

Volume 10 Nomor 2 Tahun 2026
A g u s t u s 2 0 2 6

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.

Potensi stok dan nilai ekonomi karbon ekosistem lamun di Desa Tanjung Sungkai, Kabupaten Kotabaru

Potential carbon stock and economic value of seagrass ecosystem carbon in Tanjung Sungkai Village, Kotabaru Regency

Aprizal Junaidi^{1*}, Gatot Yulianto², Niken Tunjung Murti Pratiwi², Novi Susetyo Adi³

¹Program Studi Pengelolaan Sumberdaya Pesisir dan Lautan, IPB University, Bogor, Indonesia

²Departemen Manajemen Sumberdaya Perairan, IPB University, Bogor, Indonesia

³Balai Besar Riset Sosial Ekonomi Kelautan dan Perikanan, Kementerian Kelautan dan Perikanan, Jakarta, Indonesia

Abstrak.

Ekosistem lamun merupakan salah satu ekosistem karbon biru yang berperan penting dalam penyimpanan karbon pesisir. Namun secara global mengalami penurunan luasan dan kualitas. Desa Tanjung Sungkai di Kabupaten Kotabaru, Kalimantan Selatan, memiliki potensi padang lamun yang cukup dan termasuk dalam lokasi indikatif RZ KSNT Cadangan Karbon Biru. Namun ketersediaan informasi ilmiah terkait besaran simpanan karbon total dan nilai ekonomi karbon di kawasan ini masih sangat terbatas. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kondisi ekosistem lamun berdasarkan persentase tutupan, estimasi potensi stok karbon dan nilai ekonomi karbon sebagai dasar pengelolaan pesisir berkelanjutan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tutupan lamun rata-rata sebesar $33,05 \pm 20,36\%$ (kategori sedang), dengan empat jenis lamun yang teridentifikasi, yaitu *Enhalus acoroides*, *Thalassia hemprichii*, *Syringodium isoetifolium* dan *Halophila ovalis*. Struktur komunitas didominasi oleh *H. ovalis* (59%), diikuti *S. isoetifolium* (36%). Total stok karbon mencapai 2.951.278 ton. Nilai ekonomi karbon lamun diperkirakan sebesar Rp 17,82 miliar, sementara degradasi ekosistem per hektare berpotensi menimbulkan kerugian hingga Rp 660 juta. Pendekatan *Adaptive Management* dinilai relevan untuk mendukung pengelolaan ekosistem lamun yang berkelanjutan.

Kata kunci: ekosistem lamun, karbon biru, stok karbon, nilai ekonomi karbon, Desa Tanjung Sungkai

Abstract.

*Seagrass ecosystems are blue carbon ecosystems that play a crucial role in coastal carbon storage. However, they are undergoing a global decline in terms of area and quality. The village of Tanjung Sungkai in Kotabaru Regency, South Kalimantan, has significant seagrass potential and is included in the indicative location of the KSNT Blue Carbon Reserve. However, scientific information regarding the total carbon storage and economic value of carbon in this area is limited. Therefore, this study aimed to evaluate the condition of the seagrass ecosystem based on seagrass cover percentage, estimate carbon stock potential and assess the economic value of carbon to support sustainable coastal management. The results showed that the average seagrass cover was $33.05 \pm 20.36\%$ (moderate category), with four types of seagrass identified: *Enhalus acoroides*, *Thalassia hemprichii*, *Syringodium isoetifolium* and *Halophila ovalis*. The community structure was dominated by *H. ovalis* (59%), followed by *S. isoetifolium* (36%). The total carbon stock reached 2,951.278 tons and the economic value of seagrass carbon was estimated at IDR 17.82 billion, while ecosystem degradation per hectare had the potential to cause losses of up to IDR 660 million. The Adaptive Management approach is considered relevant to support sustainable seagrass ecosystem management.*

Keywords: seagrass ecosystem, blue carbon, carbon stock, carbon economic value, Tanjung Sungkai Village

1. PENDAHULUAN

Ekosistem lamun (*seagrass meadows*) merupakan salah satu ekosistem pesisir yang memiliki peran ekologis yang sangat penting dalam mendukung keberlanjutan lingkungan pesisir. Lamun berfungsi sebagai habitat dan *nursery ground* bagi berbagai organisme laut, penstabil sedimen, serta pelindung alami garis pantai dari abrasi dan erosi (Orth *et al.* 2006; Waycott *et al.* 2009). Selain fungsi ekologis tersebut, lamun juga

* Korespondensi Penulis
Email : aprizaljunaidi@gmail.com

berperan sebagai penyedia jasa ekosistem pengaturan melalui kemampuannya menyerap dan menyimpan karbon dalam jumlah besar, sehingga dikategorikan sebagai ekosistem karbon biru (*blue carbon ecosystem*) (Nellemann *et al.* 2009).

Lamun mampu menyimpan karbon organik dalam biomassa di atas dan di bawah permukaan, serta dalam sedimen melalui proses pengendapan jangka panjang (Fourqurean *et al.* 2012). Meskipun hanya mencakup sekitar 0,1% dari total luas dasar laut global (Kennedy *et al.* 2010), ekosistem ini mampu mengakumulasi cadangan karbon dalam jumlah besar, yang secara global diperkirakan mencapai 4,2-8,4 miliar ton (Fourqurean *et al.* 2012), dengan laju simpanan rata-rata sekitar 138 gC/m² tahun (McLeod *et al.* 2011). Kapasitas penyimpanan karbon tersebut menjadikan ekosistem lamun sebagai salah satu penyerap karbon pesisir yang paling efisien dan relevan dalam upaya mitigasi perubahan iklim (Duarte *et al.* 2013).

Kemampuan ekosistem lamun dalam menyimpan karbon sangat dipengaruhi oleh kondisi ekosistemnya. Tutupan lamun sering digunakan sebagai indikator yang merepresentasikan stabilitas dan fungsi ekosistem lamun secara keseluruhan (Unsworth *et al.* 2022). Penurunan tutupan lamun dapat menyebabkan terganggunya fungsi ekologis dan berkurangnya kapasitas penyimpanan karbon bahkan menyebabkan pelepasan kembali karbon yang sebelumnya tersimpan ke atmosfer, sehingga mengubah peran lamun dari penyerap karbon menjadi sumber emisi karbon (Pendleton *et al.* 2012; Lovelock *et al.* 2017).

Secara global, ekosistem lamun mengalami penurunan luasan dan kualitas yang signifikan dalam beberapa dekade terakhir. Menurut Waycott *et al.* (2009), sekitar 29% ekosistem lamun dunia telah hilang sejak akhir abad ke-19, dengan laju kehilangan yang meningkat tajam dari sekitar 0,9% per tahun sebelum 1940 menjadi sekitar 7% per tahun sejak 1990. Skala nasional, kondisi ekosistem lamun Indonesia bersifat tidak seragam antarwilayah, dengan beberapa lokasi mengalami degradasi berat. Kondisi tersebut tercermin pada studi kasus Bangka Belitung yang mencatat kehilangan habitat lamun sebesar 82,79% selama periode 2000-2022, sehingga merepresentasikan tekanan degradasi serius di wilayah pesisir Indonesia (Adi *et al.* 2024). Penurunan ini terutama dipicu oleh intensifikasi aktivitas manusia di wilayah pesisir, seperti pembangunan infrastruktur pantai, aktivitas perikanan, lalu lintas perahu, serta peningkatan beban nutrien dan sedimen dari daratan (Orth *et al.* 2006;

Unsworth *et al.* 2022). Degradasi ekosistem lamun berdampak langsung pada penurunan fungsi ekologis, hilangnya jasa ekosistem, serta meningkatnya kerentanan wilayah pesisir terhadap dampak lingkungan dan perubahan iklim.

Indonesia tercatat sebagai salah satu negara dengan luasan ekosistem lamun terbesar di dunia dan berkontribusi signifikan terhadap penyimpanan karbon global, dengan total simpanan karbon diperkirakan mencapai 368,5 Tg dan sedimen sebagai komponen penyimpan utama sekitar 129,9 Mg C/ha (Alongi *et al.* 2016). Besarnya potensi tersebut juga mencerminkan nilai ekonomi yang penting, karena simpanan karbon lamun dapat dikonversi menjadi nilai moneter melalui konsep nilai ekonomi karbon (Pendleton *et al.* 2012). Estimasi nilai ini berperan dalam meningkatkan pemahaman, serta komitmen pemerintah dan masyarakat terhadap konservasi ekosistem pesisir yang sejalan dengan agenda pembangunan berkelanjutan dan mitigasi perubahan iklim (UNEP 2020). Meskipun demikian, pengelolaan ekosistem lamun di Indonesia masih relatif tertinggal dibandingkan ekosistem pesisir lainnya, khususnya mangrove, akibat keterbatasan data, rendahnya integrasi nilai jasa ekosistem dalam perencanaan pesisir, serta minimnya mekanisme insentif perlindungan lamun (Howard *et al.* 2017; IOJI 2023)

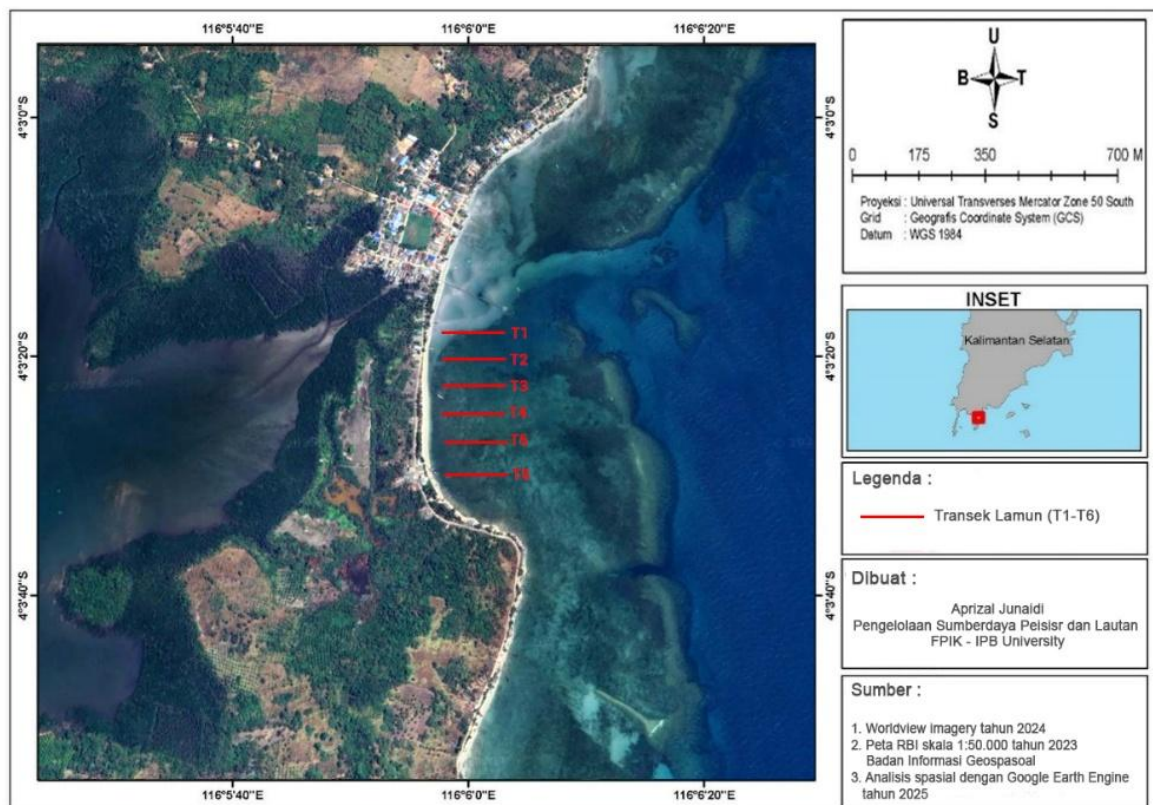
Desa Tanjung Sungkai merupakan wilayah pesisir di Kabupaten Kotabaru, Provinsi Kalimantan Selatan, yang memiliki potensi padang lamun relatif luas dengan tingkat tutupan beragam. Variasi tutupan tersebut mengindikasikan perbedaan intensitas tekanan lingkungan dan aktivitas antropogenik yang memengaruhi. Secara kebijakan, kawasan ini termasuk dalam lokasi indikatif Rencana Zonasi Kawasan Strategis Nasional Tertentu (RZ KSNT) Cadangan Karbon Biru (KKP 2025). Meskipun memiliki potensi lamun yang signifikan, ketersediaan informasi ilmiah terkait besaran simpanan karbon total dan nilai ekonomi karbon di kawasan ini masih sangat terbatas.

Berdasarkan kondisi tersebut, permasalahan utama penelitian ini terletak pada belum tersedianya data dan informasi yang komprehensif mengenai kondisi ekosistem lamun, potensi penyimpanan karbon, serta nilai ekonomi jasa ekosistem lamun di Desa Tanjung Sungkai sebagai dasar perumusan pengelolaan lingkungan berkelanjutan pada skala desa. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kondisi ekosistem lamun berdasarkan persentase tutupan, estimasi potensi stok karbon dan nilai ekonomi karbon sebagai dasar pengelolaan pesisir berkelanjutan.

2. METODOLOGI

2.1. Lokasi dan waktu penelitian

Penelitian dilaksanakan pada bulan Mei-Juni 2025 di Desa Tanjung Sungkai, Kabupaten Kotabaru, Provinsi Kalimantan Selatan (**Gambar 1**), yang merupakan kawasan pesisir dangkal dan relatif terlindung, dengan kondisi lingkungan yang dipengaruhi oleh dinamika pasang surut dan aktivitas masyarakat pesisir. Karakteristik tersebut menjadikan wilayah ini representatif untuk kajian ekosistem lamun dan pengelolaan lingkungan pesisir.



Gambar 1. Lokasi penelitian di Desa Tanjung Sungkai, Kabupaten Kotabaru.

2.2. Pengambilan data dan sampel penelitian

Pengambilan data tutupan lamun dilakukan menggunakan metode *SeagrassWatch* (McKenzie *et al.* 2003), dengan enam transek yang dipasang tegak lurus terhadap garis pantai (**Gambar 1**). Setiap transek sepanjang 100 m dengan interval pengamatan 10 m menggunakan transek kuadrat. Pada setiap kuadrat dilakukan estimasi visual persentase tutupan lamun dan pencatatan komposisi jenis yang dijumpai.

Pengambilan sampel ditentukan berdasarkan tingkat tutupan lamun dari hasil tutupan lamun di lokasi penelitian, yaitu: (1) tutupan jarang, (2) tutupan sedang dan (3) tutupan padat/sangat padat. Sampel lamun diambil menggunakan pipa pvc ukuran diameter 6 inci dan panjang 30 cm, mencakup semua spesies yang ditemukan di lokasi. Individu lamun diambil utuh dari akar hingga daun, kemudian dipisahkan menjadi dua bagian : bagian atas permukaan (*above ground*) yang terdiri dari daun dan tangkai, serta bagian bawah permukaan (*below ground*) yang meliputi akar dan rimpang (*rhizome*). Sampel sedimen diambil menggunakan pipa PVC berdiameter 3 inci dan panjang 120 cm yang ditekan atau diketuk ke dalam substrat hingga terisi penuh, kemudian nilai kompaksi diukur (Rustam *et al.* 2019). Core sedimen kemudian dibelah dan dipotong per 5 cm, lalu dikelompokkan ke dalam empat interval kedalaman: 0-15 cm, 15-30 cm, 30-50 cm dan 50-100 cm (Donato *et al.* 2011; Kauffman *et al.* 2011).

2.3. Analisis data dan sampel penelitian

Tutupan lamun dianalisis menggunakan metode Rahmawati *et al.* (2017) dengan menghitung rata-rata persentase tutupan lamun pada setiap transek. Nilai rata-rata seluruh transek kemudian digunakan untuk merepresentasikan persentase tutupan lamun pada lokasi pengamatan. Penentuan kandungan karbon biomassa dan sedimen diawali dengan pengeringan sampel lamun dan sedimen di laboratorium pada suhu 60-70 °C menggunakan oven, selama sekitar tiga hari sampai diperoleh bobot kering konstan. Bobot kering tersebut selanjutnya digunakan untuk mengestimasi kandungan karbon biomassa vegetasi lamun dengan menerapkan faktor konversi karbon sebesar 0,34 yang menunjukkan bahwa rata-rata kandungan karbon pada biomassa kering lamun adalah 34% (Duarte 1990) menggunakan **Persamaan 1**.

$$\text{Karbon Biomassa (kg C /m}^2\text{)} = \frac{\text{Biomassa tanaman} \times 0,34}{\text{luas area plot (m}^2\text{)}} \dots\dots\dots (1)$$

Kandungan karbon organik sedimen dianalisis menggunakan metode *Loss on Ignition* (LOI). Metode ini menghitung persentase bahan organik berdasarkan selisih berat sampel sebelum dan sesudah proses pembakaran (%LOI), Selanjutnya, nilai %LOI dikonversi menjadi kandungan karbon organik (%C) menggunakan faktor konversi Fourqurean *et al.* (2012) menggunakan **Persamaan 2** atau **Persamaan 3**.

$$\%C_{Org} = 0,40 \times \%LOI - 0,21 ; \text{ jika } \% LOI < 0,2 \dots\dots\dots (2)$$

$$\%C_{Org} = 0,43 \times \%LOI - 0,33; \text{ jika } \% LOI > 0,2 \dots\dots\dots (3)$$

Keterangan:

%C_{Org} = Kandungan karbon organik (%)

%LOI = *Loss on Ignition* (LOI) atau massa yang hilang saat dipanaskan pada suhu tinggi

Total stok karbon ditentukan dengan menjumlahkan stok karbon pada komponen biomassa dan sedimen, kemudian dikalikan dengan luas ekosistem lamun berbasis data Allen Coral Atlas (2022) seperti pada **Persamaan 4**.

$$C_{\text{total}} = (C_{\text{biomassa}} + C_{\text{sedimen}}) \times A \dots\dots\dots(4)$$

Keterangan:

C_{biomass} = Stok karbon biomassa per satuan luas (ton C/ha)

C_{sediment} = Stok karbon sedimen per satuan luas (ton C/ha)

A = Luasan ekosistem lamun (ha)

Perhitungan nilai ekonomi karbon ekosistem lamun dilakukan menggunakan pendekatan *Social Cost of Carbon* (SCC) dengan mempertimbangkan fraksi kehilangan karbon pasca degradasi. Pendekatan ini digunakan untuk mengestimasi kerugian ekonomi akibat emisi CO₂ yang berasal dari karbon biomassa dan sedimen lamun selama 25 tahun (2025-2050) setelah terjadinya degradasi. Perhitungan dilakukan mengikuti **Persamaan 5** yang merupakan modifikasi dari metode Krause *et al.* (2025).

$$SC_{IDR} = [(C_{\text{biomass}} + C_{\text{sediment}} \times f_{\text{loss}}) \times A \times 3,67 \times SCC] \times R \dots\dots\dots(5)$$

Keterangan:

SC_{IDR} = Nilai ekonomi karbon dalam rupiah (Rp),

C_{biomass} = Stok karbon biomassa per satuan luas (ton C/ha)

C_{sediment} = Stok karbon sedimen per satuan luas (ton C/ha)

f_{loss} = Fraksi kehilangan karbon sedimen selama 25 tahun (0,53),

A = Luas ekosistem lamun (ha)

3,67 = Faktor konversi karbon (C) menjadi karbon dioksida (CO₂), berdasarkan rasio massa molekul CO₂ terhadap C (44/12),

SCC = *Social Cost of Carbon* (185 USD /ton CO₂)

R = Nilai tukar rupiah terhadap dolar Amerika Serikat (Rp16.800).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Kondisi ekosistem lamun

Secara umum, tutupan lamun di lokasi penelitian memiliki nilai rata-rata sebesar 33,05 ± 20,36%. Berdasarkan kategori tutupan lamun, nilai rata-rata tersebut berada pada kategori sedang. Namun demikian, nilai standar deviasi yang relatif tinggi menunjukkan bahwa kondisi ekosistem lamun di lokasi penelitian bersifat heterogen, dengan perbedaan tutupan yang mencolok antar transek. Rentang nilai tutupan yang lebar, dari 3,98% (kategori jarang) hingga 61,93% (kategori padat) (**Tabel 1**).

Tabel 1. Tutupan lamun, jenis dominan dan karakteristik lokasi per transek.

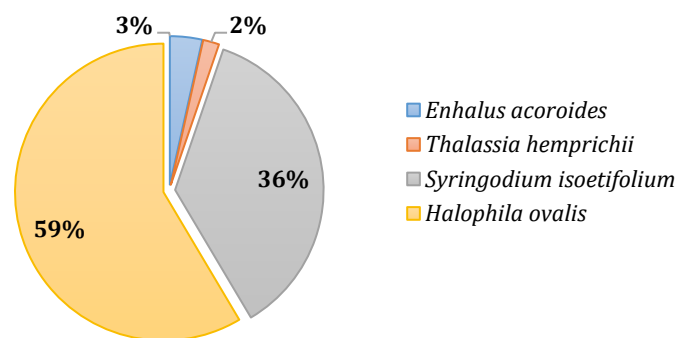
Lokasi/ transek	Tutupan lamun (%)	Kategori tutupan	Jenis lamun dominan	Keterangan lokasi
T1	3,98	Jarang	<i>Syringodium isoetifolium</i>	Aktivitas manusia tinggi; dekat dermaga kayu, area labuh jangkar dan permukiman
T2	16,48	Jarang	<i>Syringodium isoetifolium</i> ; <i>Halophila ovalis</i>	Aktivitas manusia tinggi; sandar kapal nelayan dan kawasan permukiman
T3	39,77	Sedang	<i>Halophila ovalis</i>	Aktivitas manusia sedang
T4	23,30	Jarang	<i>Halophila ovalis</i>	Aktivitas manusia sedang
T5	61,93	Padat	<i>Halophila ovalis</i>	Area terlindung; aktivitas manusia jarang
T6	52,84	Padat	<i>Halophila ovalis</i>	Area terlindung; aktivitas manusia jarang
Rata-rata	33,05 ± 20,36	Sedang		

Transek T1 dan T2 menunjukkan tutupan lamun rendah, masing-masing sebesar 3,98% dan 16,48%. Kedua transek ini berada pada area dengan aktivitas manusia yang tinggi, ditandai oleh keberadaan dermaga kayu, lokasi sandar dan labuh kapal nelayan, serta kedekatannya dengan kawasan permukiman. Kondisi tersebut berimplikasi pada tingginya gangguan fisik terhadap padang lamun. Transek T3 dan T4 memiliki tutupan lamun kategori sedang, yaitu 39,77% dan 23,30%. Area ini merupakan zona dengan aktivitas manusia tingkat sedang, di mana tekanan antropogenik masih terjadi namun tidak seintensif T1 dan T2. Transek T5 dan T6 menunjukkan tutupan lamun tertinggi, masing-masing sebesar 61,93% dan 52,84%. Kedua transek ini terletak pada area yang relatif terlindung, dengan aktivitas manusia yang jarang, sehingga memungkinkan lamun tumbuh dan berkembang secara lebih optimal.

Secara umum, pola tutupan lamun memperlihatkan peningkatan seiring berkurangnya intensitas aktivitas manusia, yang mengindikasikan bahwa tekanan antropogenik berperan penting dalam menentukan kondisi ekosistem lamun di lokasi penelitian. Hal ini sejalan dengan temuan Turschwell *et al.* (2021) yang menyatakan bahwa pada skala global, penurunan tutupan lamun berkaitan dengan tingginya tekanan aktivitas manusia, sedangkan wilayah dengan tekanan antropogenik rendah cenderung mengalami stabilitas atau peningkatan luas lamun.

Jenis lamun yang teridentifikasi di lokasi penelitian terdiri atas *Enhalus acoroides*, *Thalassia hemprichii*, *Syringodium isoetifolium* dan *Halophila ovalis*. Berdasarkan komposisi jenis (**Gambar 2**), Tutupan lamun didominasi oleh *H. ovalis* dengan proporsi 59%, diikuti oleh *S. isoetifolium* sebesar 36% dan *E. acoroides* dan *T.*

hemprichii masing-masing hanya menyumbang sekitar 3% dan 2%. Keempat spesies tersebut merupakan lamun yang umum dijumpai di perairan pesisir tropis Indonesia dan memiliki tingkat toleransi yang berbeda terhadap kondisi lingkungan. Hasil tersebut menunjukkan peredaan dibandingkan dengan hasil penelitian (Agustiana *et al.* 2024) yang juga dilakukan di Perairan Desa Tanjung Sungkai. Penelitian tersebut mencatat keberadaan tujuh spesies lamun, termasuk *Cymodocea rotundata*, *Cymodocea serrulata* dan *Halodule uninervis*, dengan struktur komunitas yang didominasi oleh lamun berukuran besar dan bersifat klimaks seperti *C. rotundata*, *E. acoroides*, *S. isoetifolium* dan *T. hemprichii*. Perbedaan komposisi dan dominasi jenis ini mengisyaratkan adanya variasi kondisi ekosistem lamun secara temporal, yang kemungkinan dipengaruhi oleh intensitas aktivitas antropogenik, karakteristik substrat, serta perbedaan waktu pengamatan, sehingga berdampak pada struktur komunitas lamun di lokasi penelitian.



Gambar 2. Komposisi jenis lamun di Desa Tanjung Sungkai.

Dominasi *H. ovalis* pada sebagian besar transek, khususnya pada T3 hingga T6, menunjukkan tingginya kemampuan adaptasi spesies ini terhadap variasi kondisi perairan, termasuk fluktuasi kekeruhan dan dinamika substrat. *H. ovalis* dikenal sebagai spesies pionir dengan kemampuan kolonisasi yang cepat di perairan dangkal yang relatif dinamis (Waycott *et al.* 2009; McKenzie *et al.* 2014). Sebaliknya, *S. isoetifolium* lebih dominan pada transek T1 dan T2, yang merupakan lokasi dengan tingkat aktivitas manusia lebih tinggi dan tutupan lamun relatif rendah. Dominasi spesies tersebut mencerminkan tingkat toleransi ekologis yang tinggi terhadap kondisi perairan dangkal yang mengalami tekanan lingkungan. Karakteristik ini memungkinkan spesies tersebut memiliki kemampuan pemulihan yang relatif cepat, laju ekspansi yang tinggi, serta kecenderungan untuk mengkolonisasi dan mendominasi

area yang baru mengalami gangguan, sehingga secara bertahap menggantikan spesies lamun lain yang memiliki toleransi lebih rendah terhadap tekanan lingkungan (Rasheed 2004; McKenzie *et al.* 2014).

Sementara itu, kontribusi *E. acoroides* dan *T. hemprichii* yang rendah di lokasi penelitian mencerminkan kondisi lingkungan yang belum stabil dan masih mengalami tekanan. Kedua spesies klimaks ini membutuhkan kejernihan perairan tinggi, substrat yang stabil, serta gangguan fisik yang minimal untuk dapat berkembang optimal. Sifat pertumbuhannya yang lambat dan kemampuan pemulihan yang terbatas menyebabkan keduanya sulit bertahan dan bersaing pada habitat yang sering terganggu, sehingga tutupannya cenderung rendah dan digantikan oleh spesies lamun yang lebih toleran dan cepat tumbuh (Pedersen *et al.* 2016; Gole *et al.* 2023; Jang dan Awiati 2023).

Secara keseluruhan, dominasi lamun pionir dan spesies yang toleran terhadap gangguan menunjukkan bahwa padang lamun di lokasi penelitian masih berada pada tahap suksesi awal hingga menengah dan belum mencapai kondisi komunitas yang stabil serta matang secara ekologis. Menurut Balestri *et al.* (2021), pola tersebut mencerminkan dinamika pasca gangguan, di mana spesies berumur relatif pendek dengan kemampuan adaptasi tinggi berkembang lebih cepat, sebelum secara bertahap diikuti oleh spesies tahap lanjut yang lebih kompetitif dan berumur panjang

3.2. Stok karbon

3.2.1. Stok karbon biomassa dan sedimen ekosistem lamun

Hasil perhitungan stok karbon ekosistem lamun di lokasi penelitian menunjukkan pola yang konsisten (**Tabel 2**), di mana peningkatan tutupan lamun diikuti oleh kenaikan stok karbon pada biomassa maupun sedimen. Pola ini menegaskan fungsi fisik-ekologis lamun dalam memperlambat dinamika perairan, meningkatkan penjebakan partikel sedimen, serta mendorong akumulasi dan penguburan karbon organik dalam jangka panjang (Sakmiana *et al.* 2023). Sejumlah studi menunjukkan bahwa padang lamun dengan tutupan tinggi memiliki kapasitas penyimpanan karbon yang jauh lebih besar dibandingkan padang lamun dengan tutupan rendah atau terdegradasi, sehingga keberadaan dan kondisi tutupan lamun menjadi faktor penentu dalam peran ekosistem ini sebagai penyimpan karbon biru di wilayah pesisir. (McLeod *et al.* 2011; Wahyudi *et al.* 2020; McHenry *et al.* 2023)

Tabel 2. Stok karbon biomassa dan sedimen ekosistem lamun.

Tutupan lamun	Karbon biomassa (Ton C/Ha)		Karbon sedimen (Ton C/Ha)
	<i>Above</i>	<i>Below</i>	
Jarang	0,1212	0,4486	77,1973
Sedang	0,2443	0,6123	114,1871
Padat	0,6964	0,8138	133,5987

Kategori tutupan lamun jarang menunjukkan stok karbon terendah pada seluruh fraksi penyimpanan karbon yang diamati, yaitu karbon biomassa *above ground* sebesar 0,1212 ton C/ha, karbon biomassa *below ground* sebesar 0,4486 ton C/ha dan karbon sedimen sebesar 77,1973 ton C/ha. Nilai tersebut mengindikasikan bahwa rendahnya tutupan lamun berpengaruh terhadap terbatasnya akumulasi karbon baik pada biomassa maupun sedimen.

Kategori tutupan lamun sedang memiliki stok karbon yang lebih tinggi dibandingkan kategori jarang, dengan nilai karbon biomassa *above ground* sebesar 0,2443 ton C/ha dan *below ground* sebesar 0,6123 ton C/ha. Stok karbon sedimen mencapai 114,1871 ton C/ha. Peningkatan nilai tersebut menunjukkan bahwa bertambahnya tutupan lamun berkontribusi terhadap peningkatan kapasitas penyimpanan karbon dalam ekosistem.

Kategori tutupan lamun padat menghasilkan stok karbon tertinggi pada seluruh fraksi penyimpanan karbon, yaitu 0,6964 ton C/ha untuk biomassa *above ground*, 0,8138 ton C/ha untuk biomassa *below ground* dan 133,5987 ton C/ha untuk karbon sedimen. Tingginya stok karbon pada kategori ini menunjukkan bahwa padang lamun dengan tutupan yang lebih rapat memiliki kemampuan yang lebih besar dalam mengakumulasi karbon melalui peningkatan biomassa serta penangkapan dan penyimpanan bahan organik di dalam sedimen.

Peningkatan stok karbon biomassa dan sedimen seiring dengan meningkatnya tutupan lamun pada lokasi penelitian mengindikasikan bahwa tutupan lamun merupakan faktor pengendali penting dalam proses akumulasi karbon. Semakin tinggi tutupan lamun, semakin besar kemampuan ekosistem dalam menyerap, menyimpan dan mengakumulasi karbon baik pada biomassa maupun sedimen. Hasil ini sejalan dengan temuan Fourqurean *et al.* (2012) dan Alongi *et al.* (2016) yang melaporkan bahwa tutupan dan kondisi padang lamun merupakan faktor penting yang memengaruhi kapasitas penyimpanan karbon pada ekosistem lamun tropis.

3.2.2. Total stok karbon ekosistem lamun di lokasi penelitian

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa total stok karbon ekosistem lamun di Desa Tanjung Sungkai mencapai 2.951,28 ton C pada luas area 27 ha (**Tabel 3**). Berdasarkan luasan tersebut, nilai stok karbon rata-rata mencapai 108,32 ton C/ha. Nilai ini berada dalam rentang nilai stok karbon ekosistem lamun Indonesia yang dilaporkan Stankovic *et al.* (2021) sebesar 56,11-139,09 ton C/ha. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kapasitas penyimpanan karbon ekosistem lamun Desa Tanjung Sungkai sebanding dengan ekosistem lamun di berbagai wilayah pesisir Indonesia.

Tabel 3. Total stok karbon ekosistem lamun di Desa Tanjung Sungkai.

Parameter	Stok karbon
Karbon biomassa	0,979 ton C/ha
Karbon sedimen	108,328 ton C/ha
Luas area lamun	27 ha
Total stok karbon kawasan	2.951,278 ton C

Stok karbon sedimen mendominasi penyimpanan karbon dengan nilai 108,33 ton C/ha, sedangkan stok karbon biomassa hanya sebesar 0,98 ton C/ha. Temuan ini menunjukkan bahwa sebagian besar cadangan karbon ekosistem lamun di Desa Tanjung Sungkai tersimpan di dalam sedimen. Hasil ini konsisten dengan Stankovic *et al.* (2021) yang melaporkan bahwa karbon sedimen merupakan penyumbang terbesar total stok karbon ekosistem lamun di Indonesia. Dominasi karbon pada sedimen mengindikasikan bahwa proses akumulasi dan penguburan bahan organik berperan penting dalam penyimpanan karbon jangka panjang pada ekosistem lamun. Temuan ini sejalan dengan Fourqurean *et al.* (2012) yang menjelaskan bahwa sebagian besar stok karbon pada ekosistem lamun tersimpan di dalam sedimen dengan proporsi jauh lebih besar dibandingkan biomassa lamun. Duarte *et al.* (2013) menyatakan bahwa akumulasi karbon organik dalam sedimen merupakan mekanisme utama yang mendukung fungsi ekosistem pesisir sebagai penyimpan karbon jangka panjang.

Nilai stok karbon ekosistem lamun di Desa Tanjung Sungkai masih berada dalam kisaran stok karbon lamun di Indonesia (Wahyudi *et al.* 2020). Temuan ini mengindikasikan bahwa ekosistem lamun di kawasan tersebut masih memiliki fungsi sebagai penyimpan karbon. Meskipun demikian, beberapa transek dengan tutupan lamun rendah ditemukan pada area yang berdekatan dengan dermaga, lokasi sandar kapal nelayan, area labuh jangkar dan kawasan permukiman. Aktivitas-aktivitas

tersebut berpotensi menimbulkan gangguan fisik pada padang lamun melalui kerusakan vegetasi, peningkatan kekeruhan perairan, serta gangguan terhadap stabilitas sedimen. Tekanan tersebut dapat mengurangi tutupan dan biomassa lamun, yang pada akhirnya berdampak pada penurunan kapasitas penyimpanan karbon ekosistem lamun (Waycott *et al.* 2009; Unsworth *et al.* 2015). Selain itu, kerusakan padang lamun juga dapat mengganggu akumulasi karbon dalam sedimen dan meningkatkan risiko hilangnya cadangan karbon yang telah tersimpan dalam jangka panjang (Marbà *et al.* 2015).

3.3. Nilai ekonomi karbon

Hasil valuasi menunjukkan bahwa nilai ekonomi karbon ekosistem lamun di Desa Tanjung Sungkai mencapai Rp 17.825.364.972 (**Tabel 4**). Nilai tersebut mencerminkan manfaat ekonomi yang dihasilkan oleh ekosistem lamun melalui fungsi penyimpanan karbon dan kontribusinya dalam mitigasi perubahan iklim. Berdasarkan pendekatan *Social Cost of Carbon*, nilai ekonomi tersebut merepresentasikan besarnya biaya sosial yang dapat dihindari melalui penyimpanan karbon oleh ekosistem lamun. Dengan demikian, keberadaan padang lamun tidak hanya memberikan manfaat ekologis, tetapi juga menghasilkan manfaat ekonomi melalui pengurangan dampak perubahan iklim yang ditimbulkan oleh emisi CO₂ (Rennert *et al.* 2022).

Tabel 4. Nilai ekonomi karbon lamun.

Indikator nilai ekonomi	Nilai (Rp)
Nilai ekonomi karbon total	17.825.364.972
Nilai ekonomi karbon per hektare	660.198.703
Nilai ekonomi karbon per tahun	713.014.599

Jika dihitung per satuan luas ekosistem, nilai ekonomi karbon yang tersimpan mencapai Rp 660.198.703 per hektare. Besaran ini menunjukkan bahwa kehilangan satu hektare ekosistem lamun memiliki implikasi terukur terhadap peningkatan emisi CO₂ yang dapat menimbulkan konsekuensi lingkungan dan kerugian sosial ekonomi yang signifikan pada skala global. Krause *et al.* (2025) menegaskan bahwa degradasi ekosistem lamun tidak dapat dipandang sebagai persoalan lokal semata, melainkan memiliki implikasi global melalui kontribusinya terhadap perubahan iklim, serta berpotensi menimbulkan kerugian sosial-ekonomi yang signifikan akibat meningkatnya dampak perubahan iklim.

Hasil perhitungan selanjutnya menunjukkan bahwa potensi kerugian selama periode 2025-2050 mencapai Rp 713.014.599 per tahun. Nilai ini mencerminkan konsekuensi ekonomi jangka panjang dari degradasi atau kehilangan ekosistem lamun akibat potensi pelepasan karbon secara berkelanjutan apabila tidak ada intervensi pengelolaan. Potensi kerugian ekonomi karbon tersebut memiliki implikasi penting dalam konteks pengelolaan lingkungan berkelanjutan, tanpa upaya perlindungan dan pengelolaan yang memadai, nilai kerugian karbon akan terus meningkat dari waktu ke waktu dan berpotensi melampaui kapasitas pembiayaan pengelolaan lingkungan di tingkat lokal. Pola akumulasi kerugian ini sejalan dengan temuan bahwa kehilangan ekosistem karbon biru menyebabkan peningkatan emisi karbon yang bersifat kumulatif dan berdampak jangka panjang terhadap sistem iklim (Pendleton *et al.* 2012; Krause *et al.* 2025).

Nilai tersebut menjadi signifikan apabila dikaitkan dengan estimasi biaya restorasi lamun. Bayraktarov *et al.* (2016) yang memperkirakan biaya restorasi ekosistem lamun sebesar US\$106.782/ha atau sekitar Rp1,71 miliar/ha (kurs Rp16.000/US\$). Implikasinya, degradasi lamun tidak hanya menimbulkan kerugian ekonomi akibat hilangnya fungsi penyimpanan karbon dan meningkatnya emisi CO₂, tetapi juga menciptakan beban biaya tambahan yang diperlukan untuk rehabilitasi ekosistem. Dengan demikian, total kerugian yang ditimbulkan mencakup kerugian ekonomi karbon sekaligus kebutuhan pembiayaan restorasi untuk memulihkan fungsi ekosistem yang hilang (Pendleton *et al.* 2012; Bayraktarov *et al.* 2016).

3.4. Pengelolaan ekosistem lamun

Pengelolaan ekosistem lamun di Desa Tanjung Sungkai dirumuskan berdasarkan kondisi tutupan lamun, stok karbon, nilai ekonomi karbon dan tingkat tekanan antropogenik menggunakan pendekatan *ecosystem-based management* yang mengintegrasikan kondisi ekosistem, jasa ekosistem dan aktivitas manusia dalam pengambilan keputusan pengelolaan (McLeod and Leslie 2009; Long *et al.* 2015).

Area dengan tutupan lamun rendah dan tekanan antropogenik tinggi diprioritaskan untuk pengendalian aktivitas yang berpotensi menyebabkan kerusakan, seperti penataan aktivitas pesisir dan pembatasan penjangkaran kapal (Orth *et al.* 2006; Waycott *et al.* 2009). Area dengan tutupan rendah hingga sedang diarahkan pada rehabilitasi lamun secara bertahap untuk memulihkan struktur dan

fungsi ekosistem (Paling *et al.* 2009; van Katwijk *et al.* 2016). Sementara itu, area dengan tutupan lamun tinggi dan stok karbon yang besar diprioritaskan sebagai zona perlindungan guna mempertahankan fungsi ekologis dan kapasitas penyimpanan karbon (McLeod *et al.* 2011; Duarte *et al.* 2013).

Pengelolaan tersebut tidak hanya bertujuan menjaga kondisi ekosistem lamun, tetapi juga mempertahankan fungsi karbon biru yang dimilikinya dengan mengintegrasikan aspek karbon biru sebagai salah satu dasar pengambilan keputusan prioritas pengelolaan dalam penentuan lokasi perlindungan dan rehabilitasi. Pertimbangan ini memungkinkan upaya perlindungan dan rehabilitasi diarahkan pada area yang memberikan kontribusi terbesar terhadap penyimpanan karbon sehingga pengelolaan tidak hanya mendukung keberlanjutan ekosistem lamun tetapi juga mempertahankan manfaat ekonomi yang dihasilkan melalui jasa penyimpanan karbon. Berbagai studi menunjukkan bahwa perlindungan ekosistem karbon biru lebih efisien secara ekonomi dibandingkan menanggung kerugian akibat degradasi ekosistem pesisir (Bayraktarov *et al.* 2016; Krause *et al.* 2025).

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Persentase tutupan lamun di Desa Tanjung Sungkai berada pada kategori sedang. Ekosistem lamun terdiri atas empat spesies, yaitu *Enhalus acoroides*, *Thalassia hemprichii*, *Syringodium isoetifolium* dan *Halophila ovalis*, dengan dominasi *Halophila ovalis*. Total stok karbon yang tersimpan mencapai 2.951,278 ton C, yang terdiri atas karbon biomassa sebesar 0,979 ton C/ha dan karbon sedimen sebesar 108,328 ton C/ha. Nilai ekonomi karbon ekosistem lamun sebesar Rp17.825.364.972. Pengelolaan ekosistem lamun di Desa Tanjung Sungkai disarankan menggunakan pendekatan *ecosystem-based management* melalui pengendalian tekanan antropogenik, rehabilitasi area terdegradasi, perlindungan kawasan dengan stok karbon tinggi, serta penguatan peran masyarakat.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kementerian Kelautan dan Perikanan yang telah memberikan dukungan biaya pendidikan dan penelitian untuk pelaksanaan tugas belajar di IPB University dan penyelesaian penelitian ini. Selain itu, kepada semua pihak terkait yang telah banyak membantu terselesaikannya penelitian ini.

6. DAFTAR PUSTAKA

- Adi W, Hartoko A, Purnomo PW, Supratman O, Pringgenies D, Hernawan UE. 2024. Ecological condition of seagrass meadows around sea-based tin mining activities in the waters of Bangka Belitung Islands, Indonesia. *Mar Pollut Bull.* 209 PA:117151. doi:10.1016/j.marpolbul.2024.117151.
- Agustiana TA, Nursalam N, Lestarina PM. 2024. Estimasi Stok Karbon Pada Padang Lamun Di Perairan Desa Tanjung Sungkai Kabupaten Kotabaru Provinsi Kalimantan Selatan. *Mar Coast Small Islands J - J Ilmu Kelaut.* 5(2):1. doi:10.20527/m.v5i2.11802.
- Alongi DM, Murdiyarso D, Fourqurean JW, Kauffman JB, Hutahaeen A, Crooks S, Lovelock CE, Howard J, Herr D, Fortes M. 2016. Indonesia's blue carbon: a globally significant and vulnerable sink for seagrass and mangrove carbon. *Wetl Ecol Manag.* 24(1):3-13. doi:10.1007/s11273-015-9446-y.
- Balestri E, Menicagli V, Lardicci C. 2021. Managing biotic interactions during early seagrass life stages to improve seed-based restoration. *J Appl Ecol.* 58(11):2453-2462. doi:10.1111/1365-2664.13980.
- Bayraktarov E, Saunders MI, Abdullah S, Mills M, Beher J, Possingham HP, Mumby PJ, Lovelock CE. 2016. The Cost and Feasibility of Marine Coastal Restoration. *Ecol Appl.* 26(4):1055-1074. doi:10.1890/15-1077.
- Donato DC, Kauffman JB, Murdiyarso D, Kurnianto S, Stidham M, Kanninen M. 2011. Mangroves among the most carbon-rich forests in the tropics. *Nat Geosci.* 4(5):293-297. doi:10.1038/ngeo1123.
- Duarte CM. 1990. Seagrass nutrient content. *Mar Ecol Prog Ser.* 67:201-207. doi:10.3354/meps067201.
- Duarte CM, Losada IJ, Hendriks IE, Mazarrasa I, Marbà N. 2013. The role of coastal plant communities for climate change mitigation and adaptation. *Nat Clim Chang.* 3(11):961-968. doi:10.1038/nclimate1970.
- Fourqurean JW, Duarte CM, Kennedy H, Marbà N, Holmer M, Mateo MA, Apostolaki ET, Kendrick GA, Krause-Jensen D, McGlathery KJ. 2012. Seagrass ecosystems as a globally significant carbon stock. *Nat Geosci.* 5(7):505-509. doi:10.1038/ngeo1477.
- Gole S, Prajapati S, Prabakaran N, Das H, Kuppusamy S, Johnson JA. 2023. Spatial

- diversity and habitat characteristics of seagrass meadows with management recommendations in the Andaman and Nicobar Islands, India. *Front Mar Sci.* 10 December:1-17. doi:10.3389/fmars.2023.1251887.
- Howard J, Sutton-Grier A, Herr D, Kleypas J, Landis E, Mcleod E, Pidgeon E, Simpson S. 2017. Clarifying the role of coastal and marine systems in climate mitigation. *Front Ecol Environ.* 15(1):42-50. doi:10.1002/fee.1451.
- [IOJI] Indonesi Ocean Justice Initiative. 2023. Blue Carbon Ecosystem as Critical Natural Capital: Governance of Blue Carbon Ecosystems in Indonesia. Jakarta Ed ke-Accessed 2025-10-22. <https://oceanjusticeinitiative.org/wp-content/uploads/2023/12/exsum-bceg-english.pdf>.
- Jang J dan Awiati W. 2023. Karbon Biru Di Indonesia: Memahami Pentingnya Konservasi Dan Restorasi Untuk Mencapai Netralitas Karbon. *J Huk dan Bisnis.* 9(1):18-36.
- van Katwijk MM, Thorhaug A, Marbà N, Orth RJ, Duarte CM, Kendrick GA, Althuizen IHJ, Balestri E, Bernard G, Cambridge ML. 2016. Global analysis of seagrass restoration: The importance of large-scale planting. *J Appl Ecol.* 53(2):567-578. doi:10.1111/1365-2664.12562.
- Kauffman JB, Heider C, Cole TG, Dwire KA, Donato DC. 2011. Ecosystem carbon stocks of micronesian mangrove forests. *Wetlands.* 31(2):343-352. doi:10.1007/s13157-011-0148-9.
- Kennedy H, Beggins J, Duarte CM, Fourqurean JW, Holmer M, Marbà N, Middelburg JJ. 2010. Seagrass sediments as a global carbon sink: Isotopic constraints. *Global Biogeochem Cycles.* 24(4):1-8. doi:10.1029/2010GB003848.
- [KKP] Kementerian Kelautan dan Perikanan. 2025. KKP Dorong Percepatan Legalisasi Rencana Zonasi KSNT untuk Karbon Biru. Humas Ditjen Penataan Ruang Laut, Kementerian Kelaut dan Perikan., siap terbit. <https://kkp.go.id/news/news-detail/kkp-dorong-percepatan-legalisasi-rencana-zonasi-ksnt-untuk-karbon-biru-vQAr.html>.
- Krause JR, Cameron C, Arias-Ortiz A, Cifuentes-Jara M, Crooks S, Dahl M, Friess DA, Kennedy H, Lim KE, Lovelock CE. 2025. Global seagrass carbon stock variability and emissions from seagrass loss. *Nat Commun.* 16(1):1-9. doi:10.1038/s41467-025-59204-4.

- Long RD, Charles A, Stephenson RL. 2015. Key principles of marine ecosystem-based management. *Mar Policy*. 57:53-60. doi:10.1016/j.marpol.2015.01.013.
- Lovelock CE, Fourqurean JW, Morris JT. 2017. Modeled CO₂ emissions from coastal wetland transitions to other land uses: Tidal marshes, mangrove forests, and seagrass beds. *Front Mar Sci*. 4 MAY:1-11. doi:10.3389/fmars.2017.00143.
- Marbà N, Arias-Ortiz A, Masqué P, Kendrick GA, Mazarrasa I, Bastyan GR, Garcia-Orellana J, Duarte CM. 2015. Impact of seagrass loss and subsequent revegetation on carbon sequestration and stocks. *J Ecol*. 103(2):296-302. doi:10.1111/1365-2745.12370.
- McHenry J, Rassweiler A, Hernan G, Dubel AK, Curtin C, Barzak J, Varias N, Lester SE. 2023. Geographic variation in organic carbon storage by seagrass beds. *Limnol Oceanogr*. 68(6):1256-1268. doi:10.1002/lno.12343.
- McKenzie L, Campbell S, C R. 2003. Seagrass-Watch: Manual for Mapping & Monitoring Seagrass Resources. Northern Fisheries Centre, Cairns: the Seagrass-Watch HQ.
- McKenzie LJ, Yoshida RL, Unsworth RKF. 2014. Disturbance influences the invasion of a seagrass into an existing meadow. *Mar Pollut Bull*. 86(1-2):186-196. doi:10.1016/j.marpolbul.2014.07.019.
- McLeod E, Chmura GL, Bouillon S, Salm R, Björk M, Duarte CM, Lovelock CE, Schlesinger WH, Silliman BR. 2011. A blueprint for blue carbon: Toward an improved understanding of the role of vegetated coastal habitats in sequestering CO₂. *Front Ecol Environ*. 9(10):552-560. doi:10.1890/110004.
- McLeod K and Leslie H. 2009. Ecosystem-Based Management for the Oceans. Ed ke-2. Island Press.
- Nellemann C, Corcoran E, Duarte CM, Valdes L, Young C De, Fonseca L, Grimsdith G. 2009. Blue Carbon Assessment. United Nations Environment Programme, GRID-Arendal.
- Orth RJ, Carruthers TIMJB, Dennison WC, Duarte CM, James W, Jr KLH, Hughes AR, Kendrick GA, Kenworthy WJ, Olyarnik S. 2006. A Global Crisis for Seagrass Ecosystems. *Bioscience*. 56(12):987-996.
- Paling EI, Fonseca M, van Katwijk MM, van Keulen M. 2009. Seagrass Restoration. *Coast Wetl - An Integr Ecosyst approach.*, siap terbit.
- Pedersen O, Colmer TD, Borum J, Zavala-Perez A, Kendrick GA. 2016. Heat stress of two

- tropical seagrass species during low tides - impact on underwater net photosynthesis, dark respiration and diel in situ internal aeration. *New Phytol.* 210(4):1207-1218. doi:10.1111/nph.13900.
- Pendleton L, Donato DC, Murray BC, Crooks S, Jenkins WA, Sifleet S, Craft C, Fourqurean JW, Kauffman JB, Marbà N. 2012. Estimating Global “Blue Carbon” Emissions from Conversion and Degradation of Vegetated Coastal Ecosystems. *PLoS One.* 7(9). doi:10.1371/journal.pone.0043542.
- Rahmawati S, Irawan A, Supriyadi IH, Azkab H. 2017. Panduan Pemantauan Penilaian Kondisi Padang Lamun. Coremap Cti Lipi. January:35.
- Rasheed MA. 2004. Recovery and succession in a multi-species tropical seagrass meadow following experimental disturbance: The role of sexual and asexual reproduction. *J Exp Mar Bio Ecol.* 310(1):13-45. doi:10.1016/j.jembe.2004.03.022.
- Rennert K, Errickson F, Prest BC, Rennels L, Newell RG, Pizer W, Kingdon C, Wingenroth J, Cooke R, Parthum B. 2022. Comprehensive evidence implies a higher social cost of CO₂. *Nature.* 610(7933):687-692. doi:10.1038/s41586-022-05224-9.
- Rustam A, Adi NS, Daulat A, Kiswara W, Yusup DSu, Ambo-Rappe R. 2019. Pedoman Pengukuran Karbon di Ekosistem Padang Lamun. Bandung: ITB Press.
- Sakmiana AF, Paputungan MS, Kusumaningrum W, Rahmawati S. 2023. Estimasi Konsentrasi dan Stok Karbon Organik pada Sedimen Lamun di Desa Selangan, Kalimantan Timur. *J Mar Res.* 12(3):483-492. doi:10.14710/jmr.v12i3.38011.
- Stankovic M, Ambo-Rappe R, Carly F, Dangan-Galon F, Fortes MD, Hossain MS, Kiswara W, Van Luong C, Minh-Thu P, Mishra AK. 2021. Quantification of blue carbon in seagrass ecosystems of Southeast Asia and their potential for climate change mitigation. *Sci Total Environ.* 783:146858. doi:10.1016/j.scitotenv.2021.146858.
- Turschwell MP, Connolly RM, Dunic JC, Sievers M, Buelow CA, Pearson RM, Tulloch VJD, Cote IM, Unsworth RKF, Collier CJ. 2021. Anthropogenic pressures and life history predict trajectories of seagrass meadow extent at a global scale. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 118(45):1-11. doi:10.1073/pnas.2110802118.
- [UNEP] United Nations Environment Programme. 2020. Out of the Blue: The value of seagrasses to the environment and to people. Nairobi: United Nations

Environment Programme.

- Unsworth RKF, Collier CJ, Waycott M, Mckenzie LJ, Cullen-Unsworth LC. 2015. A framework for the resilience of seagrass ecosystems. *Mar Pollut Bull.* 100(1):34-46. doi:10.1016/j.marpolbul.2015.08.016.
- Unsworth RKF, Cullen-Unsworth LC, Jones BLH, Lilley RJ. 2022. The planetary role of seagrass conservation. *Science* (80). 377(6606):609-613. doi:10.1126/science.abq6923.
- Wahyudi AJ, Rahmawati S, Irawan A, Hadiyanto H, Prayudha B, Hafizt M, Afdal A, Adi NS, Rustam A, Hernawan UE. 2020. Assessing Carbon Stock and Sequestration of the Tropical Seagrass Meadows in Indonesia. *Ocean Sci J.* 55(1):85-97. doi:10.1007/s12601-020-0003-0.
- Waycott M, Duarte CM, Carruthers TJB, Orth RJ, Dennison WC, Olyarnik S, Calladine A, Fourqurean JW, Heck KL, Hughes AR. 2009. Accelerating loss of seagrasses across the globe threatens coastal ecosystems. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 106(30):12377-12381. doi:10.1073/pnas.0905620106.

Analisis kualitas perairan Sungai Kampili, Kabupaten Gowa, Sulawesi Selatan menggunakan metode biotilik

Water quality analysis of the Kampili River, Gowa Regency, South Sulawesi using the biotic index method

Wafiq Azizah¹, Devi Armita^{1*}, Andi Hernawati²

¹Program Studi Biologi, Universitas Islam Negeri Alauddin Makassar, Makassar, Indonesia

²Bidang Tata Lingkungan, Dinas Lingkungan Hidup Kabupaten Gowa, Gowa, Indonesia

Abstrak.

Kualitas ekosistem sungai dapat dinilai melalui komunitas makroinvertebrata yang memiliki tingkat sensitivitas berbeda terhadap pencemaran. Sungai Kampili di Kabupaten Gowa mendapat tekanan antropogenik dari aktivitas domestik dan pertanian di sekitarnya. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kualitas air Sungai Kampili berdasarkan komposisi dan kelimpahan makroinvertebrata menggunakan indeks Biotilik. Penelitian dilakukan pada Februari 2024 dengan pengambilan sampel makroinvertebrata di sepanjang aliran sungai. Organisme diidentifikasi hingga tingkat famili, kemudian dianalisis berdasarkan persentase kelimpahan dan indeks Biotilik (X/N). Famili Hydropsychidae paling banyak ditemukan, diikuti Mesovellidae dan Ephemerellidae. Kelompok Ephemeroptera, Plecoptera, dan Trichoptera (EPT) menyumbang 53,19% dari total kelimpahan dan menunjukkan kondisi ekologis yang relatif baik. Nilai indeks Biotilik sebesar 3,11 menunjukkan bahwa sungai berada dalam kategori tercemar ringan, dengan jumlah individu yang tercatat sebanyak 47. Hasil ini menunjukkan adanya indikasi awal perubahan kondisi ekologis akibat tekanan antropogenik. Pemantauan kualitas air secara berkala, pengelolaan limbah, penerapan praktik pertanian ramah lingkungan, serta perlindungan vegetasi riparian diperlukan untuk menjaga kondisi ekosistem Sungai Kampili.

Kata kunci: indeks biotilik, kualitas air sungai, makroinvertebrata, sungai kampili, taksa EPT

Abstract.

River ecosystem quality can be assessed through macroinvertebrate communities, as different taxa have different levels of sensitivity to pollution. The Kampili River in Gowa Regency is under anthropogenic pressure from surrounding domestic and agricultural activities. This study aimed to evaluate the water quality of the Kampili River based on macroinvertebrate composition and abundance using the Biotilik Index. The study was conducted in February 2024, with macroinvertebrate samples collected along the river. The organisms were identified to the family level and analyzed based on abundance percentages and the Biotilik Index (X/N). Hydropsychidae was the most abundant family, followed by Mesovellidae and Ephemerellidae. Ephemeroptera, Plecoptera, and Trichoptera (EPT) accounted for 53.19% of the total abundance, indicating relatively good ecological conditions. The Biotilik Index value of 3.11 indicated light pollution, with 47 individuals recorded. These results suggest early changes in ecological conditions associated with anthropogenic pressure. Regular water quality monitoring, waste management, environmentally friendly agricultural practices, and riparian vegetation protection are needed to maintain the condition of the Kampili River ecosystem.

Keywords: biotilik index, river water quality, macroinvertebrates, kampili river, EPT taxa

1. PENDAHULUAN

Kualitas air merupakan fondasi utama bagi keberlanjutan ekosistem perairan, karena mendukung fungsi ekologis, menjaga keanekaragaman hayati, serta memenuhi berbagai kebutuhan manusia mulai dari pembangunan sosial-ekonomi hingga aktivitas rekreasi (Kowalik *et al.* 2015). Sungai dengan kualitas air yang baik menyediakan pasokan air, transport nutrisi dan mineral, hingga penyediaan air minum, irigasi, dan habitat bagi sumber pangan manusia (Burnett *et al.* 2024).

* Korespondensi Penulis
Email : devi.armita@uin-alauddin.ac.id

Namun, kualitas air di banyak wilayah semakin terancam oleh pencemaran yang dipicu aktivitas antropogenik seperti alih fungsi lahan, pertanian intensif, dan urbanisasi. Limbah domestik, sedimentasi, serta residu bahan kimia pertanian yang masuk ke badan air dapat menurunkan kualitas perairan secara signifikan, mengganggu keseimbangan ekosistem akuatik, dan berdampak pada kesehatan masyarakat serta produktivitas pertanian (Frost *et al.* 2024).

Sungai Kampili, yang merupakan bagian dari Sub-DAS Jeneberang di Kabupaten Gowa, Sulawesi Selatan, tidak luput dari ancaman tersebut. Sungai Kampili memiliki peruntukan utama sebagai sumber air irigasi yang mengairi lebih dari 4.000 hektar lahan pertanian melalui Bendungan Kampili, salah satu bendungan tertua di Sulawesi Selatan (Sahdana *et al.* 2022). Sesuai Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021, kualitas air Sungai Kampili seharusnya memenuhi baku mutu untuk perairan kelas II atau III yang diperuntukkan bagi irigasi, peternakan, dan pemanfaatan non konsumsi lainnya. Namun, penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa Sub-DAS Jeneberang mengalami degradasi lingkungan yang ditandai dengan tingginya bahaya erosi, fluktuasi debit sungai, dan penurunan fungsi hidrologis DAS (Akbar *et al.* 2021). Kondisi tersebut meningkatkan sedimentasi, kekeruhan, serta beban nutrien di perairan yang berpotensi menurunkan efisiensi irigasi, mempercepat pendangkalan saluran, dan mengurangi produktivitas lahan pertanian.

Pemantauan kualitas air menjadi langkah penting untuk mengevaluasi dampak perubahan tersebut. Selama ini, penilaian kualitas air umumnya didasarkan pada parameter fisika dan kimia. Meskipun memberikan informasi mengenai kondisi perairan pada saat pengambilan sampel, pendekatan tersebut belum sepenuhnya mampu menggambarkan dampak pencemaran yang berlangsung secara kumulatif maupun perubahan ekologis jangka panjang (Il Maknuun *et al.* 2021). Oleh karena itu, diperlukan metode yang mampu merekam dampak pencemaran secara jangka panjang dengan penilaian kualitas air secara biologis. Hingga saat ini, terdapat lebih dari 100 indeks berbeda yang digunakan dalam penilaian kualitas air secara biologis, yang sebagian besar berbasis pada ikan, alga, dan makroinvertebrata (Li *et al.* 2025).

Makroinvertebrata akuatik memiliki sensitivitas tinggi terhadap perubahan kualitas lingkungan, termasuk fluktuasi oksigen terlarut, kandungan bahan organik, dan keberadaan logam berat (Kadim dan Pasingi 2024; Robbi *et al.* 2024). Menurut Damanik-Ambarita *et al.* (2016), aktivitas manusia seperti pertanian, perluasan permukiman, pembangunan waduk, serta perubahan hidrologi pada badan air dapat memengaruhi keberadaan komunitas makroinvertebrata yang berfungsi sebagai indikator utama kesehatan ekosistem dan dampak aktivitas antropogenik (Mendoza *et al.* 2025).

Makroinvertebrata banyak digunakan dalam biomonitoring karena mudah dikoleksi, memiliki dampak minimal terhadap biota setempat, serta mampu merepresentasikan kondisi perairan secara lokal. Organisme bentik ini sangat sesuai untuk menilai dampak spesifik lokasi karena sebagian besar memiliki mobilitas terbatas atau bersifat sesil. Tahap larva merespons tekanan lingkungan dengan cepat, dan banyak kelompok ini relatif mudah diidentifikasi hingga tingkat taksonomi rendah seperti genus dan spesies (Tubić *et al.* 2024). Penggunaan makroinvertebrata atau lebih umum dikenal sebagai metode biotilik telah banyak diterapkan dalam kajian ekologi sungai karena bersifat murah, praktis, adaptif terhadap kondisi tropis seperti Indonesia, serta mampu memberikan gambaran kualitas air yang lebih stabil dibandingkan metode kimiawi konvensional (Il Maknuun *et al.* 2021).

Penerapan metode Biotilik telah dilaporkan pada berbagai penelitian di Indonesia, salah satunya penelitian Sukmawati *et al.* (2021) menunjukkan bahwa Sungai Mandar berada pada kategori tercemar sedang berdasarkan dominasi taksa non-EPT meskipun masih ditemukan kelompok Ephemeroptera, Plecoptera, dan Trichoptera (EPT). Sementara itu, Armita *et al.* (2021) melaporkan bahwa kualitas vegetasi riparian memengaruhi struktur komunitas makrozoobentos di saluran mata air Langlang, Kabupaten Malang. Hasil penelitian tersebut menemukan bahwa lokasi dengan vegetasi riparian yang lebih baik memiliki indeks diversitas lebih tinggi ($H' = 3,35$) dan nilai *Family Biotic Index* (FBI = 4,19) yang menunjukkan kualitas air lebih baik dibandingkan lokasi dengan vegetasi riparian yang terdegradasi. Temuan ini mengindikasikan bahwa kondisi riparian berperan penting dalam menjaga kualitas habitat dan kelimpahan makrozoobentos, sehingga dapat dijadikan acuan dalam penilaian mutu perairan berbasis bioindikator (Armita *et al.* 2021).

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kualitas perairan Sungai Kampili menggunakan metode biotilik, khususnya komunitas makroinvertebrata sebagai bioindikator, untuk memperoleh gambaran status mutu air sungai. Dengan hasil penelitian ini diharapkan dapat dijadikan dasar rekomendasi pengelolaan lingkungan perairan di Kabupaten Gowa agar mutu air sungai dapat dipertahankan atau ditingkatkan.

2. METODOLOGI

2.1. Lokasi kajian dan waktu penelitian

Penelitian dilakukan pada Februari 2024 di Sungai Kampili, Desa Kampili, Kecamatan Pallangga, Kabupaten Gowa, Provinsi Sulawesi Selatan. Lokasi pengambilan sampel dipilih secara *purposive* berdasarkan aksesibilitas, keberadaan habitat tepi sungai dengan arus sedang dan vegetasi air, serta kedekatannya dengan aktivitas antropogenik, seperti permukiman dan pertanian. Penelitian dilakukan pada satu lokasi dan satu periode pengamatan sehingga hasil yang diperoleh bersifat *snapshot*, yang merepresentasikan kondisi Sungai Kampili pada saat pengambilan sampel. Oleh karena itu, hasil penelitian hanya menggambarkan kondisi lokal dan tidak mencerminkan variasi spasial maupun musiman.

Identifikasi makroinvertebrata dan sampel air dilakukan di Laboratorium Dinas Lingkungan Hidup dan Kehutanan (DLHK) Kabupaten Gowa. Alat yang digunakan meliputi jaring surber, botol sampel, baki sortir, pinset, dan mikroskop stereo. Bahan yang digunakan adalah larutan alkohol 70% untuk pengawetan sampel biota, serta kertas label dan kantong plastik sampel, serta Buku Panduan Biotilik yang disusun oleh tim *Ecological Observation and Wetlands Conservation* (ECOTON) tahun 2013.

Kualitas perairan dievaluasi menggunakan komunitas makroinvertebrata sebagai bioindikator. Pengambilan sampel dilakukan di tepi sungai yang memiliki arus sedang, kedalaman sedang, dan ditumbuhi vegetasi air menggunakan kombinasi metode *kicking* dan *jabbing*. Pada metode *kicking*, jaring ditempatkan menghadap arah hulu, kemudian substrat diaduk selama ± 1 menit atau sepanjang ± 5 m agar makroinvertebrata terlepas dan terbawa arus ke dalam jaring. Metode *jabbing* dilakukan dengan menyapukan jaring sepanjang ± 5 m pada dasar sungai, terutama di area yang ditumbuhi vegetasi air.

Sampel yang diperoleh dicuci hingga bersih, kemudian dipindahkan ke baki sortir untuk dipisahkan dari substrat. Organisme yang bukan termasuk bioindikator Biotilik, seperti ikan, berudu, dan serangga darat, dikembalikan ke habitatnya. Makroinvertebrata selanjutnya diidentifikasi hingga tingkat famili menggunakan Lembar Panduan Identifikasi Biotilik (ECOTON 2013), kemudian dihitung jumlah individu dan skor masing-masing famili untuk analisis lebih lanjut.

Selain analisis biotik, penelitian ini juga melakukan pengukuran parameter fisika-kimia air. Sampel air diambil dari lokasi yang sama dengan pengambilan makroinvertebrata, kemudian dianalisis di Laboratorium Dinas Lingkungan Hidup dan Kehutanan (DLHK) Kabupaten Gowa. Parameter yang diukur meliputi kadar residu tersuspensi (TSS), pH, kebutuhan oksigen biologis (BOD), kebutuhan oksigen kimiawi (COD), oksigen terlarut (DO), nitrogen, dan fosfat. Analisis dilakukan sesuai dengan Standar Nasional Indonesia (SNI) yang berlaku untuk masing-masing parameter.

2.2. Prosedur analisis data

Data hasil identifikasi dianalisis menggunakan metode Biotilik. Perhitungan didasarkan pada jumlah individu setiap famili dan skor biotilik. Rumus perhitungan menggunakan metode pada penelitian Robbi *et al.* (2024) yang dirujuk dari Panduan Biotilik oleh ECOTON (2013) seperti pada **Persamaan 1**. Selanjutnya ditentukan indeks kualitas air sesuai kategori mutu perairan. Kategori kualitas air berdasarkan indeks biotilik merujuk pada penelitian Sulistiyowati *et al.* (2024) yang ditunjukkan pada **Tabel 1**.

$$\text{Nilai Indeks Biotilik} = \frac{X}{N} \dots\dots\dots(1)$$

Keterangan:

X = Skor biotilik x Jumlah individu

N = Total keseluruhan individu

Tabel 1. Kategori kualitas sungai berdasarkan nilai indeks biotilik.

Nilai Indeks Biotilik	Kategori Kualitas Sungai
3,3-4,0	Tidak tercemar
2,6-3,2	Tercemar ringan
1,8-2,5	Tercemar sedang
1,0-1,7	Tercemar berat

Selain indeks Biotilik, dihitung pula persentase kelimpahan EPT dan Non-EPT untuk memperjelas kontribusi masing-masing kelompok. Persentase EPT dihitung dengan rumus yang ditunjukkan pada **Persamaan 2**, sedangkan persentase Non-EPT dihitung dengan rumus pada **Persamaan 3**.

$$\% \text{ Kelimpahan EPT} = \frac{\text{Jumlah individu EPT}}{\text{Total seluruh individu}} \times 100\% \dots\dots\dots(2)$$

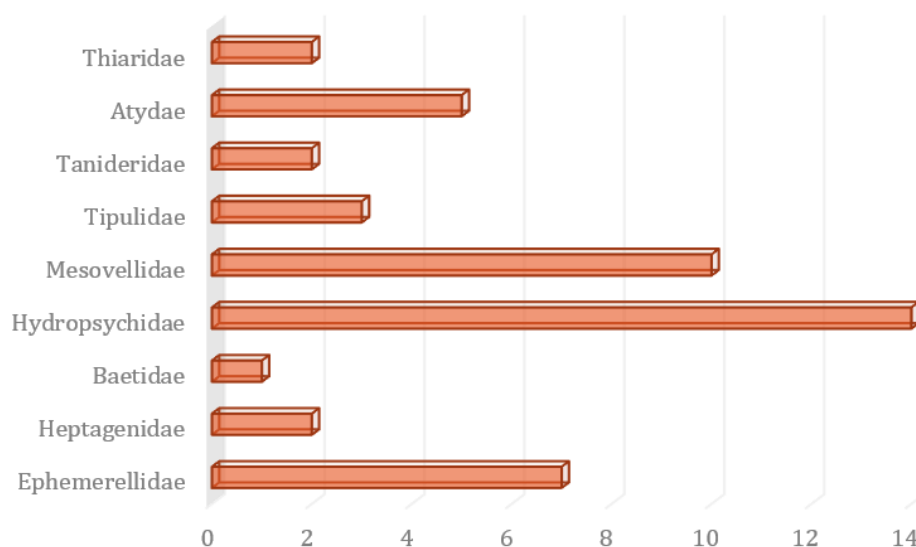
$$\% \text{ Kelimpahan Non EPT} = \frac{\text{Jumlah individu Non EPT}}{\text{Total seluruh individu}} \times 100\% \dots\dots\dots(3)$$

Keterangan:

EPT = Ephemeroptera, Plecoptera, dan Trichoptera

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Makroinvertebrata yang ditemukan pada penelitian ini terdiri atas sembilan famili yang mewakili beberapa ordo akuatik, sebagaimana tersaji pada **Gambar 1**. Keberadaan famili tersebut menunjukkan keragaman organisme bentik yang cukup representatif dalam menggambarkan kondisi perairan Sungai Kampili. Terlihat bahwa Hydropsychidae mendominasi komunitas dengan jumlah individu tertinggi, diikuti oleh Mesovellidae dan Ephemerellidae. Temuan bahwa Hydropsychidae mendominasi komunitas makroinvertebrata menunjukkan karakteristik perairan dengan arus cukup deras dan substrat berbatu, sesuai dengan preferensi ekologis famili ini dari ordo Trichoptera. Hydropsychidae dikenal memiliki toleransi sedang terhadap pencemaran dan sering dijumpai di perairan yang masih memiliki sirkulasi oksigen yang baik (Kadim *et al.* 2025).



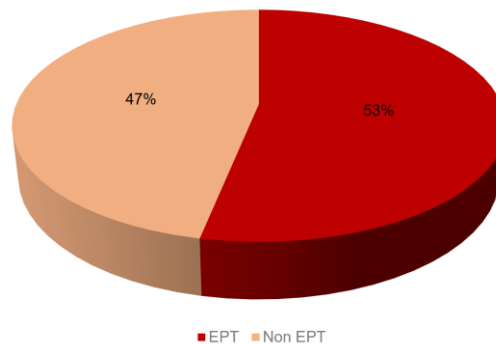
Gambar 1. Famili makroinvertebrata yang didapatkan di Sungai Kampili.

Mesovellidae (Hemiptera) dan Ephemerellidae (Ephemeroptera) menempati posisi berikutnya dalam dominasi. Mesovellidae umumnya menunjukkan toleransi tinggi terhadap pencemaran dan dapat bertahan di perairan yang mulai terdegradasi. Sebaliknya, Ephemerellidae merupakan bagian dari kelompok EPT (Ephemeroptera, Plecoptera, Trichoptera) yang sangat sensitif terhadap kualitas air, sehingga kehadirannya menjadi indikator biologis penting untuk perairan yang relatif bersih (Elfami dan Efendy 2020).

Meskipun kelompok EPT masih mendominasi komunitas makroinvertebrata, nilai indeks biotik menunjukkan penurunan. Kondisi ini dapat dijelaskan oleh dominasi Hydropsychidae yang relatif toleran terhadap tekanan antropogenik, sehingga keberadaan EPT tidak sepenuhnya merefleksikan kualitas perairan yang tinggi. Selain itu, keterbatasan skala spasial dan karakteristik mikrohabitat lokasi pengambilan sampel turut memengaruhi struktur komunitas, sehingga hasil penelitian ini lebih mencerminkan kondisi lokal daripada keseluruhan Sungai Kampili.

Famili dengan jumlah individu paling sedikit adalah Baetidae, Heptagenidae, Tanideridae, dan Thiaridae. Baetidae dan Heptagenidae, yang termasuk dalam ordo Ephemeroptera, merupakan bagian dari kelompok EPT yang dikenal sangat sensitif terhadap pencemaran dan perubahan kualitas air. Studi oleh Diantari *et al.* (2017) di Sungai Jangkok, Nusa Tenggara Barat, menunjukkan bahwa famili yang tergolong ke dalam kelompok EPT hanya ditemukan di bagian hulu dan tengah sungai yang memiliki kualitas air sangat baik dan baik, dan absen di bagian hilir sungai dengan kualitas air berada pada kategori sangat buruk akibat tekanan antropogenik. Hal serupa juga ditemukan oleh Afriani (2017) di Aliran Riam Marum, Kabupaten Bengkayang bahwa Baetidae hanya muncul di stasiun dengan substrat berbatu dan kadar oksigen terlarut tinggi, mengindikasikan bahwa kehadiran mereka sangat bergantung pada kondisi fisik dan kimia perairan yang optimal. Hal ini juga diperkuat oleh temuan Kubendran *et al.* (2017) yang melaporkan bahwa berbagai spesies Baetidae secara konsisten berasosiasi dengan substrat berbatu dan area berarus cepat, serta memiliki adaptasi morfologis untuk menahan tekanan hidraulik. Sebaliknya, spesies yang kurang mampu menghadapi arus kuat cenderung ditemukan pada habitat yang lebih tenang, sehingga menunjukkan bahwa preferensi habitat dalam famili Baetidae sangat dipengaruhi oleh kondisi fisik perairan.

Temuan pada penelitian sebelumnya semakin menegaskan bahwa makrozoobentos yang tergolong dalam ordo Ephemeroptera, Plecoptera, dan Trichoptera (EPT) memiliki sensitivitas tinggi terhadap perubahan kualitas air, terutama terhadap pencemaran organik, penurunan oksigen terlarut, dan sedimentasi. Perbandingan organisme yang tergolong ke dalam ordo EPT dan non EPT ditunjukkan pada **Gambar 2**.



Gambar 2. Proporsi individu EPT dan non EPT yang didapatkan di Sungai Kampili.

Temuan bahwa 53,19% dari total komunitas makroinvertebrata di Sungai Kampili berasal dari kelompok EPT menunjukkan bahwa lebih dari separuh komunitas masih didominasi oleh organisme yang memerlukan kondisi fisik dan kimia perairan yang relatif optimal. Walaupun jumlah individu yang tercatat ($N = 47$) relatif terbatas, proporsi EPT yang tinggi tetap menjadi indikator awal bahwa segmen sungai yang diteliti belum menunjukkan tanda degradasi berat dan masih mampu mendukung kehidupan organisme sensitif. Sebaliknya, kelompok non-EPT seperti Mesovellidae, Tipulidae, Tanyderidae, Atyidae, dan Thiaridae yang ditemukan dalam penelitian ini umumnya memiliki toleransi lebih tinggi terhadap pencemaran. Keberadaan mereka dalam proporsi lebih kecil dibandingkan EPT mengindikasikan bahwa tekanan antropogenik seperti limbah domestik, sedimentasi, atau eutrofikasi belum mendominasi struktur komunitas benthik secara keseluruhan, meskipun interpretasi ini tetap perlu mempertimbangkan keterbatasan ukuran sampel.

Studi oleh Kadim *et al.* (2024) di Sungai Bone, Gorontalo, menunjukkan pola serupa, di mana dominasi EPT di segmen hulu berkorelasi dengan nilai FBI rendah (3,71-4,5), menandakan kualitas air baik hingga sedang. Sebaliknya, penurunan EPT dan peningkatan taksa non-EPT di segmen hilir menunjukkan dampak pencemaran. Penelitian lain di inlet Sungai Danau Maninjau juga mencatat bahwa metrik EPT

memiliki korelasi sangat kuat dengan indeks kualitas air (WQI), tingginya kelimpahan EPT mencerminkan kondisi perairan yang belum tercemar berat (Ibrahim *et al.* 2021).

Nilai indeks Biotilik (X/N) pada penelitian ini sebesar 3,11 yang mengindikasikan bahwa Sungai Kampili berada dalam kategori tercemar ringan, sesuai dengan klasifikasi penilaian kualitas air berbasis komunitas makroinvertebrata (**Tabel 2**). Meskipun masih ditemukan famili dari ordo EPT yang cukup melimpah, namun nilai indeks ini menunjukkan bahwa tekanan lingkungan mulai memengaruhi struktur komunitas bentik secara signifikan.

Tabel 2. Pemeriksaan kualitas sungai berdasarkan makrozoobentos.

No*	Nama Famili	Skor Biotilik (ti)	Jumlah Individu (ni)	Ti x ni	Kategori
EPT					
1.	Ephemerellidae	4	8	32	
7.	Heptageniidae	4	2	8	
9.	Baetidae	3	1	3	
22.	Hydropsychidae	3	14	42	
Sub-total EPT			25	85	
Non EPT					
49.	Mesovellidae	3	10	30	
59.	Tipulidae	3	3	9	
65.	Tanideridae	4	2	8	
69.	Atydae	2	5	10	
83.	Thiaridae	2	2	4	
Sub-total Non EPT			22	61	
Jumlah			N = 47	X = 146	
Persentase kelimpahan EPT (n EPT/N)			53,19		
Indeks Biotilik (X/N)			3,11		Tercemar ringan

*Keterangan: Penomoran berdasarkan urutan famili pada Lembar Panduan Identifikasi Biotilik oleh ECOTON (<https://ecoton.or.id/>)

Indeks Biotilik mengukur kualitas ekosistem akuatik berdasarkan kehadiran dan kelimpahan taksa makroinvertebrata dengan sensitivitas berbeda terhadap pencemaran (Yudistira *et al.* 2023). Nilai 3,11 berada di ambang transisi antara kondisi baik dan mulai terdegradasi, yang sering kali disebabkan oleh limbah domestik, sedimentasi, penurunan oksigen terlarut, dan perubahan substrat dasar. Studi oleh Kadim *et al.* (2025) di Sungai Bone menunjukkan pola serupa. Nilai indeks Biotilik yang diperoleh yaitu 2,28 yang dikaitkan dengan penurunan jumlah taksa sensitif dan peningkatan dominasi taksa toleran seperti Ceratopogonidae, Chironomidae, Elmidae,

dan Empididae. Kehadiran EPT yang masih cukup tinggi (53,19%) menunjukkan bahwa sebagian segmen sungai masih memiliki daya dukung ekologis yang baik. Namun, penurunan nilai indeks biotilik menjadi sinyal awal bahwa kondisi fisik dan kimia perairan mulai berubah, sehingga dapat memengaruhi keberlanjutan komunitas bentik jika tidak ditangani.

Hasil pengukuran parameter fisika-kimia menunjukkan bahwa kualitas air Sungai Kampili masih berada dalam kisaran yang sesuai untuk peruntukan kelas 3 (pertanian). Nilai TSS sebesar 15 mg/L, pH 7,5, BOD 2,42 mg/L, dan COD 33,7 mg/L menunjukkan kondisi perairan relatif jernih dengan beban organik sedang. Kandungan oksigen terlarut (DO) sebesar 5,8 mg/L, nitrogen 0,53 mg/L, serta fosfat 0,05 mg/L, semuanya berada di bawah ambang batas yang ditetapkan. Data ini mendukung temuan biologis bahwa komunitas makroinvertebrata masih didominasi oleh kelompok EPT yang memerlukan kondisi fisik dan kimia perairan relatif optimal. Namun, nilai COD yang mendekati ambang batas dan indeks Biotilik sebesar 3,17 menunjukkan adanya tekanan antropogenik yang mulai memengaruhi struktur komunitas bentik.

Penurunan nilai indeks Biotilik dapat disebabkan oleh tekanan antropogenik yang terjadi di sekitar Sungai Kampili, Kabupaten Gowa. Wilayah ini mengalami peningkatan aktivitas pemukiman, pertanian intensif, dan pembuangan limbah domestik yang tidak terkelola dengan baik. Berdasarkan data dari Status Lingkungan Hidup Indonesia 2022, wilayah Sulawesi Selatan termasuk dalam zona yang mengalami degradasi kualitas air akibat pencemaran organik dan sedimentasi tinggi (KLHK 2022). Aktivitas masyarakat di bantaran sungai, seperti pembuangan limbah cair, dan alih fungsi lahan, turut mempercepat perubahan karakteristik substrat dan menurunkan kadar oksigen terlarut, yang merupakan faktor penting bagi kelangsungan hidup taksa sensitif seperti EPT. Selain itu, selama penelitian teramati adanya sampah rumah tangga, terutama plastik, yang menumpuk di beberapa titik bantaran sungai. Di jalan menuju lokasi sungai juga terdapat banyak areal persawahan, yang menunjukkan adanya aktivitas pertanian intensif di sekitar daerah aliran sungai. Kedua kondisi ini semakin memperkuat interpretasi bahwa tekanan antropogenik dari aktivitas domestik dan pertanian telah mulai memengaruhi kualitas ekosistem Sungai Kampili.

Kouwen *et al.* (2025) menegaskan pentingnya hutan riparian bagi spesies EPT, didukung oleh temuan bahwa 33 dari 47 spesies EPT (70%) lebih menyukai zona riparian berhutan. Jenis pohon dan tipe hutan turut memengaruhi komposisi komunitas makroinvertebrata. Serasah daun dari spesies berdaun lunak umumnya lebih mudah terurai dibandingkan serasah dari spesies berdaun keras, sedangkan serasah dari jenis berdaun jarum atau berstruktur lignin tinggi cenderung lebih sulit terdekomposisi. Perbedaan tingkat dekomposisi ini berpengaruh pada ketersediaan sumber makanan bagi banyak spesies EPT detritivor, sehingga struktur komunitas makroinvertebrata dapat berubah mengikuti karakteristik vegetasi riparian. Fenomena ini sejalan dengan temuan di berbagai sungai di wilayah Indonesia lainnya. Organisme EPT masih dapat bertahan dalam jumlah terbatas pada segmen yang memiliki vegetasi riparian dan substrat berbatu, namun mulai tergeser oleh taksa toleran seperti Diptera, Gastropoda, dan Oligochaeta di lokasi yang terpapar pencemaran. Sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Reymundo and Araujo (2016), taksa Ephemeroptera, Plecoptera, Trichoptera, dan Coleoptera sangat sensitif terhadap variasi fisika-kimia air dan pencemaran, sedangkan Oligochaeta mampu bertahan pada berbagai tingkat gangguan. Oleh karena itu, meskipun Sungai Kampili masih menunjukkan daya dukung ekologis yang baik, penurunan indeks biotilik harus dipandang sebagai peringatan dini akan potensi degradasi yang lebih serius. Upaya pengelolaan limbah, rehabilitasi vegetasi riparian, dan pemantauan berkala menjadi langkah penting untuk menjaga keberlanjutan fungsi ekologis sungai.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa komunitas makroinvertebrata di Sungai Kampili Kabupaten Gowa Sulawesi Selatan didominasi oleh ordo EPT (53,19%), yang mengindikasikan adanya daya dukung ekologis yang relatif baik. Namun, dengan jumlah individu yang terbatas dan nilai indeks Biotilik sebesar 3,11 kondisi sungai dapat dikategorikan tercemar ringan. Kehadiran taksa toleran serta rendahnya kelimpahan Baetidae dan Heptageniidae menandakan adanya tekanan antropogenik dari limbah domestik, pertanian, dan perubahan tata guna lahan. Temuan ini menjadi sinyal awal degradasi ekologis, sehingga diperlukan pemantauan kualitas air secara berkala, pengelolaan limbah, penerapan praktik pertanian ramah lingkungan, dan perlindungan vegetasi riparian untuk menjaga keberlanjutan ekosistem sungai.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Afriani R. 2017. Inventarisasi makrozoobentos sebagai indikator biologis kondisi perairan di Dusun Dawar Lama Kabupaten Bengkayang. *Jurnal Edumedia* 1(1):33-41. <https://doi.org/10.51826/edumedia.v1i1.55>.
- Akbar A, Tjoneng A dan Saida S. 2021. Analisis indeks bahaya erosi DAS Kampili Provinsi Sulawesi Selatan. *Jurnal AGrotekMAS* 2(3):68-75. <https://doi.org/10.33096/agrotekmas.v2i3.215>.
- Armita D, Al Amanah H dan Amrullah SH. 2021. Struktur komunitas makrozoobentos pada Saluran Mata Air Langlang dengan vegetasi riparian yang berbeda di Desa Ngenep, Kabupaten Malang, Jawa Timur. *Teknosains: Media Informasi Sains dan Teknologi* 15(2):181-189. <https://doi.org/10.24252/teknosains.v15i2.19520>.
- Burnett KAP, McMahan W and Tuberty S. 2024. Small scale wastewater treatment plant effluent influences on aquatic macroinvertebrate assemblage, functional feeding groups, and productivity. *Watershed Ecology and the Environment* 6:234-241. <https://doi.org/10.1016/j.wsee.2024.10.002>.
- Damanik-Ambarita MN, Lock K, Boets P, Everaert G, Nguyen THT, Forio MAE, Musonge PLS, Suhareva N, Bennetsen E, Landuyt D, Dominguez-Granda L and Goethals PLM. 2016. Ecological water quality analysis of the Guayas River Basin (Ecuador) based on macroinvertebrates indices. *Limnologica* 57:27-59. <https://doi.org/10.1016/j.limno.2016.01.001>.
- Diantari NPR, Ahyadi H, Rohyani IS and Suana IW. 2017. Keanekaragaman serangga Ephemeroptera, Plecoptera, dan Trichoptera sebagai bioindikator kualitas perairan di Sungai Jangkok, Nusa Tenggara Barat. *Jurnal Entomologi Indonesia* 14(3):135-142. <https://doi.org/10.5994/jei.14.3.135>.
- [ECOTON] Ecological Observation and Wetlands Conservation. 2013. Panduan Biotilik Pemantauan Kesehatan Sungai, Panduan Biotilik Untuk Pemantauan Kesehatan Daerah Aliran Sungai. ECOTON. Gresik.
- Elfami MR dan Efendy M. 2020. Struktur komunitas makrozoobentos epifauna pada ekosistem lamun, mangrove dan terumbu karang di Desa Labuhan Kecamatan Sepulu Bangkalan. *Juvenil* 1(2):260-268. <https://doi.org/10.21107/juvenil.v1i2.8446>.

- Frost C, Tibby J and Goonan P. 2024. Responses of diatoms and aquatic macroinvertebrates to deposited fine sediment in mesocosm channels as a basis for a new water quality guideline. *Science of the Total Environment* 955:1-15. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176931>.
- Ibrahim A, Sudarso J, Imroatusshoolikhah I, Toruan RL and Sari L. 2021. Penggunaan makrozoobentos dalam penilaian kualitas perairan sungai inlet Danau Maninjau, Sumatera Utara. *Jurnal Ilmu Lingkungan* 19(3):649-660. <https://doi.org/10.14710/jil.19.3.649-660>.
- Kadim MK, Pasingi N, Mursalim P dan Arbi IR. 2024. Komunitas makrozoobentos sebagai bioindikator kualitas perairan Sungai Bone Gorontalo. *Acta Aquatica* 11(3):278-284. <https://doi.org/10.29103/aa.v11i3.16439>.
- Kadim MK dan Pasingi N. 2024. Kondisi habitat fisik dan keanekaragaman makroinvertebrata sebagai indikator pencemaran di Sungai Bone Gorontalo. *Jurnal Kesehatan Lingkungan Indonesia* 23(3):301-310. <https://doi.org/10.14710/jkli.23.3.301-310>.
- Kadim MK, Pasingi N, Polamolo AI dan Maharani SA. 2025. Keberadaan Ephemeroptera, Plecoptera, Trichoptera (EPT) sebagai bioindikator pencemaran di Sungai Bone Gorontalo. *Jurnal Sumberdaya Akuatik Indopasifik* 9(2):153-164. <https://doi.org/10.46252/jsai-fpik-unipa.2025.Vol.9.No.2.445>.
- [KLHK] Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. 2022. Status Lingkungan Hidup Indonesia 2022. KLHK. Jakarta.
- Kouwen LAH van, Lee GHD van der, Kraak MHS and Verdonschot PFM. 2025. An empirically derived riparian forest preference index for lowland stream macroinvertebrates. *Ecological Indicators* 175:1-11. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2025.113547>.
- Kowalik T, Bogdał A, Borek Ł and Kogut A. 2015. The effect of treated sewage outflow from a modernized sewage treatment plant on water quality of the Breń River. *Journal of Ecological Engineering* 16(4):96-102. <https://doi.org/10.12911/22998993/59355>.
- Kubendran T, Selvakumar C, Sidhu AK, Nair A and Krishnan SM. 2017. Baetidae (Ephemeroptera: Insecta) as biological indicators of environmental degradation in Tamiraparani and Vaigai River Basins of Southern Western Ghats, India.

- International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences 6(6):558-572. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2017.606.066>.
- Li P, Xiong S, Liu J, Meng X and Wang A. 2025. Spatiotemporal characteristics of macroinvertebrate functional feeding groups and biological assessment of water quality in the Hulan River Basin. *Global Ecology and Conservation* 57:1-14. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2024.e03377>.
- Il Maknuun LL, Krisanti M and Wardiatno Y. 2021. Sensitivitas dan kelayakan indeks biotik menggunakan makroavertebrata untuk menentukan status kesehatan sungai. *Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia* 26(1):151-158. <https://doi.org/10.18343/jipi.26.1.151>.
- Mendoza SS, Morse JC and Magbanua FS. 2025. Macroinvertebrate responses to stream water quality and the proposed biological monitoring working party index for the Philippines. *Water Biology and Security*:1-11. <https://doi.org/10.1016/j.watbs.2025.100465>.
- Reymundo JIS and Araujo AAH. 2016. Spatial distribution of Ephemeroptera, Plecoptera, Trichoptera and Coleoptera (Insect) in a first order stream, montane forest, Junín, Peru. *Revista peruana de biología* 23(2): 95-102
- Robbi AA, Munfarida I, Oktorina S, Suprayogi D dan Setyowati RDN. 2024. Pemantauan makroinvertebrata sebagai bioindikator dan uji parameter fisik-kimia air pada Sungai Tambak Rejo, Sidoarjo. *Jurnal Sains dan Teknologi Lingkungan* 16(1):21-42. <https://doi.org/10.20885/jstl.vol16.iss1.art3>.
- Sahdana S, Musa R, Mallombasi A dan Latif AA. 2022. Studi pemeliharaan jaringan pada Daerah Irigasi Kampili Kabupaten Gowa. *Jurnal Ilmiah Mahasiswa Teknik Sipil* 4(2):267-273. <https://doi.org/10.33096/xh8b8f34>.
- Sukmawati, Dahlan M dan Dela R. 2021. Analisa pencemaran Sungai Mandar dengan bioindikator makroinvertebrata melalui metode biotilik. *Bina Generasi: Jurnal Kesehatan* 12(2):48-52. <https://doi.org/10.35907/bgjk.v12i2.165>.
- Sulistiyowati E, Awaliyah DF dan Uyun S. 2024. Penilaian kesehatan sungai menggunakan metode biotik dan fisik di Sungai Boyong, Sleman, Yogyakarta. *Jurnal Kesehatan Lingkungan Indonesia* 23(2):162-169. <https://doi.org/10.14710/jkli.23.2.162-169>.

- Tubić B, Andjus S, Zorić K, Vasiljević B, Jovičić K, Atlagić JČ and Paunović M. 2024. Aquatic insects (Ephemeroptera, Plecoptera and Trichoptera) metric as an important tool in water quality assessment in hilly and mountain streams. *Water* 16:1-17. <https://doi.org/10.3390/w16060849>.
- Yudistira R, Prawati E dan Rolia E. 2023. Inovasi penilaian kualitas air sungai berbasis kondisi makroinvertebrata menggunakan formula DYTERAasDAS. *JUMATISI* 4(2):318-331. <https://doi.org/10.24127/jumatisi.v4i2.5209>.

Estimasi emisi gas rumah kaca dari pembakaran sampah komunal skala desa di Kecamatan Dukun, Kabupaten Gresik

Estimation of greenhouse gas emissions from village-scale communal waste combustion in Dukun District, Gresik Regency

Faiq Abdillah¹, Abdur Rohman^{1*}, Cantika Almas Fildzah¹

¹Program Studi Teknik Lingkungan, Universitas Jember, Jember, Indonesia

Abstrak.

Pembakaran sampah adalah salah satu sumber emisi gas rumah kaca (GRK) yang mengalami peningkatan. Pembakaran sampah banyak ditemukan di kawasan perdesaan di negara berkembang. Pembakaran sampah komunal ditemukan di wilayah administrasi Kecamatan Dukun, Kabupaten Gresik. Kondisi tersebut disebabkan pengangkutan sampah menuju TPA Ngipik tidak menjangkau Kecamatan Dukun. Penelitian ini ditujukan untuk mengestimasi timbunan dan komposisi sampah yang dibakar, intensitas pembakaran, serta emisi GRK dari pembakaran sampah komunal di Kecamatan Dukun. Pengambilan sampel timbunan dan komposisi dengan metode *load-count analysis*, data intensitas pembakaran diperoleh melalui wawancara dengan perangkat desa, dan estimasi emisi GRK dihitung dengan IPCC 2006 tier 2a dan 95% rentang kepercayaan. Timbunan sampah yang dibakar secara komunal diperkirakan mencapai 1.700,24 (95% CI: 1.514,66-1.885,82) ton/tahun dari 22 lokasi pembakaran sampah komunal dengan frekuensi pembakaran 2 kali per minggu. Komposisi sampah yang dibakar didominasi sisa makanan, sampah kebun, dan plastik. Total emisi dari pembakaran komunal di Kecamatan Dukun diestimasi mencapai 778,69 (95% CI: 666,17-891,21) ton eq CO₂.

Kata kunci: emisi CO₂, gas rumah kaca, sampah rumah tangga, pembakaran sampah komunal, pengelolaan sampah perdesaan

Abstract.

Waste incineration has become a significant source of greenhouse gas (GHG) emissions and has increased substantially in recent years. Communal waste incineration is commonly found in the Dukun District, Gresik Regency due to inaccessibility of waste transport to Ngipik Landfill. This study aims to estimate the generation and composition of waste burned, the intensity of burning, and GHG emissions from communal waste burning in Dukun District. Sampling of generation and composition was carried out using load-count analysis, data on burning intensity was obtained through interviews with village officials, and GHG emission estimates were calculated using the IPCC 2006 tier2.a and 95% confidence interval. The amount of communally burned waste is estimated to reach 1,700.24 (95% CI: 1,514.66-1,885.82) tons per year from 22 communal burning sites with a burning frequency of twice a week. The composition of the burned waste was dominated by food waste, garden waste, and plastics. Total emissions from communal burning in the Dukun District are estimated to reach 778.69 (95% CI: 666.17-891.21) tonnes of CO₂ equivalent.

Keywords: CO₂ emission, greenhouse gas, household waste, communal burning of waste, Gresik Regency

1. PENDAHULUAN

Perubahan iklim adalah salah satu tantangan terbesar yang dihadapi dunia saat ini, emisi gas rumah kaca (GRK) menjadi penyebab utamanya. Gas seperti karbon dioksida (CO₂), metana (CH₄), dan dinitrogen oksida (N₂O) menyumbang pemanasan global yang tinggi (IPCC 2006). Emisi gas rumah kaca (GRK) di Indonesia mengalami peningkatan tertinggi pada tahun 2022 yaitu sebesar 10%. Sektor persampahan merupakan sektor yang mengalami peningkatan tertinggi kedua setelah sektor industri, yaitu mencapai 13% (JRC 2023).

* Korespondensi Penulis
Email : abdur@unej.ac.id

Di negara-negara berkembang, salah satu sumber utama emisi GRK berasal dari pembakaran sampah terbuka, terutama di daerah pedesaan dengan fasilitas pengelolaan sampah yang tidak memadai (Ramadan *et al.* 2022). Pembakaran sampah tanpa teknologi insinerasi melepaskan emisi langsung ke atmosfer dan menimbulkan dampak negatif, baik terhadap lingkungan maupun kesehatan manusia. Gangguan kesehatan yang paling banyak dirasakan antara lain batuk, pusing, iritasi mata, dan sesak napas (Anggunia *et al.* 2024). Oleh karena itu, pembakaran sampah terbuka mendapat perhatian global karena kontribusinya terhadap perubahan iklim dan kerusakan lingkungan (Das *et al.* 2018).

Indonesia menghadapi masalah serius dalam pengelolaan sampah, terutama di daerah pedesaan. Sebagian besar rumah tangga di daerah tersebut mengelola sampah mereka dengan membakarnya secara terbuka karena kurangnya fasilitas pengolahan sampah yang memadai (BPS 2021). Menurut data Badan Pusat Statistik (BPS), lebih dari 66,8% rumah tangga di daerah tersebut membakar sampahnya karena tidak ada akses yang cukup ke tempat pemrosesan akhir (TPA) (BPS 2018). Praktik pembakaran sampah terbuka masih menjadi pilihan utama di berbagai desa di Indonesia, seperti di Desa Tehoru, Maluku Tengah, masyarakat membakar sampah di sekitar rumah mereka karena tidak adanya fasilitas pemrosesan sampah yang memadai (Lating *et al.* 2021). Kondisi serupa ditemukan di Desa Cikaret, Bogor, dimana pembakaran sampah menimbulkan asap beracun dan polusi udara yang berdampak negatif bagi kesehatan masyarakat sekitar, seperti gangguan pernapasan dan penyakit kulit (Wulandari dan Rofi'ah 2023). Pembakaran ini menghasilkan emisi GRK serta polutan berbahaya, seperti partikel debu dan senyawa kimia toksik, yang berdampak buruk terhadap kesehatan manusia dan lingkungan (Janwar *et al.* 2023). Masalah ini diperparah dengan minimnya kesadaran masyarakat mengenai dampak buruk dari pembakaran sampah terhadap lingkungan dan kesehatan (Mashudi *et al.* 2022). Kurangnya kesadaran lingkungan serta minimnya infrastruktur pengelolaan sampah memperparah situasi ini (Sandika *et al.* 2018).

Kabupaten Gresik, salah satu pusat industri di Jawa Timur, juga menghadapi tantangan dalam pengelolaan sampah, terutama di wilayah perdesaan seperti Kecamatan Dukun. Di sini, pengangkutan sampah oleh Dinas Lingkungan Hidup (DLH) sangat terbatas (Pratama dan Rachmanto 2023). Kondisi tersebut menyebabkan

pembakaran sampah terbuka dipilih sebagai metode utama dalam pengurangan volume sampah. Berdasarkan observasi langsung yang dilakukan sebelum penelitian ini dimulai, masyarakat sering membakar sampah di lokasi terbuka yang telah ditetapkan secara komunal yang dikoordinir oleh pemerintah desa. Praktik ini menghasilkan emisi GRK dalam jumlah yang signifikan karena penerapan sistem pembakaran sampah komunal tersebut. Hal ini menunjukkan pentingnya inventarisasi emisi GRK yang dihasilkan dari praktik pembakaran ini agar dapat mendukung langkah-langkah pengelolaan yang lebih baik di masa depan.

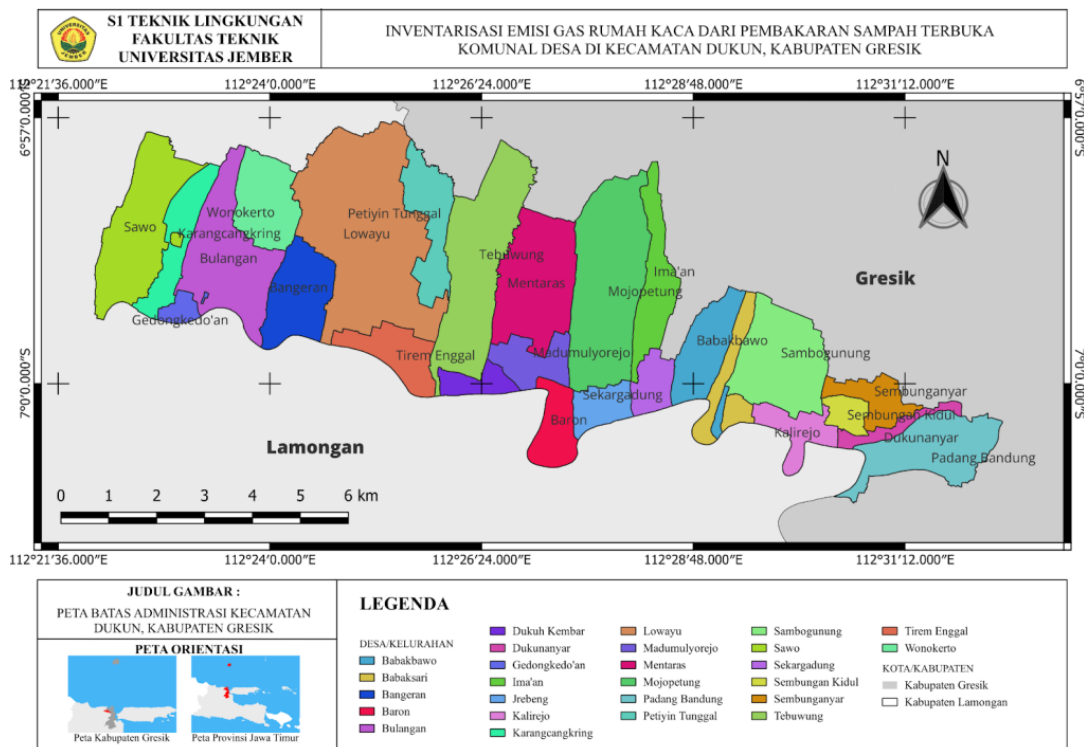
Penelitian terkait emisi GRK di Indonesia sebagian besar berfokus pada sektor transportasi dan industri di daerah perkotaan seperti yang dilakukan oleh Anifah *et al.* (2021) di Kelurahan Karang Joang, Balikpapan, Mashudi *et al.* (2022) di Jabodetabek, dan Wahyudi (2019) di Kabupaten Pati. Kajian emisi pengelolaan sampah di daerah pedesaan khususnya di Kabupaten Gresik masih terbatas. Banyak desa di Kecamatan Dukun yang menggunakan pembakaran sampah terbuka sebagai solusi pengurangan timbulan sampah, tetapi belum ada data yang cukup untuk menghitung dampak lingkungan dari praktik ini. Padahal berdasarkan penelitian yang dilakukan di kawasan perdesaan di Kota Semarang, diketahui emisi dari pembakaran sampah terbuka berpotensi memberikan kontribusi besar terhadap total emisi GRK khususnya pada kawasan yang tidak terjangkau pelayanan TPA (Ramadan *et al.* 2022). Penelitian ini berusaha untuk mengisi kekosongan tersebut dengan menyediakan data konkret terkait emisi GRK dari pembakaran sampah di wilayah pedesaan, khususnya di Kecamatan Dukun. Hasil penelitian ini diharapkan dapat membantu dalam perumusan kebijakan pengelolaan sampah yang lebih berkelanjutan di wilayah tersebut.

Penelitian ini secara spesifik bertujuan untuk mengidentifikasi dan mengukur emisi gas rumah kaca yang dihasilkan dari pembakaran sampah terbuka di lokasi-lokasi komunal di Kecamatan Dukun, Kabupaten Gresik. Menggunakan model perhitungan emisi dari *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), penelitian ini memberikan estimasi kuantitatif dari emisi CO₂, CH₄, dan N₂O yang dilepaskan akibat pembakaran sampah (IPCC 2006). Penelitian ini juga mengkaji komposisi sampah yang dibakar dan intensitas pembakaran pada masing-masing desa. Hasil penelitian diharapkan memberikan rekomendasi yang dapat diterapkan untuk mengurangi emisi melalui pengelolaan sampah yang lebih baik dan berkelanjutan.

2. METODOLOGI

2.1. Lokasi kajian dan waktu penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Kecamatan Dukun, Kabupaten Gresik, Jawa Timur (**Gambar 1**). Kecamatan ini dipilih karena berdasarkan observasi ditemukan banyak lokasi pembakaran sampah terbuka komunal, yang digunakan sebagai metode utama pengurangan timbulan sampah oleh masyarakat setempat. Penelitian dilakukan pada bulan Juni hingga Juli 2024, mencakup pengambilan data lapangan melalui survei, wawancara, dan pengambilan sampel sampah di lokasi pembakaran komunal.



Gambar 1. Wilayah administrasi Kecamatan Dukun, Kabupaten Gresik.

2.2. Metode pengumpulan data

Penelitian ini menggunakan data primer dan sekunder untuk mendukung analisis emisi gas rumah kaca (GRK) dari pembakaran sampah terbuka. Data primer berupa lokasi, intensitas, dan cakupan pelayanan pembakaran sampah komunal diperoleh dari wawancara dan kuesioner kepada perangkat desa. Pengambilan data timbulan dan komposisi sampah yang dibakar dilakukan dengan metode *load-count analysis*. Pengambilan sampel dilakukan pada 10 dari 22 lokasi pembakaran sampah komunal yang dipilih dengan *stratified random sampling* yang membagi desa menjadi

kategori (stratum) perkotaan dan perdesaan (**Tabel 1**). Sampel timbulan dan komposisi diambil 2 kali seminggu pada setiap lokasi (3-10 Juni 2024) disesuaikan dengan waktu pengangkutan sampah oleh petugas (Damanhuri dan Padmi 2010).

Tabel 1. Lokasi pengambilan sampel timbulan dan komposisi sampah yang dibakar.

No	Lokasi pengambilan sampel	Stratum
1	Lokasi Pembakaran Komunal Bandung Baru	Perkotaan
2	Lokasi Pembakaran Komunal Padang Wetan	Perkotaan
3	Lokasi Pembakaran Komunal Gedong	Perkotaan
4	Lokasi Pembakaran Komunal Siraman	Perkotaan
5	Lokasi Pembakaran Komunal Sariwonorejo	Perkotaan
6	Lokasi Pembakaran Komunal Sekargadung	Perkotaan
7	Lokasi Pembakaran Komunal Karangcangkkring	Perkotaan
8	Lokasi Pembakaran Komunal Mojopetung	Perdesaan
9	Lokasi Pembakaran Komunal Tiremenggal	Perdesaan
10	Lokasi Pembakaran Komunal Sawo	Perdesaan

Keterangan: Stratum atau klasifikasi sesuai dengan Perka BPS Nomor 120 Tahun 2020 tentang Klasifikasi Desa Perkotaan dan Perdesaan.

Volume timbulan sampah yang dibakar diperoleh dari pengukuran langsung volume motor bak yang terisi sampah. Massa sampah diukur langsung dari sampah yang diangkut saat hari pengambilan sampel pada 10 lokasi pengambilan sampel (KLH 2012). Pengambilan sampel komposisi sampah diambil secara acak sebesar 500 liter di setiap lokasi pengambilan sampel, kemudian dipilah berdasarkan komposisi dalam IPCC 2019 volume 5 bab 2 (Damanhuri dan Padmi 2010; IPCC 2019) (**Gambar 2**). Alat yang dibutuhkan dalam pengambilan sampel tersebut dapat dilihat dalam **Tabel 2**.



Gambar 2. Pengumpulan data: pengukuran volume sampah (kiri); penimbangan sampah (kanan).

Tabel 2. Alat yang digunakan dalam penelitian.

No.	Alat	Kegunaan
1	Timbangan 0-300 kg	Mengukur massa sampah yang akan dibakar
2	Kotak 500 liter	Wadah sampel pemilahan komposisi sampah
3	Skop	Memindahkan sampah
4	Garpu rumput	Memindahkan sampah
5	<i>Trash bag</i>	Wadah sampah yang telah dipilah sesuai komposisi
6	Sarung tangan	Pengaman diri

2.3. Prosedur analisis data

2.3.1 Timbulan dan komposisi sampah yang dibakar

Timbulan sampah yang diperoleh dari pengambilan sampel berupa total timbulan sampah yang diangkut menuju lokasi pembakaran dalam satuan volume dan massa. Nilai tersebut berikutnya dihitung dengan **Persamaan 1** untuk mengetahui rata-rata timbulan sampah yang dibakar pada tiap rumah dan per kapita. Komposisi sampah dihitung dengan **Persamaan 2** (SNI 19-3964-1995).

$$\text{Massa sampah (kg/orang/hari)} = \frac{\text{massa total sampah (kg/hari)}}{\text{jumlah orang terlayani (orang)}} \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{Komposisi sampah (\%)} = \frac{\text{massa tiap jenis sampah (kg)}}{\text{massa total sampah (kg)}} \times 100\% \dots\dots\dots (2)$$

2.3.2 Emisi pembakaran sampah komunal

Estimasi emisi pembakaran sampah dihitung dengan *incineration and open burning of waste model tier 2.a* untuk memperkirakan emisi CO₂ (**Persamaan 3**), CH₂ (**Persamaan 4**), dan N₂O (**Persamaan 5**) dari pembakaran sampah komunal di Kecamatan Dukun (IPCC 2006). *Tier 2.a* dipilih karena dalam penelitian ini timbulan dan komposisi diketahui dari sumber data primer, sedangkan faktor emisi diperoleh dari tetapan bawaan IPCC.

$$\text{CO}_2 \text{ emissions} = \text{MSW} \cdot \sum (WF_j \cdot dm_j \cdot CF_j \cdot FCF_j \cdot OF_j) \cdot \frac{44}{12} \dots\dots\dots (3)$$

Keterangan:

CO ₂	= Emisi CO ₂ dari pembakaran sampah (Gg CO ₂ /tahun)
MSW	= Total timbulan sampah yang dibakar dalam satu tahun (Gg/tahun)
WF _j	= Fraksi jumlah sampah berdasarkan jenisnya terhadap MSW yang dibakar (%)
dm _j	= Fraksi massa kering sampah sesuai jenisnya terhadap MSW yang dibakar (%)
CF _j	= Fraksi karbon pada sampah berdasarkan jenisnya pada kondisi kering (%)
FCF _j	= Fraksi fosil karbon sampah berdasarkan pada total karbon (%)
44/12	= Faktor konversi massa atom dari C ke CO ₂

$$CH_4 = \sum (IW_j \cdot EF) \cdot 10^{-6} \dots\dots\dots (4)$$

Keterangan:

CH₄ = Emisi CH₄ dari pembakaran sampah (Gg CH₄/tahun)
 IW_j = Total massa basah sampah jenis j yang dibakar (Gg/tahun)
 EF = Fraksi emisi CH₄ (%)
 dm_j = Faktor konversi kg ke Gg

$$N_2O = \sum (IW_j \cdot EF) \cdot 10^{-6} \dots\dots\dots (5)$$

Keterangan:

N₂O = Emisi N₂O dari pembakaran sampah (Gg N₂O/tahun)
 IW_j = Total massa kering sampah jenis j yang dibakar (Gg/tahun)
 EF = Fraksi emisi N₂O (%)
 dm_j = Faktor konversi kg ke Gg

Emisi dihitung menggunakan 95% *confidence interval* (95% CI) untuk memperkirakan rentang kepercayaan dari hasil estimasi rata-rata dan total emisi dari pembakaran sampah di Kecamatan Dukun, Kabupaten Gresik. Interval kepercayaan ini diterapkan pada perhitungan emisi CO₂, CH₄, dan N₂O, untuk memberikan gambaran tentang tingkat ketidakpastian dan rentang estimasi emisi GRK yang dihasilkan pada penelitian ini (Tong et al. 2012). Rangkaian perhitungan 95% CI dilakukan dengan **Persamaan 6** hingga **Persamaan 9** (Penn State Department of Statistics 2024).

$$S_h^2 = \frac{1}{n_h - 1} \sum_{i=1}^{n_h} (y_{hi} - \underline{y}_h)^2 \dots\dots\dots (6)$$

$$\widehat{T}_{st} = N \cdot \underline{y}_{st} \dots\dots\dots (7)$$

$$\widehat{Var}(\widehat{T}_{st}) = \sum_{h=1}^L N_h \cdot (N_h - n_h) \cdot \frac{S_h^2}{n_h} \dots\dots\dots (8)$$

$$90\text{ CI} = \widehat{T}_{st} \pm t \sqrt{\widehat{Var}(\widehat{T}_{st})} \dots\dots\dots (9)$$

Keterangan:

S_h = Standar deviasi pada stratum h
 n_b = Jumlah sampel titik stratum h (lokasi pembakaran)
 y_h = Rata-rata data pada stratum h (dalam kg/rumah/hari untuk timbulan sampah yang dibakar dan ton/rumah/tahun untuk emisi pembakaran sampah)
 Var = Varians data
 T_{st} = Total data pada seluruh stratum (dalam kg/hari untuk timbulan sampah yang dibakar dan ton/tahun untuk emisi pembakaran sampah)
 N_h = Total lokasi pembakaran pada stratum h
 N = Total lokasi pembakaran pada seluruh stratum

Total emisi yang diestimasi berikutnya dihitung dampak negatifnya terhadap pemanasan global dengan nilai *Global Warming Potential (GWP)* masing-masing parameter polutan GRK (**Tabel 3**) (IPCC 2021).

Tabel 3. Nilai GWP CO₂, CH₄, dan N₂O.

No	Polutan GRK	Nilai GWP (eq CO ₂)
1	Karbon dioksida (CO ₂)	1
2	Metana (CH ₄)	27
3	Dinitrogen oksida (N ₂ O)	273

Keterangan: Nilai GWP diperoleh dari IPCC (2021).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Kondisi terkini pengelolaan sampah di Kecamatan Dukun

Pengelolaan sampah di Kecamatan Dukun, Kabupaten Gresik hingga saat penelitian ini dilakukan masih dikoordinir oleh pemerintah desa. Kondisi ini disebabkan oleh pengangkutan truk sampah DLH yang tidak menjangkau wilayah Kecamatan Dukun. Pengangkutan menuju TPA Ngipik di Kawasan Gresik Kota melayani 6 kecamatan di kawasan Gresik Selatan dan Gresik Kota (Pratama dan Rachmanto 2023). Kecamatan Dukun yang berada di Gresik Utara tidak terlayani sepenuhnya oleh TPA Ngipik (DLH Kabupaten Gresik 2022).

Hasil wawancara dengan salah satu perangkat desa di Kecamatan Dukun menyatakan bahwa sampah di Kecamatan Dukun yang terangkut menuju TPA adalah sampah yang bersumber dari Pasar Dukun. Alasan pemerintah desa memilih mengelola sampah mandiri adalah karena biaya retribusi truk sampah yang dinilai mahal sehingga dalam praktiknya pengolahan sampah di Kecamatan Dukun menggunakan sistem *open dumping* dan pembakaran komunal yang tersebar di 26 lokasi yang beroperasi hingga penelitian ini dilakukan. Alasan tersebut juga ditemukan dalam penelitian di Desa Mekar Jaya, Kabupaten Sambas (Kazliani 2023). Secara normatif, pembakaran sampah yang tidak sesuai dengan persyaratan teknis telah dilarang dalam Undang-Undang nomor 18 tahun 2008 BAB X pasal 29 ayat 29 (1) poin g. Peraturan tersebut berikutnya ditindaklanjuti oleh Pemda Kabupaten Gresik dengan mengatur denda paling banyak Rp 500.000,00 dan ancaman pidana paling lama 3 bulan untuk pelaku pembakaran sampah yang dilarang dalam Perda Kabupaten Gresik nomor 9 tahun 2010 pasal 40 ayat (3).

Kondisi pengelolaan sampah di Kecamatan Dukun juga tidak terlepas dari konteks kebijakan yang berlaku. Undang-Undang Nomor 18 Tahun 2008 secara tegas melarang praktik pembakaran sampah yang tidak memenuhi persyaratan teknis, yang

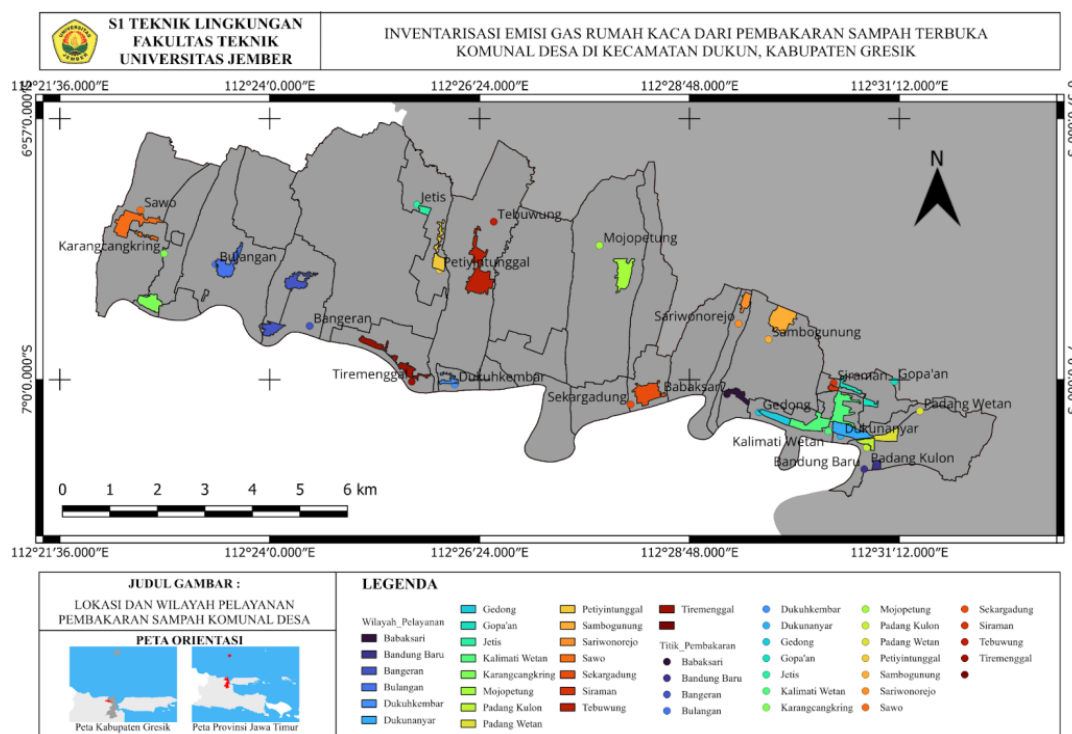
kemudian diturunkan dalam Peraturan Daerah Kabupaten Gresik Nomor 9 Tahun 2010 dengan sanksi administratif dan pidana. Namun, keterbatasan pelayanan pengangkutan sampah oleh DLH serta tingginya biaya operasional menjadi faktor utama yang menyebabkan kebijakan tersebut belum sepenuhnya efektif diterapkan di tingkat desa. Akibatnya, pemerintah desa mengambil peran mandiri dalam pengelolaan sampah dengan pendekatan praktis berupa pembakaran komunal, meskipun praktik ini berpotensi menimbulkan dampak lingkungan dan kesehatan.

Berdasarkan hasil wawancara juga ditemukan rencana pembuatan 5 lokasi *open dumping* baru di 4 desa lainnya, yaitu Desa Ima'an, Desa Jrebeng, Desa Madumulyorejo, dan Desa Gedongkedo'an. Perlakuan mandiri oleh masing-masing warga dilakukan di 4 desa tersebut, perlakuan mandiri yang ditemukan berdasarkan keterangan perangkat desa antara lain: pembuangan di pinggir jalan/lahan kosong, pembakaran sampah mandiri, dan pembuangan sampah ke sungai. Perilaku mandiri tersebut juga ditemukan di desa yang telah memiliki lokasi pembuangan sampah komunal.

Temuan ini memperkuat penelitian yang dilakukan Han *et al.* (2015) yang menyatakan bahwa penimbunan, pembakaran, dan pembuangan sampah sembarangan banyak dilakukan di kawasan pedesaan khususnya yang tidak terlayani fasilitas pengolahan sampah. Praktik tersebut menunjukkan kesenjangan antara kebijakan dan implementasi di lapangan. Temuan ini mengindikasikan bahwa permasalahan pengelolaan sampah di Kecamatan Dukun tidak hanya berkaitan dengan ketersediaan fasilitas, tetapi juga berkaitan dengan perilaku masyarakat serta keterbatasan alternatif pengelolaan sampah yang mudah diterapkan.

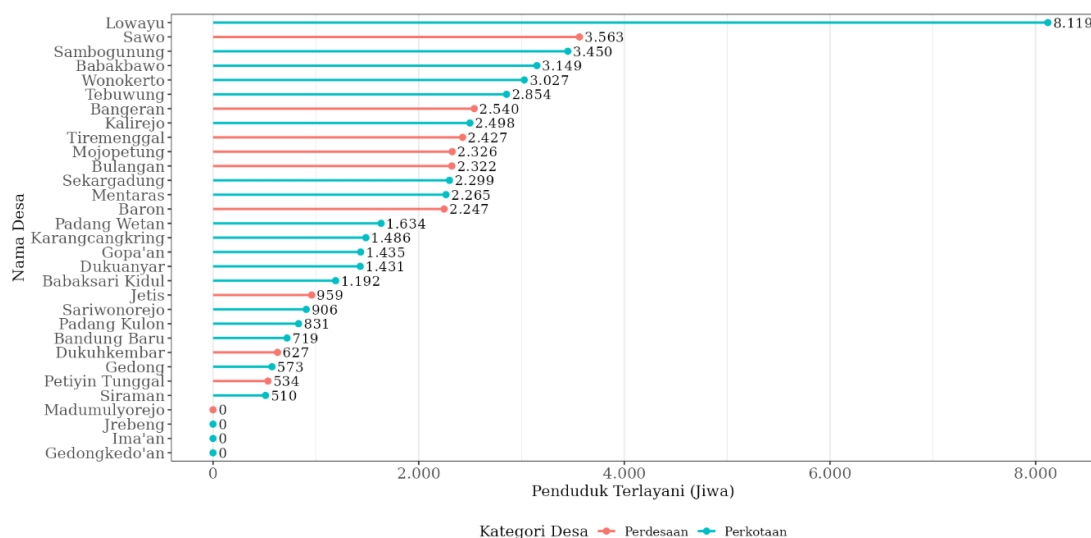
3.2. Intensitas pembakaran sampah komunal di Kecamatan Dukun

Lokasi *open dumping* di Kecamatan Dukun dapat dikategorikan menjadi 2 berdasarkan metode pengolahan sampahnya, yaitu penimbunan terbuka dan pembakaran. Berdasarkan hasil wawancara dengan perangkat desa, pembakaran sampah dilakukan di 22 lokasi *open dumping*, sedangkan penimbunan sampah dilakukan di 4 lokasi *open dumping*. Persebaran lokasi pembakaran sampah komunal di Kecamatan Dukun dan wilayah pelayanannya disajikan dalam **Gambar 3**. Pembakaran dipilih karena dinilai efektif, mudah, dan murah untuk pengurangan timbulan sampah dalam waktu singkat. Pendapat yang sama digunakan sebagai alasan pembakaran di perdesaan Kota Semarang (Wahyudi 2019).



Gambar 3. Lokasi pembakaran sampah komunal dan wilayah pelayanan di Kecamatan Dukun.

Jumlah penduduk yang terlayani pembakaran sampah komunal di Kecamatan Dukun mencapai 37.116 jiwa (8.675 rumah) yang tersebar di 16 desa (**Gambar 4**). Temuan tersebut selaras dengan pernyataan Das *et al.* (2018) bahwa pembakaran sampah lebih banyak dilakukan di kawasan sub-urban dan perdesaan dibandingkan perkotaan.



Gambar 4. Cakupan pelayanan lokasi *open dumping* desa di Kecamatan Dukun, Kabupaten Gresik.

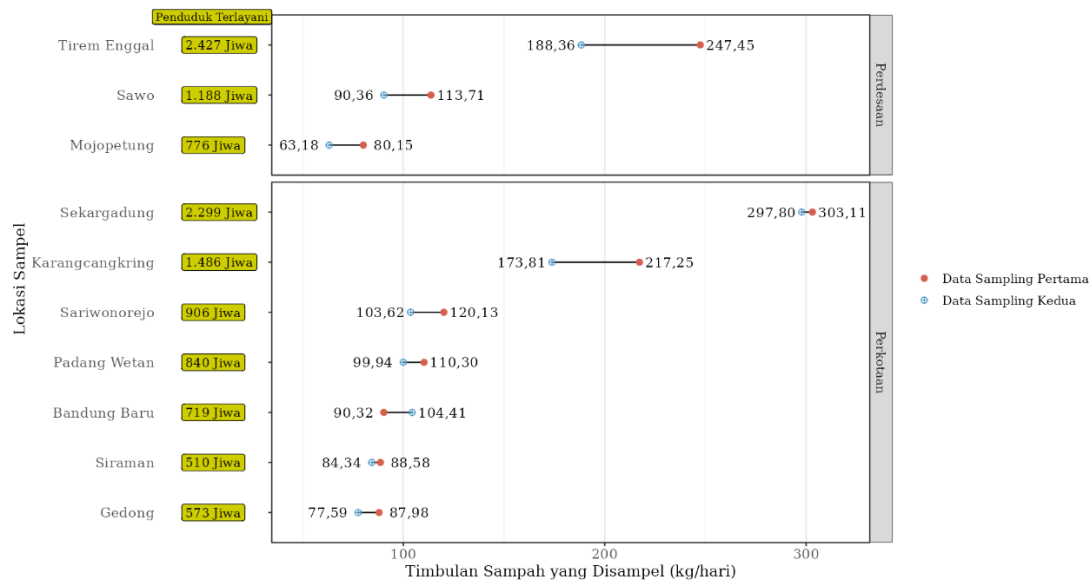
Pengangkutan sampah di Kecamatan Dukun dilakukan oleh petugas setiap 2 kali seminggu untuk setiap rumah baik pada musim kemarau maupun musim hujan. Pembakaran sampah dilakukan pada hari yang sama dengan hari pengangkutan sampah di masing-masing lokasi pembakaran sampah komunal. Aktivitas pengolahan sampah di lokasi pembakaran sampah komunal di Kecamatan Dukun dapat dilihat pada **Gambar 5**.



Gambar 5. Aktivitas pengolahan sampah di lokasi pembakaran sampah komunal: pengangkutan sampah menuju lokasi pembakaran (kiri); pembakaran terbuka sampah (kanan).

3.3. Timbulan dan komposisi sampah yang dibakar secara komunal di Kecamatan Dukun

Timbulan sampah yang dibakar di 10 lokasi pengambilan sampel bersumber dari sampah rumah tangga yang tidak dipilah oleh petugas, sehingga sampah yang dibakar merupakan campuran dari sampah organik dan anorganik. Proses pemilahan sampah dilakukan secara mandiri oleh sebagian warga dari rumah. Sampah yang dipilah di rumah berupa sampah yang memiliki nilai jual di tukang rongsok atau pengepul, seperti botol plastik, gelas plastik, kertas, nasi aking, dan lain-lain. Kondisi masyarakat serupa juga ditemukan di Desa Tegalwangi, Kabupaten Jember yang melakukan pembakaran sampah dan melakukan pemilahan sampah organik dan anorganik. Pemilahan sampah secara mandiri yang dilakukan masyarakat di desa tersebut bergantung pada keberadaan tukang rongsok dan kesadaran masyarakat terhadap nilai jual sampah (Faridawati dan Sudarti 2021). Timbulan sampah yang masuk ke 10 lokasi pembakaran sampah yang dilakukan sampling disajikan dalam **Gambar 6**.

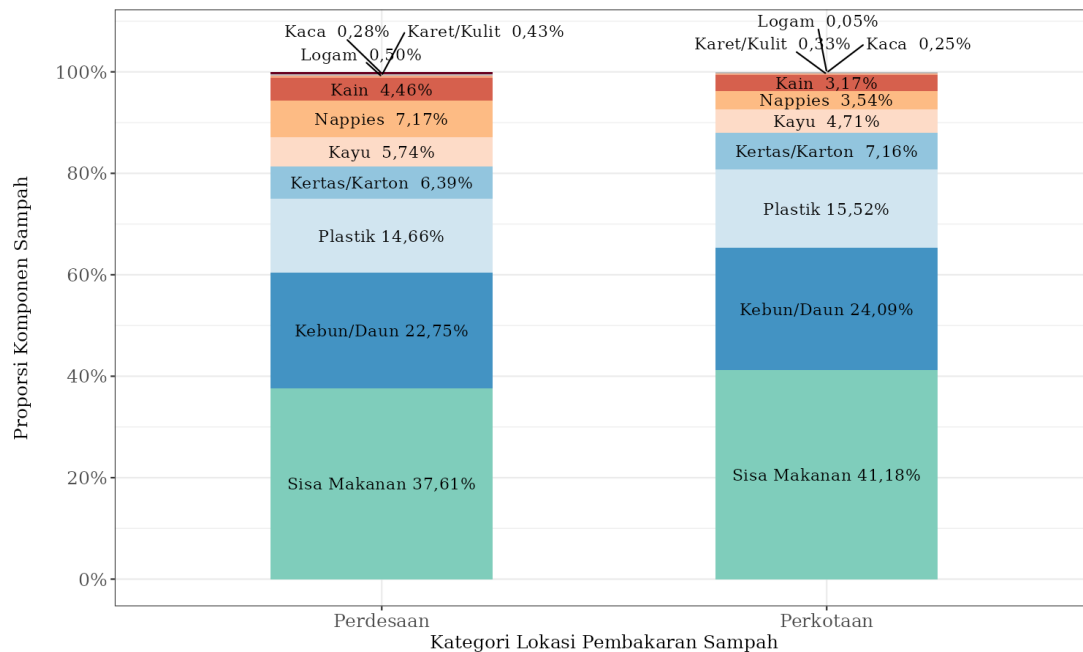


Gambar 6. Jumlah timbulan sampah (Hasil olahan data sampel).

Hasil olahan data sampel menunjukkan timbulan sampah di 10 lokasi dalam 2 kali pengambilan sampel, warna hijau menunjukkan desa dengan stratum perdesaan dan biru menunjukkan desa dengan stratum perkotaan. Total timbulan sampah yang dibakar di 10 lokasi pengambilan sampel bervariasi tergantung pada cakupan pelayanan dan lama sampah yang terkumpul (hari) dalam satu kali pengangkutan.

Berikutnya, perkiraan timbulan sampah yang dibakar di Kecamatan Dukun dengan 95% CI menunjukkan bahwa total sampah yang dibakar sekitar 1.700,24 (95% CI: 1.514,30 - 1.889,17) ton/tahun. Total sampah yang dibakar di pembakaran komunal Kecamatan Dukun mencapai 0,537 (95% CI: 0,478 - 0,596) kg/rumah/hari atau setara dengan 0,125 (95% CI: 0,111 - 0,139) kg/orang/hari. Nilai tersebut berada pada rentang timbulan sampah yang dibakar di kawasan *peri urban* yaitu sebesar 0,088 - 0,176 kg/orang/hari (Ramadan et al. 2022). Temuan tersebut karena Kecamatan Dukun juga merupakan daerah dengan kategori kawasan *peri urban* (Anggraeni dan Aulia 2019). Karena kesamaan jenis kawasan, maka timbulan sampah di dua wilayah tersebut berada pada rentang yang sama.

Komposisi sampah dalam penelitian ini dikategorikan menjadi 11, yaitu: sisa makanan, kebun, plastik, kertas/karton, kayu, kain, karet/kulit, logam, kaca, *nappies*, dan lainnya (IPCC 2019). Komposisi sampah yang dibakar di Kecamatan Dukun didominasi oleh sisa makanan, sampah kebun, dan plastik. Perbandingan komposisi sampah di stratum perkotaan dan perdesaan dapat dilihat pada **Gambar 7**.



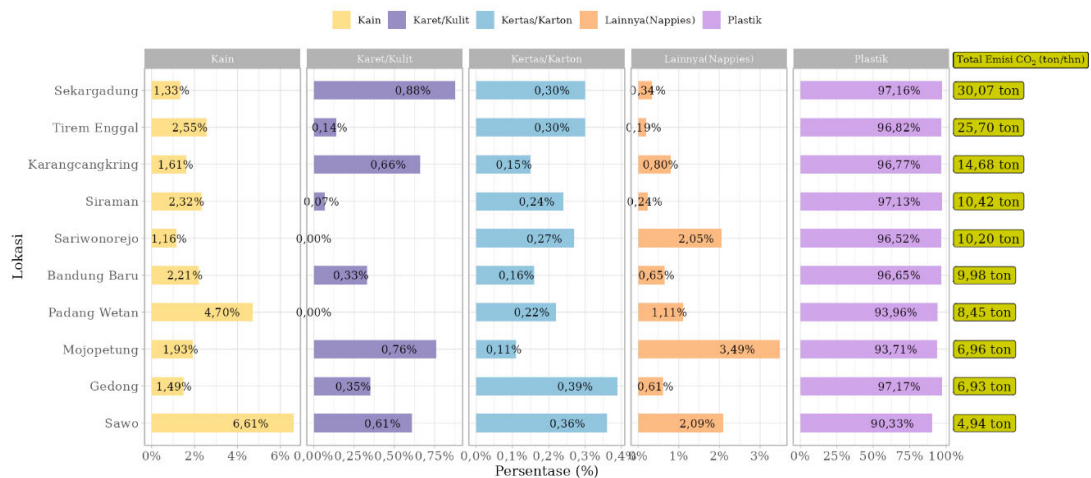
Gambar 7. Komposisi sampah yang dibakar secara komunal: stratum perkotaan (kiri); stratum perdesaan (kanan).

Komposisi sampah yang dibakar di stratum perkotaan dan perdesaan memiliki kemiripan. **Gambar 7** menunjukkan timbunan sampah yang dibakar di Kecamatan Dukun didominasi oleh 40,11% sisa makanan 23, 69% sampah kebun, dan 15,26% plastik. Komposisi tersebut hampir sama dengan komposisi sampah di Kabupaten Gresik dan komposisi sampah yang masuk ke TPS Peganden. Ketiga lokasi tersebut memiliki kemiripan komposisi sampah yang didominasi sampah organik dan plastik (Aninuddin dan Rosariawari 2021; SIPSN 2023).

3.4. Estimasi emisi gas rumah kaca dari pembakaran sampah komunal di Kecamatan Dukun

3.4.1. Emisi gas karbon dioksida (CO₂)

Emisi gas karbon dioksida dari 10 lokasi pengambilan sampel dihitung dengan model IPCC 2006. Faktor emisi menggunakan nilai tetapan dalam IPCC 2006 volume 2 bab 2. Hasil perhitungan emisi CO₂ dari pembakaran sampah di lokasi tersebut disajikan dalam **Gambar 8**. Sampah plastik merupakan penghasil emisi tertinggi dibanding komposisi lainnya karena memiliki nilai tetapan faktor emisi yang paling tinggi dibanding komposisi lainnya. Emisi CO₂ dari sampah organik (sisa makanan, kebun, dan kayu) dianggap 0 (nol) karena emisi CO₂ yang dihitung dengan model IPCC hanya emisi dari pembakaran sampah anorganik atau yang memiliki fraksi fosil karbon.

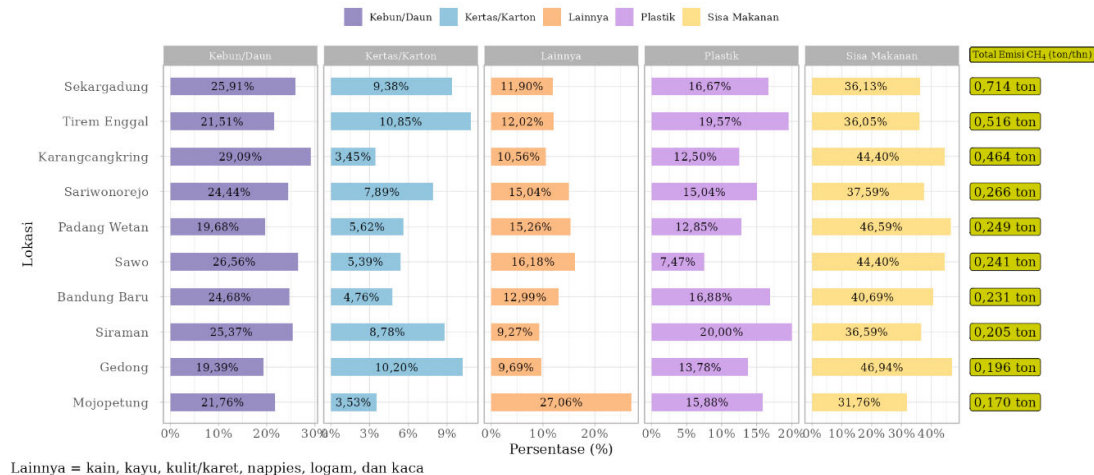


Gambar 8. Estimasi emisi gas karbon dioksida (CO₂) di 10 lokasi pengambilan sampel.

Emisi dari pembakaran sampah organik dalam model IPCC dianggap terurair dan terserap seluruhnya oleh tanaman (Pulles *et al.* 2022). Sedangkan perbedaan total emisi CO₂ pada masing-masing lokasi pembakaran disebabkan perbedaan jumlah penduduk yang terlayani di setiap lokasi pembakaran komunal. Total emisi yang dihasilkan dari pembakaran sampah berbanding lurus dengan jumlah penduduk yang terlayani dan timbunan sampah yang dibakar di satu lokasi pembakaran sampah komunal. Pernyataan tersebut didukung dengan hasil analisis yang menunjukkan bahwa lokasi pembakaran sampah di Desa Sekargadung menyumbang emisi tertinggi dalam 1 tahun yaitu 30,07 ton CO₂/tahun.

3.4.2. Emisi gas metana (CH₄)

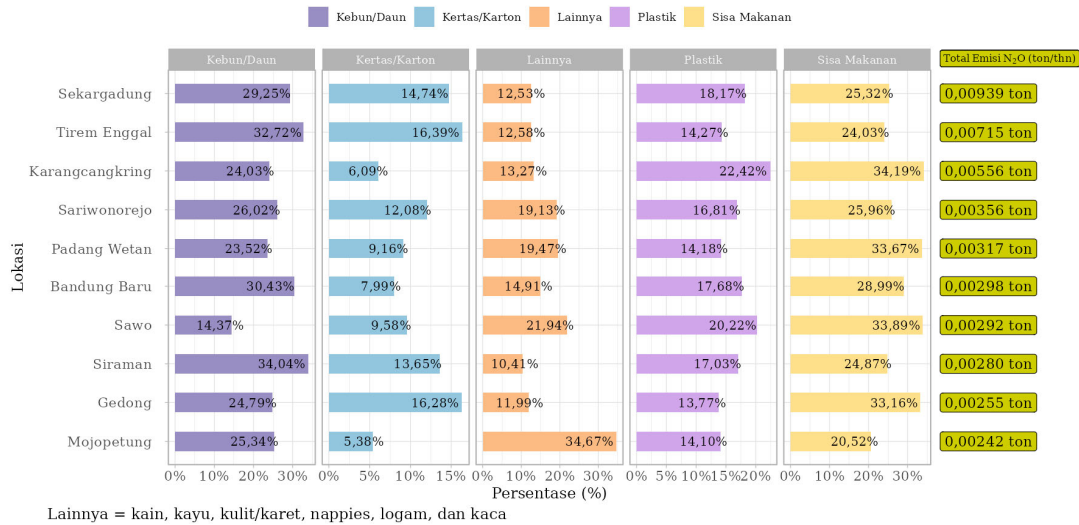
Gas metana dari pembakaran sampah dalam model IPCC dihitung pada masing-masing komposisi di 10 lokasi pengambilan sampel. Hasil perhitungan emisi dengan data timbulan sampah dari pengambilan sampel dapat dilihat pada **Gambar 9**. Berdasarkan hasil perhitungan dengan model IPCC, komposisi sampah yang menyumbang emisi metana tertinggi adalah sisa makanan. Lokasi yang menyumbang emisi metana terbanyak adalah lokasi pembakaran sampah komunal Desa Sekargadung. Salah satu penyebab total emisi CH₄ yang bervariasi di setiap lokasi pembakaran sampah komunal adalah perbedaan cakupan pelayanan di masing-masing lokasi pembakaran sampah komunal.



Gambar 9. Estimasi emisi gas metana (CH₄) di 10 lokasi pengambilan sampel.

3.4.3. Emisi gas dinitrogen oksida (N₂O)

Total emisi N₂O dipengaruhi oleh komposisi sampah karena estimasi emisi N₂O didasarkan pada massa sampah dalam kondisi kering. Hasil estimasi emisi N₂O di 10 lokasi pengambilan sampel dapat dilihat pada **Gambar 10**. Sisa makanan dan sampah plastik menyumbang emisi GRK terbesar karena jumlah timbulannya paling tinggi dibandingkan jenis sampah lainnya. Kadar air berat kering sampah plastik dalam IPCC 2006 juga mempengaruhi total emisi yang bersumber dari pembakaran sampah plastik.



Gambar 10. Estimasi emisi gas dinitrogen oksida (N₂O) di 10 lokasi pengambilan sampel.

3.4.4. Rentang kepercayaan estimasi emisi dari pembakaran sampah komunal

Estimasi emisi GRK dihitung dengan 95% CI untuk mengetahui rentang ketidakpastian dari estimasi emisi di lokasi pengambilan sampel terhadap seluruh lokasi pembakaran sampah komunal di Kecamatan Dukun (populasi) (Tong *et al.* 2012). Perhitungan rentang kepercayaan dilakukan dengan menggunakan 95% CI karena data hasil pengambilan sampel merupakan kumpulan rata-rata timbunan. Menurut teori *central limit theorem*, kumpulan dari rata-rata sampel akan mendekati distribusi normal walaupun sampel tidak membentuk distribusi normal sehingga metode konvensional untuk perhitungan 95% CI dapat dilakukan (Islam 2018). Hasil perhitungan 95% CI disajikan dalam **Tabel 4**.

Tabel 4. Rentang kepercayaan estimasi emisi pembakaran sampah komunal di Kecamatan Dukun.

No	Gas emisi	Rata-rata (ton/rumah/tahun)	Total (ton/tahun)
1	Timbunan sampah	196,01 (174,58-217,43)	1.700,24 (95% CI: 1.514,3-1.889,17)
2	CO ₂	0,0508 (95% CI: 0,496-0,520)	440,7 (95% CI: 333,12-548,28)
3	CH ₄	0,00127 (95% CI: 0,00113-0,00141)	11,05 (95% CI: 9,84-12,26)
4	N ₂ O	0,000017 (0,000015-0,000019)	0,145 (95% CI: 0,126-0,164)

Total timbunan sampah yang dibakar di seluruh lokasi pembakaran sampah komunal di Kecamatan Dukun diperkirakan mencapai 1.700,24 (95% CI: 1.514,3-1.889,17) ton/tahun. Proses pembakaran tersebut diestimasi menghasilkan emisi CO₂ sekitar 440,7 (95% CI: 333,12-548,28) ton CO₂/tahun, emisi CH₄ sebesar 11,05

(95% CI: 9,84-12,26) ton CH₄/tahun, dan emisi N₂O mencapai 0,145 (95% CI: 0,126-0,164) ton N₂O/tahun. Emisi pembakaran sampah terbuka dihitung dengan *global warming potential (GWP)* untuk memperkirakan dampak pemanasan global dari pembakaran sampah komunal di Kecamatan Dukun, Kabupaten Gresik. Hasil perhitungan tersebut disajikan dalam **Tabel 5**.

Tabel 5. Dampak pemanasan global dari pembakaran sampah komunal di Kecamatan Dukun, Kabupaten Gresik.

No.	Gas emisi	Total emisi GRK (ton/tahun)	Nilai GWP	Total GWP pembakaran sampah komunal
1	CO ₂	440,7 (95% CI: 333,12-548,28)	1	440,7 (95% CI: 333,12-548,28)
2	CH ₄	11,05 (95% CI: 9,84-12,26)	27	298,35 (95% CI: 262,76-334,94)
3	N ₂ O	0,145 (95% CI: 0,126-0,164)	273	39,59 (95% CI: 34,43-44,75)
4	Total	1.700,24 (95% CI: 1.514,3-1.889,17)	-	778,69 (95% CI: 666,17-891,21)

Total emisi GRK yang bersumber dari pembakaran sampah komunal di Kecamatan Dukun setara dengan 778,69 (95% CI: 666,17-891,21) ton eq CO₂/tahun. Emisi per kapita dari pembakaran sampah tersebut diperkirakan mencapai 0,021 (95% CI: 0,018-0,024) ton eq CO₂/orang/tahun atau setara dengan 0,40% hingga 0,54% dari rata-rata emisi GRK yang dihasilkan satu orang di Indonesia, yaitu sebesar 4,473 ton eq CO₂/orang/tahun (JRC 2023).

3.4.5. Strategi pengelolaan sampah

Hasil estimasi emisi gas rumah kaca menunjukkan bahwa pembakaran sampah komunal di Kecamatan Dukun menghasilkan emisi yang cukup signifikan dengan kontribusi terbesar berasal dari fraksi sampah plastik. Tingginya kontribusi emisi dari plastik disebabkan oleh kandungan karbon fosil yang tinggi sehingga pembakarannya menghasilkan emisi karbon dioksida secara langsung. Selain itu, fraksi sampah organik seperti sisa makanan dan sampah kebun juga berkontribusi terhadap pembentukan gas metana dan dinitrogen oksida yang memiliki potensi pemanasan global lebih tinggi dibandingkan karbon dioksida.

Komposisi sampah yang didominasi oleh sampah organik menunjukkan adanya peluang besar untuk menerapkan pengelolaan sampah berbasis pengurangan di sumber. Pengomposan dapat menjadi alternatif yang efektif untuk mengurangi timbulan sampah yang selama ini dibakar secara terbuka. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa pengomposan mampu mengurangi lebih dari separuh timbulan

sampah organik yang masuk ke fasilitas pengelolaan sampah (Octavia et al. 2015). Selain itu, penerapan prinsip 3R (*reduce, reuse, recycle*) dapat mengurangi jumlah sampah yang harus dibakar sekaligus meningkatkan nilai ekonomi dari sampah yang masih memiliki potensi daur ulang.

Pengembangan fasilitas pengelolaan sampah skala desa seperti bank sampah, TPS3R, rumah kompos, maupun TPST dapat menjadi solusi yang sesuai dengan karakteristik wilayah Kecamatan Dukun. Keberadaan bank sampah memiliki peluang keberhasilan yang cukup tinggi karena masyarakat telah terbiasa menjual sampah yang memiliki nilai ekonomi kepada pengepul. Dengan pengelolaan yang baik, bank sampah tidak hanya berfungsi sebagai sarana pengurangan sampah tetapi juga dapat meningkatkan pendapatan masyarakat melalui sistem tabungan sampah (Asteria dan Heruman 2016).

Upaya pengurangan emisi dari sektor persampahan di Kecamatan Dukun juga memerlukan dukungan kelembagaan dan kolaborasi antar pemangku kepentingan. Pendekatan *collaborative governance* dapat diterapkan melalui kerja sama antara pemerintah daerah, pemerintah desa, masyarakat, sektor swasta, dan lembaga non-pemerintah dalam penyediaan sarana, pembiayaan, edukasi, serta pengawasan pengelolaan sampah. Pendekatan kolaboratif tersebut terbukti mampu meningkatkan efektivitas pengelolaan sampah pada tingkat lokal karena memungkinkan pembagian peran dan sumber daya secara lebih optimal (Setiawandari dan Kriswibowo 2023). Dengan demikian, strategi pengelolaan sampah di Kecamatan Dukun perlu diarahkan pada pengurangan ketergantungan terhadap pembakaran terbuka melalui peningkatan pengolahan sampah organik, penguatan sistem daur ulang, penyediaan fasilitas pengelolaan sampah yang memadai, serta penguatan kolaborasi antar pemangku kepentingan untuk mewujudkan sistem pengelolaan sampah yang lebih berkelanjutan.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Pembakaran sampah komunal di Kecamatan yang difungsikan saat ini adalah 22 lokasi dengan pembakaran 2 kali dalam satu minggu pada musim apa pun. Saat ini timbulan sampah yang dibakar di lokasi pembakaran sampah komunal di Kecamatan Dukun masih lebih rendah dibanding dengan penelitian sebelumnya yang dilakukan di kawasan perdesaan di daerah lain. Komposisi sampah yang dibakar di Kecamatan

Dukun didominasi oleh sisa makanan, kebun, dan plastik. Emisi CO₂ dan N₂O paling tinggi berasal dari sampah plastik, sedangkan emisi CH₄ tertinggi berasal dari sampah sisa makanan. Total emisi yang bersumber dari aktivitas pembakaran sampah komunal di Kecamatan Dukun mencapai 778,69 (95% CI: 666,17-891,21) ton eq CO₂/tahun. Berdasarkan temuan dalam penelitian ini, penulis memberikan saran untuk penelitian emisi CO₂ dari pembakaran sampah berikutnya dapat mempertimbangkan perhitungan emisi dari pembakaran sampah sisa makanan. Penambahan parameter polutan lokal seperti PM_{2,5} juga dapat dilakukan. Penelitian lanjutan untuk strategi penurunan emisi dan pengolahan sampah di Kecamatan Dukun, Kabupaten Gresik juga perlu dilakukan agar berikutnya dapat diterapkan sebagai kebijakan yang lebih berkelanjutan.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Anggraeni N dan Aulia BU. 2019. Penentuan Tingkat Kesenjangan Wilayah dan Faktor Penyebab Terjadinya Kesenjangan di Kabupaten Gresik. *Jurnal Ilmiah Teknik Lingkungan* 7(2):1-10.
- Anggunia FOD, Rokhim A, Afandi. 2024. Upaya Hukum Masyarakat yang Terkena Dampak Pencemaran Udara Akibat Pembakaran Sampah Domestik (Studi Kasus Desa Sumbersuko Kecamatan Dampit Kabupaten Malang). *Dinamika* 30 (1):8943-8959.
- Anifah EM, Rini IDWS, Hidayat R, Ridho M. 2021. Estimasi Gas Rumah Kaca (GRK) Kegiatan Pengelolaan Sampah di Kelurahan Karang Joang, Balikpapan. *Jurnal Sains dan Teknologi Lingkungan*. 13(1): 17-33.
- Aninuddin MQA dan Rosariawari F. 2021. Potensi Pemanfaatan Sampah TPS di Kabupaten Gresik sebagai Bahan Bakar Refused Drived Fuel (Studi Kasus TPS Peganden). *Environmental Science and Engineering Conference (ESEC)* 2(1):67-74.
- Asteria D dan Heruman H. 2016. Bank Sampah sebagai Alternatif Strategi Pengelolaan Sampah Berbasis Masyarakat di Tasikmalaya. *Jurnal Manusia dan Lingkungan* 23(1):136-141.
- [BPS] Badan Pusat Statistik. 2018. *Statistik Lingkungan Hidup Indonesia 2018: Pengelolaan Sampah di Indonesia*. Badan Pusat Statistik.

- [BPS] Badan Pusat Statistik. 2021. Statistik Potensi Desa Indonesia 2021. Badan Pusat Statistik.
- Damanhuri E dan Padmi T. 2010. Diktat Kuliah TL-3104: Pengolahan Sampah. Program Studi Teknik Lingkungan FTSL ITB.
- Das B, Bhavé PV, Sapkota A, Byanju RM. 2018. Estimating Emissions from Open Burning of Municipal Solid Waste in Municipalities of Nepal. *Waste Management* 79:481-490.
- [DLH] Dinas Lingkungan Hidup Kabupaten Gresik. 2022. Jumlah dan Kapasitas Tempat Pembuangan Sampah Menurut Kecamatan di Kabupaten Gresik Tahun 2022. Open Data Kabupaten Gresik. Tersedia pada: <https://data.go.id/dataset/dataset/jumlah-dan-kapasitas-tempat-pembuangan-sampah-di-kabupaten-gresik1>
- Faridawati D dan Sudarti. 2021. Pengetahuan Masyarakat Tentang Dampak Pembakaran Terhadap Lingkungan Kabupaten Jember. *Jurnal Sanitasi Indonesia* 1(2):50-55.
- Han Z, Liu D, Lei Y, Wu J, Li S. 2015. Characteristics and Management of Domestic Waste in the Rural Area of Southwest China. *Water Management dan Research* 33(1):39-47.
- Islam MR. 2018. Sample size and its role in Central Limit Theorem (CLT). *International Journal of Physics and Mathematics* 1(1):37-44.
- [IPCC] Intergovernmental Panel on Climate Change. 2006. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 5: Waste. Chapter 5: Incineration and Open Burning of Waste. IPCC.
- [IPCC] Intergovernmental Panel on Climate Change. 2019. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 5: Waste. Chapter 2: Waste Generation, Composition, and Management Data. IPCC.
- Janwar AM, Silvia R, Ibrahim A, Wiyanti T, Zulfikar ML, Sulaiman Z, Sumarno DI. 2023. Pengadaan Bak Sampah untuk Kebersihan Lingkungan di Desa Ridogalih Kecamatan Cikakak Kabupaten Sukabumi. *Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat Abdi Nusa* 3(2):102-106.

- [JRC] Joint Research Centre. 2023. GHG Emissions of All World Countries 2023. Publications Office of the European Union. https://edgar.jrc.ec.europa.eu/report_2023
- Kazliani. 2023. Pembakaran dan Pembuangan Sampah di Desa Mekar Jaya. IRAJAGADHITA: Jurnal Pengabdian dan Pemberdayaan Masyarakat 1(2):87-94.
- [KLH] Kementerian Lingkungan Hidup. 2012. Pedoman Penyelenggaraan Inventarisasi Emisi Gas Rumah Kaca Nasional Buku II Volume 4. Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan.
- Lating Z, Dolang MW, Lapodi AR, Umasugi MT. 2021. Pemberdayaan Masyarakat sebagai Upaya Pemanfaatan Insenerator dalam Mengelolah Sampah Anorganik. Aptekmas 4(3):55-59.
- Mashudi LA, Tamara D, Ramadwiriani S, Rizki ADP, Parluhutan JA, Prayoga A, Putri AR, Kusumawardani N. 2022. Riset Aktivitas Pembakaran Sampah Terbuka di Wilayah Jabodetabek. Waste4Change. <https://waste4change.com/research/open-burning-waste-in-jabodetabek>
- Octavia D, Fitriyaningsih Y, Jati DR. 2015. Analisis Beban Emisi CO dan CH₄ dari Kegiatan Pembakaran Sampah Rumah Tangga Secara Terbuka (Studi Kasus Kecamatan Sungai Kakap, Kabupaten Kubu Raya). Jurnal Ilmiah Teknik Lingkungan 3(1):1-10.
- [Perda] Peraturan Daerah Kabupaten Gresik Nomor 9 Tahun 2010 tentang Pengelolaan Sampah.
- [Perka BPS] Peraturan Kepala Badan Pusat Statistik Nomor 120 Tahun 2020 tentang Klasifikasi Desa Perkotaan dan Perdesaan di Indonesia 2020 Buku 2: Jawa. Badan Pusat Statistik.
- Penn State Department of Statistics. 2024. Sampling Theory and Methods. Diperoleh dari: <https://online.stat.psu.edu/stat506/>
- Pratama RP dan Rachmanto TA. 2023. Kinerja Pengelolaan Sampah Perkotaan di Kota Kecamatan Gresik. Jurnal Indonesia Sosial Teknologi 4(01):102-120.
- Pulles T, Gillenwater M, and Radunsky K. 2022. CO₂ emissions from biomass combustion: Accounting of CO₂ emissions from biomass under the UNFCCC. Carbon Management 13(1):181-189.

- Ramadan BM, Rachman I, and Matsumoto T. 2022. Activity and Emission Inventory of Open Waste Burning at the Household Level in Developing Countries: A Case Study of Semarang City. *Journal of Material Cycles and Waste Management* 24:1194-1204.
- Sandika IKB, Ekayana AAG, Suryana IGPE. 2018. Edukasi Pengelolaan Sampah kepada Masyarakat di Desa Pecatu. *Widyabhakti Jurnal Ilmiah Populer* 1(1):61-68.
- Setiawandari NEP dan Kriswibowo A. 2023. Collaborative Governance dalam Pengelolaan Sampah. *Jurnal Kebijakan Publik* 14(2):149-155.
- SNI 19-3964-1995 tentang Pengambilan dan Pengukuran Contoh Timbulan dan Komposisi Sampah Perkotaan.
- Tong LI, Chang CW, Jin SE, dan Saminathan R. 2012. Quantifying uncertainty of emission estimates in National Greenhouse Gas Inventories using bootstrap confidence intervals. *Atmospheric Environment* 56:80-87.
- Wahyudi J. 2019. Emisi Gas Rumah Kaca (GRK) dari Pembakaran Terbuka Sampah Rumah Tangga Menggunakan Model IPCC. *Jurnal Litbang* 15(1):65-76.
- Wulandari S dan Rofi'ah. 2023. Analisis Penyelesaian Konflik Dampak Pembakaran Sampah Terhadap Kesehatan Lingkungan dan Masyarakat di Desa Cikaret RT 06 RW 08 Kecamatan Bogor Selatan. *Manifesto: Jurnal Gagasan Komunikasi, Politik, dan Budaya* 1(1):23-29.

Pengembangan kerangka konseptual untuk transisi energi berkelanjutan: pendekatan bibliometrik

Development of conceptual framework for sustainable energy transitions: a bibliometric approach

Muhamad Ferdy Firmansyah^{1*}, Yudha Hadian Nur¹, Muhamad Andri Arif Pramanda²

¹Badan Penelitian dan Pengembangan Daerah, Provinsi Jawa Barat, Bandung, Indonesia

²Departemen Akuntansi, Fakultas Ekonomi dan Bisnis, Universitas Siliwangi, Tasikmalaya, Indonesia

Abstrak.

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan kerangka konseptual transisi energi berkelanjutan yang dapat menjadi penelitian awal dalam mengukur dan memetakan transisi energi berkelanjutan di Indonesia. Penelitian ini menggunakan analisis bibliometrik dan telaah pustaka untuk memetakan cakupan komponen dan indikator transisi energi berkelanjutan berdasarkan dimensi keberlanjutan. Melalui pengamatan deskriptif bibliografi, publikasi terkait transisi energi berkelanjutan paling banyak diterbitkan pada kurun waktu 2019-2023 dan sitasi pada topik ini mengalami peningkatan sejak tahun 2017. Kata kunci yang paling sering muncul meliputi konservasi sumber daya alam, lingkungan, manusia, dan hewan. Hingga tahun 2023, kata kunci yang dominan adalah konservasi sumber daya energi, lingkungan, dan manusia dengan tren topik pada tema energi, transisi, dan keberlanjutan. Hasil analisis VosViewer terdapat empat kluster, yaitu dampak lingkungan, sumber daya alam, intensitas energi, dan ekonomi lingkungan. Output peta tematik menghasilkan kluster yang berfokus pada pembangunan ekonomi, konservasi sumber daya alam, dan hewan. Hasil penelitian ini menghasilkan kerangka konseptual awal yang dapat menjelaskan ruang lingkup transisi energi berkelanjutan.

Kata kunci: transisi energi, bibliometrik, lingkungan, ekonomi

Abstract.

This research aims to develop a conceptual framework for sustainable energy transition as an initial research in measuring and mapping sustainable energy transition in Indonesia. A bibliometric analysis and systematic literature review were conducted to identify the components and indicators of a sustainable energy transition based on sustainability dimensions. Bibliographic analysis shows that publications related to the sustainable energy transition were dominantly published in the period 2019-2023, while citations on this topic increased in 2017. The keywords that emerged most often in the study were conservation of natural resources, environment, humans, and animals. In terms of the period, the keywords with the highest use until 2023 are conservation of energy resources, environment and humans with trend topics on the themes of energy, transition and sustainability. There are four clusters of VosViewer output, namely focusing on environmental impact, natural resources, energy intensity and environmental economy. The thematic map output produces clusters that focus on economic development, conservation of natural resources and animals. The findings provide an initial conceptual framework that can explain the scope of the sustainable energy transition.

Keywords: energy transition, bibliometric, environment, economy

1. PENDAHULUAN

Energi adalah fondasi kehidupan manusia yang berasal dari berbagai sumber, seperti matahari, angin, air, otot hewan dan manusia, kayu, hingga bahan bakar fosil (Solomon and Krishna 2011). Pemanfaatan bahan bakar fosil kemudian menjadi penggerak utama perkembangan peradaban dan industrialisasi sejak revolusi industri sekitar tahun 1700-an. Namun di era modern, kekhawatiran terhadap sumber energi yang semakin terbatas (Solomon and Krishna 2011) dan didorong dengan semakin tingginya kesadaran akan perubahan iklim (Selvakkumaran and Ahlgren 2020), menekan dunia untuk mengambil langkah konkret beralih kepada energi terbarukan.

* Korespondensi Penulis
Email : muhamadferdy77@gmail.com

Peralihan energi tersebut dikenal dengan istilah transisi energi, yang mengacu kepada pergeseran dari satu energi dominan kepada energi yang baru (Carley and Konisky 2020). Transisi energi di era modern ditandai dengan penurunan bahan bakar fosil, baik batu bara atau minyak bumi kepada sumber energi lain yang memiliki emisi karbon rendah seperti angin, matahari, dan panas bumi. Tidak hanya pada tingkat nasional, transisi energi pun harus dapat dikaji pada tingkat lokal. Transisi Energi Lokal (TEL) bisa mendorong keberhasilan transisi energi pada tingkat nasional (Drewello 2022). Transisi Energi Lokal diartikan sebagai transisi dari energi fosil yang terpusat ke pembangkitan dan konsumsi energi terbarukan di tingkat lokal.

TEL berfokus kepada skala “mikro” dalam transisi energi, yaitu didorong insentif ekonomi dan kemauan masyarakatnya sendiri untuk “bertransisi energi”. Dalam skala yang lebih luas, TEL selaras dengan konsep “*The Prism of Sustainability*”, yaitu konsep holistik dimana keberlanjutan dipengaruhi oleh dimensi sosial, ekonomi, lingkungan, dan dimensi institusional (Spangenberg 2002). Konsep *Prism of Sustainability* mengusulkan bahwa keberlanjutan sejati hanya dapat dicapai jika keempat pilar ini seimbang dan diperhatikan bersama. Dalam kata lain, tindakan keberlanjutan harus mendukung pertumbuhan ekonomi yang sehat, kesejahteraan sosial yang inklusif, pelestarian lingkungan yang berkelanjutan, dan didorong oleh partisipasi dari masyarakatnya. Dengan pendekatan ini, kita dapat mencapai keberlanjutan yang lebih holistik dan meminimalkan konflik antara berbagai dimensi keberlanjutan.

Transisi energi merupakan langkah penting dalam mengatasi tantangan perubahan iklim dan yang komprehensif dilakukan pada tingkat nasional dan lokal (Drewello 2022). Indikator transisi energi memegang peran penting dan relevan agar para pemangku kebijakan dapat menentukan fokus. Sejumlah indikator, indeks maupun pengukuran tentang transisi telah mulai dikembangkan baik dalam bentuk penilaian sampai pada pengujian secara geografis. Desain *Strategic Environmental Assessment* (SEA) berfokus pada konteks pemerintah, risiko, keberlanjutan, dan manajemen transisi lanskap yang berusaha memberikan praktik konvensional pada penerapan kebijakan, rencana dan program (Nwanekezie et al. 2021).

Sejumlah kajian telah memfokuskan diri pada penyusunan *assessment* untuk tema-tema umum pada konsep transisi energi. Yang et al. 2020 memiliki konsentrasi pada kerangka indeks utama untuk penilaian keberlanjutan kuantitatif untuk

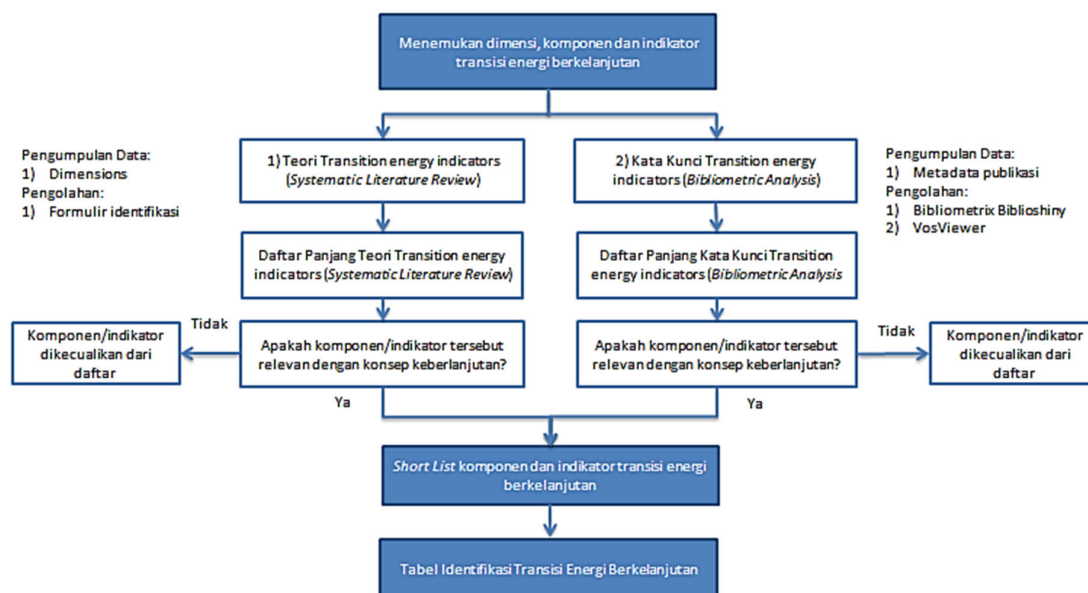
infrastruktur energi di kota pintar dengan fokus pengukuran pada aspek ekonomi, lingkungan, sosial dan kebebasan serta privasi. Penelitian yang dilakukan oleh (Shmelev and Shmeleva 2018) berusaha mengidentifikasi "*global urban sustainability assesment*" atau penilaian urbanisasi keberlanjutan secara global dengan multidimensi yang mengukur empat hal yaitu ekonomi, teknologi sosial, dan lingkungan. Studi yang dilakukan oleh (Praene et al. 2018) menyusun indikator sistem energi berkelanjutan yang digunakan dalam penilaian pulau kecil yang mempertimbangkan persentase energi terbarukan, situasi listrik, pembangunan ekonomi dan lokalisasi geografis. Dengan mengambil kasus di negara G7, (Ibrahim et al. 2023) mempertimbangkan peran transisi energi bersamaan dengan inovasi teknologi dan mobilisasi demografis dalam keberlanjutan lingkungan. Penelitian yang dilakukan oleh (Naegler et al. 2021) mengamati pengukuran transformasi energi keberlanjutan multidimensi dengan fokus pengamatan kepada ekologi, sosioekonomi dan sosioteknikal.

Penelitian ini berusaha untuk melakukan pemetaan komponen dan indikator transisi energi berkelanjutan berdasarkan rekam jejak publikasi dengan dianalisis menggunakan bibliometrik dan *systematic literature review*. Tujuan dari penelitian ini adalah menyusun *short list* kerangka konseptual yang dapat dikembangkan sebagai *index* atau *asesment* lainnya. Pemetaan komponen atau indikator dapat bermanfaat untuk melihat prospek dan kondisi terkini kajian, serta peluang-peluang dalam memprioritaskan kebijakan dan penyusunan pengukuran yang sistematis. Pada konteks global, luaran penelitian akan melengkapi kerangka konseptual dari indikator transisi energi berkelanjutan, sedangkan pada konteks nasional dapat memberikan hasil adaptasi dan peningkatan (*scaled-up*) untuk mendorong pembakuan indikator penentuan transisi energi berkelanjutan pada skala nasional.

2. METODOLOGI

Penelitian ini menggunakan *bibliometric analysis* untuk mengidentifikasi kata kunci utama dari sejumlah data publikasi mengenai transisi energi terbarukan dari rentang 1999 sampai 2023. Penelitian ini juga menggunakan *systematic literature review* (SLR) yang digunakan untuk mengidentifikasi kajian teori secara komprehensif dan sistematis. Didapatkan 403 jurnal ilmiah yang diolah di *bibliometric analysis* dan 23 jurnal ilmiah, yang kemudian diambil 12 artikel relevan untuk struktur SLR. Data sekunder yang digunakan bersumber dari dimension.ai. Hal ini karena data ini

cenderung dapat langsung diolah dengan tanpa melibatkan peneliti sebagai pengambil data (Firmansyah and Maulana 2021). Penelitian kualitatif menggunakan *thematic analysis* untuk menyusun kerangka pemikiran melalui analisis masalah dan fenomena melalui beberapa proses ilmiah (Kiger and Varpio 2020). **Gambar 1** memperlihatkan kerangka penelitian untuk mencari komponen dan indikator dengan menggunakan bibliometrika dan diperkuat melalui *systematic literature review*.



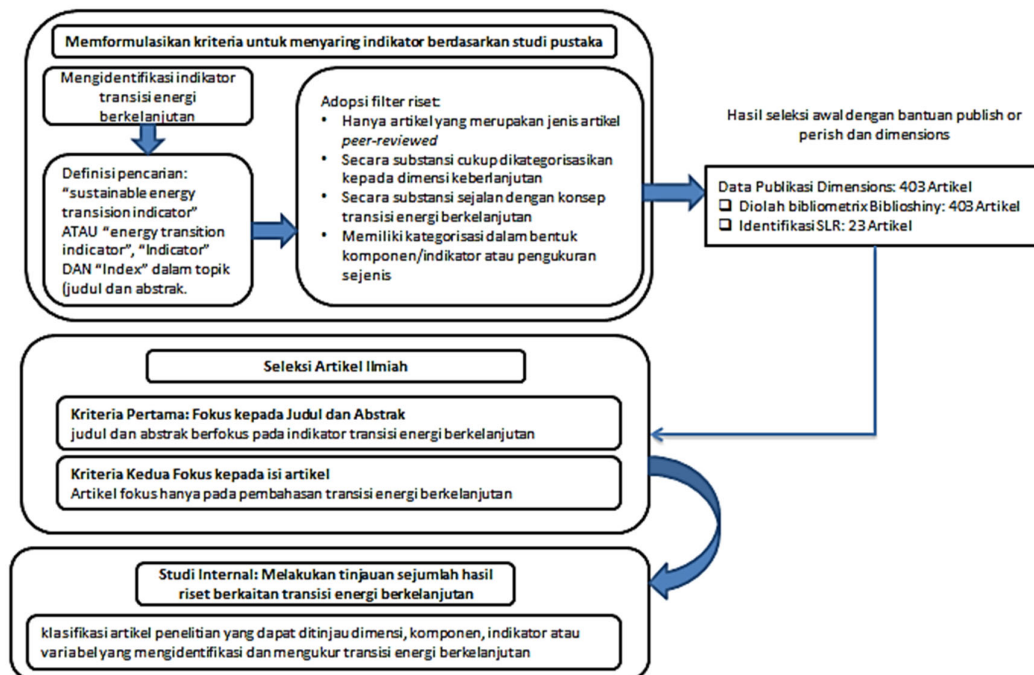
Gambar 1. Kerangka penelitian untuk menentukan dimensi, komponen dan indikator transisi energi berkelanjutan menggunakan analisis bibliometrika dan *systematic literature review*.

Penelitian ini menggunakan pendekatan *bibliometric analysis* untuk analisis data yang memfokuskan pada identifikasi sejumlah publikasi dengan tujuan mendapatkan informasi dari perkembangan tren riset (Cobo *et al.* 2011; Martínez *et al.* 2015). *Bibliometric analysis* merupakan penelitian pada ranah kajian bibliometrik dan dapat digunakan dalam berbagai studi ilmu (Aria and Cuccurullo 2017). Terdapat setidaknya dua aspek yang harus dilengkapi dalam pendekatan bibliometrik yaitu *mapping* dan *graphical* (Taqi *et al.* 2021). Secara prosedur, dibedakan menjadi dua yaitu *performance analysis* (evaluasi publikasi dan *citations*) dan *science mapping* (struktur dinamis penelitian yang digeneralisasi melalui visualisasi digital) (Yu and Muñoz-Justicia 2020; Rosado and De Souza 2021). Selain bibliometrik, terdapat juga pendekatan *scientometrik* yang menganalisis publikasi dalam bidang ilmiah tertentu melalui perspektif pemetaan bidang terkait (Makkizadeh and Sa'adat 2017).

Metode tinjauan bibliometrik yang diterapkan berfokus pada spesifikasi sejumlah artikel ilmiah yang ditulis sehingga diperoleh polarisasi khusus dan unik yang dapat memetakan sejumlah capaian penelitian baru. Adapun *Software* yang digunakan dalam penelitian ini adalah R *Bibliometrix* *Biblioshiny* yang menggunakan *web apps* dengan *shiny package environment* R (Huang et al. 2021) dan *VosViewer* yang digunakan untuk mengidentifikasi *network*, *overlay* dan *density visualization* (Canesi and Marella 2023). Pendekatan bibliometrik berguna untuk menganalisis bidang penelitian, generalisasi dan visualisasi subdomain konseptualnya serta evolusi tematik yang berkembang pada topik riset tertentu (Muñoz-Leiva et al. 2012).

Pada **Gambar 2** memperlihatkan tahapan *desk study* untuk melakukan kegiatan *systematic literature review*. Dalam penelitian ini sejumlah sumber akademis dikumpulkan secara sistematis yang berkaitan dengan transisi energi berkelanjutan. Daftar panjang (*longlist*) komponen dan indikator terpilih didasarkan atas tinjauan pustaka terkait kriteria-kriteria:

1. *Transition energy indicators* yang didapatkan dari hasil *systematic literature review* dan *bibliometric analysis*;
2. Konsep dimensi/prinsip pembangunan berkelanjutan ditinjau dari aspek ekonomi (*prosperity*), lingkungan (*planet*), sosial (*people*), dan pemerintah (*rules*).



Gambar 2. Rangkaian kegiatan *desk study* pada *systematic literature review*.

Penelitian ini menggunakan *VosViewer* untuk mendapatkan klusterisasi berdasarkan *network* dan *overlay visualization* lalu mengambil *output* analisis *keywords* dari *Biblioshiny Bibliometrix R Packages* dan diperkuat dengan memperhatikan pembahasan komponen dan indikator pada *systematic literature review*. Secara keseluruhan, tahapan dan aktivitas penelitian disajikan pada **Tabel 1** (Ilham et al. 2021; Panchal et al. 2021; Ghaleb et al. 2022).

Tabel 1. Konsep identifikasi dari *output VosViewer, Biblioshiny Bibliometrix R Packages* dan *Systematic literature review*.

No.	Pendahuluan (data search and retrival)	Tahap 1 (identification in general)	Tahap 2 (selection article)	Tahap 3 (streams and sub-streams idenfitation)	Tahap 4 (findings and research opportunity)
1.	Melakukan pemilihan topik dan tujuan penelitian	Mencari artikel pada tahap awal (main information in step 1) Artikel: 403	Mencari artikel pada tahap kedua (main information in step 2) Artikel: 403	Mencari artikel pada tahap ketiga (main information in step 3) Artikel: 403 (Bibliometrix) Artikel: 23 (SLR)	Melakukan penjelasan penemuan dan research opportunity***
2.	Membuat pertanyaan penelitian	Mengumpulkan artikel pada tahap awal (dengan pencarian "search" pada dimension.ai)	Menyeleksi artikel berdasarkan kriteria <i>Transition energy indicator</i> Konsep Berkelanjutan Artikel: 403 (Bibliometrix) Artikel: 23 (SLR)	Mengolah data dengan menganalisis hasil <i>VosViewer*</i> dan <i>Bibliometrix**</i>	
3.	Membuat kata kunci dan jenis penelusuran pustaka (title-keyword) " <i>Sustainability of Energy Transition</i> "	Mengolah data ke dalam R <i>Bibliometrix</i> <i>Biblioshiny</i> pada tahap awal			
4.	Software: <i>Publish or Perish, Website Dimensions</i>	Software: <i>Dimension.ai (website)</i> R Studio	Software: <i>Bibliometrix: Dimension.ai (website)</i> R Studio SLR Tabel Identifikasi		

Keterangan:

*data yang ditampilkan meliputi hasil *output*: (1) *network, overlay, density*

**data yang ditampilkan meliputi hasil *output*: (1) *overview: main information, annual scientific production dan average citations per year*

***data yang ditampilkan meliputi hasil *output*: *Annual scientific production, Average citations per year, Corresponding author's countries dan Countries scientific production, Trend Topics dan Thematic Map dan Factorial Analysis*

relevansi >1,00. Hasil seleksi ini menghasilkan 43 *items*, 4 kluster, 687 *links*, dan 1954 total *link strength*. Guna menghasilkan penelitian berbasis *mapping research*, hasil *output* dari *VosViewer* diidentifikasi melalui konsep *clustering*. Adapun setiap identifikasi akan dibagi menjadi sejumlah kluster dianalisis berdasarkan *links*, *total link strength*, *occurences* dan *average publication year* (**Tabel 2**).

Tabel 2. Hasil pengolahan analisis bibliometrika *VosViewer*.

ID	Label	x	y	Cluster	Weight			Score
					Links	TLS	Occur	Avg. Pub. Year
4	Carbon emission	-0.1785	-0.9425	1	28	59	16	2020.94
7	Climate change	-0.3284	-0.4117	1	40	143	44	2018.89
8	CO2 emission	0.046	0.1053	1	37	107	28	2019.96
10	Ecological footprint	-0.5016	-0.6855	1	26	61	18	2018.11
12	Economic growth	-0.666	-0.3394	1	37	148	34	2019.71
13	Education	-0.8542	-0.5645	1	20	27	15	2015.27
22	Energy use	0.0832	-0.8882	1	30	60	21	2019.38
24	Fossil fuel	0.3011	-0.6201	1	33	78	21	2020.52
26	Global warming	0.0248	-0.5588	1	27	42	13	2020.08
28	GHG emission	-0.2265	-0.1574	1	40	115	26	2020.19
30	Investment	0.075	-0.0386	1	41	124	37	2020
33	Natural resource	-0.2808	-0.8004	1	28	62	16	2020.81
34	Renewable energy	0.1623	-0.116	1	38	199	53	2020.74
1	Biofuel	0.8121	0.3435	2	29	57	12	2019.17
2	Biomass	0.8622	0.04	2	32	85	21	2019.95
9	Coal	0.9938	0.3836	2	22	49	11	2020
14	Electricity	1.1162	0.0352	2	31	96	25	2019.84
20	Energy system	0.429	0.3749	2	39	163	63	2020.19
21	Energy transition	0.451	0.1951	2	41	222	84	2020.95
25	Fuel	0.7578	-0.0414	2	36	100	29	2020.52
29	Hydrogen	1.0645	-0.2618	2	25	41	14	2021.93
31	Land	0.4405	-0.6873	2	29	42	13	2020.92
32	Life cycle assessment	0.3895	-0.2908	2	36	84	25	2020.88
37	Social energy	0.6907	-0.3656	2	32	52	11	2019.45
38	Sa	0.5002	-0.0928	2	38	93	31	2019.87
43	Wind	1.1207	0.1642	2	23	39	10	2019
11	Ed	-0.8656	0.0967	3	35	126	30	2019.6
15	Energy consumption	-0.6664	0.3443	3	34	140	41	2020.9
16	Energy efficiency	0.2324	0.5314	3	38	112	29	2019.62
17	Energy policy	-0.283	0.8765	3	26	60	15	2018.33
18	Energy security	-0.1268	0.9712	3	30	86	22	2019.73
19	Energy supply	0.0613	0.9563	3	27	72	23	2019.87

ID	Label	x	y	Cluster	Weight			Score
					Links	TLS	Occur	Avg. Pub. Year
23	Es	-0.3051	0.0886	3	36	153	49	2020.43
27	Green economy	-0.849	0.7671	3	24	42	11	2019.82
39	Sd	-0.3368	0.3389	3	42	218	65	2019.11
3	Business	-0.7697	0.432	4	33	91	26	2019.85
5	Circular economy	-0.6878	-0.0773	4	34	92	29	2021.21
6	Clean energy	-0.0182	0.2173	4	27	38	10	2021
35	Res	-0.1653	0.7083	4	32	76	20	2020.25
36	Sdgs	-0.8548	-0.3122	4	28	49	10	2021.7
41	Trade	-0.4053	0.6419	4	27	50	14	2018.86
42	Waste	-0.4731	-0.1876	4	35	90	25	2019.28

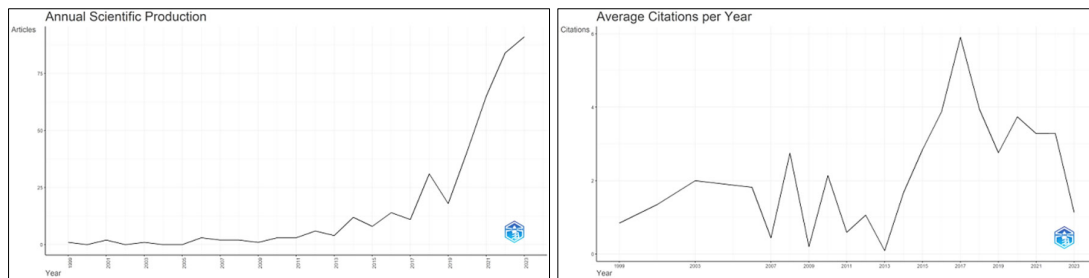
Keterangan: GHG=greenhouse gas emissions, SD=sustainable development, RES=renewable energi resources, ED=economic development, ES=environmental sustainability, SA=sustainability assessment, TLS= Total link strange, Occur=Occurrences.

Melalui konsep ini, pemetaan kluster pada tabel di atas mewakili keterkaitan yang ada antara jurnal yang menerbitkan artikel ilmiah antara tahun 1999 dan 2023 berdasarkan kata kunci utama kajian. Analisis ini menghasilkan empat kluster yang mewakili empat topik riset berbeda. Pengelompokan (*clustering*) tersebut membantu mengidentifikasi bidang yang paling relevan untuk dipelajari dan menyarankan indikator digital untuk mengukur sistem berkelanjutan. Selanjutnya, beberapa kata kunci yang dipindahkan untuk menyesuaikan dengan kluster yang lebih tepat. Sejumlah kata kunci ini yaitu *social indicator*, *economic growth*, *economic development*, *education* dan *investment* (dipindah ke *environmental economy*), dan *sustainable development* hanya ada di kluster 4.

3.2. Identifikasi *bibliometrix biblioshiny R packages*

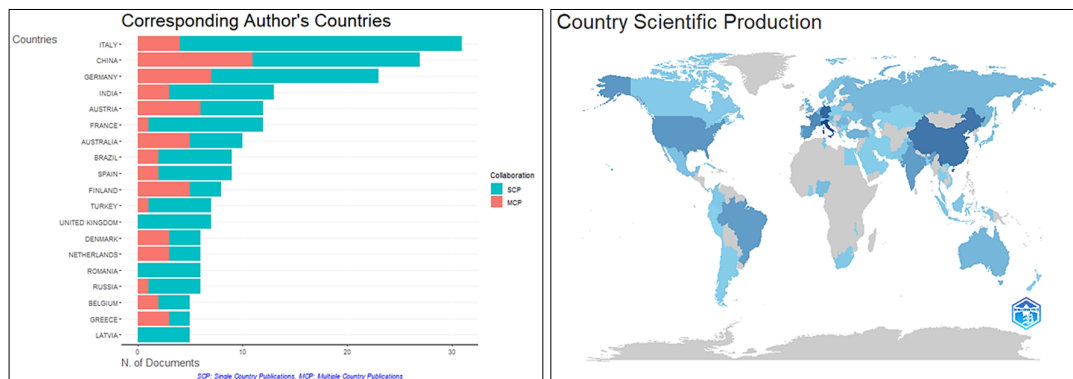
Pada awal penelitian diperlukan identifikasi *main information* yang dapat diklasifikasikan sebagai statistik deskriptif yang menggunakan data sebagai *main features of dataset* (Ahnert and Krebs 2021). Tabel di bawah memperlihatkan hasil dari *overview* kajian transisi energi berkelanjutan. Penelusuran melalui *Dimension* dengan menggunakan *keyword* pencarian yaitu “*sustainability of energy transition*”. Dari hasil pencarian total penelusuran yang didapatkan sejak tahun 1999-2023 sebanyak 403 dokumen. *Authors* sebanyak 1345, *author’s keywords* (DE) sebanyak 73, *sources* sebanyak 236, *authors of single-authored docs* sebanyak 41, *documents* yang dianalisis di *biblioshiny* sebanyak 403, *international co-authorship* sebanyak 18,61% dan *average citations per document* yaitu 11,68.

Annual scientific production merupakan fitur yang terdapat pada *biblioshiny* yang digunakan untuk memetakan perkembangan dari *annual scientific production* setiap tahun (Dervis 2019; Perea et al. 2020). *Annual scientific production* dapat digunakan untuk melihat kapasitas penelitian dalam suatu topic riset tertentu dalam total produksi tahunan (Agbo et al. 2021; Lithin et al. 2021). Hasil pengolahan untuk *annual scientific production* dan *average citations per year* disajikan pada **Gambar 4**.



Gambar 4. *Annual scientific production* (kiri) dan *average citations per year* (kanan).

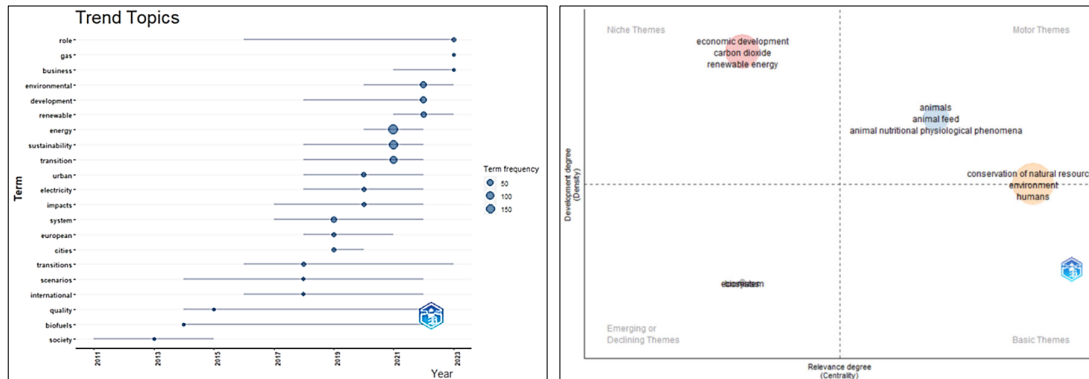
Hasil *annual scientific production* memperlihatkan bahwa penelitian dengan topik transisi energi berkelanjutan sudah mulai banyak diterbitkan sejak tahun 2019, yang terus naik tajam hingga 2023. Di sisi lain, pada hasil *average citations per year* intensitas tertinggi terjadi pada tahun 2017. Hal ini menandakan bahwa penelitian transisi energi berkelanjutan mulai banyak dilakukan pada beberapa tahun terakhir.



Gambar 5. *Corresponding author's countries* (kiri) dan *countries scientific production* (kanan).

Gambar 5 memberikan gambaran tentang *corresponding author's countries* dan *countries scientific production*. Italia, Tiongkok dan Jerman merupakan tiga negara asal penulis terbanyak yang membahas mengenai transisi energi berkelanjutan. Bila kita melihat secara keseluruhan, peneliti yang berfokus pada transisi energi berkelanjutan dominan berada di wilayah Eropa, Amerika Utara dan sebagian negara-negara Asia dan Amerika Selatan. Bila ditinjau menurut periode waktu peningkatan signifikan

penelitian diawali sejak tahun 2013 dengan data terkini sampai 2023 terjadi kenaikan dengan titik awal kenaikan pada tahun 2021. Bila tinjau dari *trend topics* (pada **Gambar 6** bagian kiri) didapatkan *energy*, *transition* dan *sustainability* mulai konsep diangkat pada periode tahun 2018-2022 dengan *term frequency* antara 100-150.



Gambar 6. *Trend topics* (kiri) dan *thematic map* (kanan).

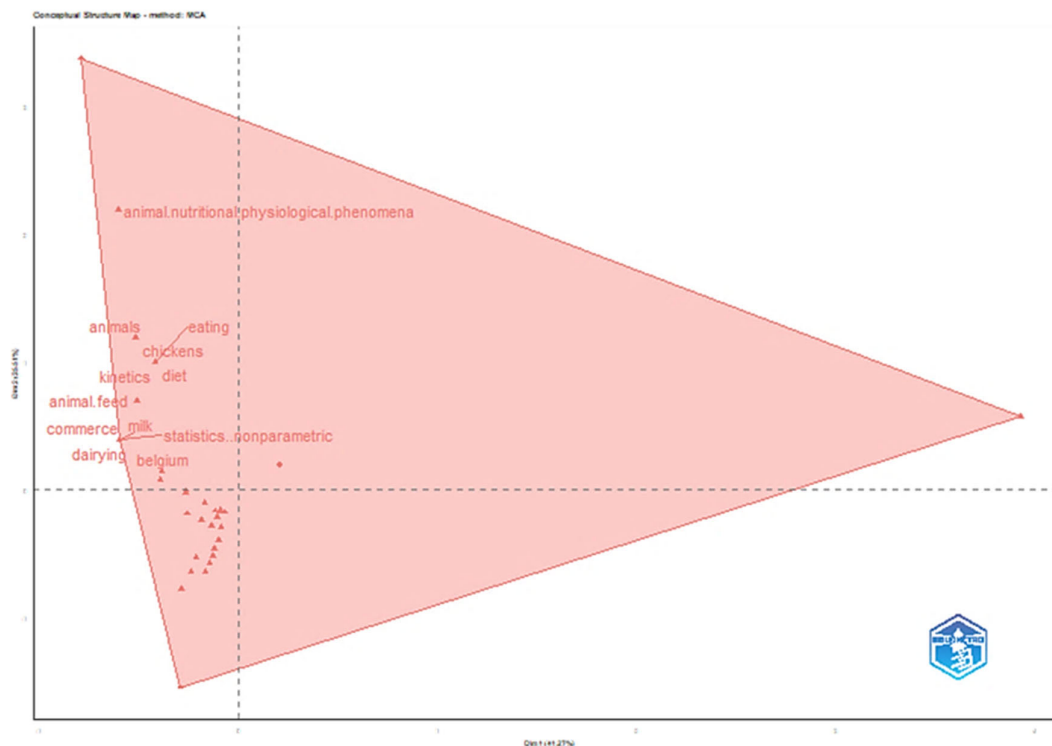
Pada **Gambar 6** bagian kanan ditampilkan hasil *thematic map* yang terdiri dari setiap kluster dibagi dalam empat tema (*themes*) yaitu *motor*, *basic*, *niche* dan *emerging or declining themes* (Espina-Romero et al. 2022)². Kluster satu (*economic development*) dikategorikan sebagai *niche themes*, kluster dua (*animals*) dikategorikan *motor themes*, kluster lima (*conservation of natural resources*) beririsan antara *motor themes* dan *basic themes* sedangkan kluster tiga (*ecosystem*) dan empat (*biomass*) masuk *emerging or declining themes*. Dari hasil ini diambil hanya *niche*, *motor* dan *basic themes* (dari **Gambar 6** bagian kanan) untuk lebih jelas ditampilkan pada **Tabel 3**.

Analisis faktorial yang diperlihatkan pada **Gambar 7** digunakan untuk menginvestigasi sejumlah perbedaan pada kluster riset atau topik riset di luar kluster yang sudah mulai diamati (Radanliev and De Roure 2021). Meskipun tidak ada hubungan yang jelas antara topik yang diteliti dalam penelitian ini, namun dapat terlihat kata kunci turunan dari *conservation of natural resources*, *environment*, *humans*, dan *animals*, Hal ini mengartikan bahwa meskipun saat ini belum ada penelitian terkait, namun komunitas riset secara aktif memantaunya. Pada segitiga merah (**Gambar 7**) ditemukan titik-titik kata kunci yang berdekatan yang menandakan bahwa kata kunci tersebut sering muncul bersamaan dalam koleksi literatur dan sering diamati oleh peneliti dalam kurun waktu penelitian 1999-2023.

²*Basic themes* (masalah yang disebabkan oleh situasi kritis yang mempengaruhi masyarakat kita), *motor themes* (tema utama dari bagian terdepan penelitian), *niche themes* (beberapa topik yang dieksplorasi yang harus dipelajari lebih mendalam), *emerging* (tema yang menurun)

Tabel 3. Hasil klusterisasi *thematic map* dari *bibliometrix biblioshiny R packages*.

Cluster Label	No.	Words	Cluster	Btw centrality	Clos centrality	Pagerank centrality
Economic development (niche themes)	1	Economic development	1	127.12	0.01	0.03
	2	Carbon dioxide	1	37.63	0.01	0.02
	3	Renewable energy	1	37.63	0.01	0.02
	4	Cross-sectional studies	1	8.38	0.01	0.02
	5	inventions	1	8.38	0.01	0.02
Animals (motor themes)	6	animals	2	560.38	0.01	0.04
	7	animal feed	2	106.20	0.01	0.02
	8	animal nutritional physiological phenomena	2	24.69	0.01	0.02
	9	ecosystem	3	35.69	0.01	0.02
Biomass (emerging)	10	biomass	4	37.09	0.01	0.01
Conservation of natural resources (motor/basic themes)	11	conservation of natural resources	5	374.27	0.01	0.04
	12	environment	5	224.90	0.01	0.04
	13	humans	5	906.20	0.01	0.04
	14	conservation of energy resources	5	330.72	0.01	0.02
	15	organic agriculture	5	93.61	0.01	0.02

**Gambar 7.** Factorial analysis untuk identifikasi struktur hubungan kata kunci dalam kluster.

3.3. Identifikasi verifikasi konsep berdasarkan *systematic literature review*

Hasil penelusuran komponen dan indikator melalui *systematic literature review* didapatkan setidaknya 23 artikel ilmiah yang sesuai dengan persyaratan dan setidaknya 12 artikel ilmiah yang memiliki konsentrasi pengukuran dan pengolahan ukuran yang sesuai dengan transisi energi berkelanjutan. Penelitian Nwanekezie *et al.* (2021) mengidentifikasi penilaian lingkungan strategis berbasis transisi yang membagi penilaian ke dalam empat poin yaitu lingkungan kelembagaan, konteks politik, konteks kebijakan dan regulasi, dan hubungan aktor dan pemangku kepentingan. Penelitian yang dilakukan oleh Praene *et al.* (2018) melakukan identifikasi mengenai transisi berkelanjutan pada kawasan pemerintahan kepulauan melalui pengamatan pada komponen *Geography*, *Socio-economy* dan *Energy*. Adapun hasil penelusuran SLR dalam 12 artikel ilmiah ditampilkan pada **Tabel 4**.

Penelitian Jiang *et al.* (2009) dan Karami and Madlener (2023) memfokuskan transisi energi dan faktor keberlanjutan perkotaan, Tariq and Hassan (2023) berusaha meneliti sejumlah peran indikator transisi energi dari beberapa variabel, Radovanović *et al.* (2021) berfokus pada identifikasi variabel ekonomi, lingkungan dan perdagangan. Penelitian yang dilakukan oleh Schlör *et al.* (2018) berfokus pada mengelola ruang ketahanan sistem energi yang juga setelahnya terdapat kajian dari Zeraibi *et al.* (2021) yang mengukur *ecological footprint* dan *generation capacity* di ASEAN-5. Sejumlah kajian telah memfokuskan diri pada penyusunan *assessment* untuk tema-tema umum pada konsep transisi energi seperti kajian Yang *et al.* (2020), Shmelev and Shmeleva (2018), Praene *et al.* (2018), Ibrahim *et al.* (2023) dan Naegler *et al.* (2021).

3.4. Elaborasi luaran *VosViewer*, *biblioshiny* *bibliometrix* *packages* dan *systematic literatur review*

Memperhatikan hasil yang didapatkan dari *output vos viewer*, mendalami sebaran data *keywords* pada *biblioshiny Bibliometrix packages*, serta memverifikasi beberapa *keyword* melalui SLR, selanjutnya gabungan dari ini ditampilkan pada **Tabel 5** yang menjelaskan perbandingan dua sumber olahan yang mendeteksi komponen dan indikator dengan keduanya mempertimbangkan temuan dari SLR. Dari hasil ini ditemukan *short list* awal dalam menentukan perjalanan perkembangan konseptual transisi energi berkelanjutan yang telah berkembang dari tahun 1999 sampai 2023.

Tabel 4. Hasil penelusuran komponen dan indikator melalui *systematic literature review*.

No.	Penulis	Komponen	Indikator
1	Nwanekezie et al. (2021)	<i>Institutional Environment, Political Context, Policy and Regulation Context and Actor and Stakeholder Relation</i>	<i>Inovation, Political Environment, Macro Level Policy, PPPs, Supporting Policies, Actor Influence and Collaboration</i>
2	Praene et al. (2018)	<i>Geography, Socio-economy, and Energy</i>	<i>Isolation Index, Surface, HDI, Population, GDP, Urban Population, Electricity Consumption, Hidroelecrocity Consumption, Share of Renewable energy and Access to electricity (%)</i>
3	Naegler et al. (2021)	<i>Ecological, Socioeconomic, and Sociotechnical</i>	<i>Climate Change, Ecosystem Quality, Human Health, Resources and Employment</i>
4	Jiang et al.(2009)	<i>Economic Sustainability and Environmental Sustainability</i>	<i>Capital cost, OandM cost, TAEC Indicator, Ecological Footprints, Metabolism and Pulse</i>
5	Shmelev and Shmeleva (2018)	<i>Economic, Smart, Social and Environment</i>	<i>GRP, Incom, Inflation, Unemployment, Patents, Internet, Metro, Life, Education, Gini, CO2, Renewables, PM10, Water, Waster, Recycling</i>
6	Tariq and Hassan (2023)	<i>Green Finance Index, Environmental Quality, Renewable Energy, GDP, Environmental Regulations</i>	<i>Green Securitoes, Green Investment, Green Bonds, Carbon Finance, Co2 Emission, Percentage of total energy consumption, GDP per capita and Ratification of NDC Policy</i>
7	Radovanović et al. (2021)	-	<i>GDP per capita, Energy Intensity per unit of GDP, CO2 emissions per unit of GDP, Carbon Intensity of Industry, Coal Consumption per capita, CO2 Intensity of power index, Oil products in final consumption, Net energy imports and Renewable share in FEC</i>
8	Yang et al. (2020)	<i>Economy, Environment, Society and Respect in freedom and privacy</i>	<i>Sustainable and stable Economic Growth, Less inequality, Protection of natural environment, Better living environment, Safe and healthy life, Convenient and happy life, Human rights and Privacy preservation</i>
9	Schlör et al. (2018)	<i>Efficiency, Greenhouse gas emissions, Renewable Energy, Transport</i>	<i>Primary Energy Consumption, Resource Productivity, Air Quality, GHG, % Renewable energy in final energy consumption, % Renewable energy in electricity consumption, Goods transport intensity, Person transport intensity, Rail goods transport, Ship goods transport</i>
10	Zeraibi et al. (2021)	<i>Ecological Footprint, Economic Growth, Renewable Electricity Generation Capacity, Technological Innovation, Financial Development and Population Growth</i>	-
11	Canesi and Marella (2023)	<i>Social and Governance/Institutional, Economic, Environmental</i>	<i>a. Social values, Gender equality, Identities, Relationships and institutions, Health, education, Food, Water, Housing affordability, Social Cohesion, Inequalities and Justice, Welfare and Equity b. Human and social capital, intergenerational equity for resources, distributional equity, optimal growth, economic activity c. Climate change, natural resource management and treshold, resource and renewable energy consumption, infrasctructure and cities, biodiversity and ecosystem</i>
12	Karami and Madlener (2023)	<i>Energy and Environment, Quality of life, Local Economy and Digitalization</i>	<i>GHG Emission, Promotion of renewable energy sources, Economic and efficient use of energy sources, Ambient air quality improvement, Total phosphorus input in flowing waters, Reduction of noise pollution, New busines registration, Reduction in income inequality, access to public WIFI and Access to high-speed internet</i>

Tabel 5. Short list kerangka konseptual transisi energi berkelanjutan.

Sumber	No.	Komponen	Indikator
Klusterisasi VosViewer	1	Cluster 1 (environmental impact)	carbon emission, climate change, CO2 emission, ecological footprint, energy use, fossil fuel, global warming, greenhouse gas emission, natural resource, renewable energy
	2	Cluster 2 (natural resources)	biofuel, biomass, coal, electricity, energy system, energy transition, fuel, hydrogen, land, life cycle assessment, sustainability assessment, wind
	3	Cluster 3 (energy intensity)	energy consumption, energy efficiency, energy policy, energy security, energy supply, environmental sustainability, green economy
	4	Cluster 4 (environmental economy)	business, circular economy, clean energy, renewable energy source, sustainable development goal, trade, waste, investment, social indicator, economic growth, education, economic development
Klusterisasi Thematic Map	5	Economic Development	economic development, carbon dioxide, renewable energy, cross-sectional studies, inventions
	6	Animals	Animals, animal feed, animal nutritional physiological phenomena
	7	Conservation of Natural Resources	conservation of natural resources, environment, humans, conservation of energy resources, organic agriculture

4. KESIMPULAN

Melalui analisis bibliometrika maka didapatkan sejumlah hasil kata kunci yang dapat diidentifikasi sebagai komponen dan indikator. Pertama hasil dari *VosViewer* membagi topik ke dalam empat kluster dengan rangkuman klusterisasi yaitu berfokus pada *environmental impact*, *natural resources*, *energy intensity* dan *environmental economy*. Hasil yang dikeluarkan oleh *VosViewer* lebih cenderung mengelompokkan kata kunci kajian terhadap ruang lingkup energi dan lingkungan. Selanjutnya *thematic map* yang dikeluarkan dari *biblioshiny* mengelompokkan kata kunci terhadap lima kluster namun hanya tiga kluster yang diterima akibat dari dua kluster yang masuk *emerging themes*. Kluster dari *thematic map* berfokus pada sisi *economic development*, *conservation of natural resources* dan *animals*. Kedua, pengamatan deskriptif *biblioshiny* publikasi yang berhubungan dengan transisi energi berkelanjutan dominan terbit pada rentang waktu 2019-2023 dan kutipan atas topik ini telah naik sejak tahun 2017. Kata kunci paling banyak keluar pada kajian yaitu *conservation of natural resources*, *environment*, *humans*, dan *animals*. Namun bila ditinjau secara periode kata kunci yang meningkat penggunaannya yaitu *conservation of energy resources*, *environment* dan *humans* dengan *trend topic* sejak 2018-2023 berfokus pada tema *energy*, *transition* dan *sustainability* dengan *term frequency* antara 100-150. Kajian ini dapat dikembangkan di penelitian lanjutan berupa penyeleksian indikator yang dapat

dilanjutkan pada tahap yang lebih mendalam seperti melakukan pengaplikasian Delphi, wawancara mendalam atau sampai pada pemodelan dinamis. Selanjutnya bila akan diimplementasikan untuk studi kasus maka diperlukan penyetaraan dengan penentuan nilai ambang batas (*threshold*) untuk penyusunan indeksasi atau *assessment*.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Agbo FJ, Sanusi IT, Oyelere SS and Suhonen J. 2021. Application of virtual reality in computer science education: A systematic review based on bibliometric and content analysis methods. *Education Sciences* 11(3). <https://doi.org/10.3390/educsci1103f0142>
- Ahnert M and Krebs P. 2021. Growth of science in activated sludge modelling – A critical bibliometric review. *Water Science and Technology* 83(12):2841–2862. <https://doi.org/10.2166/wst.2021.191>
- Aria M and Cuccurullo C. 2017. Bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics* 11(4):959–975. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007>
- Canesi R and Marella G. 2023. Towards European transitions: Indicators for the development of marginal urban regions. *Land* 12(1). <https://doi.org/10.3390/land12010027>
- Carley S and Konisky DM. 2020. The justice and equity implications of the clean energy transition. *Nature Energy* 5(8):569–577. <https://doi.org/10.1038/s41560-020-0641-6>
- Cobo MJ, López-Herrera AG, Herrera-Viedma E and Herrera F. 2011. An approach for detecting, quantifying, and visualizing the evolution of a research field: A practical application to the Fuzzy Sets Theory field. *Journal of Informetrics* 5(1):146–166. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2010.10.002>
- Dervis H. 2019. Bibliometric analysis using Bibliometrix an R package. *Journal of Scientometric Research* 8(3):156–160. <https://doi.org/10.5530/JSCIRES.8.3.32>
- Drewello H. 2022. Towards a theory of local energy transition. *Sustainability* 14(18). <https://doi.org/10.3390/su141811119>
- Espina-Romero L, Guerrero-Alcedo J, Noroño Sánchez JG and Ochoa-Díaz A. 2022. What are the topics that business ecosystems navigate? Updating of scientific

- activity and future research agenda. *Sustainability* 14(23).
<https://doi.org/10.3390/su142316224>
- Firmansyah MF and Maulana HZ. 2021. Empirical study of e-learning on financial literacy and lifestyle: A millennial urban generations cased study. *International Journal of Engineering, Science and Information Technology* 1(3):75–81.
- Ghaleb H, Alhajlah HH, Abdullah AAB, Kassem MA and Al-Shrafi MA. 2022. A scientometric analysis and systematic literature review for construction project complexity. *Buildings* 12(4):1–20.
- Huang J-H, Duan X-Y, He F-F, Wang G-J and Hu X-Y. 2021. A historical review and bibliometric analysis of research on weak measurement research over the past decades based on Biblioshiny. *arXiv:2108.11375v1*:1–19.
- Ibrahim RL, Al-mulali U, Solarin SA, Ajide KB, Al-Faryan MAS and Mohammed A. 2023. Probing environmental sustainability pathways in G7 economies: The role of energy transition, technological innovation, and demographic mobility. *Environmental Science and Pollution Research* 30(30):75694–75719.
<https://doi.org/10.1007/s11356-023-27472-6>
- Ilham I, Ekowati D and Handriana T. 2021. A systematic literature review: The influence of information technology enabler and organizational learning on performance. *Library Philosophy and Practice* 2021.
- Jiang F, Shi F, Villarroel Walker R, Lin Z and Beck MB. 2009. Incremental infrastructure transitions towards cities as forces for good in the environment. *Conference Proceedings - IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics* October:1476–1482. <https://doi.org/10.1109/ICSMC.2009.5346301>
- Karami M and Madlener R. 2023. Sustainability performance of rural municipalities in Germany. *Energy, Sustainability and Society* 13.
<https://doi.org/10.1186/s13705-023-00425-0>
- Kiger ME and Varpio L. 2020. Thematic analysis of qualitative data: AMEE Guide No. 131. *Medical Teacher* 42(8):846–854.
<https://doi.org/10.1080/0142159X.2020.1755030>
- Lithin BM, Chakraborty S, Kumar Ghosh B and Shenoy UR. 2021. Overview of bond mutual funds: A systematic and bibliometric review. *Cogent Business and Management* 8(1). <https://doi.org/10.1080/23311975.2021.1979386>

- Makkizadeh F and Sa'adat F. 2017. Bibliometric and thematic analysis of articles in the field of infertility 2011–2015. *International Journal of Reproductive BioMedicine* 15(11):719–728. <https://doi.org/10.29252/ijrm.15.11.719>
- Martínez MA, Cobo MJ, Herrera M and Herrera-Viedma E. 2015. Analyzing the scientific evolution of social work using science mapping. *Research on Social Work Practice* 25(2):257–277. <https://doi.org/10.1177/1049731514522101>
- Muñoz-Leiva F, Viedma-del-Jesús MI, Sánchez-Fernández J and López-Herrera AG. 2012. An application of co-word analysis and bibliometric maps for detecting the most highlighting themes in the consumer behaviour research from a longitudinal perspective. *Quality and Quantity* 46(4):1077–1095. <https://doi.org/10.1007/s11135-011-9565-3>
- Naegler T, Becker L, Buchgeister J, Hauser W, Hottenroth H, Junne T, Lehr U, Scheel O, Schmidt-Scheele R, Simon S, Sutardio C, Tietze I, Ulrich P, Viere T and Weidlich A. 2021. Integrated multidimensional sustainability assessment of energy system transformation pathways. *Sustainability* 13(9):1–28. <https://doi.org/10.3390/su13095217>
- Nwanekezie K, Noble B and Poelzer G. 2021. Transitions-based strategic environmental assessment. *Environmental Impact Assessment Review* 91:106643. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2021.106643>
- Panchal R, Singh A and Diwan H. 2021. Does circular economy performance lead to sustainable development? A systematic literature review. *Journal of Environmental Management* 293:112811. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112811>
- Perea LN, Gaviria D and Redondo MI. 2020. Bioeconomy: Bibliometric analysis from 2006 to 2019. *Revista Espacios* 41(45):10–28. <https://doi.org/10.48082/espacios-a20v41n43p02>
- Praene JP, Payet M and Bénard-Sora F. 2018. Sustainable transition in small island developing states: Assessing the current situation. *Utilities Policy* 54:86–91. <https://doi.org/10.1016/j.jup.2018.08.006>
- Radanliev P and De Roure D. 2021. Epistemological and bibliometric analysis of ethics and shared responsibility—health policy and IoT systems. *Sustainability* 13(15). <https://doi.org/10.3390/su13158355>

- Radovanović M, Filipović S and Andrejević Panić A. 2021. Sustainable energy transition in Central Asia: Status and challenges. *Energy, Sustainability and Society* 11:49. <https://doi.org/10.1186/s13705-021-00324-2>
- Rosado CAG and De Souza MC. 2021. A bibliometric study on the use of games in the production engineering area. *Gestão and Produção* 28(3):1–21. <https://doi.org/10.1590/1806-9649-2021V28E5171>
- Schlör H, Venghaus S and Hake JF. 2018. The FEW-Nexus city index—Measuring urban resilience. *Applied Energy* 210:382–392. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.02.026>
- Selvakkumaran S and Ahlgren EO. 2020. Impacts of social innovation on local energy transitions: Diffusion of solar PV and alternative fuel vehicles in Sweden. *Global Transitions* 2:98–115. <https://doi.org/10.1016/j.glt.2020.06.004>
- Shmelev SE and Shmeleva IA. 2018. Global urban sustainability assessment: A multidimensional approach. *Sustainable Development* 26(6):904–920. <https://doi.org/10.1002/sd.1887>
- Solomon BD and Krishna K. 2011. The coming sustainable energy transition: History, strategies, and outlook. *Energy Policy* 39(11):7422–7431. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.09.009>
- Spangenberg JH. 2002. Environmental space and the prism of sustainability: Frameworks for indicators measuring sustainable development. *Ecological Indicators* 2(3):295–309. [https://doi.org/10.1016/S1470-160X\(02\)00065-1](https://doi.org/10.1016/S1470-160X(02)00065-1)
- Taqi M, Rusydiana AS, Kustiningsih N and Firmansyah I. 2021. Environmental accounting: A scientometric using biblioshiny. *International Journal of Energy Economics and Policy* 11(3):369–380. <https://doi.org/10.32479/ijeep.10986>
- Tariq A and Hassan A. 2023. Role of green finance, environmental regulations, and economic development in the transition towards sustainable environment. *Journal of Cleaner Production* 413:137425. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137425>
- Yang J, Liu H, Wang Y, Qiu Z, Dong Z, Suzuki T, Noguchi T and Watabe M. 2020. Key index framework for quantitative sustainability assessment of energy infrastructures in a smart city: An example of Western Sydney. *Energy Conversion and Economics* 1(3):221–237. <https://doi.org/10.1049/enc2.12017>

- Yu J and Muñoz-Justicia J. 2020. A bibliometric overview of Twitter-related studies indexed in Web of Science. *Future Internet* 12(5).
<https://doi.org/10.3390/FI12050091>
- Zeraibi A, Balsalobre-Lorente D and Murshed M. 2021. The influences of renewable electricity generation, technological innovation, financial development, and economic growth on ecological footprints in ASEAN-5 countries. *Environmental Science and Pollution Research* 28(37):51003–51021.
<https://doi.org/10.1007/s11356-021-14301-x>

Profil pencemaran air tanah sekitar tempat pemrosesan akhir sampah di Kabupaten Bekasi

The profile of groundwater pollution around landfill in Bekasi Regency

Harry Alfiansyah^{1*}, Rachmadhi Purwana¹, Haruki Agustina¹

¹Sekolah Ilmu Lingkungan, Universitas Indonesia, Jakarta, Indonesia

Abstrak.

Pencemaran air tanah yang terjadi di sekitar aktivitas TPA sampah merupakan dampak dari adanya operasional TPA sampah, terlebih lagi jika masih menggunakan metode *open dumping* maka potensi infiltrasi lindi akan masuk ke dalam tanah dan mencemari air tanah. Selain tinggi akan pencemar organik, air lindi juga mengandung logam berat. Hal ini dapat terjadi karena terdapat berbagai macam sampah yang ditimbun. Tujuan dari penelitian ini adalah meninjau profil pencemaran air tanah berdasarkan parameter pencemar logam berat pada 8 titik pengambilan sampel di wilayah Desa Burangkeng, Kabupaten Bekasi. Adapun logam berat yang dianalisis adalah besi (Fe), mangan (Mn), kromium (Cr), dan kadmium (Cd). Hasil analisis menunjukkan terdapat kandungan logam berat Fe, Mn, dan Cr pada semua lokasi, namun didapatkan juga hasil tidak terdeteksi pada logam berat Fe, Cr, dan seluruh lokasi menunjukkan logam Cd di bawah limit deteksi. Hasil analisis pada beberapa lokasi juga didapatkan melebihi baku mutu yang berlaku, yaitu Peraturan Menteri Kesehatan No. 2 Tahun 2023. Oleh karena itu, perlu dilakukan strategi untuk mengurangi dampak yang terjadi, yaitu dengan melakukan pengolahan air sederhana skala rumah dan pemanfaatan penyediaan air bersih komunal.

Kata kunci: air tanah, logam berat, pencemaran

Abstract.

Groundwater pollution that occurs around waste landfill activities is the impact of the operation of a waste landfill, especially if the open dumping method is still used, there is potential for leachate infiltration to enter the soil and pollute groundwater. Apart from being high in organic pollutants, leachate also contains heavy metals. This can happen because there are various kinds of waste that are piled up. The aim of this research is to review the groundwater pollution profile based on heavy metal pollution parameters at 8 sampling points in the Burangkeng Village area. The heavy metals analyzed were Iron (Fe), manganese (Mn), Chromium (Cr), and Cadmium (Cd). The heavy metals Fe, Mn, and Cr were found at all locations, but the results also showed that the heavy metals Fe and Cr were not detected, and all locations showed that Cd metal was below the detection limit. The analysis results at several locations were also found to exceed the applicable quality standards, namely Minister of Health Regulation No. 2 of 2023. Therefore, strategies to mitigate these impacts on groundwater are necessary, including household-scale water treatment and the utilization of communal clean water supplies.

Keywords: groundwater, heavy metals, pollution

1. PENDAHULUAN

Peningkatan jumlah penduduk mencirikan adanya pengaruh aktivitas manusia dan indikasi atas keberhasilan sistem utama kehidupan dari sisi ekonomi maupun sosial. Di samping itu, terdapat penggunaan sumber daya yang justru menimbulkan permasalahan baru, salah satunya keberadaan limbah (Wijaya and Soedjono 2018; Miller and Spoolman 2018). Pola ini menjadi pengaruh utama peningkatan produksi sampah yang menjadi masalah besar di perkotaan. Bank Dunia melaporkan bahwa 40-70% sampah perkotaan tidak tertangani pada beberapa tempat, sehingga berakhir dengan penumpukan pada lahan terbuka atau pembakaran (Agustina *et al.* 2021).

* Korespondensi Penulis
Email : hryalfh@gmail.com

Kabupaten Bekasi memiliki lebih dari 3,5 juta jiwa penduduk dan terdapat sekitar kurang lebih 11 kawasan industri besar serta tempat berdirinya 7.339 perusahaan. Sampai akhir 2021, estimasi timbulan sampah yang dihasilkan mencapai 6.750 m³/hari dengan kemampuan pengelolaan Pemda Bekasi baru mencapai 940 m³/hari saja yang selanjutnya diangkut ke TPA Burangkeng di Kecamatan Setu, sehingga masih terdapat sekitar 5.810 m³ atau 86% sampah yang belum terkelola. Timbulan sampah ini bersumber dari berbagai kegiatan domestik, seperti kegiatan rumah tangga, institusi, jalan, pasar, area komersial, area publik, dan industri. Menurut data dari Pemerintah Kabupaten Bekasi Tahun 2021, komposisi sampah padat di Kabupaten Bekasi didominasi oleh sampah organik, yaitu sebesar 67% seperti sisa makanan, dedaunan dan sejenisnya. Sedangkan sampah anorganik terdiri dari 11% plastik, 13% kertas dan sisanya berupa logam, kayu, karet, kaca dan sejenisnya.

Sampah dari aktivitas domestik perkotaan yang ditimbun di tempat pemrosesan akhir (TPA) menjadi salah satu potensi terjadinya pencemaran terhadap lingkungan baik pencemaran air permukaan dan air tanah karena adanya lindi yang merupakan suatu permasalahan yang signifikan (Walid *et al.* 2020). Lindi atau *leachate* yang berasal dari kegiatan TPA sampah ini mengandung cemaran organik, anorganik, logam berat, dan bakteri yang akan masuk ke dalam tanah dan mencemari air tanah (Ningsih 2020). Kondisi ini menjadi penting karena sekitar sepertiga populasi dunia atau 2,2 miliar jiwa (31,5%) bergantung pada air tanah untuk memenuhi kebutuhan sehari-hari (Murphy *et al.* 2017; Emenike *et al.* 2018; Bodrud-Doza *et al.* 2019).

Pengelolaan sampah yang kurang optimal merupakan salah satu faktor yang berkontribusi terhadap kontaminasi air tanah (Essien *et al.* 2019). Kompleksitas tersebut tentu akan menyebabkan berbagai dampak bagi manusia yang menggunakan air tanah untuk menunjang kebutuhan sehari-harinya, terutama bagi penduduk yang tinggal di sekitar tempat pembuangan sampah. Hal ini juga dipicu dari proses pengelolaan tempat pembuangan akhir sampah yang digunakan pada umumnya di Indonesia masih berupa metode *landfilling* yang dilaksanakan secara *open-dumping* sehingga menimbulkan lindi yang berpotensi menuju sumber air dan mencemarinya. Kualitas dan debit lindi yang dihasilkan bergantung dari kondisi iklim dan karakter timbunan sampah yang berasal dari aktivitas antropogenik manusia (Aljaradin 2012; Purba dan Kamil 2015).

Penelitian dilakukan di Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) Sampah Kabupaten Bekasi yang berada di Desa Burangkeng, Kecamatan Setu. Pemilihan lokasi didasari pada metode pengelolaan sampah yang dilakukan masih menggunakan metode *Open Dumping* sehingga tidak ada *layer* atau rekayasa teknis antara timbunan sampah dengan permukaan tanah, sehingga berpotensi menyebabkan infiltrasi lindi ke dalam air tanah. Parameter logam berat dipilih sebagai objek penelitian karena memiliki dampak yang bervariasi untuk lingkungan maupun manusia.

2. METODOLOGI

2.1. Lokasi kajian dan waktu penelitian

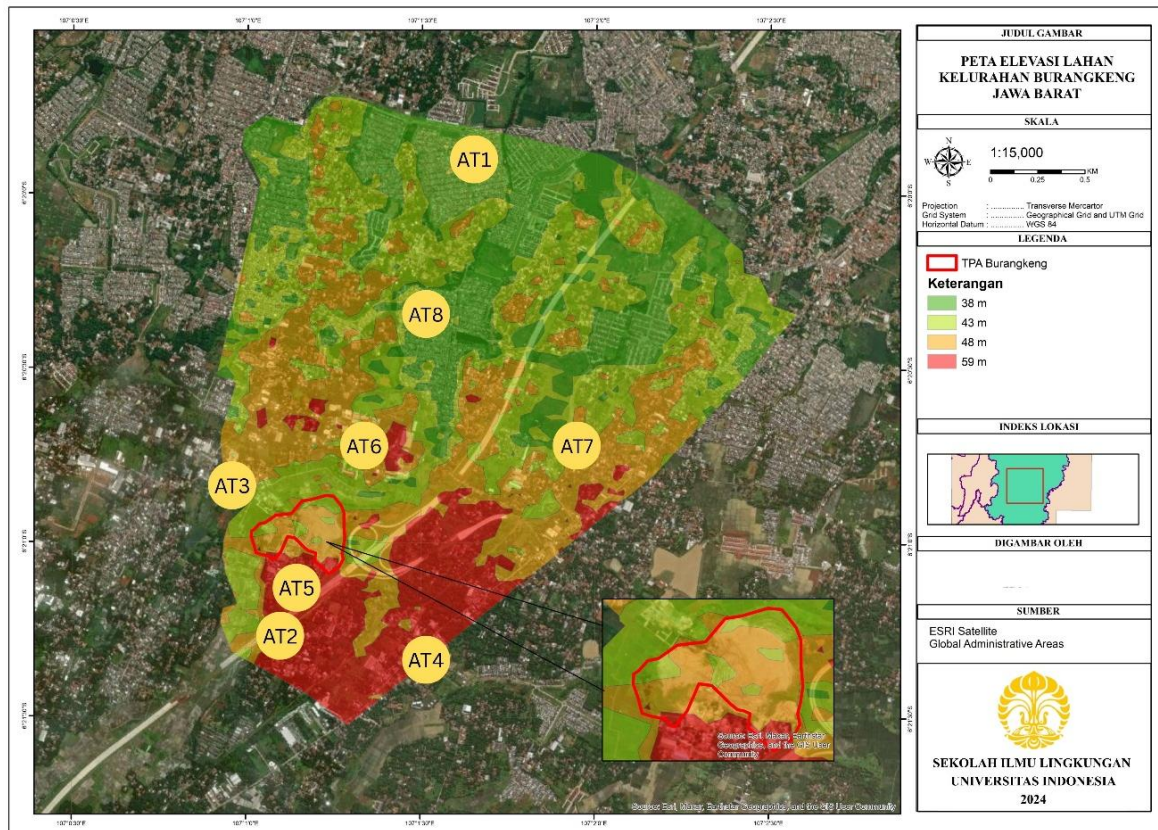
Pengambilan sampel air tanah dilakukan pada beberapa titik yang tersebar di Desa Burangkeng, Kecamatan Setu, Kabupaten Bekasi. Adapun waktu penelitian dilakukan selama Mei-Oktober 2024.

2.2. Metode pengambilan data

Sampel air tanah diambil satu kali menggunakan metode *grab sampling* dengan volume 300 mL dari rumah penduduk Desa Burangkeng yang menggunakan sumur bor atau sumur gali. Sampel dimasukkan ke dalam botol sampel dan diawetkan dengan penambahan 1 mL H_2SO_4 pekat. Pengambilan sampel dilakukan secara *random sampling* dengan mempertimbangkan ketinggian lahan dan jarak lokasi terhadap titik tengah TPA (**Tabel 1** dan **Gambar 1**). Selanjutnya, sampel dianalisis menggunakan metode analisis air bersih dengan instrumen *Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometry* (ICP-OES) di laboratorium swasta yang terakreditasi KAN (Komite Akreditasi Nasional).

Tabel 1. Titik lokasi pengambilan sampel air tanah.

Kode	Titik Koordinat	Keterangan
AT1	6°19'52.81"S; 107°1'36.88"E	2,20 km utara; titik terjauh; elevasi 38 m
AT2	6°21'10.03"S; 107°1'6.02"E	0,37 km selatan; titik <i>upstream</i> ; elevasi 59 m
AT3	6°20'54.63"S; 107°1'58.31"E	1,44 km timur laut; elevasi 48 m
AT4	6°21'15.66"S; 107°1'32.65"E	0,80 km timur; titik <i>upstream</i> ; elevasi 59 m
AT5	6°21'7.89"S; 107°1'7.87"E	0,28 km selatan; titik <i>upstream</i> ; elevasi 59 m
AT6	6°20'43.96"S; 107°1'17.55"E	0,53 km utara; titik <i>downstream</i> ; elevasi 43 m
AT7	6°20'50.10"S; 107°1'1.00"E	0,43 km barat; elevasi 48 m
AT8	6°20'17.43"S; 107°1'26.58"E	1,40 km utara; titik <i>downstream</i> ; elevasi 38 m



Gambar 1. Lokasi pengambilan sampel.

2.3. Metode pengolahan data

Data hasil pengujian laboratorium ditabulasikan dalam bentuk tabel dan diagram batang. Selanjutnya, hasil analisis dilakukan analisis komparasi dengan peraturan yang berlaku, yaitu Peraturan Menteri Kesehatan Nomor 2 Tahun 2023, diprasyaratkan bahwa air yang digunakan untuk keperluan higiene dan sanitasi bagi perorangan/rumah tangga yang mengakses secara mandiri untuk keperluan sehari-hari. **Tabel 2** disajikan terkait parameter dan nilai ambang batas dari peraturan yang digunakan pada penelitian ini.

Tabel 2. Parameter dan baku mutu yang digunakan.

Parameter	Nilai Baku Mutu	Satuan
Besi (Fe)	0,2	mg/L
Mangan (Mn)	0,1	mg/L
Kromium (Cr)	0,01	mg/L
Kadmium (Cd)	-	mg/L

Sumber : Permenkes No. 2 Tahun 2023

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Karakteristik lokasi penelitian

Penelitian ini dilakukan di Desa Burangkeng yang merupakan salah satu wilayah administratif dalam skala desa/kelurahan di Kecamatan Setu, Kabupaten Bekasi, Provinsi Jawa Barat yang memiliki luas keseluruhan sebesar 603 Hektar dengan persentase terhadap luas Kecamatan Setu adalah 11%. Secara administratif, Desa Burangkeng terbagi menjadi 3 dusun, diantaranya Dusun I Cinyosog Barat, Dusun II Cinyosog Timur, dan Dusun III Burangkeng. Desa Burangkeng menjadi satu-satunya wilayah di Kabupaten Bekasi yang terdapat tempat pembuangan akhir sampah regional di wilayah Kabupaten Bekasi sejak tahun 1994 yang terletak di sisi sebelah selatan dari wilayah desa.

TPA sampah regional Kabupaten Bekasi didirikan pada 1 Juni 1994 oleh Pemerintah Kabupaten Bekasi yang menjadi satu-satunya fasilitas tempat pengelolaan akhir sampah untuk wilayah Kabupaten Bekasi. Secara administratif, lokasi TPA sampah ini masuk ke dalam wilayah Dusun II Cinyosog Timur, Desa Burangkeng, Kecamatan Setu, Kabupaten Bekasi. Berdasarkan Peraturan Daerah Kabupaten Bekasi Nomor 12 Tahun 2011 tentang Rencana Tata Ruang Wilayah Kabupaten Bekasi Tahun 2011-2013, sejak awal didirikan luas areanya adalah 11,6 Ha yang terdiri dari 4 zona.

Sejak awal didirikan hingga saat ini, sistem pengelolaan yang diterapkan masih menggunakan sistem *open dumping* tanpa ada perlakuan apa pun, hanya terjadi proses pengangkutan dan penimbunan. Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 18 Tahun 2008 Tentang Pengelolaan Sampah Pasal 44 telah mewajibkan setiap pemerintah daerah untuk menutup TPA sampah dengan sistem *open dumping* paling lambat pada Tahun 2013 atau lima tahun semenjak peraturan diterbitkan. Selain itu, pengelolaan sampah di TPA Sampah Regional Kabupaten Bekasi secara teoritis dan praktis tidak layak dilanjutkan operasionalnya sehingga memberikan dampak negatif bagi lingkungan sekitar, diantaranya adalah pencemaran air tanah, limpasan air lindi ke pemukiman sekitar, dan pencemaran udara akibat produksi gas metana yang berlebihan.

3.2. Profil pencemar pada air tanah

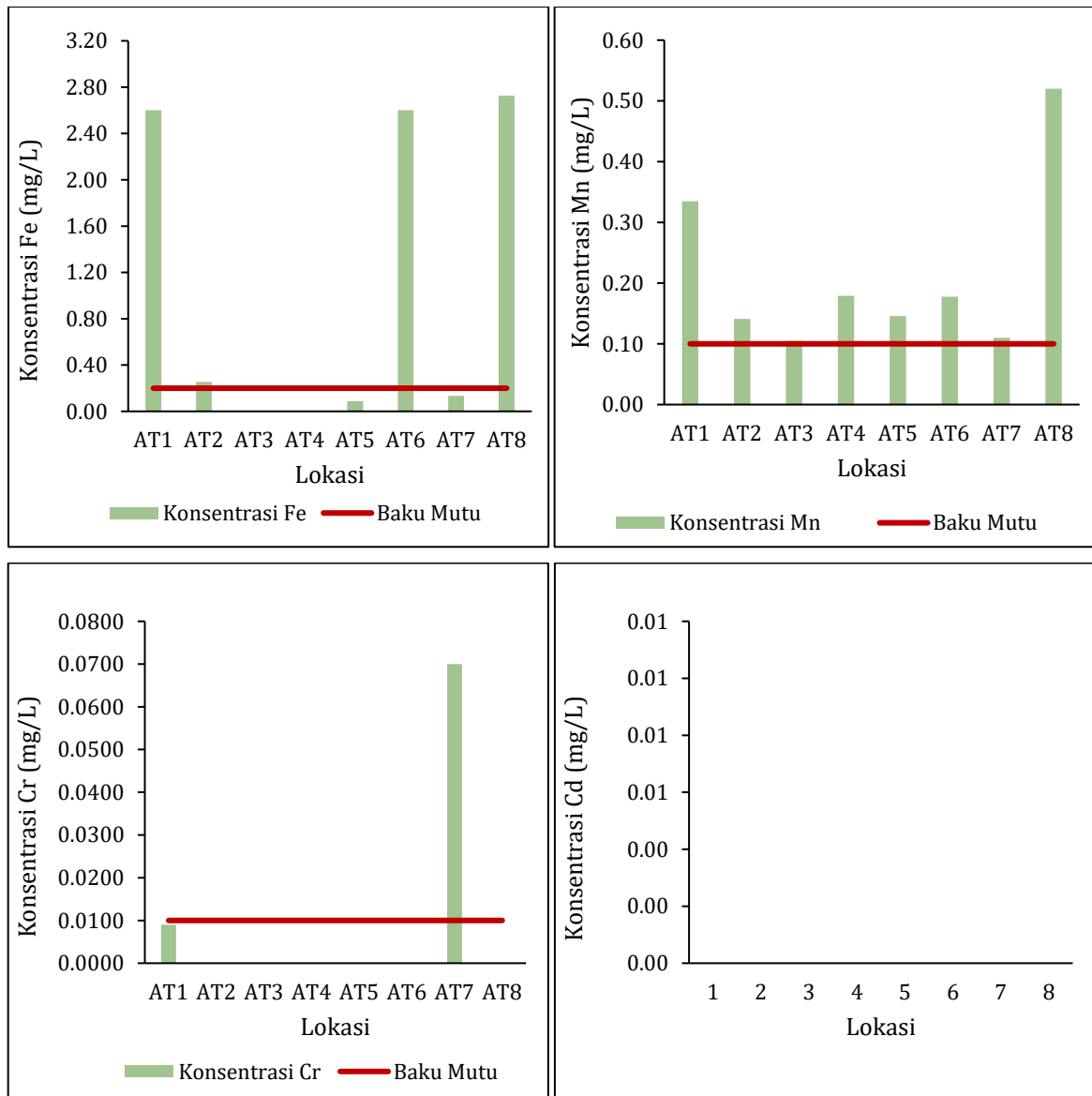
Pengujian kualitas air tanah dilakukan melalui analisis laboratorium terhadap parameter logam berat, yaitu besi (Fe), mangan (Mn), kadmium (Cd), dan kromium (Cr). Sampel air tanah diambil pada delapan titik dengan mempertimbangkan kemiringan lahan dan pemanfaatan air tanah untuk kebutuhan sehari-hari. Hasil analisis dibandingkan dengan baku mutu berdasarkan Permenkes Nomor 2 Tahun 2023. Hasil analisis menunjukkan adanya parameter pencemar pada seluruh titik pengambilan sampel, meskipun sebagian parameter terdeteksi pada konsentrasi di bawah batas deteksi instrumen (*not detected*/ND), yaitu 0,01 mg/L. Limit deteksi menunjukkan kadar analit berada di bawah kemampuan deteksi instrumen ICP-OES (Harmono 2020). Pada penelitian ini, nilai ND ditemukan pada parameter Fe dan Cr, sedangkan Cd tidak terdeteksi pada seluruh titik sampling (**Tabel 3**).

Tabel 3. Hasil pengujian laboratorium air tanah.

No.	Kode sampel	Titik koordinat	Hasil pengujian (mg/L)			
			Fe	Mn	Cr	Cd
1	AT1	6°19'52.81"S; 107° 1'36.88"E	2.60	0.33	0.01	ND
2	AT2	6°21'10.03"S; 107° 1'6.02"E	0.25	0.14	ND	ND
3	AT3	6°20'54.63"S; 107° 1'58.31"E	ND	0.11	ND	ND
4	AT4	6°21'15.66"S; 107° 1'32.65"E	ND	0.18	ND	ND
5	AT5	6°21'7.89"S; 107° 1'7.87"E	0.09	0.15	ND	ND
6	AT6	6°20'43.96"S; 107° 1'17.55"E	2.60	0.18	ND	ND
7	AT7	6°20'50.10"S; 107° 1'1.00"E	0.13	0.11	0.07	ND
8	AT8	6°20'17.43"S; 107° 1'26.58"E	2.73	0.52	ND	ND

Sumber : Hasil pengujian laboratorium (2024)

Berdasarkan hasil pengujian, konsentrasi Fe melebihi baku mutu pada tiga titik, yaitu AT1 dan AT8 di sebelah utara TPA serta AT2 di sebelah selatan TPA (**Gambar 2**). Konsentrasi Fe tertinggi ditemukan pada AT8 yang berjarak 1,40 km di sebelah utara TPA. Sementara itu, sampel dari wilayah timur, timur laut, dan barat TPA Burangkeng menunjukkan nilai Fe pada kategori ND, yang mengindikasikan konsentrasi berada di bawah batas deteksi instrumen. Konsentrasi Fe di atas 1 mg/L dapat menyebabkan air berbau, memiliki sedikit rasa, berwarna kekuningan, serta meninggalkan noda pada pakaian (Febrina dan Ayuna 2015; Supriyantini dan Endrawati 2015). Besi sebagai logam esensial tetap dibutuhkan manusia untuk mencegah anemia dengan jumlah konsumsi kurang dari 100 mg/hari (Ika dan Irwan 2012; Nurhidayah *et al.* 2018).



Gambar 2. Hasil pengujian laboratorium air tanah.

Pada pengujian laboratorium, seluruh sampel air tanah menunjukkan konsentrasi mangan (Mn) melebihi baku mutu Permenkes Nomor 2 Tahun 2023 sebesar 0,1 mg/L. Kondisi serupa ditemukan oleh Chakraborty and Kumar (2016) pada air tanah sekitar 1,5 km dari TPA di Ranchi, Jharkhand, India, dengan konsentrasi Mn sebesar 0,14 mg/L yang melebihi baku mutu setempat, sebesar 0,1 mg/L. Kondisi tersebut diduga berkaitan dengan migrasi lindi secara vertikal dan horizontal yang menyebabkan kontaminasi air tanah. Konsentrasi Mn tertinggi ditemukan pada sampel AT8 di sebelah utara TPA, diikuti oleh titik AT1.

Pola persebaran konsentrasi logam Mn cenderung meningkat ke arah utara, terutama pada wilayah dengan elevasi lahan yang lebih rendah. Logam Mn ditemukan secara alami pada batuan, tanah, dan sumber air bawah tanah (Royani *et al.* 2017). Apabila air dengan konsentrasi Fe dan Mn yang terlalu tinggi dikonsumsi oleh manusia, maka akan menyebabkan beberapa gangguan kesehatan seperti keracunan kronis, bronkitis, sampai kerusakan saraf (Zhang *et al.* 2020).

Kromium (Cr) terdeteksi pada dua lokasi, yaitu wilayah barat dan utara TPA Burangkeng. Konsentrasi tertinggi terdapat pada sampel AT7 di sebelah barat TPA dan sampel AT1 di sebelah utara TPA melebihi baku mutu Permenkes No. 2 Tahun 2023, sehingga wilayah tersebut perlu mendapat perhatian. Sementara itu, sampel AT2, AT3, AT4, AT5, AT6, dan AT8 menunjukkan hasil *Not Detected* (ND), yang mengindikasikan konsentrasi Cr berada di bawah batas deteksi instrumen. Paparan krom dalam jangka pendek melalui kontak dengan kulit dapat menyebabkan iritasi, sedangkan paparan krom melalui oral dengan tertelannya makanan atau minuman yang telah terkontaminasi akan menyebabkan sakit perut dan muntah (Palar 2012). Paparan krom dalam jangka panjang dan terus-menerus, meskipun dalam konsentrasi yang rendah, krom dapat menyebabkan kerusakan kulit, pernapasan, sistem kekebalan tubuh, dan dapat menyebabkan kanker (Wise *et al.* 2016; Yang *et al.* 2021).

3.3. Pengendalian dampak pencemaran air tanah

Pola penggunaan air tanah dalam menunjang kehidupan sehari-hari bagi penduduk di sekitar TPA sampah akan menyebabkan berbagai dampak yang ditimbulkan, sehingga diperlukan bentuk strategi pengendalian dampak untuk meminimalisir dampak yang terjadi. Pengelolaan terhadap kualitas air termasuk air tanah perlu dilakukan untuk memastikan bahwa bentuk-bentuk penyebab terjadinya pencemaran air dapat dikendalikan dan dikurangi. Adapun salah satu bentuk strategi terhadap pengelolaan air tanah adalah dengan melakukan pengelolaan kualitas dan pengendalian pencemaran air tanah sehingga tetap dalam kondisi alamiahnya, melakukan pembatasan penyadapan air tanah pada daerah yang sudah rawan dan kritis sampai pada penerapan suatu bentuk larangan dalam pengambilan atau eksploitasi air tanah pada zona kritis dan rusak (Kodoatie dan Sjarief 2007; Ardiatma 2015).

Beberapa bentuk strategi yang dapat dilakukan adalah dengan melakukan pengolahan air sederhana skala rumah tangga, mengingat di lokasi penelitian belum terdapat layanan air perpipaan. Menurut Daulay dan Manalu (2019), beberapa teknologi seperti penggunaan kombinasi antara karbon aktif (75%) dan batu zeolit (25%) dapat efektif untuk menurunkan konsentrasi pencemar seperti Fe, Mn, serta pencemar lain seperti TDS dan Cl⁻. Selain itu, pemanfaatan program PAMSIMAS (Program Penyediaan Air Minum dan Sanitasi Berbasis Masyarakat) sebagai pelayanan penyediaan air bersih komunal dari Kementerian Pekerjaan Umum dan Penataan Ruang.

Penelitian terkait keberlanjutan program PAMSIMAS di Desa Burangkeng telah dilakukan oleh Mega *et al.* (2024), dengan salah satu strategi yang dapat diterapkan adalah melalui pemanfaatan teknologi tepat guna untuk memperbaiki kualitas air SPAM, yaitu dengan pemanfaatan PAMSIMAS. Maka, dengan adanya penggunaan teknologi sederhana skala rumahan bersamaan dengan akses air bersih yang diterima melalui PAMSIMAS menjadi salah satu strategi pengendalian dampak terhadap penggunaan air tanah yang tercemar. Bentuk strategi terhadap pencemaran air tanah sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Daniel *et al.* (2022), bahwa dengan adanya peningkatan partisipasi masyarakat terhadap sistem layanan air bersih, maka akan diiringi dengan keberlanjutan sistem tersebut sehingga akan mereduksi dampak kepada penduduk dari segi sosial masyarakat.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Hasil evaluasi profil pencemaran air tanah yang dilakukan di sekitar lokasi Tempat Pembuangan Akhir Sampah Kabupaten Bekasi menunjukkan melebihi baku mutu yang ditetapkan yaitu Permenkes No. 2 Tahun 2023 pada beberapa lokasi sehingga tidak dapat digunakan dalam peruntukkan sanitasi dan MCK. Hal ini tentu membutuhkan bentuk strategi pengendalian dampak mengingat penduduk di lokasi penelitian masih menggunakan air tanah untuk kebutuhan sehari-hari. Strategi yang dapat dilakukan adalah melakukan pengolahan air sederhana skala rumahan paralel dengan pemanfaatan penyediaan air komunal.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Peneliti menyampaikan ucapan terima kasih kepada penduduk dan perangkat Desa Burangkeng, Puskesmas Setu I, dan Pemerintah Kabupaten Bekasi yang telah memberikan izin dan pengumpulan data dalam penelitian ini.

6. DAFTAR PUSTAKA

- Agustina TF, Hendrawan DI dan Purwaningrum P. 2021. Analisis kualitas air tanah di sekitar TPA Bagendung, Cilegon. *Jurnal Bhuwana* 1(1):29-43. <https://doi.org/10.25105/bhuwana.v1i1.9274>
- Aljaradin M. 2012. Environmental impact of municipal solid waste landfills in semi-arid climates (Case study: Jordan). *The Open Waste Management Journal* 5(1):28-39. <https://doi.org/10.2174/1876400201205010028>
- Ardiatma D. 2015. Kajian pencemaran lingkungan air tanah akibat aktivitas produksi Pabrik Gula Madukismo Daerah Istimewa Yogyakarta. Universitas Gadjah Mada.
- Bodrud-Doza M, Islam SMDU, Rume T, Quraishi SB, Rahman MS and Bhuiyan MAH. 2019. Groundwater quality and human health risk assessment for safe and sustainable water supply of Dhaka City dwellers in Bangladesh. *Groundwater for Sustainable Development* 10.
- Chakraborty S and Kumar RN. 2016. Assessment of groundwater quality at a MSW landfill site using standard and AHP based water quality index: A case study from Ranchi, Jharkhand, India. *Environmental Monitoring and Assessment* 188:335. <https://doi.org/10.1007/s10661-016-5336-x>
- Daulay HA dan Manalu K. 2019. Pengaruh kombinasi media filter karbon aktif dengan zeolit dalam menurunkan kadar logam air sumur. *JISTech (Journal of Islamic Science and Technology)* 4(2):91-96.
- Daniel D, Djono TPAI and Iswarani WP. 2022. Factors related to the functionality of community-based rural water supply and sanitation program in Indonesia. *Geography and Sustainability*.
- Emenike CPT, Enebe IT and Jarvis P. 2018. Fluoride contamination in groundwater sources in Southwestern Nigeria: Assessment using multivariate statistical approach and human health risk. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 156:391-402.

- Essien JP, Inam ED, Ikpe DI, Udofia GE and Benson NU. 2019. Ecotoxicological status and risk assessment of heavy metals in municipal solid wastes dumpsite impacted soil in Nigeria. *Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management* 11:100215. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2019.100215>
- Febrina L dan Ayuna A. 2015. Studi penurunan kadar besi (Fe) dan mangan (Mn) dalam air tanah menggunakan saringan keramik. *Jurnal Teknologi Universitas Muhammadiyah Jakarta* 7(1):35.
- Harmono DH. 2020. Validasi metode analisis logam merkuri (Hg) terlarut pada air permukaan dengan automatic mercury analyzer. *Journal of Laboratory* 2(3).
- Ika T dan Irwan S. 2012. Analisis logam timbal (Pb) dan besi (Fe) dalam air laut di wilayah pesisir Pelabuhan Ferry Taipa Kecamatan Palu Utara. *Jurnal Akademi Kimia* 4(1):181-186.
- Kodoatie JR dan Sjarief R. 2007. Pengelolaan sumber daya air terpadu. Cetakan 2 - Edisi Revisi. Andi. Yogyakarta.
- Mega T, Puspita D dan Zevi Y. 2024. Analisis keberlanjutan dan strategi pengelolaan sistem penyediaan air minum berbasis masyarakat di Kabupaten Bekasi, Jawa Barat. IX(4).
- Miller GT and Spoolman SA. 2018. *Living in Environment*. 829.
- Murphy HM, Prioleau MD, Borchardt MA and Hynds PD. 2017. Review: Epidemiological evidence of groundwater contribution to global enteric disease. *Hydrogeology Journal* 25(4):981-1001.
- Ningsih RO. 2020. Indeks kualitas air tanah di sekitar Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Antang Kota Makassar. *Jurnal Environmental Science* 2(2):156. <https://doi.org/10.35580/jes.v2i2.13372>
- Palar. 2012. Pencemaran dan toksikologi logam berat. Rineka Cipta.
- PerDa (Peraturan Daerah) Kabupaten Bekasi Nomor 12 Tahun 2011 tentang rencana tata ruang wilayah Kabupaten Bekasi tahun 2011-2013.
- PerMenKes (Peraturan Menteri Kesehatan) Nomor 2 Tahun 2023 tentang Peraturan Pelaksanaan Peraturan Pemerintah Nomor 66 Tahun 2014 tentang kesehatan lingkungan.

- Purba DCV dan Kamil IM. 2015. Analisis pola penyebaran logam berat pada air tanah dangkal akibat lindi di sekitar Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) Jatibarang, Semarang. *Jurnal Teknik Lingkungan* 21(2):149-158.
- Royani A, Subagja R dan Manaf A. 2017. Studi pelindian mangan secara reduksi dengan menggunakan larutan asam sulfat. *Indonesian Journal of Industrial Research* 11(1):1-9. <https://doi.org/10.26578/jrti.v11i1.1724>.
- UU (Undang-Undang) Republik Indonesia Nomor 18 Tahun 2008 tentang pengelolaan sampah.
- Walid A, Kusumah RGT, Putra EP, Herlina W dan Suciarti P. 2020. Pengaruh keberadaan TPA terhadap kualitas air bersih di wilayah pemukiman warga sekitar: Studi literatur. *Jurnal Ilmiah Universitas Batanghari Jambi* 20(3):1075. <https://doi.org/10.33087/jiubj.v20i3.1025>
- Wijaya IMW and Soedjono ES. 2018. Domestic wastewater in Indonesia: Challenge in the future related to nitrogen content. *International Journal of Geomate* 15(47):32-41.
- Wise SS, Holmes AL, Liou L, Adam RM and Wise JP. 2016. Hexavalent chromium induces chromosome instability in human urothelial cells. *Toxicology and Applied Pharmacology* 296:54-60. <https://doi.org/10.1016/j.taap.2016.02.015>
- Yang Z, Zhang X, Jiang Z, Li Q, Huang P, Zheng C, Liao Q and Yang W. 2021. Reductive materials for remediation of hexavalent chromium contaminated soil - A review. *Science of The Total Environment* 773:145654. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145654>
- Zhang Z, Xiao C, Adeyeye O, Yang W and Liang X. 2020. Source and mobilization mechanism of iron, manganese and arsenic in groundwater of Shuangliao City, Northeast China. *Water* 12(2). <https://doi.org/10.3390/w12020534>

Analisis pengaruh penerapan Peraturan Presiden nomor 15 tahun 2018 terhadap kinerja kualitas air Sungai Citarum

Analysis of the impact of Presidential Regulation No.15 of 2018 implementation on the water quality of the Citarum River

Een Irawan Putra^{1*}, Soeryo Adiwibowo², Hefni Effendi³

¹Program Studi Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan, IPB University, Bogor, Indonesia

²Departemen Sains Komunikasi dan Pengembangan Masyarakat, IPB University, Bogor, Indonesia

³Departemen Manajemen Sumberdaya Perairan, IPB University, Bogor, Indonesia

Abstrak.

Sungai Citarum menyokong pertanian, energi, dan sebagai sumber air baku, namun pencemaran dari kegiatan tersebut mengancam kesehatan dan ekonomi masyarakat. Respons Pemerintah Indonesia dengan menetapkan Peraturan Presiden Nomor 15 Tahun 2018 untuk mempercepat pengendalian pencemaran dan kerusakan DAS Citarum. Diluncurkan Program Citarum Harum sebagai bagian dari Perpres yang bertujuan memperbaiki kualitas air sungai melalui pengendalian pencemaran yang lebih terkoordinasi dan sinergis. Tujuan penelitian adalah menilai status mutu air dan tingkat pencemaran sungai menerapkan metode Indeks Pencemaran (IP) pasca terbitnya Perpres No. 15 Tahun 2018. Pengambilan data kualitas air dilakukan pada 3 lokasi di Sungai Cibeureum Hilir, Cisangkan Hilir, dan Cimahi Leuwigajah. Beberapa parameter kualitas air yang diamati mencakup parameter fisika (TSS) dan parameter kimia (DO, BOD, COD, total fosfat) menunjukkan nilai yang melebihi baku mutu pada ketiga lokasi. Indeks pencemaran (IP) termasuk status mutu tercemar ringan hingga sedang pada saat program Citarum Harum aktif dilaksanakan. Hal ini didukung oleh ketatnya pengawasan oleh aparat militer pada aktivitas pembuangan limbah industri dan rumah tangga selama program Citarum Harum aktif berjalan.

Kata kunci: sungai, pencemaran, kualitas air, Citarum Harum, Peraturan Presiden

Abstract.

The Citarum River supports key sectors such as agriculture, energy, and raw water supply. However, pollution poses significant threats to public health and the regional economy. In response, the Government of Indonesia issued Presidential Regulation No. 15 of 2018 to accelerate the control of pollution and degradation in the Citarum watershed. The "Citarum Harum" program, launched as part of this regulation, aims to improve river water quality through more coordinated and synergistic pollution control efforts. This study aims to determine the water quality status and pollution levels of the river using the Pollution Index (PI) method following the enactment of Presidential Regulation No. 15 of 2018. Water quality data were collected at three monitoring points along the Cibeureum Hilir, Cisangkan Hilir, and Cimahi Leuwigajah segments. The parameters analyzed included physical (TSS) and chemical (DO, BOD, COD, total phosphate) indicators, which exceeded water quality standards at all three locations. The PI values indicated slightly to moderately polluted water conditions during the implementation of the Citarum Harum program. This condition is attributed to the strict supervision by military authorities over industrial and domestic waste disposal activities during the implementation of Citarum Harum program.

Keywords: river, pollution, water quality, Citarum Harum, Presidential Regulation

1. PENDAHULUAN

Citarum bernilai sejarah, ekonomi, dan sosial yang signifikan sehingga disebut sebagai sungai strategis nasional. Sutapa *et al.* (2021) menyatakan bahwa Daerah Aliran Sungai (DAS) Citarum berfungsi strategis pada skala nasional ditinjau dari aspek sumber daya air, jumlah penduduk, dampak sosial, lingkungan dan ekonomi serta potensi kerusakan air. Sungai Citarum melintasi 7 kabupaten dan 2 kota.

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

Penelitian yang dilakukan oleh Hermawan dan Wardhani (2021) pada Sungai Cibeureum Sub DAS Citarum yang melintasi Kota Bandung dan Kota Cimahi menemukan bahwa sungai ini memiliki indeks tercemar berat. Sejak 2007, Sungai Citarum dijuluki sebagai salah satu diantara sungai terkotor di dunia (Price and Price 2017). Effendi *et al.* (2021) mengemukakan bahwa secara umum, permasalahan sungai yang melewati kawasan perkotaan sumber pencemarnya adalah aktivitas domestik, rumah sakit, perhotelan, dan industri skala kecil. Kondisi serupa juga terjadi di DAS Citarum Hulu, di mana urbanisasi yang pesat menjadi salah satu faktor utama perubahan penggunaan dan tutupan lahan (Agaton *et al.* 2016). Tekanan berbagai aktivitas tersebut berpotensi meningkatkan beban limbah yang masuk ke badan air dan pada akhirnya menurunkan kualitas perairan.

Pemerintah Indonesia menindaklanjuti pencemaran yang terjadi di Sungai Citarum dengan menetapkan Peraturan Presiden Nomor 15 Tahun 2018 tentang Percepatan Pengendalian Pencemaran dan Kerusakan Daerah Aliran Sungai Citarum. Implementasi peraturan ini diwujudkan dalam program Citarum Harum. Sebagai salah satu langkah strategisnya telah dibentuk Tim Satuan Tugas (Satgas) Citarum Harum bertugas melakukan pencegahan, penanggulangan pencemaran dan kerusakan, serta program pemulihan lingkungan. Setelah kurang lebih tujuh tahun berjalan, kualitas air sebagai indikator utama keberhasilan program perlu dianalisis lebih lanjut. Dengan demikian, penelitian ini dilaksanakan untuk menilai pengaruh penerapan Peraturan Presiden Nomor 15 Tahun 2018 terhadap kualitas air Sungai Citarum.

2. METODOLOGI

2.1. Lokasi kajian dan waktu penelitian

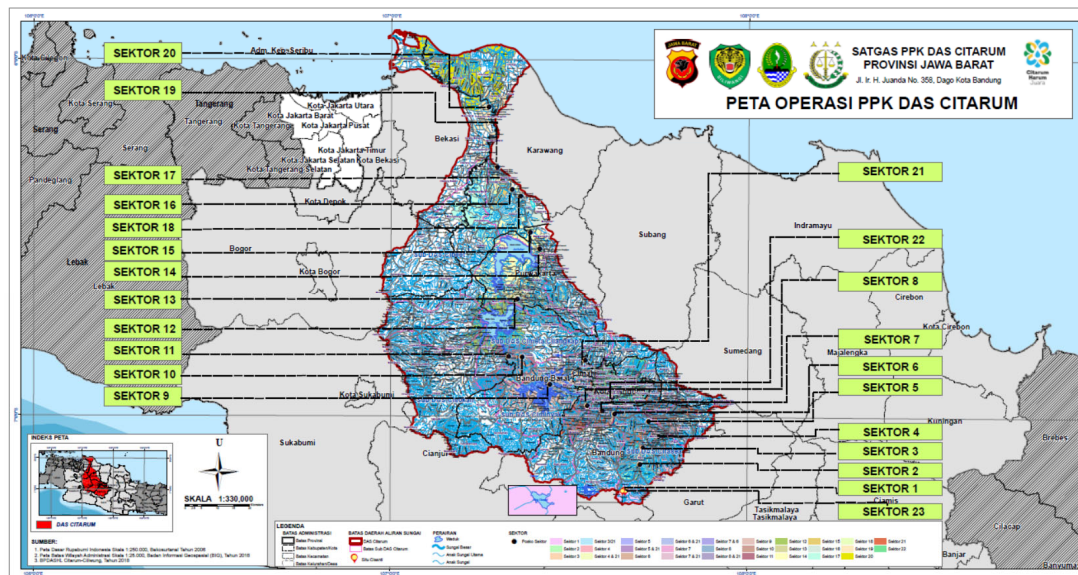
Penelitian ini dilakukan pada bulan Januari hingga Maret 2025. Penentuan titik pengambilan contoh air dilakukan dengan metode *purposive sampling* karena ketiga titik ini merupakan titik rutin pemantauan kualitas air oleh Dinas Lingkungan Hidup (DLH) Kota Cimahi dan Balai Besar Wilayah Sungai (BBWS) Citarum. Data kualitas air berasal dari pengambilan contoh air di anak sungai Citarum, yaitu di titik Cisangkan Hilir, Cibeureum Hilir, dan Cimahi Leuwigajah.

Adapun nama lokasi, titik koordinat, dan sumber data sekunder lokasi pengambilan sampel air disajikan pada **Tabel 1**. Lokasi penelitian di Kota Cimahi yang masuk ke dalam sektor 21 Satgas Citarum Harum disajikan pada **Gambar 1**. Wilayah

geografi sektor 21 meliputi daerah sepanjang aliran Sungai Citarum di wilayah Kabupaten Bandung dan Kota Cimahi.

Tabel 1. Lokasi pengambilan sampel air.

No.	Nama Lokasi	Titik koordinat	Sumber data sekunder
1	Cisangkan Hilir	6°55'55,092"S; 107°33'42,774"E	DLH Kota Cimahi
2	Cibeureum Hilir	6°55'55,832"S; 107°32'0,198"E	DLH Kota Cimahi
3	Cimahi Leuwigajah	6°53'52,776"S; 107°33'23,304"E	BBWS Citarum



Gambar 1. Peta lokasi sektor 21 Satgas Citarum.

2.2. Prosedur analisis data

Data primer dikumpulkan melalui pengambilan contoh air yang dilakukan dengan metode *grab sample* pada bulan Maret 2025. Sampel diberi label sesuai titik pengambilan dan diawetkan melalui pendinginan sebelum dianalisis di Laboratorium Pengujian Kualitas Lingkungan BINALAB. Data sekunder didapat dari Dinas Lingkungan Hidup (DLH) Kota Cimahi untuk titik Cisangkan Hilir dan Cibeureum Hilir, serta dari Balai Besar Wilayah Sungai (BBWS) Citarum untuk titik Cimahi Leuwigajah pada periode tahun 2016 hingga 2024. Penelitian ini merupakan evaluasi kebijakan pasca terbitnya PerPres Nomor 15 Tahun 2018 tentang Percepatan Pengendalian Pencemaran dan Kerusakan Daerah Aliran Sungai Citarum. Dengan demikian, evaluasi mencakup periode sebelum kebijakan (2016-2018) dan periode setelah kebijakan diterapkan (2019-2025).

Data primer yang dianalisis lebih lanjut mencakup 6 parameter, yaitu *total suspended solids* (TSS), *biological oxygen demand* (BOD), *chemical oxygen demand* (COD), *dissolved oxygen* (DO), nitrat (NO₃-N), total fosfat. Analisis kualitas air mengacu pada Standar Nasional Indonesia (SNI) untuk kualitas air dan limbah, yaitu TSS (SNI 6989.3-2019), BOD (SM 24th Edition, 5210 B, 2023), COD (SNI 6989.2:2019), DO (IK-MP.K-A09 Elektrometri), NO₃-N (SNI 6989.79:2011), total fosfat (SNI 6989.31:2021).

Penentuan status mutu air menggunakan metode Indeks Pencemar (IP) dengan mengacu pada baku mutu air kelas II, yakni peruntukan prasarana/sarana rekreasi air, pembudidayaan ikan air tawar, peternakan air, irigasi tanaman atau peruntukan lain yang sejenis dengan kegunaan tersebut menurut lampiran VI Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup. Rumus Indeks Pencemar (IP) disajikan melalui **Persamaan 1**. Penentuan mutu air menggunakan metode IP sebagaimana ditampilkan pada **Tabel 2**.

$$PI_j = \sqrt{\frac{\left(\frac{C_i}{L_{ij}}\right)_M^2 + \left(\frac{C_i}{L_{ij}}\right)_R^2}{2}} \dots\dots\dots(1)$$

Keterangan:

PI_j = Indeks Pencemaran bagi peruntukan (j) yang merupakan fungsi dari C_i/L_{ij}

L_{ij} = Konsentrasi parameter kualitas air yang dicantumkan dalam Baku Peruntukan Air (j)

C_i = Konsentrasi parameter kualitas air (i) yang diperoleh dari hasil analisis sampel air pada suatu lokasi alur sungai

M = Nilai maksimum

R = Nilai rata-rata

Tabel 2. Penentuan status mutu air.

Nilai Indeks	Klasifikasi
0 ≤ PI _j ≤ 1,0	Memenuhi baku mutu (kondisi baik)
1,0 < PI _j ≤ 5,0	Cemar ringan
5,0 < PI _j ≤ 10	Cemar sedang
PI _j > 10	Cemar berat

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Kualitas air

Pencemaran air adalah masuknya/dimasukkannya segala cairan, padatan, gas, energi, organisme patogen atau zat lain ke dalam air yang berdampak pada terganggunya kualitas air. Kondisi kualitas air yang tercemar akan berdampak bagi kesehatan dan kesejahteraan masyarakat.

Data kualitas air diperbandingkan dengan baku mutu air Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan kelas II. Hasil uji parameter kualitas air di titik Cisangkan Hilir ditampilkan pada **Tabel 3** di bawah ini. Pada titik Cisangkan Hilir tahun 2016, 2017, dan 2018 sebelum pelaksanaan program Citarum Harum, kualitas air yang melebihi baku mutu adalah BOD, COD, dan fosfat. Sementara itu, setelah pelaksanaan program Citarum Harum dimulai dari tahun 2019 sampai dengan tahun 2025 dapat dilihat bahwa BOD, COD, dan fosfat tetap melebihi baku mutu. Namun, nilai konsentrasinya jauh melebihi konsentrasi baku mutu ditemukan pada parameter COD pada tahun 2021 sebesar 111,33 mg/L, tahun 2024 sebesar 161,47 mg/L. Sebagaimana penelitian yang dilakukan oleh Rosmeiliyana dan Wardhani (2021) bahwa pada bagian hulu, tengah dan hilir Sungai Cisangkan didominasi oleh kegiatan domestik dan *home industry*.

Tabel 3. Hasil analisis kualitas air di titik Cisangkan Hilir.

Parameter	Satuan	Baku Mutu	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
DO	mg/l	4	2	2,21	0,38	1,24	2,2	1,42	3,08	2,11	4,07	2,7
BOD	mg/l	3	45,2	13,87	22,39	29,3	25,8	3,9	35,5	48,7	66,1	21
COD	mg/l	25	83,9	56,51	92,96	81,6	84,17	111,33	92,26	106,6	161,47	70
TSS	mg/l	50	19,3	56	22,64	27,3	2,2	26,93	14,63	16,25	18,33	13
Fosfat	mg/l	0,2	3,65	0,15	0,17	0,8	0,54	0,16	0,63	0,98	1,01	0,24
Nitrat	mg/l	10	3,94	2,57	1,72	6,09	0,42	0,72	0,76	1,6	0,9	0,04

Pada titik selanjutnya yaitu Cibeureum Hilir (**Tabel 4**), beberapa parameter seperti BOD dan COD sebelum pelaksanaan program Citarum Harum melebihi baku mutu. Namun TSS justru konsentrasinya melebihi baku mutu sejak tahun 2019, yaitu saat dimulainya pelaksanaan program. Konsentrasi nitrat pada semua tahun pengamatan memenuhi baku mutu.

Tabel 4. Hasil analisis kualitas air di titik Cibeureum Hilir.

Parameter	Satuan	Baku Mutu	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
DO	mg/l	4	3,5	3	0,65	3,52	5,18	2,72	4,25	3,1	4,97	3,7
BOD	mg/l	3	20	20	42,03	42	26,5	33,8	31,4	119	30,1	8,4
COD	mg/l	25	61	77	80,91	100,33	83,33	98,43	90,86	812,83	71,6	20
TSS	mg/l	50	17	38	35,29	92,33	76,73	67,26	43,67	88,33	76,26	330
Fosfat	mg/l	0,2	0,25	0,17	0,81	0,46	0,6	0,18	0,55	0,88	0,66	0,42
Nitrat	mg/l	10	1,8	2,16	3,63	1,5	1,22	1,97	1,13	1,95	1,5	1,2

Pada titik Cimahi Leuwigajah, TSS yang melebihi baku mutu hanya ditemukan pada tahun 2017 seperti yang disajikan pada **Tabel 5**. Perubahan pada konsentrasi DO pasca pelaksanaan program Citarum Harum ditandai dengan konsentrasi DO yang tidak memenuhi baku mutu sejak 2018 sampai dengan 2025.

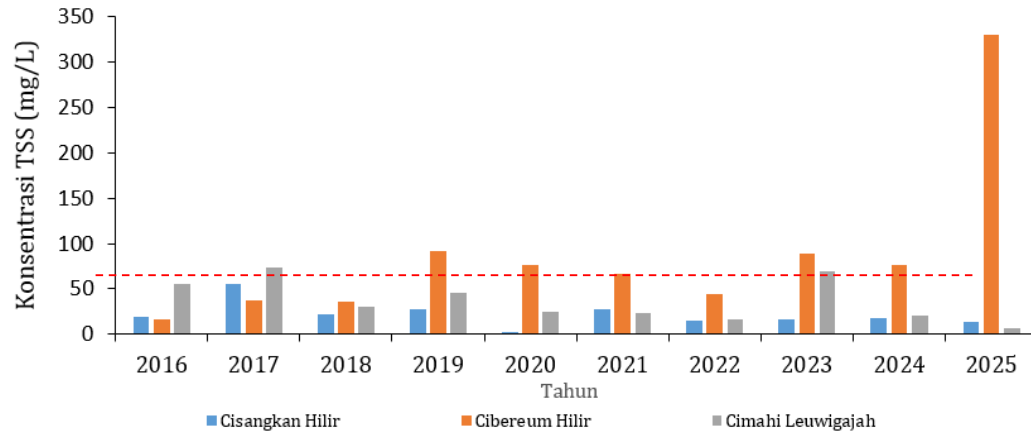
Tabel 5. Hasil analisis kualitas air di Cimahi Leuwigajah.

Parameter	Satuan	Baku Mutu	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
DO	mg/l	4	6,7	6,2	0,2	0,4	2,5	0,2	5,8	0,2	0,4	3,6
BOD	mg/l	3	6	19	45	75	22	9	21	47	13	7
COD	mg/l	25	62	40	181	162	47	69	4	93	66	13
TSS	mg/l	50	15	88	23	46	15	49	20	70	28	6
Fosfat	mg/l	0,2	0,18	0,17	0,81	0,46	0,6	0,18	0,55	0,88	0,66	0,45
Nitrat	mg/l	10	1,5	1,2	1,9	4,5	3,9	1,9	1,54	1,1	1,8	1,9

3.1.1. TSS (*total suspended solid*)

TSS berasal dari bahan organik yang luruh, proses sedimentasi, dan erosi yang terus menerus terjadi. Marselina *et al.* (2022) menyatakan bahwa kandungan bahan organik dalam air limbah yang tinggi, terutama yang telah tersuspensi dapat mengakibatkan kekeruhan dan mengganggu fotosintesis akibat cahaya matahari yang sukar berpenetrasi ke perairan.

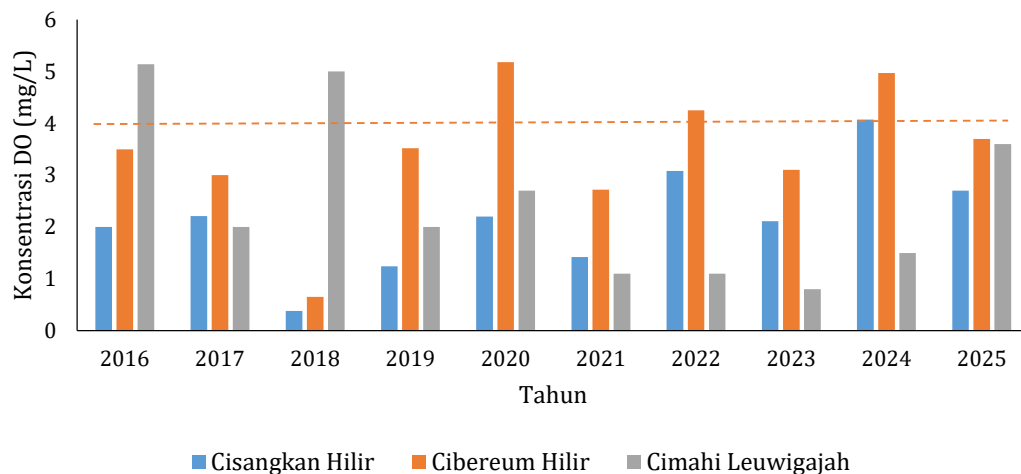
Berdasarkan pada **Gambar 2** dapat diketahui bahwa titik Cibeureum Hilir memiliki konsentrasi TSS yang melebihi baku mutu setelah pelaksanaan program Citarum Harum yaitu pada tahun 2019, 2020, 2021, 2023, dan 2024. Pada saat penelitian berlangsung, untuk tahun 2025 setelah dilakukan pengambilan sampel sesaat di titik pengamatan yang sama konsentrasinya jauh melebihi baku mutu dengan nilai TSS sebesar 330 mg/L. Penelitian yang dilakukan oleh Hermawan dan Wardhani (2021) menyatakan bahwa Sungai Cibeureum Hilir dan Sungai Cisangkan termasuk ke dalam salah satu sungai yang memiliki risiko sanitasi yang tinggi karena terdapat aktivitas industri dan domestik di sepanjang alirannya.



Gambar 2. Konsentrasi TSS (*total suspended solid*).

3.1.2. DO (*dissolved oxygen*)

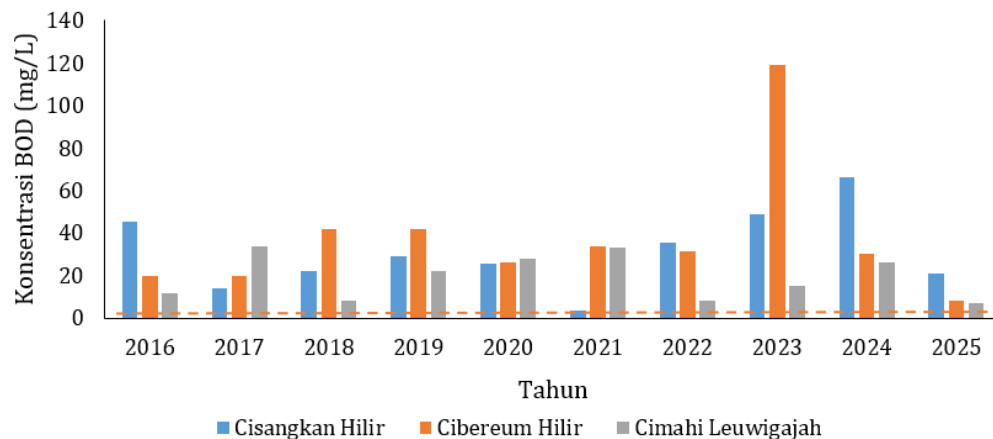
Parameter DO merupakan penanda penting bahwa oksigen terlarut dibutuhkan oleh semua organisme di perairan. Fluktuasi nilai DO dalam air dapat disebabkan oleh proses fotosintesis dan absorpsi dari udara. Rendahnya konsentrasi DO di sekitar lingkungan perairan ditandai dengan aroma tidak sedap sebagai akibat dari proses degradasi anaerobik yang terjadi. Cibeureum Hilir memiliki DO yang lebih tinggi dibandingkan Cisangkan Hilir dan Cimahi Leuwigajah. Konsentrasi DO pada 2020 dan 2024 menunjukkan konsentrasi yang tinggi. Berbeda dengan parameter lainnya, konsentrasi DO yang tinggi menggambarkan kualitas air yang baik (**Gambar 3**). Oksigen terlarut dalam konsentrasi yang tinggi dapat membantu mempercepat proses oksidasi bahan organik dan anorganik.



Gambar 3. Konsentrasi DO (*dissolved oxygen*).

3.1.3. BOD (*biological oxygen demand*)

Effendi dan Prayoga (2021) menyatakan bahwa BOD menggambarkan bantuan mikroba yang dapat mendekomposisi keberadaan senyawa organik dalam air. Kamila *et al.* (2024) menyatakan bahwa bahan organik yang menjadi penyebab tingginya nilai konsentrasi BOD dan COD bersumber dari pertanian, limbah domestik, limbah industri, limbah peternakan dalam bentuk limpasan air. Konsentrasi BOD pada tiga titik sampel, yaitu Cisangkan Hilir, Cibeureum Hilir, dan Cimahi Leuwigajah, secara keseluruhan melebihi baku mutu sejak tahun 2016 sampai dengan tahun 2025. Penelitian terbaru Marselina *et al.* (2025) menegaskan bahwa parameter BOD gagal memenuhi standar baku mutu yang termuat dalam Lampiran VII Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021. Meskipun parameter TSS, total fosfat, DO, dan nitrat telah memenuhi standar baku mutu yang sama. Sebagaimana ditampilkan pada **Gambar 4** di bawah ini, Cibeureum Hilir adalah titik dengan konsentrasi BOD tertinggi.

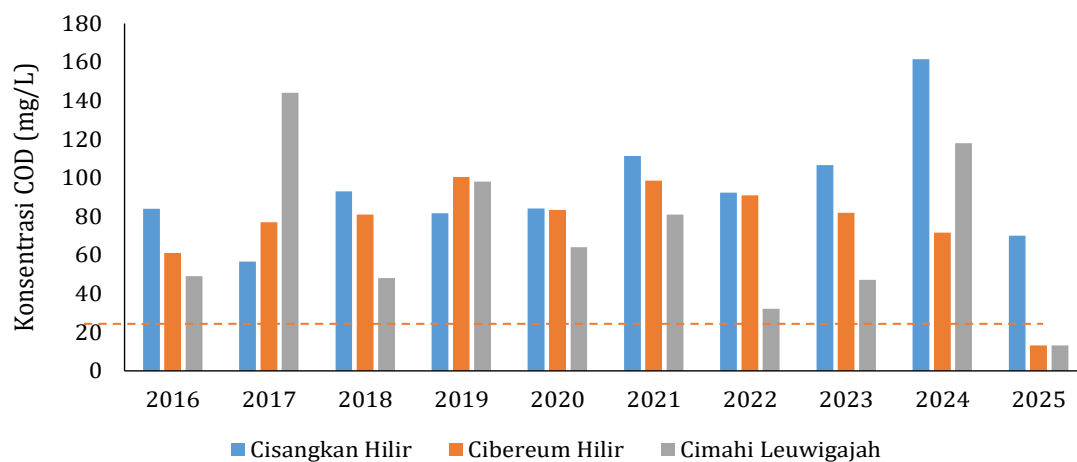


Gambar 4. Konsentrasi BOD (*biological oxygen demand*).

3.1.4. COD (*chemical oxygen demand*)

Konsentrasi COD menunjukkan jumlah bahan organik teroksidasi, sehingga konsekuensinya dapat mengurangi kadar oksigen terlarut dalam air. Kirana *et al.* (2019) menegaskan bahwa konsentrasi COD yang tinggi dapat berdampak pada tidak tercukupinya kadar oksigen yang digunakan untuk proses metabolisme dan berujung pada kematian biota air. Zainalarifin *et al.* (2024) menyatakan bahwa meskipun aktivitas manusia menjadi faktor utama dalam menentukan tingkat kelimpahan sampah padat pada aliran sungai, faktor hidrologi terutama lebar dan tinggi muka air juga dapat meningkatkan kelimpahan sampah padat.

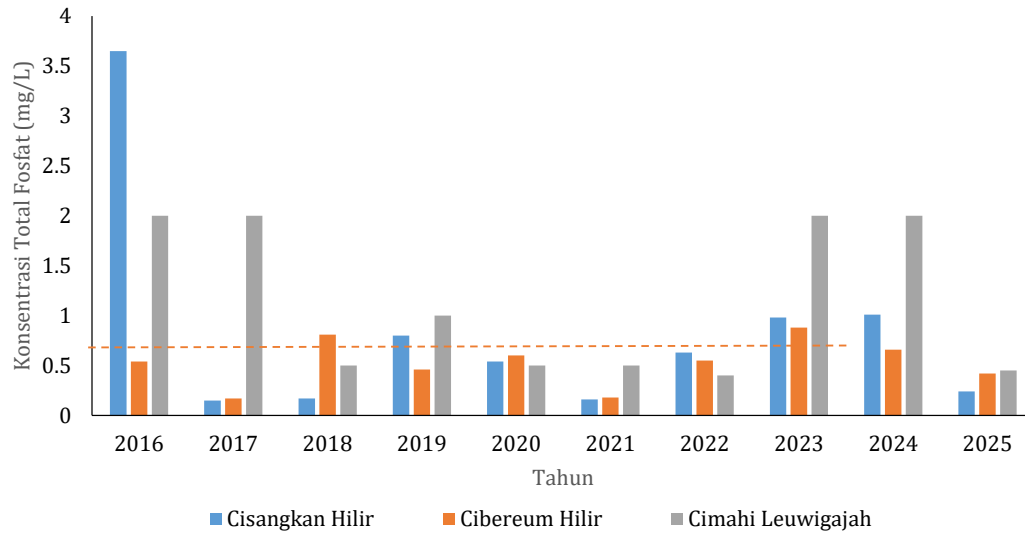
Nilai TDS yang tinggi dapat berakibat pada organisme air dan penurunan keanekaragaman. COD tinggi mengindikasikan terjadinya oksidasi bahan organik yang berakibat pada berkurangnya kadar oksigen terlarut. Biota air menerima dampak buruk dari tingginya nilai COD ini karena kebutuhan oksigen untuk proses metabolismenya tidak terpenuhi. Dapat dilihat pada **Gambar 5** bahwa konsentrasi COD melebihi baku mutu, baik sebelum maupun sesudah pelaksanaan program Citarum Harum. Pada tahun 2025 konsentrasi COD di Cisangkan Hilir berada di atas baku mutu dan di Cibeureum Hilir maupun Cimahi Leuwigajah masih di bawah baku mutu.



Gambar 5. Konsentrasi COD (*chemical oxygen demand*).

3.1.5. Fosfat

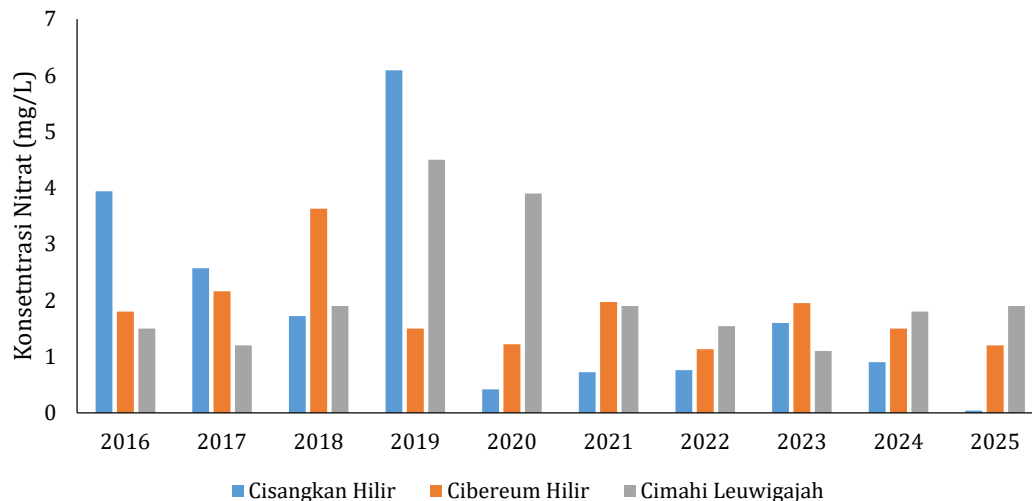
Total fosfat bersumber dari aktivitas pertanian yang menggunakan pupuk dan kemudian terbawa hanyut oleh air larian ke sungai (Savayedra and Arp 2017). Pada **Gambar 6** ditunjukkan bahwa konsentrasi fosfat bersifat fluktuatif pada setiap tahun dan setiap lokasi. Khusus untuk titik Cimahi Leuwigajah, konsentrasi fosfat selalu melebihi baku mutu sejak tahun 2016 sampai dengan tahun 2025. Konsentrasi fosfat yang tinggi dalam air dapat diperkirakan muncul dari buangan air limbah domestik yang mengandung surfaktan, seperti detergen, sabun, dan sampo yang berasal dari limbah domestik. Hal ini ditekankan kembali oleh Effendi (2003) bahwa limbah domestik yang berasal dari aktivitas peternakan, pertanian serta pelapukan bahan organik di sepanjang aliran sungai dapat mempengaruhi konsentrasi fosfat. Nybakken (1992) menyatakan bahwa parameter fosfat dan nitrat sangat mempengaruhi proses pertumbuhan dan perkembangan organisme di perairan sungai.



Gambar 6. Konsentrasi total fosfat.

3.1.6. Nitrat

Konsentrasi nitrat pada tiga titik pengambilan sampel sejak tahun 2016 sampai dengan tahun 2025 tidak ada yang melebihi baku mutu sebagaimana ditampilkan pada **Gambar 7**. Effendi *et al.* (2018) menyatakan bahwa kondisi ini menandakan lingkungan perairan bersifat aman dari pencemaran nitrat karena tidak terdapat indikasi pencemaran berlebih dari sumber pupuk kimia, sehingga ledakan eutrofikasi dapat dihindari dan menjaga kualitas ekosistem perairan.



Gambar 7. Konsentrasi nitrat

3.2. Indeks pencemaran (IP)

Selanjutnya dilaksanakan penilaian status mutu air sungai dengan metode IP. Pada **Tabel 6** dapat dilihat bahwa Cibeureum Hilir pada tahun 2016, 2017, dan 2018 sebelum pelaksanaan program Citarum Harum status mutu airnya masing-masing adalah tercemar ringan, tercemar ringan, dan tercemar berat. Sementara setelah pelaksanaan program Citarum Harum status mutu tercemar berat hanya ditemukan pada tahun 2019 dan tahun 2023 dengan nilai IP masing-masing 10,25 dan 29,55.

Tabel 6. Nilai indeks pencemaran (IP) dan status mutu air di titik Cibeureum Hilir.

Perhitungan	Tahun									
	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
(Ci/Li) R ²	3,46	3,94	14,56	14,19	8,00	9,00	9,07	172,78	9,04	4,48
(Ci/Li) M ²	44,44	44,44	196,28	196	78,03	126,94	109,55	1573,44	100,67	43,56
(IP)	4,89	4,92	10,27	10,25	6,56	8,24	7,70	29,55	7,41	4,90
Status mutu	Cemar ringan	Cemar ringan	Cemar berat	Cemar berat	Cemar sedang	Cemar sedang	Cemar sedang	Cemar berat	Cemar sedang	Cemar ringan

Selanjutnya pada **Tabel 7** ditampilkan nilai IP dan status mutu air pada titik Cisangkan Hilir. Pada lokasi ini, IP dan status mutu air pasca pelaksanaan program Citarum Harum bersifat fluktuatif dimulai dari tahun 2019 dan tahun 2020 dengan status mutu air tercemar sedang. Kemudian tahun 2021 status mutu airnya tercemar ringan, lalu pada tahun 2023 tercemar sedang. Pada tahun 2023 dan tahun 2024 nilai IP masing-masing adalah 11,89 dan 16,09 dengan status mutu air tercemar berat. Kemudian sesuai hasil analisis pengambilan sampel tahun 2025 nilai IP sebesar 5,14 dengan status mutu tercemar sedang. Penelitian yang dilakukan oleh Rosmeiliyana dan Wardhani (2021) serta Hermawan dan Wardhani (2021) menghasilkan data bahwa mutu air Sungai Cisangkan dan Cibeureum tidak jauh berbeda dan menyumbang tingginya pencemaran di Sungai Citarum.

Tabel 7. Nilai indeks pencemaran (IP) dan status mutu air di titik Cisangkan Hilir.

Perhitungan	Tahun									
	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
(Ci/Li) R ²	39,84	2,46	4,85	9,68	6,38	1,62	10,42	19,20	32,57	3,75
(Ci/Li) M ²	333,06	21,38	55,70	95,39	73,96	19,83	140,03	265,32	485,47	49,00
(IP)	13,65	3,45	5,50	7,25	6,34	3,27	8,67	11,89	16,09	5,14
Status Mutu	Cemar berat	Cemar ringan	Cemar sedang	Cemar sedang	Cemar sedang	Cemar ringan	Cemar sedang	Cemar berat	Cemar berat	Cemar sedang

Nilai IP dan status mutu air di titik Cimahi Leuwigajah ditampilkan pada **Tabel 8**. Berdasarkan nilai tersebut dapat dikatakan bahwa titik Cimahi Leuwigajah sudah tercemar dengan tingkatan ringan hingga berat. Pada tahun 2024 dan tahun 2025 menunjukkan status mutu tercemar ringan dengan nilai indeks pencemaran 3,35 dan 1,78. Setelah pelaksanaan program Citarum Harum, kondisi tercemar berat di titik Cimahi Leuwigajah ini terdapat di tahun 2023 dan tahun 2019.

Tabel 8. Nilai indeks pencemaran (IP) dan status mutu air di titik Cimahi Leuwigajah.

Perhitungan	Tahun									
	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
(Ci/Li) R ²	2,35	3,20	21,02	35,40	4,90	1,96	4,19	18,58	3,71	0,90
(Ci/Li) M ²	28,44	40,11	225,00	625,00	53,78	9,00	49,00	245,44	18,78	5,44
(IP)	3,92	4,65	11,09	18,17	5,42	2,34	5,16	11,49	3,35	1,78
Status mutu	Cemar ringan	Cemar ringan	Cemar berat	Cemar berat	Cemar sedang	Cemar ringan	Cemar sedang	Cemar berat	Cemar ringan	Cemar ringan

Amelia (2024) menegaskan bahwa penegakan hukum terhadap pencemaran lingkungan dan kerusakan DAS Citarum dapat dilakukan melalui dua pendekatan yaitu melalui mekanisme pidana dan mekanisme gabungan pidana dan sanksi administratif (non-penalti). Loucks (2017) menyatakan bahwa sumber daya air perlu dikelola dengan mengedepankan penyelarasan dimensi ekologi, ekonomi, dan sosial. Pola pengelolaan sumber daya air harus mampu mempertahankan keberlanjutan lingkungan pada waktu mendatang.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Kualitas air pada 3 lokasi penelitian yaitu di Sungai Cisangkan Hilir, Cibeureum Hilir dan Cimahi Leuwigajah telah tercemar. Sumber pencemar utama diprediksi bersumber dari limbah domestik dan kegiatan industri. Hal ini ditunjukkan oleh sejumlah parameter yang melebihi baku mutu, meliputi TSS, DO, BOD, COD, total fosfat. Nilai IP memperlihatkan status mutu air di ketiga titik tersebut berada pada kategori tercemar ringan hingga tercemar berat. Pada tahun 2019 dan tahun 2023, seluruh titik penelitian tercatat berada pada kategori tercemar berat. Selama pelaksanaan aktif program Citarum Harum pada 2020-2022, status mutu air cenderung membaik menjadi tercemar ringan hingga sedang. Namun, pada 2024-2025, ketika program mulai tidak aktif status mutu kembali menjadi tercemar ringan hingga berat kualitas perairan di tiga titik lokasi penelitian telah tercemar ringan hingga berat.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada Sekolah Pascasarjana IPB University, Sekretariat Sekolah Pascasarjana Ilmu Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan (PSL) IPB University, Dansektor 21 Citarum Harum dan anggota Satgas Citarum Harum, Balai Besar Wilayah Sungai Citarum, Dinas Lingkungan Hidup Provinsi Jawa Barat, Dinas Lingkungan Hidup Kota Cimahi dan Laboratorium Pengujian Kualitas Lingkungan Binalab yang telah membantu menyediakan data sekunder pemantauan kualitas air dan melakukan pengujian contoh uji kualitas air dalam penelitian ini.

6. DAFTAR PUSTAKA

- Agaton M, Setiawan Y and Effendi H. 2016. Land use/land cover change detection in an urban watershed: a case study of Upper Citarum Watershed, West Java Province, Indonesia [Proceeding]. IOP Conference Series.
- Amelia D. 2024. Regulasi penegakan hukum terhadap pencemaran air di Sungai Citarum, Jawa Barat. *Savana: Indonesian Journal of Natural Resources and Environmental Law* 1 (02): 88-98.
- Effendi H. 2003. Telaah kualitas air bagi pengolahan sumber daya dan lingkungan perairan. Kanisius. Jakarta.
- Effendi H, Muslimah S and Permatasari PA. 2018. Relationship between land use and water quality in Pesanggrahan River [Proceeding]. IOP Conference Series.
- Effendi H dan Prayoga G. 2021. Kondisi sesaat kualitas air di sekitar kampus PSDKU IPB di Kota Sukabumi. *Jurnal Pengelolaan Lingkungan Berkelanjutan* (3):748-758.
- Effendi H, Prayoga G, Azhar AR and Azhar R. 2021. Pollution source of Cileungsi-Cikeas-Bekasi river [Proceeding]. IOP Conference Series.
- Hermawan YI dan Wardhani E. 2021. Status mutu air Sungai Cibeureum, Kota Cimahi. *Jurnal Sumberdaya Alam dan Lingkungan* 8(1):28-41.
- Kamila A, Sadidan I dan Fauzie AK. 2024. Penilaian status mutu air Sungai Citarum Menggunakan Metode Indeks Pencemaran. *Ruwa Jurai: Jurnal Kesehatan Lingkungan* 18(2):84-91.
- Kirana KH, Novala GC, Fitriani D, Agustine E, Rahmaputri MD, Fathurrohman F, Rizkita NR, Andrianto N, Juniarti N dan Zaenudinna RA. 2019. Identifikasi kualitas air

- Sungai Citarum melalui analisa parameter hidrologi dan kandungan logam berat (Studi Kasus: Sungai Citarum Sektor 7). *Wahana Fisika* 4(2):120–128.
- Loucks B. 2017. *Water resource systems planning and management*. Springer.
- Marselina M, Wibowo F and Mushfiroh A. 2022. Water quality index assessment methods for surface water: A case study of the Citarum River in Indonesia. *Heliyon* 8(7).
- Marselina M, Rahmi NA and Nurhayati SA. 2025. The water quality of the Upper Citarum: Applying the overall index of pollution, Said-WQI, and pollution index methods. *Heliyon* 11(2).
- Nybakken J. 1992. *Biologi laut*. Gramedia Pustaka Utama. Jakarta.
- PP (Peraturan Pemerintah) Nomor 22 Tahun 2021 tentang penyelenggaraan perlindungan dan pengelolaan lingkungan hidup.
- PerPres (Peraturan Presiden) Nomor 15 Tahun 2018 tentang percepatan pengendalian pencemaran dan kerusakan daerah aliran Sungai Citarum.
- Price L and Price D. 2017. *The death of the Citarum River: Indonesia's most toxic waterway*. Pulitzer Center.
- Rosmeiliyana dan Wardhani E. 2021. Perhitungan status mutu air Cisangkan Kota Cimahi, Jawa Barat.
- Savayedra S and Arp D. 2017. Interactions between ammonia and nitrite oxidizing bacteria in co-cultures: Is there evidence for mutualism, commensalism, or competition?. Oregon State Univ. Corvallis.
- Sutapa IDA, Apip, Fakhrudin M and Yogaswara H. 2021. Implementation of ecohydrology to support sustainable water resources management in tropical region, Indonesia. *Ecohydrology and Hydrobiology* 21(3):501–515.
- Zainalarifin J, Kamilatunnisa A, Effendi H and Taryono. 2024. Impact of rainfall on the abundance of solid waste found in the flow of the Citarum River [Proceeding]. IOP Conference Series.

JURNAL PENGELOLAAN LINGKUNGAN BERKELANJUTAN

JOURNAL OF ENVIRONMENTAL SUSTAINABILITY MANAGEMENT

ISSN 2598-0017 | E-ISSN 2598-0025

Vol. 10 No. 2, Agustus 2026

Potensi stok dan nilai ekonomi karbon ekosistem lamun di Desa Tanjung Sungkai, Kabupaten Kotabaru (Aprizal Junaidi, Gatot Yulianto, Niken Tunjung Murti Pratiwi, Novi Susetyo Adi)	123-141
Analisis kualitas perairan Sungai Kampili, Kabupaten Gowa, Sulawesi Selatan menggunakan metode biotilik (Wafiq Azizah, Devi Armita, Andi Hernawati)	142-156
Estimasi emisi gas rumah kaca dari pembakaran sampah komunal skala desa di Kecamatan Dukun, Kabupaten Gresik (Faiq Abdillah, Abdur Rohman, Cantika Almas Fildzah)	157-178
Pengembangan kerangka konseptual untuk transisi energi berkelanjutan: pendekatan bibliometrik (Muhamad Ferdy Firmansyah, Yudha Hadian Nur, Muhamad Andri Arif Pramanda)	179-198
Profil pencemaran air tanah sekitar tempat pemrosesan akhir sampah di Kabupaten Bekasi (Harry Alfiansyah, Rachmadhi Purwana, Haruki Agustina)	199-210
Analisis pengaruh penerapan Peraturan Presiden nomor 15 tahun 2018 terhadap kinerja kualitas air Sungai Citarum (Een Irawan Putra, Soeryo Adiwibowo, Hefni Effendi)	211-224

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