

Perubahan penggunaan dan tutupan lahan (*land use and land cover change*, LULCC) merupakan kunci bagi berbagai isu lingkungan regional dan global, seperti degradasi lahan, hilangnya keanekaragaman hayati, perubahan iklim, ketahanan pangan, serta keberlanjutan lingkungan (Foley *et al.* 2005; Lambin and Geist 2006; Turner *et al.* 2007). Di wilayah tropis, perhatian terhadap LULCC meningkat seiring percepatan konversi hutan dan ekosistem rentan, seperti lahan gambut, yang berdampak langsung terhadap siklus karbon global dan stabilitas ekosistem (Lambin *et al.* 2003). Indonesia, khususnya Pulau Sumatra, mengalami laju konversi hutan yang tinggi akibat ekspansi perkebunan dan pembangunan, sehingga menimbulkan keprihatinan global terkait emisi karbon, kehilangan biodiversitas, dan degradasi jasa ekosistem (Miettinen *et al.* 2011; Margono *et al.* 2014). Selama periode 1990-2000, Sumatra kehilangan sekitar 7,5 juta hektare hutan, dengan Provinsi Riau sebagai kontributor terbesar (42%) serta mencatat laju deforestasi tertinggi di Sumatra pada periode 2009-2011 yang didorong oleh perluasan perkebunan kelapa sawit dan hutan tanaman industri (Carlson *et al.* 2012; Margono *et al.* 2014).

Meskipun sektor perkebunan berkontribusi terhadap pertumbuhan ekonomi, deforestasi dan degradasi hutan yang tidak terkendali menimbulkan dampak lingkungan yang signifikan. Secara global, deforestasi dan degradasi hutan tropis merupakan penyumbang emisi gas rumah kaca terbesar kedua setelah sektor energi (IPCC 2019). Dampak lainnya meliputi gangguan siklus hidrologi yang meningkatkan risiko banjir dan kekeringan, konflik penggunaan lahan, serta hilangnya habitat satwa liar endemik Sumatra (Bradshaw *et al.* 2007; Hansen *et al.* 2013).

Selain konversi lahan, Sumatra juga rawan mengalami kebakaran hutan dan lahan, terutama di lahan gambut dataran rendah yang kaya menyimpan karbon namun rentan terhadap gangguan antropogenik dan cuaca ekstrem (Turetsky *et al.* 2015). Pada periode kering akibat El Niño, kebakaran gambut dapat meluas dan sulit dikendalikan, seperti yang terjadi pada tahun 1997 dan 2015 menyebabkan degradasi gambut jangka panjang dan emisi karbon besar (Page *et al.* 2002; Field *et al.* 2016). Kebakaran berulang menyebabkan kehilangan karbon tanah, penurunan muka lahan, serta kerusakan keanekaragaman hayati, sehingga menegaskan pentingnya pemantauan spasio-temporal dan pemulihan vegetasi dalam pengelolaan ekosistem.

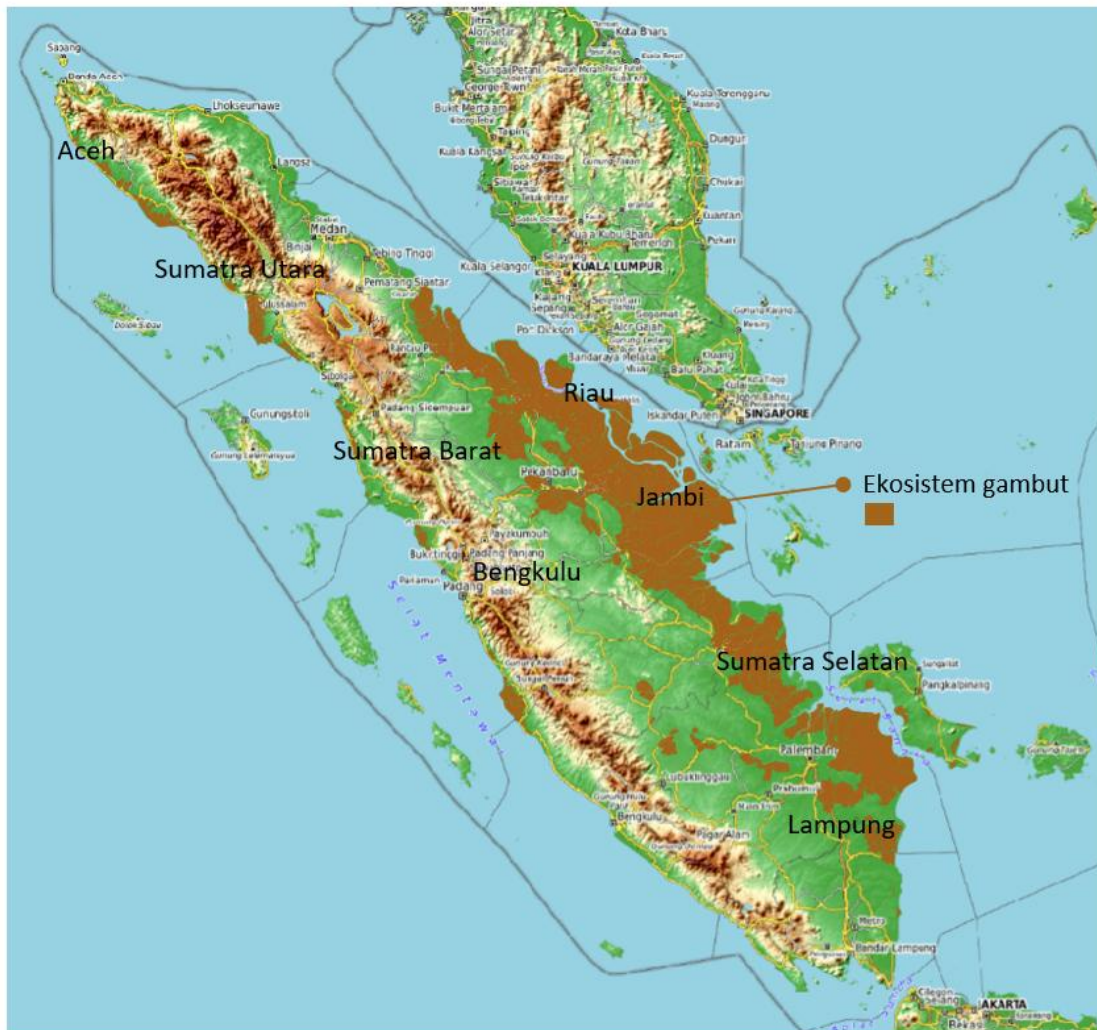
Dalam konteks tersebut, pemahaman mengenai trajektori perubahan tutupan vegetasi menjadi sangat penting. Trajektori perubahan menggambarkan urutan transisi tutupan lahan dari waktu ke waktu, misalnya dari hutan primer menjadi lahan terdegradasi, lalu dikonversi menjadi perkebunan atau berkembang menjadi hutan sekunder (Lambin *et al.* 2003). Pendekatan analisis trajektori dinilai lebih informatif dibandingkan analisis perubahan neto, karena mampu mengungkap proses dan mekanisme perubahan yang mendasari dinamika tutupan lahan (Malanson & Pontius 2005). Melalui pendekatan ini, perubahan akibat gangguan mendadak seperti penebangan atau kebakaran dapat dibedakan dari degradasi bertahap, serta dikaitkan dengan faktor pendorong alami maupun antropogenik (Zhu 2017).

Sejumlah penelitian sebelumnya telah mengkaji dinamika tutupan lahan di Sumatra, termasuk identifikasi pola perubahan vegetasi jangka panjang (Setiawan *et al.* 2015) dan proses pemulihan vegetasi pasca kebakaran gambut yang dipengaruhi oleh frekuensi kebakaran (Setiawan *et al.* 2025). Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan mengkarakterisasi trajektori perubahan tutupan vegetasi di Pulau Sumatra secara spasio-temporal menggunakan data satelit multi-temporal. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai implikasi ekologis dari berbagai trajektori perubahan, khususnya terkait peran gangguan berulang dan ekspansi perkebunan terhadap kapasitas pemulihan ekosistem, serta relevansinya dalam mendukung pengelolaan lanskap dan perumusan kebijakan pembangunan berkelanjutan di Sumatra.

2. METODOLOGI

2.1. Lokasi penelitian

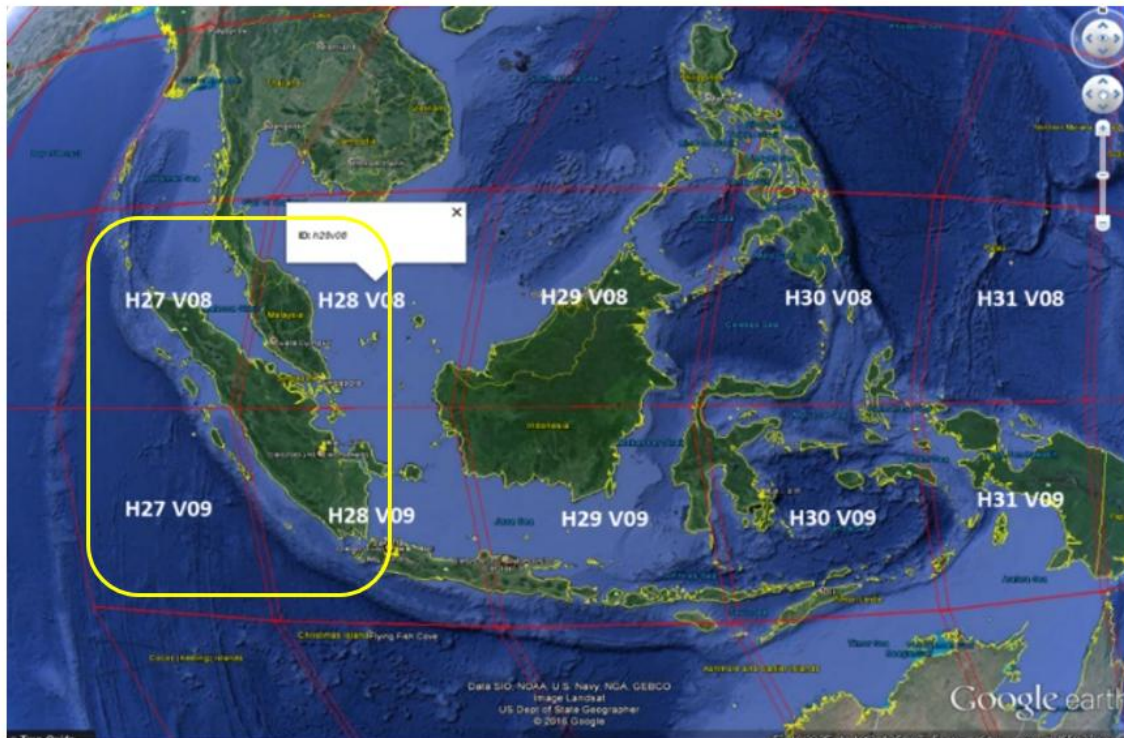
Cakupan studi analisis perubahan tutupan vegetasi meliputi seluruh Pulau Sumatra. Secara geografis, Sumatra terbagi menjadi beberapa provinsi, dari Aceh hingga Lampung, dengan luasan sekitar 47,3 juta hektare (**Gambar 1**). Beberapa provinsi memiliki ekosistem lahan gambut cukup luas yaitu Provinsi Riau, Jambi, dan Sumatra Selatan, yang sering kali secara historis sering kali mengalami kebakaran hutan dan lahan.



Gambar 1. Lokasi penelitian di Pulau Sumatra.

2.2. Data spasial

Penelitian ini menggunakan data penginderaan jauh multi-temporal untuk menganalisis perubahan tutupan vegetasi di Pulau Sumatra. Data utama berupa citra satelit MODIS produk MOD13Q1 dengan resolusi spasial 250 m yang menyediakan *Enhanced Vegetation Index* (EVI) komposit 16-harian dengan koreksi awan, sehingga sesuai untuk memantau dinamika vegetasi secara kontinu. Analisis dilakukan pada periode 2001-2020 untuk merepresentasikan variasi antar dekade, termasuk kejadian El Niño tahun 2015 dan penerapan moratorium hutan sejak 2011. Wilayah kajian dicakup oleh empat tile MODIS (h27v08, h27v09, h28v08, dan h28v09) dengan total sekitar 460 komposit per piksel selama periode pengamatan. Data MODIS diperoleh dari *Land Processes Distributed Active Archive Center* (LP DAAC) dan diproyeksikan ke sistem koordinat geografis WGS84.



Gambar 2. Cakupan tile H/V data MODIS untuk wilayah Sumatra.

Sebagai data pendukung, penelitian ini memanfaatkan citra Landsat dan peta tutupan lahan multi-temporal dari Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK) tahun 2000, 2010, dan 2020 skala 1:250.000 untuk membantu interpretasi jenis dan arah perubahan vegetasi. Selain itu, data titik panas MODIS (*Fire Hotspots Terra/Aqua*) periode 2001-2020 digunakan untuk mengidentifikasi kejadian kebakaran, khususnya di wilayah lahan gambut timur Sumatra yang rentan terhadap gangguan api. Validasi ekologis dilakukan menggunakan data lapangan dan referensi sekunder terkait kondisi vegetasi pada lahan gambut yang terbakar, termasuk informasi struktur tegakan sebelum dan sesudah kebakaran sebagaimana dilaporkan dalam studi sebelumnya (Setiawan *et al.* 2025).

2.3. Metode analisis

2.3.1. Pra-pengolahan data

Seluruh citra EVI MODIS 16-harian disusun menjadi deret waktu per *pixel*. Redaksi derau dilakukan melalui *Maximum Value Composite* (MVC) bulanan, yakni memilih nilai EVI maksimum tiap bulan per *pixel* agar efek awan tersisa berkurang. Hasilnya, diperoleh 12 nilai EVI per tahun per *pixel* (total 240 *time-points* 2001-2020). Data *hotspot* di-*overlay* ke *grid* MODIS untuk menandai *pixel-pixel* yang mengalami

kebakaran pada tahun tertentu. *MODIS Land Discipline Group* (MODLAND) mengembangkan indeks vegetasi EVI MODIS data dengan **Persamaan 1**. Sementara itu, **Gambar 3** mengilustrasikan perubahan nilai indeks dalam beberapa periode tahun yang terdeteksi dan menggambarkan perubahan tutupan lahan yang terjadi.

$$EVI = G \frac{\rho_{nir}^* - \rho_{red}^*}{\rho_{nir}^* + C_1 \rho_{red}^* - C_2 \rho_{blue}^* + L} (1 + L) \dots\dots\dots(1)$$

Keterangan:

ρ_{nir}^* = nilai reflektan dari infra-merah dekat (NIR)

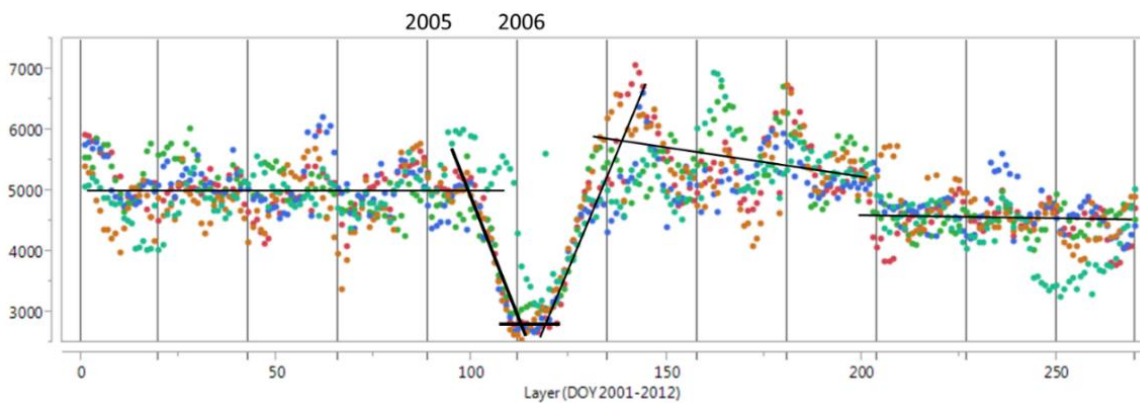
ρ_{red}^* = nilai reflektan dari pita merah (*red*)

ρ_{blue}^* = nilai reflektan dari pita biru (*blue*)

L = faktor koreksi tanah (nilai = 1,0)

C = koefisien koreksi kanal merah akibat efek atmosfer / *aerosol scattering* (nilai C₁= 6,0; nilai C₂ = 7,5)

G = faktor gain (nilai = 2,5)



Gambar 3. Perubahan pola indeks vegetasi yang terdeteksi sebagai perubahan tutupan lahan.

Normalized Burn Ratio (NBR) adalah indeks spektral yang dikembangkan untuk mendeteksi dan mengevaluasi dampak kebakaran terhadap vegetasi, khususnya pada ekosistem hutan dan lahan gambut. NBR memanfaatkan perbedaan respons spektral vegetasi sehat dan vegetasi terbakar pada kanal *Near Infrared* (NIR) dan *Shortwave Infrared* (SWIR). Vegetasi sehat umumnya memiliki reflektansi tinggi pada NIR dan rendah pada SWIR, sedangkan area terbakar atau terdegradasi menunjukkan penurunan reflektansi NIR dan peningkatan reflektansi SWIR akibat hilangnya biomassa hijau, perubahan struktur kanopi, serta peningkatan kandungan abu dan tanah terbuka. Secara matematis, NBR dirumuskan pada **Persamaan 2**.

$$NBR = \frac{(NIR - SWIR)}{(NIR + SWIR)} \dots\dots\dots(2)$$

Keterangan:

SWIR = nilai reflektan *shortwave infrared*

NIR = nilai reflektan dari infra-merah dekat

2.3.2. Deteksi perubahan tahunan

Perbedaan nilai EVI antar tahun dideteksi dengan metode dalam Setiawan *et al.* (2015). Setiap *pixel* dilakukan perhitungan $\Delta\text{EVI} = |\text{EVI}(t) - \text{EVI}(t+1)|$ untuk semua pasangan tahun $t..t+1$. *Pixel* dianggap mengalami perubahan signifikan pada interval $t-t+1$ jika ΔEVI melebihi ambang α , yang ditentukan berdasarkan distribusi ΔEVI di area hutan stabil (*baseline*). Nilai α dipilih setara penurunan >20% dari nilai EVI rata-rata tahunan *pixel*, yang melebihi 2 standar deviasi variabilitas musiman normal. Arah perubahan juga dicatat, di mana penurunan EVI menunjukkan gangguan vegetasi, sedangkan peningkatan EVI mengindikasikan pemulihan. Hasilnya berupa peta *pixel* yang berubah per tahun, yang kemudian dikelompokkan ke dalam segmen trajektori dengan perbedaan nilai rata-rata EVI. Selanjutnya, dihitung perbedaan nilai dari dua tahun secara berurutan (*successive years*) dengan formula jarak (**Persamaan 3**).

$$d_{k,l} = \frac{N_k}{N_{\text{new}}} |\mu_k - \mu_{\text{new}}|^2 + \frac{N_l}{N_{\text{new}}} |\mu_l - \mu_{\text{new}}|^2 \dots \dots \dots (3)$$

Keterangan:

$d_{k,l}$ = jarak antara dua segmen tahun secara berurutan

N = jumlah data yang diobservasi ($N_{\text{new}} = N_k + N_l$)

μ = nilai rata-rata segmen

2.3.3. Analisis trajektori perubahan tutupan

Berdasarkan peta perubahan tahunan, trajektori perubahan tutupan lahan diidentifikasi untuk setiap piksel selama periode 20 tahun. Trajektori didefinisikan sebagai urutan keadaan tutupan lahan suatu piksel, yang dimulai dari kondisi awal tahun 2001, mengalami satu atau lebih perubahan pada tahun-tahun tertentu, hingga mencapai kondisi akhir pada tahun 2020. Beberapa kategori trajektori utama yang digunakan antara lain:

- a. Hutan menjadi Pertanian Permanen: penurunan EVI tajam lalu stabil rendah, kelas akhir pertanian/perkebunan
- b. Hutan menjadi Permukiman/Infrastruktur: penurunan EVI tajam, kelas akhir lahan terbangun
- c. Hutan menjadi Hutan Sekunder: penurunan EVI kemudian meningkat kembali mendekati semula, kelas akhir kembali hutan (regenerasi)
- d. Hutan menjadi Belukar terbuka: penurunan EVI, kelas akhir semak belukar (tidak diolah lanjut)

- e. Siklus Hutan Tanaman: fluktuasi EVI periodik (turun-naik), kelas tutupan berganti hutan tanaman ↔ lahan terbuka
- f. Ekspansi Pertanian pada lahan terbuka: kenaikan EVI bertahap dari lahan tadah hujan/belukar menjadi lahan budidaya.

Kriteria setiap kategori disusun berdasarkan literatur dan contoh empiris, termasuk rujukan Setiawan *et al.* (2015), misalnya dalam mengidentifikasi siklus hutan tanaman melalui pola penurunan EVI signifikan (pemanenan) yang diikuti peningkatan kembali (*replanting*) dalam selang waktu beberapa tahun.

Pixel yang terindikasi kebakaran berdasarkan *hotspot* dan penurunan EVI bersamaan, dilakukan analisis tambahan menggunakan NBR dari citra *Landsat* pasca kejadian. Selisih nilai NBR sebelum dan sesudah kebakaran (dNBR) dihitung untuk menguantifikasi tingkat keparahan kebakaran, di mana nilai dNBR yang tinggi mencerminkan dampak kebakaran yang besar terhadap vegetasi. Selanjutnya, trajektori EVI pasca kebakaran dianalisis guna mengevaluasi laju dan tingkat pemulihan vegetasi, yaitu dengan menilai apakah nilai EVI kembali mendekati kondisi pra-kebakaran. Mengacu pada Setiawan *et al.* (2025), laju pemulihan ditentukan berdasarkan waktu yang dibutuhkan EVI untuk kembali hingga $\pm 10\%$ dari nilai pra-kebakaran, sedangkan piksel yang tidak mencapai tingkat tersebut dalam periode lebih dari lima tahun diklasifikasikan sebagai mengalami degradasi permanen.

2.3.4. Validasi dan evaluasi

Validasi dilakukan melalui dua tahap, yaitu validasi deteksi perubahan dan validasi klasifikasi trajektori. Validasi deteksi perubahan menggunakan 10.000 titik sampel acak yang mewakili area terdeteksi berubah dan tidak berubah, yang diverifikasi menggunakan peta tutupan lahan, citra resolusi tinggi *Google Earth*, serta laporan kasus terkait. Berdasarkan hasil verifikasi, dihitung akurasi keseluruhan serta akurasi produser dan pengguna untuk kelas “berubah” dan “tidak berubah”, dengan target akurasi keseluruhan $\geq 80\%$ sesuai Setiawan *et al.* (2015). Validasi klasifikasi trajektori dilakukan melalui studi kasus pada lokasi representatif, seperti wilayah deforestasi intensif di Riau dan lahan gambut terbakar di Sumatra Selatan, dengan membandingkan hasil klasifikasi terhadap data lapangan, perizinan, survei vegetasi, serta informasi pendukung dari masyarakat lokal, data sekunder, dan media.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Pola spasio-temporal perubahan tutupan vegetasi

Hasil analisis menunjukkan bahwa Pulau Sumatra mengalami kehilangan tutupan hutan yang signifikan selama dua dekade terakhir. Total deforestasi pada periode 2001-2020 diperkirakan mencapai sekitar 6-7 juta hektare, konsisten dengan berbagai sumber independen yang melaporkan kehilangan hutan sekitar 67.000 km² hingga tahun 2018 (Hansen *et al.* 2013; Margono *et al.* 2014; Gaveau *et al.* 2016). Laju deforestasi rata-rata selama periode tersebut melebihi 3.000 km² per tahun, yang menempatkan Sumatra sebagai salah satu *hotspot* deforestasi tropis di dunia (Margono *et al.* 2014). Secara spasial, perubahan tutupan vegetasi tidak terjadi secara merata, dengan konsentrasi kehilangan hutan terbesar teridentifikasi di wilayah Sumatra bagian tengah dan timur, sebagaimana ditunjukkan pada peta distribusi perubahan (**Gambar 4**).



Gambar 4. Distribusi perubahan tutupan vegetasi yang terdeteksi di Pulau Sumatra tahun 2014-2024.

Kawasan dengan aktivitas deforestasi paling intensif di Pulau Sumatra meliputi Provinsi Riau, Jambi, Sumatra Selatan, serta sebagian wilayah pantai timur Sumatra Utara. Riau muncul sebagai *hotspot* deforestasi utama akibat kombinasi ekspansi perkebunan kelapa sawit dan hutan tanaman industri di lahan gambut. Sebaliknya, provinsi di ujung selatan dan utara Sumatra, yaitu Lampung dan Aceh, menunjukkan laju perubahan yang relatif lebih rendah.

Kondisi tersebut dipengaruhi oleh keterbatasan sisa hutan di Lampung yang hanya menyisakan kurang dari 10% tutupan hutan, serta dominasi hutan pegunungan yang relatif masih utuh di Aceh dan Sumatra Utara bagian barat, khususnya pada ekosistem Leuser-Ulu Masen. Di wilayah pegunungan Bukit Barisan secara umum, perubahan tutupan hutan lebih banyak berupa degradasi lokal akibat pembalakan liar dibandingkan konversi masif menjadi lahan pertanian

Dengan mengintegrasikan hasil deteksi perubahan tahunan dan peta tutupan lahan, penelitian ini mengidentifikasi lima trajektori perubahan tutupan vegetasi dominan di Sumatra. Trajektori pertama merupakan pola deforestasi klasik, yaitu perubahan hutan menjadi lahan terbuka yang selanjutnya dikonversi menjadi pertanian permanen. Pola ini ditandai oleh kehilangan tajuk hutan secara *abrupt* yang tercermin dari penurunan nilai EVI yang signifikan, sering kali didahului oleh kebakaran atau fase lahan kosong, sebelum akhirnya berkembang menjadi perkebunan homogen seperti kelapa sawit atau akasia. Trajektori ini paling banyak ditemukan di Riau, Jambi, dan Sumatra Selatan, terutama pada awal tahun 2000-an, dan memberikan kontribusi terbesar terhadap total deforestasi di Sumatra.

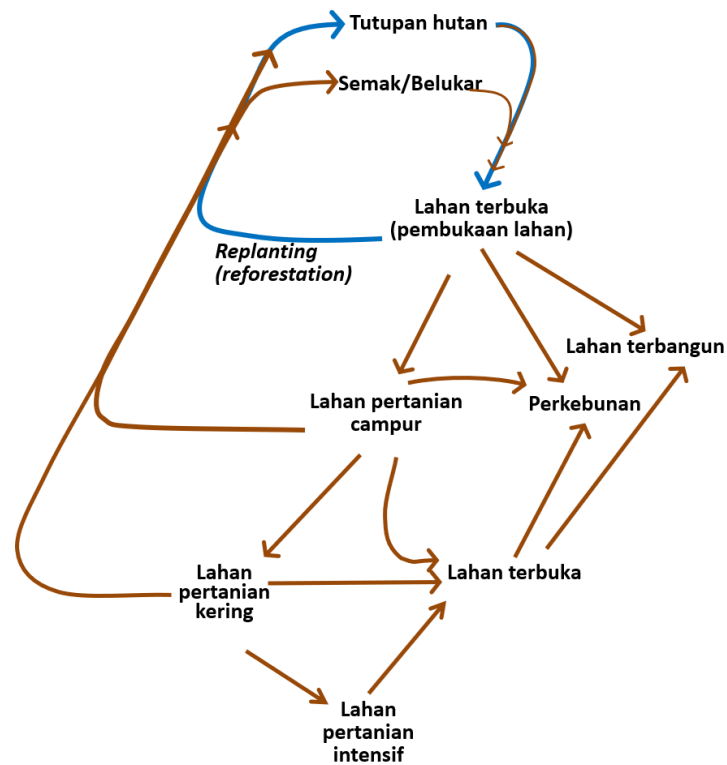
Trajektori kedua menunjukkan perubahan hutan menjadi lahan terbuka yang kemudian dialihfungsikan menjadi permukiman atau infrastruktur. Meskipun memiliki fase awal yang serupa dengan konversi ke pertanian, tujuan akhir trajektori ini bersifat non-pertanian, seperti pembangunan kawasan permukiman, jaringan jalan, atau pertambangan terbuka. Pola ini teridentifikasi di koridor perkotaan Medan-Binjai, sepanjang proyek Jalan Tol Trans-Sumatra, serta di wilayah pertambangan batu bara di Sumatra Selatan. Secara regional, frekuensinya lebih rendah dibandingkan konversi ke pertanian, namun berdampak signifikan pada skala lokal di sekitar pusat pertumbuhan urban dan industri.

Trajektori ketiga mencerminkan ekspansi pertanian pada lahan tidak berhutan, yaitu perubahan dari lahan terbuka atau bersemak menjadi lahan budidaya. Pola ini ditandai oleh peningkatan nilai EVI secara bertahap atau relatif cepat pada piksel non-hutan, tergantung pada intensitas pengelolaan lahan. Trajektori ini umum dijumpai di wilayah pinggiran hutan atau lahan gambut yang telah lama terdegradasi, seperti di perbatasan Jambi-Sumatra Selatan, di mana lahan gambut terbuka banyak dikonversi menjadi kebun sawit rakyat.

Trajektori 4 mencerminkan siklus rotasi hutan tanaman, ditandai oleh perubahan berulang dari hutan tanaman menjadi lahan terbuka dan kembali menjadi hutan tanaman. Pola ini terutama terjadi di kawasan hutan tanaman industri, di mana nilai EVI menunjukkan fluktuasi periodik akibat kegiatan tebang habis dan penanaman kembali. Dalam periode pengamatan 20 tahun, siklus ini dapat terjadi lebih dari satu kali, misalnya pada interval 6-7 tahun. Trajektori ini banyak terdeteksi di Riau dan Sumatra Selatan yang memiliki konsesi hutan tanaman luas, serta penting untuk membedakan antara perubahan tutupan yang bersifat sementara dengan deforestasi permanen. Meskipun tidak menyebabkan kehilangan hutan secara neto dalam jangka panjang, fase lahan terbuka pada siklus ini tetap mencerminkan degradasi habitat sementara.

Trajektori terakhir atau trajektori 5 menunjukkan perubahan hutan menjadi semak belukar atau vegetasi sekunder terdegradasi dengan regenerasi terbatas. Trajektori ini umumnya dipicu oleh kebakaran atau penebangan selektif yang tidak diikuti konversi lahan lebih lanjut. Pola temporal EVI menunjukkan penurunan saat gangguan terjadi, diikuti peningkatan parsial yang tidak kembali ke tingkat semula, sehingga stabil pada nilai yang lebih rendah. Kondisi ini umum dijumpai pada lahan gambut terbakar yang ditinggalkan, di mana vegetasi yang tumbuh kembali didominasi spesies pionir berstruktur rendah. Temuan ini sejalan dengan hasil Setiawan *et al.* (2025) yang menunjukkan bahwa kebakaran berulang menyebabkan stagnasi nilai EVI dan perubahan struktur vegetasi menuju semak belukar. Trajektori ini banyak ditemukan di kawasan konservasi yang mengalami gangguan, seperti pinggiran taman nasional atau lahan yang sebelumnya dikelola namun kemudian ditinggalkan.

Gambar 5 menunjukkan trajektori perubahan tutupan hutan yang bersifat *multi-directional*, di mana hutan tidak hanya mengalami konversi satu arah menuju lahan terbuka atau penggunaan budidaya, tetapi juga melalui berbagai jalur transisi yang berbeda. Tutupan hutan dapat berubah menjadi semak/belukar atau lahan terbuka sebagai tahap awal pembukaan lahan, yang selanjutnya berkembang menjadi pertanian campur, pertanian intensif, maupun perkebunan. Sebaliknya, sebagian lahan terbuka atau lahan terdegradasi juga dapat kembali menuju kondisi berhutan melalui *replanting* atau *reforestasi*, menunjukkan adanya dinamika gangguan-pemulihan dalam sistem penggunaan lahan.



Gambar 5. Trajektori multi-arah perubahan tutupan hutan.

3.2. Perbedaan antar kawasan (kawasan produksi vs kawasan lindung)

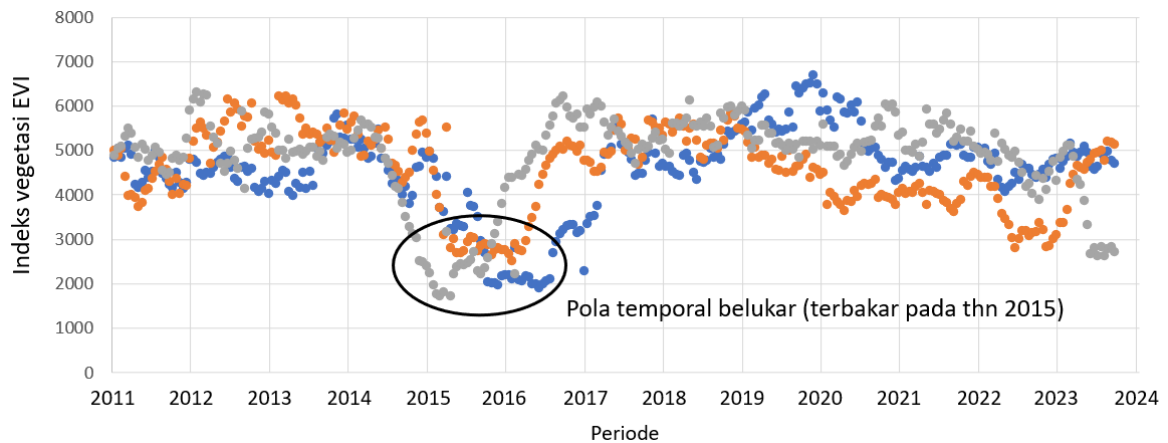
Analisis trajektori per kategori kawasan hutan menunjukkan dinamika yang berbeda antara hutan produksi dan hutan lindung. Pada kawasan hutan produksi (HP), terdeteksi banyak perubahan bersifat siklikal dan terencana. Misalnya di konsesi HPK/HTI, kurva EVI menampilkan pola tebang tanam (Trajektori 4) dan ada juga perubahan gradual akibat praktik *selective logging* yang tersebar (EVI turun sedikit tanpa putus, sulit terdeteksi *threshold*). Pola perubahan *abrupt* maupun gradual di hutan produksi ini mencerminkan dampak aktivitas pengelolaan lahan (*land management*) yang intens di Sumatra. Sebaliknya, di kawasan hutan lindung dan konservasi, secara ideal tidak boleh ada perubahan berarti kecuali gangguan alami.

Perubahan tutupan di TN Tesso Nilo dan TN Gunung Leuser didominasi perambahan serta kebakaran. Penurunan nilai EVI di TN Tesso Nilo mencerminkan konversi hutan menjadi sawit ilegal, sementara kebakaran 2015 merusak SM Giam Siak Kecil. Trajektori hutan konservasi umumnya berubah permanen menjadi belukar atau pertanian ilegal, berbeda dengan siklus tebang di hutan produksi. Hal ini menegaskan kerentanan kawasan lindung terhadap degradasi jika penegakan hukum lemah.

3.3. Kasus khusus: kebakaran dan pemulihan vegetasi

Dinamika perubahan tutupan vegetasi di Sumatra, khususnya pada ekosistem lahan gambut. Analisis spasio-temporal pasca kebakaran memberikan gambaran mengenai kapasitas pemulihan ekosistem gambut. Studi trajektori oleh Setiawan *et al.* (2025) di lahan gambut Merang, Sumatra Selatan menunjukkan perbedaan pemulihan yang jelas antara area yang mengalami kebakaran tunggal dan kebakaran berulang. Pada lahan gambut yang hanya terbakar satu kali, seperti pada peristiwa kebakaran tahun 2015, nilai EVI meningkat secara bertahap pasca kebakaran dan mendekati kondisi pra-kebakaran dalam kurun waktu sekitar 3-5 tahun yang mengindikasikan adanya potensi suksesi alami. Sebaliknya, area yang mengalami kebakaran berulang (mengalami 3-4 kali kebakaran antara 2005-2019) menunjukkan pola EVI yang fluktuatif namun stagnan pada nilai rendah, akibat vegetasi yang terus terbakar sebelum sempat membentuk tutupan yang rapat. Survei lapangan mengonfirmasi bahwa kebakaran berulang menurunkan kompleksitas struktur hutan - hampir semua pohon besar mati, hanya menyisakan tumbuhan bawah seperti paku-pakuan (*Stenochlaena palustris*) dan semak (*Melastoma* sp.). Kondisi vegetasi dengan biomassa rendah ini menyebabkan nilai EVI tetap rendah meskipun terdapat penutupan vegetasi, sehingga mencerminkan pergeseran trajektori ekosistem menuju kondisi terdegradasi permanen apabila gangguan kebakaran terus berulang.

Indeks vegetasi EVI dan NBR sangat berguna dalam memetakan dampak kebakaran di Sumatra. Hasil analisis menunjukkan ratusan ribu hektar lahan terbakar terutama di Sumsel dan Jambi. Ketika *overlay* dengan trajektori, hampir semua *pixel* yang terbakar 2015 masuk kategori "Hutan menjadi Belukar" atau "Hutan Tanaman menjadi Belukar" (karena banyak HTI gambut juga terbakar). Hanya sedikit yang pulih menjadi "Hutan kembali". Ini menandakan *severity* kebakaran 2015 menyebabkan perubahan permanen di banyak area. Berdasarkan hasil analisis, sekitar 6,5% dari hutan Sumatra terbakar setidaknya sekali 2002-2019, dengan beberapa area gambut terbakar berkali-kali (berdasarkan akumulasi *burn area*). Pola spasial menunjukkan area gambut yang dikeringkan untuk konsesi paling rentan terbakar.



Gambar 6. Perubahan dinamika temporal vegetasi yang diperoleh dari data MODIS.

Temuan lain, analisis trajektori juga mengungkap resiliensi relatif hutan non-gambut terhadap kebakaran. Di hutan tanah mineral, jika terbakar sekali umumnya tutupan bisa pulih lebih baik karena pohon-pohon besar mungkin sebagian selamat atau sumber biji dekat. Ini berbeda dengan gambut yang sekali terbakar pun susah pulih karena kondisi tanah berubah (kering dan subsiden). Hal ini menggarisbawahi perlunya perhatian khusus pada trajektori kebakaran di lahan gambut.

3.4. Interpretasi ekologis dan hubungan dengan penggunaan lahan

Hasil analisis trajektori menunjukkan bahwa konversi hutan akibat aktivitas manusia merupakan pendorong utama hilangnya tutupan hutan di Sumatra, terutama melalui jalur hutan menjadi lahan pertanian/perkebunan. Meskipun indeks vegetasi (NDVI/EVI) pada lahan budidaya dapat kembali tinggi, kondisi ini tidak merepresentasikan pemulihan ekosistem, melainkan penggantian hutan alam yang kompleks oleh vegetasi homogen, sehingga analisis trajektori penggunaan lahan menjadi penting untuk membedakan “*greening*” semu dari pemulihan ekologis yang sesungguhnya.

Selain konversi langsung, trajektori hutan menjadi belukar menunjukkan luasnya degradasi tanpa perubahan fungsi lahan permanen, yang berdampak pada penurunan kualitas habitat dan stok karbon, namun sekaligus menyimpan potensi restorasi alami jika gangguan dihentikan. Di sisi lain, trajektori siklik pada hutan tanaman mencerminkan intensifikasi kehutanan yang secara tutupan tampak stabil, tetapi secara ekologis rentan terhadap erosi, emisi karbon, dan kehilangan biodiversitas selama fase lahan terbuka. Pola-pola trajektori ini juga memperlihatkan

kuatnya pengaruh kebijakan dan ekonomi, di mana pembatasan deforestasi skala besar pasca 2011 diimbangi oleh ekspansi lahan skala kecil yang tersebar. Dengan demikian, pemetaan trajektori tidak hanya menjelaskan arah perubahan tutupan hutan, tetapi juga mengidentifikasi wilayah prioritas untuk pencegahan konversi lanjutan dan intervensi restorasi.

3.5. Implikasi dan rekomendasi kebijakan

Implikasi kebijakan dari hasil analisis trajektori menegaskan perlunya perlindungan ketat terhadap sisa hutan alam Sumatra, terutama blok hutan besar dan utuh seperti Leuser dan Ulu Masen, serta kantong hutan dataran rendah yang masih tersisa namun berada di bawah tekanan tinggi. Data trajektori menunjukkan bahwa area ini rentan terhadap konversi ilegal, sehingga penguatan patroli, penegakan hukum dan pelibatan masyarakat lokal menjadi krusial untuk mencegah deforestasi.

Selain perlindungan, restorasi ekosistem pada area terdegradasi (trajektori hutan → belukar) perlu diprioritaskan sebelum lahan berubah fungsi permanen. Lahan gambut terdegradasi dan area hulu DAS yang mengalami degradasi merupakan target strategis untuk rehabilitasi melalui *rewetting*, revegetasi spesies asli, dan pengendalian kebakaran. Integrasi peta trajektori ke dalam perencanaan rehabilitasi hutan dan lahan nasional akan meningkatkan ketepatan sasaran dan efisiensi alokasi sumber daya. Pengendalian kebakaran, khususnya di lahan gambut, muncul sebagai faktor penentu arah trajektori. Area dengan kebakaran berulang perlu menjadi fokus pencegahan berbasis komunitas dan penegakan larangan pembukaan lahan dengan api, disertai kewajiban pengelolaan air oleh pemegang konsesi. Hasil studi ini juga mengindikasikan bahwa moratorium hutan primer dan gambut pasca 2011 efektif menekan deforestasi, namun perlu diperkuat melalui sinkronisasi kebijakan pusat-daerah dan perluasan perlindungan ke hutan sekunder bernilai konservasi tinggi.

Di tingkat tata kelola, informasi trajektori dapat dimanfaatkan untuk penataan ruang dan perizinan berbasis bukti, dengan mengarahkan ekspansi pertanian ke lahan terdegradasi dan menghindari pembukaan hutan baru. Di sisi lain, komitmen nol deforestasi sektor swasta perlu diawasi secara ketat melalui transparansi rantai pasok dan penegakan standar keberlanjutan, serta didukung oleh pemberdayaan petani kecil agar peningkatan produksi tidak mendorong ekspansi ke kawasan hutan.

Secara keseluruhan, studi ini menegaskan bahwa pencegahan deforestasi dan pemulihan lahan terdegradasi harus berjalan beriringan, didukung oleh sistem *monitoring* spasio-temporal yang berkelanjutan. Pemanfaatan analisis trajektori memungkinkan intervensi yang lebih dini, terarah, dan adaptif untuk membelokkan trajektori negatif menuju pemulihan hutan jangka panjang..

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Studi ini menyajikan karakterisasi yang komprehensif terhadap trajektori spasio-temporal perubahan tutupan vegetasi di Pulau Sumatra, yang menunjukkan bahwa kehilangan hutan meningkat tajam pada awal tahun 2000-an, terutama didorong oleh ekspansi perkebunan dan kebakaran berulang di lahan gambut, sebelum melambat dalam satu dekade terakhir seiring intervensi kebijakan dan semakin terbatasnya hutan dataran rendah yang tersisa. Meskipun terjadi perlambatan, kehilangan dan degradasi hutan masih terkonsentrasi pada *hotspot* tertentu, khususnya di Provinsi Riau, Jambi, Sumatra Selatan, dan Sumatra Utara, sementara wilayah lain menunjukkan kondisi relatif stabil atau pemulihan terbatas.

Analisis berbasis trajektori menunjukkan keunggulan yang jelas dibandingkan pendekatan dua-waktu, karena mampu membedakan konversi penggunaan lahan yang bersifat permanen dari gangguan sementara yang diikuti pemulihan, serta mengungkap dinamika perubahan tutupan hutan yang bersifat multi-arah dan multi-tahap. Berbagai tipe trajektori berkorelasi kuat dengan faktor penggerak spesifik, termasuk konversi menuju perkebunan, degradasi akibat pembalakan dan kebakaran, serta dinamika siklik pada hutan tanaman industri. Integrasi deret waktu indeks vegetasi dengan metrik kebakaran semakin memperkuat ketepatan atribusi perubahan.

Dari perspektif ekologi, hasil penelitian ini menegaskan bahwa frekuensi gangguan merupakan faktor kunci yang menentukan ketahanan ekosistem. Gangguan tunggal masih memungkinkan terjadinya pemulihan parsial, namun gangguan berulang, terutama kebakaran, secara signifikan menurunkan kapasitas pemulihan dan mendorong pergeseran menuju kondisi ekosistem yang terdegradasi. Temuan ini menekankan pentingnya pendekatan pengelolaan lanskap yang mempertimbangkan tekanan kumulatif, bukan hanya kejadian gangguan secara individual.

Berdasarkan temuan tersebut, strategi pengelolaan yang efektif perlu memprioritaskan perlindungan hutan alam yang tersisa, restorasi dini pada lahan terdegradasi sebelum terjadi konversi permanen, penguatan pencegahan kebakaran lahan gambut, serta keberlanjutan kebijakan moratorium hutan dan gambut yang didukung penegakan hukum yang konsisten. Integrasi informasi trajektori ke dalam sistem pemantauan dan perencanaan tata ruang berpotensi meningkatkan ketepatan sasaran intervensi konservasi dan restorasi.

Secara keseluruhan, analisis trajektori spasio-temporal merupakan kerangka kerja yang kuat dan relevan secara kebijakan untuk memahami dinamika perubahan tutupan hutan di Sumatra, serta mendukung pengambilan keputusan berbasis bukti dalam pengelolaan hutan dan lanskap yang adaptif dan berkelanjutan.

5. UCAPAN TERIMAKASIH

Penelitian ini didukung oleh pendanaan RIIM LPDP dan Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) melalui Program Riset dan Inovasi untuk Indonesia Maju (RIIM) *Batch* 3, dengan Nomor Kontrak 4/IV/KS/05/2023 dan 13955/IT3/PT.01.03/P/B/2023. Kami juga menyampaikan apresiasi yang sebesar-besarnya kepada Pusat Penelitian Lingkungan Hidup, *International Research Institute for Environment and Climate Change* (PPLH-LRI LPI), IPB University, serta para mitra kolaborasi, termasuk Direktorat Inventarisasi dan Pemantauan Sumber Daya Hutan, Kementerian Kehutanan Republik Indonesia, dan Laboratorium Analisis Lingkungan dan Pemodelan Geospasial, Fakultas Kehutanan dan Lingkungan, IPB University, atas dukungan berharga mereka dalam kegiatan validasi lapangan dan penyediaan data. Selain itu, kami mengucapkan terima kasih kepada seluruh tim lapangan, para pemangku kepentingan lokal, dan mitra peneliti yang telah memberikan kontribusi penting, sehingga penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik.

6. DAFTAR PUSTAKA

- Bradshaw CJA, Sodhi NS, Peh KSH, Brook BW. 2007. Global evidence that deforestation amplifies flood risk and severity. *Global Change Biology* 13:237-256.
- Carlson KM, Curran LM, Ratnasari D, Pittman AM, Soares-Filho BS, Asner GP, Trigg SN, Gaveau DA, Lawrence D, and Rodrigues HO. 2012. Committed carbon emissions, deforestation, and community land conversion from oil palm plantation expansion

- in West Kalimantan, Indonesia. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 109(19):7559-7564. <https://doi.org/10.1073/pnas.1200452109>
- Field RD, van der Werf GR, Fanin T, Fetzner EJ, Fuller R, Jethva H, Levy R, Livesey NJ, Luo M, Torres O, and Worden HM. 2016. Indonesian fire activity and smoke pollution in 2015 show persistent nonlinear sensitivity to El Niño-induced drought. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 113(33):9204-9209. <https://doi.org/10.1073/pnas.1524888113>
- Foley JA, Defries R, Asner GP, Barford C, Bonan G, Carpenter SR, Chapin FS, Coe MT, Daily GC, Gibbs HK, Helkowski JH, Holloway T, Howard EA, Kucharik CJ, Monfreda C, Patz JA, Prentice IC, Ramankutty N, and Snyder PK. 2005. Global consequences of land use. *Science* 309(5734):570-574. <https://doi.org/10.1126/science.1111772>.
- Gaveau DLA, Sheil D, Husnayaen, Salim MA, Arjasakusuma S, Ancrenaz M, Pacheco P, and Meijaard E. 2016. Rapid conversions and avoided deforestation: examining four decades of industrial plantation expansion in Borneo. *Scientific Reports* 6:32017.
- Hansen MC, Potapov PV, Moore R, Turubanova SA, Tyukavina A, Thau D, Stehman SV, Goetz SJ, Loveland TR, Kommareddy A, Egorov A, Chini L, Justice CO, and Townshend JR. 2013. High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. *Science* 342:850-853.
- Lambin EF and Geist H. 2006. *Land-use and land-cover change: local processes and global impacts*. Springer 10.1007/3-540-32202-7.
- Lambin EF, Geist HJ, Lepers E. 2003. Dynamics of land-use and land-cover change in tropical regions. *Annual Review of Environment and Resources* 28:205-241.
- Margono BA, Potapov PV, Turubanova S, Stolle F, Hansen MC. 2014. Primary forest cover loss in Indonesia over 2000-2012. *Nature Climate Change* 4:730-735.
- Malanson J and Pontius RG. 2005. Comparison of the structure and accuracy of two land change models. *Internasional Journal of Geographical Information Science* 19(2):243-265.
- Miettinen J, Shi C, Liew SC. 2011. Deforestation rates in insular Southeast Asia between 2000 and 2010. *Global Change Biology* 17:2261-2270.

- Page SE, Siegert F, Rieley JO, Boem HDV, Jaya A, and Limin S. 2002. The amount of carbon released from peat and forest fires in Indonesia during 1997. *Nature* 420:61-65.
- Setiawan Y, Lubis MI, Yusuf SM, Prasetyo LB. 2015. Identifying change trajectory over the Sumatra's forestlands using moderate image resolution imagery. *Procedia Environmental Sciences* 24:189-198.
- Setiawan Y, Kustiyo, Hudjimartsu SA, Handayani MA, Jamil A, and Putra EI. 2025. Spatio-temporal detection of vegetation change and recovery in fire-affected peatlands of Sumatra, Indonesia. *Journal of Natural Resources and Environmental Management (JPSL)*15(6):1034-1050. DOI: 10.29244/jpsl.15.6.1034.
- Turner BL, Lambin EF, Reenberg A. 2007. The emergence of land change science for global environmental change and sustainability *PNAS* 104:20666-20671
- Turetsky MR, Benscoter B, Page S, Rein G, van der Werf GR, Watts A. 2015. Global vulnerability of peatlands to fire and carbon loss. *Nature Geoscience* 8:11-14.
- Zhu Z. 2017. Change detection using landsat time series: A review of frequencies, preprocessing, algorithms, and applications. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 130:370-384

JURNAL PENGELOLAAN LINGKUNGAN BERKELANJUTAN

JOURNAL OF ENVIRONMENTAL SUSTAINABILITY MANAGEMENT

ISSN 2598-0017 | E-ISSN 2598-0025

Vol. 9 No. 3, Desember 2025

Pengelolaan dan mitigasi dampak limbah masker di Kecamatan Rungkut, Surabaya (Tarikh Azis Ramadani, An'nisa Kurniawati, Ayu Nindyapuspa)	233-245
Penerapan teknik <i>low impact development</i> (LID) untuk optimalisasi sistem drainase (studi kasus: Kecamatan Cianjur) (Moh. Rangga Sururi, Lingga Rendragraha Badrukamal, Rachmawati Sugiharti Djembarmanah, Fauzi Fadlurrohman)	246-264
Assessing wastewater treatment performance in small island contexts: a multi-aspect evaluation of Tidung Besar Island, Indonesia (Gatot Prayoga, Gatot Yulianto, Hefni Effendi)	265-289
Status keberlanjutan keramba jaring apung di Danau Rawa Pening pada dimensi ekologi berdasarkan pendekatan RAPFISH (Tesalonika Putri Kinanti, Djohan, Desti Christian Cahyaningrum)	290-306
Life cycle assessment of coal-based power plants: impacts on urban carbon footprint and externality costs (Zahidah Mahroini, Feneubrina Bainirad)	307-320
Elektrokoagulasi dalam pengelolaan air gambut: studi komparatif elektroda aluminium dan besi (Stevin Carolius Angga, Muh Supwatul Hakim, Samsul Arifin, Syahrani Riana Dewi, Enjel Elya Resha, Tety Wahyuningsih Manurung)	321-332
Trajektori perubahan tutupan vegetasi di Pulau Sumatra berbasis analisis spasio-temporal (Yudi Setiawan, Kustiyo, Sahid Agustian Hudjimartsu)	333-351

Tersedia secara *online* di <https://journal.bkpsl.org/index.php/jplb>

Sekretariat Jurnal Pengelolaan Lingkungan Berkelanjutan (JPLB)

Gedung Pusat Penelitian Lingkungan Hidup (PPLH) Lantai 4

Kampus IPB Dramaga Bogor 16680

Telp. 0251 - 8621262; Fax. 0251 - 8622134

e-mail : jplb@bkpsl.org / jurnalbkpsl@gmail.com



9 772598 002001



9 772598 001004