

TEKNOLOGI KESEHATAN LINGKUNGAN

Editor: Hairil Akbar



Jordan Syah Gustav | Ihsan Murdani
Sandy Novryanto Sakati | Dewi Fitria Marlisa
Redha Rahmi | Fitri Yanti
Fachry Rumaf | Angki Irawan
Muhamad Faisal Pataha | Yunita Sari Thirayo
Fitrianty Sutadi Lanyumba | Sugiarto

BUNGA RAMPAI

TEKNOLOGI KESEHATAN LINGKUNGAN

UU No 28 tahun 2014 tentang Hak Cipta

Fungsi dan sifat hak cipta Pasal 4

Hak Cipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 3 huruf a merupakan hak eksklusif yang terdiri atas hak moral dan hak ekonomi.

Pembatasan Pelindungan Pasal 26

Ketentuan sebagaimana dimaksud dalam Pasal 23, Pasal 24, dan Pasal 25 tidak berlaku terhadap:

- i Penggunaan kutipan singkat Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait untuk pelaporan peristiwa aktual yang ditujukan hanya untuk keperluan penyediaan informasi aktual;
- ii Penggandaan Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait hanya untuk kepentingan penelitian ilmu pengetahuan;
- iii Penggandaan Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait hanya untuk keperluan pengajaran, kecuali pertunjukan dan Fonogram yang telah dilakukan Pengumuman sebagai bahan ajar; dan
- iv Penggunaan untuk kepentingan pendidikan dan pengembangan ilmu pengetahuan yang memungkinkan suatu Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait dapat digunakan tanpa izin Pelaku Pertunjukan, Produser Fonogram, atau Lembaga Penyiaran.

Sanksi Pelanggaran Pasal 113

1. Setiap Orang yang dengan tanpa hak melakukan pelanggaran hak ekonomi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf i untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 1 (satu) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp100.000.000 (seratus juta rupiah).
2. Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf c, huruf d, huruf f, dan/atau huruf h untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 3 (tiga) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).

TEKNOLOGI KESEHATAN LINGKUNGAN

Jordan Syah Gustav | Ihsan Murdani
Sandy Novryanto Sakati | Dewi Fitria Marlisa
Redha Rahmi | Fitri Yanti
Fachry Ruma | Angki Irawan
Muhamad Faisal Pataha | Yunita Sari Thirayo
Fitrianty Sutadi Lanyumba | Sugiarto

Editor:
Hairil Akbar

Penerbit



CV. MEDIA SAINS INDONESIA
Melong Asih Regency B40 - Cijerah
Kota Bandung - Jawa Barat
www.medsan.co.id

Anggota IKAPI
No. 370/JBA/2020

TEKNOLOGI KESEHATAN LINGKUNGAN

Jordan Syah Gustav | Ihsan Murdani
Sandy Novryanto Sakati | Dewi Fitria Marlisa
Redha Rahmi | Fitri Yanti
Fachry Rumaf | Angki Irawan
Muhamad Faisal Pataha | Yunita Sari Thirayo
Fitrianty Sutadi Lanyumba | Sugiarto

Editor:

Hairil Akbar

Tata Letak:

Eleazar Mali Paruntung

Desain Cover:

Qonita Azizah

Ukuran:

A5 Unesco: 15,5 x 23 cm

Halaman:

viii, 219

ISBN:

978-634-310-040-9

Terbit Pada:

Juni 2026

Hak Cipta 2026 @ Media Sains Indonesia dan Penulis

Hak cipta dilindungi undang-undang. Dilarang keras menerjemahkan, memfotokopi, atau memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini tanpa izin tertulis dari Penerbit atau Penulis.

PENERBIT MEDIA SAINS INDONESIA

(CV. MEDIA SAINS INDONESIA)

Melong Asih Regency B40 - Cijerah

Kota Bandung - Jawa Barat

www.medsan.co.id

KATA PENGANTAR

Puji syukur kami panjatkan kehadirat Tuhan Yang Maha Esa karena berkat rahmat dan karunia-Nya sehingga buku kolaborasi dalam bentuk buku dapat dipublikasikan dan dapat sampai di hadapan pembaca. Buku ini disusun oleh sejumlah dosen dan praktisi sesuai dengan kepakarannya masing-masing. Buku ini diharapkan dapat hadir dan memberi kontribusi positif dalam ilmu pengetahuan khususnya terkait dengan “Teknologi Kesehatan Lingkungan” buku ini memberikan nuansa berbeda yang saling menyempurnakan dari setiap pembahasannya, bukan hanya dari segi konsep yang tertuang dengan detail, melainkan contoh yang sesuai dan mudah dipahami terkait Teknologi Kesehatan Lingkungan.

Sistematika buku ini dengan judul “Teknologi Kesehatan Lingkungan” mengacu pada konsep dan pembahasan hal yang terkait. Buku ini terdiri atas 12 bab yang dijelaskan secara rinci dalam pembahasan antara lain mengenai Konsep dan Ruang Lingkup Teknologi dalam Kesehatan Lingkungan; Prinsip Dasar Pemilihan Teknologi; Teknologi Penyediaan Air Bersih; Teknologi Pengolahan Air Limbah Domestik dan Industri; Teknologi Persampahan; Teknologi Penyehatan Udara; Teknologi Penyehatan Udara; Teknologi Pengendalian Vektor dan Binatang Pembawa Penyakit; Penerapan IoT dan Big data dalam Pengawasan Lingkungan; Teknologi Tepat Guna Berbasis Masyarakat; Analisis Biaya Manfaat dan Kelayakan Teknologi; Evaluasi Kinerja Sistem Penyehatan Lingkungan; serta Studi Kasus Teknologi Kesehatan Lingkungan.

Buku ini memberikan nuansa yang berbeda dengan buku lainnya, karena membahas berbagai Teknologi Kesehatan Lingkungan sesuai dengan update keilmuan. Akhirnya

kami mengucapkan terima kasih yang tak terhingga kepada semua pihak yang telah mendukung dalam proses penyusunan dan penerbitan buku ini, secara khusus kepada Penerbit Media Sains Indonesia sebagai inisiator buku ini. Semoga buku ini dapat bermanfaat bagi pembaca sekalian.

Bandung, Mei 2026

Editor

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	i
DAFTAR ISI.....	iii
1 KONSEP DAN RUANG LINGKUP TEKNOLOGI DALAM KESEHATAN LINGKUNGAN	1
Jordan Syah Gustav, S.ST., M.Tr.T.....	1
Konsep Teknologi dalam Kesehatan Lingkungan....	1
Karakteristik Teknologi Kesehatan Lingkungan	3
Ruang Lingkup Teknologi dalam Kesehatan Lingkungan	5
Batasan dan Cakupan Ruang Lingkup	9
Peran Teknologi dalam Kesehatan Lingkungan	12
2 PRINSIP DASAR PEMILIHAN TEKNOLOGI	19
Ihsan Murdani, S.K.M., M.Kes.	19
Prinsip Dasar Pemilihan Teknologi.....	19
Kriteria Pemilihan Teknologi (Pendekatan Multidimensi).....	26
Pendekatan Modern dalam Pemilihan Teknologi ..	28
Contoh Aplikasi Pemilihan Teknologi	31
Kerangka Pengambilan Keputusan	31
3 TEKNOLOGI PENYEDIAAN AIR BERSIH	39
Dr. Sandy Novryanto Sakati, SKM., M.Kes.	39
Pendahuluan	39
Konsep Dasar Air Bersih.....	41
Sumber-Sumber Air Bersih.....	43
Tantangan dalam Penyediaan Air Bersih.....	45
Teknologi Pengolahan Air Bersih.....	47

4	TEKNOLOGI PENGOLAHAN AIR LIMBAH DOMESTIK DAN INDUSTRI.....	57
	Dewi Fitria Marlisa, S.T., M.T.....	57
	Pendahuluan	57
	Karakteristik Air Limbah.....	58
	Teknologi Pengolahan Air Limbah Domestik	60
	Teknologi Pengolahan Air Limbah Industri.....	63
	Tantangan dalam Pengolahan Air Limbah.....	66
	Prospek dan Solusi Masa Depan	67
5	TEKNOLOGI PERSAMPAHAN.....	73
	Redha Rahmi, SKM, M.Kes.	73
	Pendahuluan	73
	Jenis-Jenis Teknologi Persampahan	76
	Waste-to-Energy (WTE)	78
	Pirolisis.....	80
	Refuse Derived Fuel (RDF)	81
	Biogas.....	82
	Teknologi Pemilahan Cerdas	85
	Aplikasi Digital	86
	Lubang Biopori	88
6	TEKNOLOGI PENYEHATAN UDARA.....	93
	Fitri Yanti, SKM., M.Kes.....	93
	Pendahuluan	93
	Beban Penyakit Akibat Pencemaran Udara (ISPA dan PM2.5)	94
	Pentingnya Pendekatan Teknologi dalam Penyehatan Udara	95
	Konsep Dasar Penyehatan Udara.....	96

	Prinsip Pencegahan Penyakit Berbasis Lingkungan.....	98
	Jenis Pencemar Udara dan Dampaknya	99
	Dampak Kesehatan pada Kelompok Rentan.....	101
	Teknologi Penyehatan Udara Dalam Ruangan ...	103
	Teknologi Penyehatan Udara Luar Ruangan	105
7	TEKNOLOGI PENGENDALIAN VEKTOR DAN BINATANG PEMBAWA PENYAKIT	117
	Fachry Rumaf, S.K.M., M.Kes.	117
	Pengantar Teknologi Pengendalian Vektor.....	117
	Metode Pengendalian Vektor	119
	Teknologi Inovatif dalam Pengendalian Vektor ...	120
	Tantangan dalam Pengendalian Vektor	122
	Kesimpulan dan Rekomendasi.....	123
8	PENERAPAN IOT DAN BIG DATA DALAM PENGAWASAN LINGKUNGAN	127
	Angki Irawan, M.P.H.	127
	Konsep Dasar Integrasi IoT dan Big Data dalam Ecowatch.....	127
	Arsitektur Sensor Jaringan dan Pengumpulan Data (IoT Layer)	129
	Teknologi Big Data dalam Pemrosesan Data Lingkungan	131
	Implementasi Sektor Pengawasan Lingkungan ..	133
	Visualisasi Data dan Dashboard Pemantauan ...	136
	Tantangan dan Kendala Penerapan	137
	Tren Masa Depan: Environmental Digital Twins	139

9	TEKNOLOGI TEPAT GUNA BERBASIS MASYARAKAT	147
	Muhamad Faisal Pataha, S.Kom., M.P.H.....	147
	Paradigma Baru Sanitasi di Era Digital.....	147
	Digitalisasi Analisis Kebutuhan Sanitasi Partisipatif.....	148
	TTG Penyediaan Air Bersih & Sensor Monitoring	150
	TTG Limbah Cair & Smart Monitoring System ...	152
	<i>Smart Waste</i> Management Berbasis Masyarakat	154
	Teknologi Digital dalam Pengendalian Vektor.....	157
	Implementasi Khusus: Wilayah Kepulauan & Pesisir	159
10	ANALISIS BIAYA MANFAAT DAN KELAYAKAN TEKNOLOGI	167
	Yunita Sari Thirayo, SKM., M.P.H.	167
	Konsep Analisis Biaya-Manfaat.....	167
	Prinsip Dasar Analisis Ekonomi.....	170
	Komponen Biaya.....	171
	Konsep Kelayakan Teknologi.....	174
	Dimensi Kelayakan	175
	Contoh Kasus: Implementasi “ <i>Smart Water Monitoring</i> ” Berbasis <i>Internet of Things (IoT)</i> untuk Pencegahan Penyakit Berbasis Air di Daerah Pinggiran Kota	178
	Pendalaman Analisis dan Implikasi Kebijakan ...	179
11	EVALUASI KINERJA SISTEM PENYEHATAN LINGKUNGAN.....	185
	Dr. Fitrianty Sutadi Lanyumba, SKM, M.Kes.	185
	Pendahuluan	185

	Pengertian Sistem Penyehatan Lingkungan	186
	Komponen Sistem Kesehatan Lingkungan	187
	Siklus Pengelolaan Sistem Penyehatan Lingkungan	191
	Konsep Dasar Evaluasi Kinerja Sistem Penyehatan Lingkungan	193
	Kerangka Evaluasi Kinerja yang Dapat Digunakan	194
12	STUDI KASUS TEKNOLOGI KESEHATAN LINGKUNGAN	201
	Dr. Ir. Sugiarto, M.S.	201
	Teknologi Kesehatan Lingkungan	201
	Urgensi Implementasi Teknologi	202
	Perkembangan Teknologi Kesehatan Lingkungan.....	202
	Studi Kasus I: Implementasi IoT Pada Pengolahan Limbah Padat (<i>Smart Waste Managament</i>).....	203
	Studi Kasus II: Sistem Monitoring Kualitas Udara Secara <i>Real-Time</i>	207
	Model Prediksi Polusi.....	208
	Studi Kasus III: Inovasi Teknologi Pengolahan Air limbah Domestik	210
	Integrasi Data dan Tantangan Regulasi	212
	Kesimpulan.....	215

KONSEP DAN RUANG LINGKUP TEKNOLOGI DALAM KESEHATAN LINGKUNGAN

Jordan Syah Gustav, S.ST., M.Tr.T.
Universitas Sebelas Maret

Konsep Teknologi dalam Kesehatan Lingkungan

Konsep teknologi dalam kesehatan lingkungan memiliki dua cabang ilmu yang dipadukan untuk mencapai tujuan. Berikut merupakan pengertian kesehatan lingkungan dan teknologi yang mendukung pengembangannya.

1. Pengertian Kesehatan Lingkungan

Kesehatan lingkungan merupakan cabang ilmu kesehatan masyarakat yang berfokus pada upaya pencegahan penyakit melalui pengendalian faktor-faktor lingkungan. Menurut World Health Organization, kesehatan lingkungan mencakup seluruh aspek fisik, kimia, dan biologis eksternal yang memengaruhi kesehatan manusia (WHO, 2022). Lingkungan dalam hal ini tidak hanya terbatas pada kondisi alam, tetapi juga mencakup lingkungan buatan seperti permukiman, tempat kerja, dan fasilitas umum.

Di Indonesia, kesehatan lingkungan juga diatur dalam kebijakan nasional yang menekankan pentingnya pengendalian kualitas air, udara, tanah, serta sanitasi sebagai determinan utama kesehatan masyarakat (Kementerian Kesehatan RI, 2017). Tujuan utama kesehatan lingkungan adalah menciptakan kondisi yang aman dan sehat guna menurunkan risiko penyakit berbasis lingkungan seperti diare, ISPA, dan penyakit akibat vektor (Prüss-Ustün et al., 2016).

2. Pengertian Teknologi

Teknologi merupakan hasil penerapan ilmu pengetahuan yang digunakan untuk mempermudah aktivitas manusia dan menyelesaikan berbagai permasalahan praktis. Secara umum teknologi tidak hanya berupa alat namun juga mencakup metode, sistem, dan proses yang dirancang untuk meningkatkan efisiensi dan efektivitas (Rogers, 2003). Perkembangan teknologi mengalami transformasi dari sistem konvensional menuju teknologi modern berbasis digital. Dalam konteks lingkungan, perkembangan ini dipicu oleh meningkatnya kompleksitas permasalahan seperti pencemaran, eksploitasi sumber daya, dan perubahan iklim (Mihelcic & Zimmerman, 2014).

Teknologi memiliki peran penting dalam meningkatkan kualitas hidup manusia, termasuk dalam bidang kesehatan. Misalnya, teknologi pengolahan air dapat menghasilkan air layak minum, sementara teknologi pengendalian emisi mampu menekan pencemaran udara dari sektor industri (Tchobanoglous et al., 2014). Dengan demikian, teknologi menjadi solusi strategis dalam mengatasi berbagai tantangan lingkungan secara sistematis dan berkelanjutan.

3. Konsep Teknologi Kesehatan Lingkungan

Teknologi kesehatan lingkungan merupakan penerapan teknologi untuk mengendalikan faktor lingkungan yang berpotensi menimbulkan gangguan kesehatan. Konsep ini mengintegrasikan ilmu kesehatan masyarakat dengan teknik lingkungan dalam upaya menciptakan lingkungan yang sehat (Friis, 2012). Teknologi kesehatan lingkungan berfungsi sebagai alat pengendalian risiko melalui pendekatan preventif dan promotif. Pendekatan preventif bertujuan mengurangi paparan terhadap faktor risiko, sedangkan pendekatan promotif berfokus pada peningkatan kualitas lingkungan (WHO, 2022).

Ruang lingkup teknologi ini meliputi pengolahan air, pengelolaan limbah, pengendalian pencemaran udara, serta sistem pemantauan lingkungan. Keberhasilan implementasinya sangat bergantung pada kesesuaian dengan kondisi lokal, termasuk aspek sosial dan ekonomi masyarakat (Mihelcic & Zimmerman, 2014).

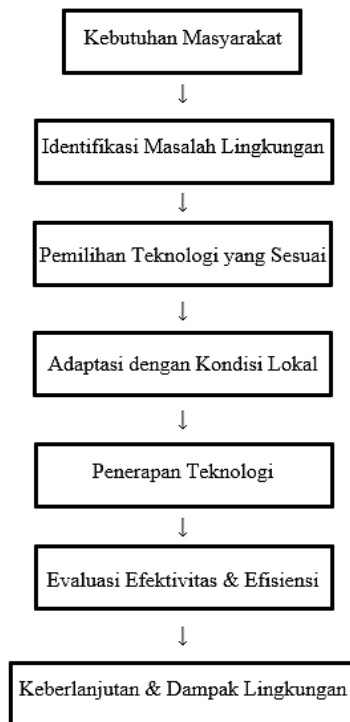
Selain itu, konsep ini menekankan prinsip keberlanjutan, yaitu teknologi harus memberikan manfaat jangka panjang tanpa merusak lingkungan. Oleh karena itu, pengembangan teknologi kesehatan lingkungan harus mempertimbangkan aspek ekologis, ekonomi, dan sosial secara seimbang.

Karakteristik Teknologi Kesehatan Lingkungan

Teknologi kesehatan lingkungan memiliki karakteristik khusus yang membedakannya dari teknologi pada bidang lain. Salah satu karakteristik utama adalah berbasis kebutuhan masyarakat, di mana teknologi dikembangkan untuk menjawab permasalahan nyata terkait kualitas lingkungan (Friis, 2012).

Selain itu teknologi ini harus bersifat adaptif terhadap kondisi lokal. Perbedaan geografis, sosial, dan ekonomi menyebabkan kebutuhan teknologi di setiap wilayah tidak sama. Teknologi yang terlalu kompleks seringkali sulit diterapkan di masyarakat dengan keterbatasan sumber daya (Mihelcic & Zimmerman, 2014).

Diagram 1.1 Alur Karakteristik Teknologi Kesehatan Lingkungan



Karakteristik lainnya adalah efisiensi dan efektivitas, teknologi harus mampu memberikan hasil optimal dengan penggunaan sumber daya minimal. Hal ini mencakup efisiensi biaya, energi, serta kemudahan operasional dan pemeliharaan (Tchobanoglous et al., 2014).

Tabel 1.1 Karakteristik Teknologi Kesehatan Lingkungan

No	Karakteristik	Penjelasan	Indikator Keberhasilan
1	Berbasis Kebutuhan	Disesuaikan dengan masalah nyata masyarakat	Tepat sasaran
2	Adaptif Lokal	Sesuai kondisi geografis & sosial	Mudah diterapkan
3	Efektif	Mampu menyelesaikan masalah	Hasil optimal
4	Efisien	Hemat biaya dan sumber daya	Biaya rendah
5	Ramah Lingkungan	Tidak menimbulkan dampak negatif	Minim pencemaran
6	Berkelanjutan	Dapat digunakan jangka panjang	Stabil & terus digunakan

Teknologi kesehatan lingkungan harus ramah lingkungan dan berkelanjutan, prinsip ini penting untuk memastikan bahwa teknologi tidak menimbulkan dampak negatif di masa depan (WHO, 2022). Dengan karakteristik tersebut, teknologi kesehatan lingkungan diharapkan mampu memberikan solusi yang komprehensif dan berkelanjutan.

Ruang Lingkup Teknologi dalam Kesehatan Lingkungan

Ruang lingkup teknologi dalam kesehatan lingkungan mencakup berbagai intervensi teknis yang dirancang untuk mengendalikan faktor risiko lingkungan yang

berdampak terhadap kesehatan manusia. Perkembangan teknologi saat ini tidak hanya berfokus pada fungsi pengolahan, tetapi juga pada efisiensi, keberlanjutan, dan integrasi sistem berbasis data. Hal ini sejalan dengan temuan penelitian terbaru yang menekankan bahwa pendekatan teknologi lingkungan modern harus mampu mengintegrasikan aspek teknik, ekologi, dan kesehatan masyarakat secara simultan (Lin et al., 2023).

Selain itu, kompleksitas permasalahan lingkungan seperti pencemaran air, udara, dan limbah menuntut penerapan teknologi yang bersifat multidisiplin dan adaptif terhadap kondisi lokal. Studi terbaru menunjukkan bahwa inovasi dalam teknologi kesehatan lingkungan, termasuk pemanfaatan sistem berbasis digital dan *resource recovery*, berperan penting dalam meningkatkan efektivitas pengelolaan lingkungan serta mendukung pembangunan berkelanjutan (Van de Walle et al., 2023).

Ruang lingkup ini mencakup berbagai sektor utama seperti penyediaan air bersih, pengelolaan limbah, pengendalian pencemaran udara, sanitasi lingkungan, pengendalian vektor penyakit, serta sistem pemantauan lingkungan. Masing-masing aspek memiliki karakteristik dan pendekatan teknologi yang berbeda, namun saling terintegrasi dalam satu sistem kesehatan lingkungan yang utuh. Oleh karena itu, pemahaman terhadap ruang lingkup ini menjadi penting sebagai dasar dalam merancang dan menerapkan teknologi yang tepat guna, efektif, serta berkelanjutan dalam upaya meningkatkan derajat kesehatan masyarakat. Berikut merupakan tabel gambaran umum Teknologi dalam kesehatan lingkungan :Tabel 1.2 Gambaran umum teknologi dalam kesehatan lingkungan

No	Ruang Lingkup	Tujuan Utama	Jenis Teknologi	Prinsip Kerja	Contoh Penerapan	Manfaat Kesehatan
1	Penyediaan Air Bersih	Menyediakan air layak konsumsi	Filtrasi, koagulasi, sedimentasi, desinfeksi (klorin, UV)	Menghilangkan kontaminan fisik, kimia, biologis	IPAL, saringan pasir lambat	Mencegah diare, kolera
2	Pengelolaan Limbah	Mengurangi pencemaran lingkungan	IPAL, sanitary landfill, 3R	Pengolahan fisik, kimia, biologis limbah	Limbah domestik & industri	Menjaga kualitas air & tanah
3	Pengendalian Pencemaran Udara	Mengurangi polutan udara	Scrubber, electrostatic precipitator, filter HEPA	Menangkap partikel dan gas berbahaya	Cerobong industri, HVAC	Mencegah ISPA

No	Ruang Lingkup	Tujuan Utama	Jenis Teknologi	Prinsip Kerja	Contoh Penerapan	Manfaat Kesehatan
4	Sanitasi Lingkungan	Menjaga kebersihan lingkungan	Septic tank, drainase, STBM	Pengelolaan limbah domestik	Jamban sehat, drainase kota	Mencegah penyakit sanitasi
5	Pengendalian Vektor	Mengendalikan vektor penyakit	Fogging, larvasida, perangkap	Membunuh/menghambat vektor	Pengendalian nyamuk DBD	Mencegah DBD, malaria
6	Pemantauan Lingkungan	Monitoring kualitas lingkungan	IoT, GIS, sensor digital	Pengumpulan & analisis data	Monitoring air & udara	Deteksi dini risiko

Batasan dan Cakupan Ruang Lingkup

Batasan serta cakupan teknologi dalam kesehatan lingkungan agar tidak terjadi tumpang tindih dengan bidang lain, khususnya teknologi kesehatan klinis. Pemahaman batasan ini penting karena pendekatan, tujuan, dan objek intervensi keduanya berbeda secara mendasar, meskipun sama-sama berkontribusi terhadap peningkatan derajat kesehatan masyarakat. Berikut merupakan batasan yang ada :

1. Perbedaan Teknologi Kesehatan Lingkungan dan Teknologi Kesehatan Klinis

Teknologi kesehatan lingkungan berfokus pada pengendalian faktor eksternal yang memengaruhi kesehatan manusia, seperti kualitas air, udara, sanitasi, dan limbah. Sebaliknya, teknologi kesehatan klinis lebih berorientasi pada diagnosis, pengobatan, dan rehabilitasi individu di fasilitas pelayanan kesehatan. Perbedaan ini tidak hanya terletak pada objek intervensi, tetapi juga pada pendekatan yang digunakan. Dalam praktiknya, teknologi kesehatan lingkungan menggunakan pendekatan preventif dan berbasis populasi, sedangkan teknologi klinis lebih menekankan pendekatan kuratif dan individual. Studi terbaru menunjukkan bahwa intervensi berbasis lingkungan memiliki dampak yang lebih luas dalam menurunkan beban penyakit dibandingkan intervensi klinis saja, terutama untuk penyakit berbasis lingkungan seperti diare dan penyakit pernapasan (Prüss-Ustün et al., 2023).

Perkembangan teknologi digital juga memperjelas perbedaan ini. Teknologi klinis banyak berfokus pada alat medis dan sistem berbasis pasien, sedangkan teknologi kesehatan lingkungan berkembang pada sistem pemantauan berbasis data seperti IoT dan sistem informasi lingkungan (Bachri et al., 2023).

Tabel 1.3 Perbandingan Teknologi

Aspek	Kesehatan Lingkungan	Kesehatan Klinis
Fokus	Lingkungan (air, udara, limbah)	Individu/pasien
Pendekatan	Preventif & promotif	Kuratif & rehabilitatif
Lokasi	Komunitas & lingkungan	Rumah sakit/klinik
Teknologi	IPAL, sanitasi, monitoring	MRI, ventilator
Dampak	Populasi luas	Individu

2. Fokus pada Faktor Lingkungan sebagai Determinan Kesehatan

Teknologi kesehatan lingkungan memiliki fokus utama pada faktor lingkungan sebagai determinan kesehatan, lingkungan berperan besar dalam menentukan kondisi kesehatan manusia, mulai dari kualitas air, udara, hingga sanitasi. Organisasi kesehatan global menyebutkan bahwa sebagian besar penyakit dapat dicegah melalui perbaikan lingkungan (WHO, 2023).

Penelitian terbaru menunjukkan bahwa peningkatan kualitas air dan sanitasi secara signifikan mampu menurunkan kejadian penyakit menular seperti diare (Van de Walle et al., 2023). Selain itu, pengendalian pencemaran udara melalui teknologi juga terbukti menurunkan risiko penyakit pernapasan dan kardiovaskular (Maurya et al., 2023). Dengan demikian, teknologi kesehatan lingkungan berperan sebagai sistem pencegahan yang bekerja sebelum penyakit muncul, berbeda dengan pendekatan klinis yang bekerja setelah individu terpapar penyakit.

3. Cakupan Skala Teknologi Kesehatan Lingkungan

Teknologi kesehatan lingkungan memiliki cakupan luas dari skala kecil hingga besar, yang menunjukkan fleksibilitasnya dalam berbagai kondisi.

a. Skala Rumah Tangga

Teknologi sederhana seperti saringan air, septic tank, dan pengelolaan sampah menjadi solusi utama.

b. Skala Komunitas

Meliputi sistem sanitasi bersama, pengolahan air komunal, dan drainase lingkungan berbasis masyarakat.

c. Skala Industri

Menggunakan teknologi kompleks seperti IPAL industri dan sistem pengendalian emisi untuk mengurangi dampak pencemaran (Lin et al., 2023).

d. Skala Perkotaan

Mengintegrasikan teknologi dalam sistem besar seperti smart city, termasuk monitoring kualitas udara dan air berbasis IoT (Bachri et al., 2023).

4. Sintesis Batasan dan Cakupan

Teknologi kesehatan lingkungan memiliki batasan yang jelas pada pengendalian faktor lingkungan dengan pendekatan preventif dan cakupan luas, perbedaannya dengan teknologi klinis terletak pada fokus dan pendekatan yang digunakan. Dengan cakupan dari rumah tangga hingga perkotaan, teknologi ini menjadi sistem yang fleksibel dan berperan penting dalam peningkatan kesehatan masyarakat secara menyeluruh.

Peran Teknologi dalam Kesehatan Lingkungan

Teknologi dalam kesehatan lingkungan berperan sebagai penghubung antara ilmu pengetahuan dan praktik lapangan dalam menjaga kualitas lingkungan. Perannya tidak hanya terbatas pada penyelesaian masalah, tetapi juga pada upaya pencegahan dan peningkatan kualitas hidup masyarakat secara menyeluruh. Dalam konteks saat ini, teknologi menjadi semakin penting karena permasalahan lingkungan semakin kompleks, mulai dari pencemaran, keterbatasan sumber daya, hingga perubahan iklim.

Salah satu peran utama teknologi adalah dalam pengendalian risiko lingkungan. Teknologi memungkinkan identifikasi, pengukuran, dan pengendalian berbagai faktor risiko seperti pencemaran air, udara, dan tanah. Misalnya, sistem monitoring berbasis sensor dan Internet of Things (IoT) mampu memberikan data kualitas lingkungan secara real-time sehingga tindakan pengendalian dapat dilakukan lebih cepat dan tepat. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa sistem pemantauan berbasis digital mampu meningkatkan efektivitas pengendalian pencemaran hingga signifikan karena berbasis data yang akurat (Bachri et al., 2023). Selain itu, teknologi pengolahan limbah modern tidak hanya berfungsi mengurangi polutan, tetapi juga mampu memulihkan sumber daya seperti energi dan nutrisi (*resource recovery*) sehingga lebih berkelanjutan (Lin et al., 2023).

Peran berikutnya adalah dalam pencegahan penyakit berbasis lingkungan. Banyak penyakit yang muncul akibat kondisi lingkungan yang tidak sehat, seperti diare, penyakit pernapasan, dan penyakit berbasis vektor. Teknologi kesehatan lingkungan bekerja sebelum penyakit muncul, misalnya melalui penyediaan air bersih, sanitasi yang layak, serta pengendalian vektor. Studi

terbaru menunjukkan bahwa peningkatan akses terhadap air bersih dan sanitasi mampu menurunkan angka kejadian penyakit secara signifikan, terutama di wilayah berkembang (Van de Walle et al., 2023). Selain itu, teknologi pengendalian pencemaran udara juga berperan dalam menurunkan risiko penyakit pernapasan melalui pengurangan paparan polutan (Maurya et al., 2023). Dengan demikian, teknologi berfungsi sebagai lapisan perlindungan awal yang menjaga masyarakat tetap sehat sebelum membutuhkan intervensi klinis.

Lingkungan yang bersih dan sehat secara langsung berdampak pada kenyamanan hidup, produktivitas, serta kesejahteraan masyarakat. Teknologi seperti sistem sanitasi modern, pengelolaan limbah yang baik, dan penyediaan air bersih berkontribusi dalam menciptakan lingkungan yang layak huni. Dalam skala yang lebih besar, penerapan teknologi dalam konsep *smart environment* atau *smart city* memungkinkan pengelolaan lingkungan yang lebih terintegrasi dan efisien. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa integrasi teknologi digital dalam pengelolaan lingkungan dapat meningkatkan kualitas hidup masyarakat melalui pengurangan paparan risiko dan peningkatan akses terhadap layanan dasar (Urrutia et al., 2023).

Tabel 1.4 Peran Teknologi dalam Kesehatan Lingkungan

Peran	Bentuk Teknologi	Dampak
Pengendalian Risiko	Monitoring IoT, IPAL, filter udara	Mengurangi pencemaran
Pencegahan Penyakit	Air bersih, sanitasi, pengendalian vektor	Menurunkan angka penyakit
Peningkatan Kualitas Hidup	Smart environment, pengelolaan limbah	Lingkungan lebih sehat & nyaman

Daftar Pustaka

- Bachri, S., Nugroho, A., & Prasetyo, B. (2023). Smart environmental monitoring system berbasis IoT dalam pengelolaan kualitas air dan limbah domestik. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 21(2), 115–126.
- Friis, R. H. (2012). *Essentials of Environmental Health*. Jones & Bartlett.
- Kementerian Kesehatan RI. (2017). *Pedoman Kesehatan Lingkungan*.
- Lin, Y., Zhang, X., Li, H., & Chen, J. (2023). Resource recovery from wastewater: A sustainable approach for environmental management. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 11, 1150044. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2023.1150044>
- Maurya, P. K., Singh, R., & Kumar, A. (2023). Advances in air pollution control using biological and phytoremediation approaches. *Environmental Technology & Innovation*, 31, 103200. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103200>
- Mihelcic, J. R., & Zimmerman, J. B. (2014). *Environmental Engineering: Fundamentals, Sustainability, Design*. Wiley.
- Prüss-Ustün, A., Wolf, J., Corvalán, C., Bos, R., & Neira, M. (2023). Preventing disease through healthy environments: Updated evidence. *The Lancet Planetary Health*. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(23\)00012-7](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(23)00012-7)
- Prüss-Ustün, A., et al. (2016). *Preventing Disease Through Healthy Environments*. World Health Organization.
- Rogers, E. M. (2003). *Diffusion of Innovations*. Free Press.
- Tchobanoglous, G., et al. (2014). *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery*. McGraw-Hill.
- Urrutia, J., Gómez, M., & Sánchez, D. (2023). Air purification technologies for healthcare environments: A review of UVGI and filtration systems. *Journal of*

Environmental Health Science and Engineering, 21(1), 45–58.

Van de Walle, J., Nguyen, T. T., & Verstraete, W. (2023). Greywater reuse and sustainable urban water management systems. *Environmental Science and Ecotechnology*, 16, 100289. <https://doi.org/10.1016/j.es.2023.100289>

World Health Organization. (2022). *Environmental Health*.

World Health Organization. (2023). Environmental health. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/environmental-health>

Profil Penulis



Jordan Syah Gustav S.ST., M.Tr.T.

Penulis di lahirkan di Madiun pada tanggal 19 Agustus 1996 Ketertarikan penulis terhadap Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) dimulai pada tahun 2014 silam. Hal tersebut membuat penulis memilih untuk masuk ke Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya dengan memilih Jurusan Teknik Keselamatan dan Kesehatan Kerja dan berhasil lulus pada tahun 2018. Penulis kemudian melanjutkan pendidikan studi S2 di prodi Teknik Keselamatan dan Risiko pada tahun 2019. Dua tahun kemudian, penulis menyelesaikan studi S2 di prodi Teknik Keselamatan dan Risiko Program Pasca Sarjana Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya. Saat ini penulis bekerja sebagai dosen tetap di Universitas Sebelas Maret prodi Sarjana Terapan Keselamatan dan Kesehatan Kerja. Penulis pernah Bekerja sebagai HSE Officer di PT. Tatamulia Nusantara Indah – Project Bumiraya City Mall Pontianak, HSE Manager PT. Tanto Group Surabaya (Logistik), dan HSE Supervisor di PT. Charoen Pokphand Indonesia- Plant Surabaya. Penulis juga aktif dalam kegiatan ilmiah dan organisasi keprofesian yaitu APJI. Sehari-harinya bekerja sebagai dosen pengampu mata kuliah Komunikasi K3, K3 Manufaktur, K3 Logistik dan K3 Transportasi. Selain itu penulis juga aktif dalam menulis jurnal serta aktif menulis buku ajar dan book chapter.

Email Penulis : Jordansyahgustav@staff.uns.ac.id

PRINSIP DASAR PEMILIHAN TEKNOLOGI

Ihsan Murdani, S.K.M., M.Kes.
Universitas Teuku Umar

Prinsip Dasar Pemilihan Teknologi

Pemilihan teknologi merupakan tahapan krusial dalam proses perencanaan serta pengelolaan sistem kesehatan lingkungan karena berperan dalam menentukan keberhasilan intervensi lingkungan yang dilakukan. Proses ini tidak hanya berfokus pada aspek teknis semata, tetapi juga mempertimbangkan faktor sosial, ekonomi, lingkungan, serta aspek kelembagaan secara terpadu. Secara konseptual, tujuan utama dari pemilihan teknologi adalah memperoleh alternatif terbaik yang paling sesuai dengan kondisi nyata di lapangan sehingga mampu menghasilkan manfaat yang optimal dan berkelanjutan bagi masyarakat (Febrianti et al., 2023).

Dalam kajian rekayasa lingkungan, prinsip pemilihan teknologi sering dikaitkan dengan konsep *appropriate technology*, yaitu pendekatan yang menekankan penggunaan teknologi yang sesuai dengan kebutuhan, kemampuan, serta karakteristik lokal Masyarakat. Konsep ini menegaskan bahwa teknologi yang dipilih tidak selalu harus yang paling canggih, tetapi lebih kepada teknologi yang tepat guna, mudah dioperasikan, serta efektif dalam konteks penerapannya. Pendekatan ini juga

sejalan dengan prinsip keberlanjutan yang menekankan kesesuaian antara teknologi dan kapasitas lingkungan serta sosial masyarakat agar dapat diterapkan dalam jangka panjang (Hifni et al., 2024).

1. Prinsip Kesesuaian (Appropriateness)

Prinsip kesesuaian menekankan bahwa teknologi yang dipilih harus selaras dengan kondisi lokal agar dapat berfungsi secara efektif dan berkelanjutan. Kesesuaian tersebut mencakup aspek geografis, iklim, budaya masyarakat, tingkat pendidikan, serta kemampuan teknis pengguna. Dalam pendekatan *socio-technical systems theory*, keberhasilan teknologi tidak hanya ditentukan oleh kecanggihan alat, tetapi juga oleh kemampuan teknologi beradaptasi dengan lingkungan sosial tempat teknologi itu diterapkan. Oleh karena itu, teknologi yang dirancang tanpa mempertimbangkan konteks lokal cenderung menghadapi resistensi, tidak digunakan secara optimal, atau bahkan ditinggalkan oleh masyarakat (Stirling et al., 2021).

Teknologi yang terlalu kompleks sering kali sulit dioperasikan di wilayah dengan keterbatasan sumber daya manusia, infrastruktur, maupun akses pemeliharaan. Dalam teori *Technology Acceptance Model (TAM)*, kemudahan penggunaan (*perceived ease of use*) menjadi faktor utama yang memengaruhi penerimaan teknologi oleh pengguna. Jika suatu teknologi dianggap rumit, mahal, atau membutuhkan keahlian khusus, maka tingkat adopsinya akan rendah. Oleh sebab itu, pemilihan teknologi sebaiknya mempertimbangkan kesederhanaan operasional, kemudahan perawatan, dan ketersediaan suku cadang agar teknologi dapat dimanfaatkan secara jangka Panjang (Venkatesh et al., 2023).

Konsep teknologi tepat guna menjadi sangat relevan dalam konteks pembangunan masyarakat, terutama di negara berkembang. Teknologi tepat guna menekankan solusi yang sederhana, hemat biaya, mudah dipelajari, serta memanfaatkan sumber daya lokal. Pandangan ini sejalan dengan konsep *frugal innovation*, yaitu inovasi yang menghasilkan manfaat maksimal dengan sumber daya minimal. Banyak studi menunjukkan bahwa teknologi sederhana namun sesuai kebutuhan masyarakat justru lebih berhasil dibandingkan teknologi modern yang mahal tetapi sulit diterapkan. Dengan demikian, efektivitas teknologi bukan semata diukur dari tingkat kecanggihannya, melainkan dari kemampuannya menyelesaikan masalah nyata masyarakat secara efisien dan berkelanjutan (Venkatesh et al., 2023).

2. Prinsip Efektivitas dan Efisiensi

Efektivitas berkaitan dengan kemampuan suatu teknologi dalam mencapai tujuan yang telah ditetapkan, seperti menurunkan kadar pencemar hingga memenuhi standar baku mutu lingkungan. Dalam perspektif *performance management theory*, efektivitas diukur melalui tingkat keberhasilan output dan outcome dibandingkan target yang direncanakan. Dengan demikian, teknologi dinilai efektif apabila mampu memberikan hasil nyata berupa peningkatan kualitas air, udara, maupun tanah sesuai regulasi yang berlaku. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa efektivitas teknologi lingkungan semakin penting dalam mendukung pembangunan berkelanjutan melalui peningkatan kualitas lingkungan dan pengurangan emisi secara terukur (Glauning et al., 2025).

Sementara itu, efisiensi berkaitan dengan kemampuan teknologi menggunakan sumber daya secara optimal, meliputi energi, biaya, bahan baku, dan waktu operasional. Menurut teori *resource efficiency*, sistem yang efisien mampu menghasilkan output maksimum dengan input minimum tanpa menurunkan kualitas hasil. Prinsip ini sejalan dengan konsep *eco-efficiency* yang menekankan penciptaan nilai ekonomi lebih besar dengan penggunaan sumber daya lebih sedikit serta dampak lingkungan yang lebih rendah. Studi terkini menunjukkan bahwa efisiensi energi dan inovasi hijau memiliki kontribusi signifikan terhadap peningkatan kinerja lingkungan dan produktivitas sektor industri modern (Javed et al., 2024).

Teknologi yang baik harus mampu memberikan hasil maksimal dengan penggunaan sumber daya yang minimal. Oleh karena itu, keseimbangan antara efektivitas dan efisiensi menjadi prinsip utama dalam pemilihan teknologi. Teknologi yang sangat efektif tetapi membutuhkan biaya tinggi dan konsumsi energi besar belum tentu layak diterapkan, demikian pula teknologi yang murah namun gagal mencapai target pengendalian pencemaran. Dalam teori *value engineering*, pilihan terbaik adalah teknologi yang memberikan fungsi tertinggi dengan biaya siklus hidup terendah. Pendekatan ini menekankan bahwa keputusan teknologi harus mempertimbangkan manfaat teknis, biaya operasional, risiko, dan keberlanjutan secara terpadu (Wang et al., 2024).

Oleh sebab itu, evaluasi kinerja teknologi menjadi aspek penting dalam proses pemilihan. Evaluasi dapat dilakukan melalui indikator kuantitatif seperti efisiensi energi, biaya per unit pengolahan, tingkat penurunan polutan, keandalan operasi, serta umur

teknis peralatan. Pendekatan terbaru banyak menggunakan metode *Life Cycle Assessment (LCA)* dan *Data Envelopment Analysis (DEA)* untuk membandingkan performa berbagai alternatif teknologi secara objektif. Melalui evaluasi yang komprehensif, organisasi dapat memilih teknologi yang tidak hanya unggul secara teknis, tetapi juga ekonomis dan berkelanjutan dalam jangka panjang (Zhang et al., 2024).

3. Prinsip Keberlanjutan (Sustainability)

Keberlanjutan merupakan prinsip penting dalam pemilihan teknologi modern karena teknologi yang dipilih harus mampu beroperasi secara efektif dalam jangka panjang tanpa menimbulkan kerusakan lingkungan. Hal ini mencakup penggunaan energi yang efisien, pengurangan limbah, pemanfaatan sumber daya secara bijak, serta kemampuan beradaptasi terhadap perubahan kondisi lingkungan dan iklim. Dalam konsep *sustainable technology*, keberhasilan suatu teknologi tidak hanya diukur dari kinerja saat ini, tetapi juga dari dampaknya terhadap generasi mendatang. Prinsip ini sejalan dengan tujuan *Sustainable Development Goals (SDGs)*, khususnya SDG 3 tentang kesehatan yang baik dan kesejahteraan, SDG 6 tentang air bersih dan sanitasi layak, serta SDG 12 tentang konsumsi dan produksi yang bertanggung jawab. Oleh karena itu, keberlanjutan menjadi dasar utama dalam menentukan teknologi yang ramah lingkungan, efisien, dan bermanfaat bagi masyarakat secara berkelanjutan (Rakhmadani et al., 2024).

4. Prinsip Kelayakan Ekonomi

Kelayakan ekonomi mencakup analisis biaya dan manfaat dari suatu teknologi untuk memastikan

bahwa investasi yang dilakukan memberikan nilai yang optimal. Biaya yang perlu dipertimbangkan tidak hanya terbatas pada biaya investasi awal, tetapi juga biaya operasional, pemeliharaan, konsumsi energi, serta biaya penggantian komponen selama masa penggunaan teknologi. Teknologi yang tampak murah pada tahap awal belum tentu ekonomis dalam jangka panjang apabila memiliki biaya perawatan tinggi atau umur pakai yang pendek. Oleh karena itu, pendekatan *life cycle cost analysis* banyak digunakan dalam evaluasi ekonomi karena mampu menilai seluruh biaya selama siklus hidup teknologi secara lebih komprehensif. Pendekatan ini membantu pengambil keputusan memilih teknologi yang paling efisien, berkelanjutan, dan menguntungkan dalam jangka panjang (Supadma et al., 2025).

5. Prinsip Kemudahan Operasi dan Pemeliharaan

Teknologi yang dipilih harus mudah dioperasikan dan dipelihara oleh pengguna agar dapat dimanfaatkan secara optimal dalam jangka panjang. Sistem yang terlalu rumit, membutuhkan keterampilan khusus, atau sulit dipahami berisiko mengalami kerusakan, kesalahan penggunaan, atau bahkan tidak digunakan secara maksimal. Dalam teori *Technology Acceptance Model (TAM)*, kemudahan penggunaan (*perceived ease of use*) menjadi faktor penting yang memengaruhi penerimaan dan keberhasilan adopsi teknologi. Selain itu, kemudahan perawatan juga sangat penting untuk menjamin keberlanjutan operasional, menekan biaya pemeliharaan, serta memperpanjang umur pakai teknologi. Oleh karena itu, teknologi yang sederhana, andal, dan mudah dirawat cenderung lebih berhasil diterapkan dibandingkan teknologi yang kompleks namun sulit dikelola (Nirsal et al., 2025).

6. Prinsip Ketersediaan Sumber Daya

Pemilihan teknologi harus mempertimbangkan ketersediaan sumber daya, seperti lahan, energi, bahan baku, air, serta tenaga kerja yang dibutuhkan dalam proses operasional. Teknologi yang memerlukan sumber daya langka, mahal, atau sulit diakses cenderung menghadapi kendala implementasi dan berisiko tidak berjalan secara efektif maupun berkelanjutan. Dalam perspektif *resource-based approach*, keberhasilan penerapan teknologi sangat dipengaruhi oleh kesesuaian antara kebutuhan teknologi dengan kapasitas sumber daya yang tersedia. Oleh karena itu, teknologi yang dipilih sebaiknya sesuai dengan kondisi lokal agar mudah dioperasikan, efisien, dan memberikan manfaat optimal bagi pengguna. Ketersediaan sumber daya menjadi faktor penting dalam memastikan kelayakan teknis dan ekonomi suatu teknologi (Kurniawan et al., 2022).

7. Prinsip Regulasi dan Standar

Setiap teknologi harus memenuhi regulasi dan standar yang berlaku, baik pada tingkat nasional maupun internasional, terutama yang berkaitan dengan kualitas lingkungan, keselamatan kerja, dan kesehatan masyarakat. Kepatuhan terhadap standar tersebut menjadi syarat utama agar teknologi dapat diterapkan secara aman, efektif, dan sesuai hukum yang berlaku. Dalam bidang kesehatan lingkungan, penerapan teknologi yang tidak memenuhi regulasi berpotensi menimbulkan risiko pencemaran, gangguan kesehatan, serta sanksi administratif maupun hukum. Oleh karena itu, kepatuhan regulasi merupakan unsur penting dalam menjamin mutu layanan, perlindungan masyarakat, dan keberlanjutan operasional teknologi (WHO 2024).

Kriteria Pemilihan Teknologi (Pendekatan Multidimensi)

Pemilihan teknologi tidak dapat didasarkan hanya pada satu aspek semata, melainkan harus mempertimbangkan berbagai dimensi secara terpadu agar keputusan yang diambil lebih efektif, efisien, dan berkelanjutan. Dalam teori *systems approach*, suatu teknologi dipandang sebagai bagian dari sistem yang saling berhubungan dengan aspek teknis, sosial, ekonomi, lingkungan, dan kelembagaan. Oleh karena itu, keberhasilan penerapan teknologi sangat ditentukan oleh kemampuan pengambil keputusan dalam menilai keterkaitan antar berbagai faktor tersebut secara menyeluruh. Pendekatan terpadu ini menjadi semakin relevan pada era pembangunan berkelanjutan yang menuntut keseimbangan antara manfaat ekonomi, perlindungan lingkungan, dan kesejahteraan sosial (Stermann, 2022).

Kriteria teknis meliputi kinerja, keandalan, efisiensi, serta fleksibilitas teknologi dalam menyesuaikan diri terhadap perubahan kebutuhan operasional. Dalam perspektif *technology performance theory*, teknologi yang baik adalah teknologi yang mampu bekerja secara konsisten, mudah dipelihara, dan memiliki kapasitas adaptasi terhadap perubahan kondisi lapangan. Fleksibilitas juga penting terutama pada sistem modern yang menghadapi dinamika kebutuhan pengguna dan perkembangan inovasi yang cepat (Schilling, 2022).

Kriteria lingkungan mencakup dampak teknologi terhadap ekosistem, penggunaan sumber daya alam, emisi, limbah, serta potensi pencemaran sekunder. Pendekatan *Life Cycle Thinking* menekankan bahwa penilaian lingkungan tidak hanya dilakukan saat teknologi beroperasi, tetapi juga sejak tahap produksi, penggunaan, hingga pembuangan akhir. Teknologi yang ramah lingkungan adalah teknologi yang mampu

meminimalkan jejak karbon, mengurangi limbah, dan mendukung ekonomi sirkular. Konsep ini menjadi fokus utama dalam kebijakan hijau global saat ini (UNEP, 2022).

Kriteria sosial berkaitan dengan tingkat penerimaan masyarakat, perubahan perilaku, dampak terhadap kualitas hidup, serta kesesuaian dengan nilai budaya lokal. Dalam teori *Technology Acceptance Model (TAM)* dan *Diffusion of Innovation Theory*, adopsi teknologi sangat dipengaruhi oleh persepsi kemudahan penggunaan, manfaat yang dirasakan, serta pengaruh sosial di lingkungan pengguna. Oleh sebab itu, teknologi yang unggul secara teknis belum tentu berhasil apabila tidak diterima oleh masyarakat atau bertentangan dengan kebiasaan local (Venkatesh et al., 2023).

Kriteria ekonomi mencakup biaya investasi awal, biaya operasional, biaya pemeliharaan, serta manfaat ekonomi jangka panjang yang dihasilkan. Dalam teori *cost-benefit analysis*, suatu teknologi dinilai layak apabila manfaat total yang diperoleh lebih besar daripada seluruh biaya selama siklus hidup teknologi. Saat ini, banyak organisasi juga menggunakan pendekatan *life cycle costing* untuk memastikan bahwa teknologi yang dipilih tidak hanya murah di awal, tetapi juga ekonomis dalam jangka Panjang (Woodward, 2023).

Kriteria institusional meliputi kapasitas lembaga pelaksana, kualitas sumber daya manusia, sistem tata kelola, serta dukungan regulasi dan kebijakan pemerintah. Menurut teori *institutional capacity*, teknologi akan lebih berhasil diterapkan apabila didukung oleh organisasi yang kuat, koordinasi antarinstansi yang baik, serta kebijakan yang konsisten. Tanpa dukungan kelembagaan, teknologi sering mengalami hambatan implementasi meskipun secara teknis sangat baik (OECD, 2024).

Pendekatan multidimensi ini banyak digunakan dalam metode *Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA)* untuk membantu proses pengambilan keputusan yang lebih objektif, transparan, dan sistematis. MCDA memungkinkan berbagai alternatif teknologi dibandingkan berdasarkan sejumlah kriteria sekaligus dengan pembobotan tertentu sesuai prioritas pengguna. Metode ini sangat relevan dalam pemilihan teknologi lingkungan, infrastruktur, energi, dan kesehatan masyarakat karena mampu mengintegrasikan data kuantitatif maupun pertimbangan kualitatif secara bersamaan (Triantaphyllou, 2023).

Pendekatan Modern dalam Pemilihan Teknologi

Pendekatan modern dalam pemilihan teknologi merupakan proses pengambilan keputusan yang dilakukan secara sistematis dengan mempertimbangkan aspek teknis, ekonomi, lingkungan, sosial, dan kelembagaan secara terpadu. Teknologi tidak lagi dipilih hanya berdasarkan harga murah atau tingkat kecanggihan, tetapi juga berdasarkan efektivitas, efisiensi, keberlanjutan, serta kesesuaiannya dengan kebutuhan pengguna dan kondisi lokal. Dalam praktiknya, metode seperti *Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA)*, *Cost-Benefit Analysis (CBA)*, dan *Life Cycle Assessment (LCA)* banyak digunakan untuk membandingkan berbagai alternatif teknologi secara objektif. Dengan pendekatan ini, teknologi yang dipilih diharapkan mampu memberikan manfaat maksimal, mudah diterapkan, ramah lingkungan, dan mendukung pembangunan jangka Panjang (Sudarmaji, et al., 2025).

1. Pendekatan Berbasis Risiko (Risk-Based Approach)

Pendekatan ini menekankan identifikasi, penilaian, dan pengendalian risiko yang dapat memengaruhi kesehatan manusia akibat paparan bahaya fisik,

kimia, biologis, maupun lingkungan. Dalam kerangka *risk-based approach*, teknologi dipilih berdasarkan kemampuannya menurunkan tingkat risiko secara signifikan, baik melalui pencegahan paparan, pengurangan bahaya, maupun peningkatan keamanan operasional. Pendekatan ini banyak digunakan dalam bidang kesehatan lingkungan, sanitasi, air minum, dan keselamatan kerja karena membantu memastikan bahwa intervensi teknologi memberikan perlindungan yang nyata bagi masyarakat. Oleh karena itu, teknologi yang efektif adalah teknologi yang mampu mengendalikan risiko secara terukur, berkelanjutan, dan sesuai standar kesehatan yang berlaku (Harnawati, R. A, 2024).

2. Pendekatan Smart Technology

Perkembangan teknologi digital memungkinkan penggunaan sensor cerdas dan sistem berbasis *Internet of Things* (IoT) untuk memantau kualitas lingkungan secara *real-time*, seperti kualitas udara, suhu, kelembapan, tingkat kebisingan, serta kualitas air. Melalui jaringan sensor yang saling terhubung, data dapat dikumpulkan, dikirim, dan dianalisis secara otomatis sehingga meningkatkan akurasi, kecepatan respons, dan efisiensi pengambilan keputusan. Dalam konsep *smart environmental monitoring*, teknologi IoT membantu pemerintah dan organisasi mendeteksi pencemaran lebih dini, merespons kejadian darurat dengan cepat, serta mendukung kebijakan berbasis data. Oleh karena itu, penerapan sistem digital ini menjadi bagian penting dalam pengelolaan lingkungan modern yang adaptif dan berkelanjutan (Putra, 2023).

3. Pendekatan Circular Economy

Pendekatan ini menekankan pada pemanfaatan kembali sumber daya melalui prinsip ekonomi sirkular, seperti daur ulang air limbah, pemulihan material, dan pengolahan sampah menjadi energi. Konsep tersebut bertujuan untuk mengurangi jumlah limbah yang dibuang ke lingkungan, memperpanjang siklus penggunaan sumber daya, serta meningkatkan efisiensi pemanfaatan bahan baku dan energi. Dalam perspektif pembangunan berkelanjutan, penerapan *circular economy* mampu menekan eksploitasi sumber daya alam, mengurangi emisi, serta menciptakan nilai ekonomi baru dari limbah yang sebelumnya tidak termanfaatkan. Oleh karena itu, pendekatan ini semakin banyak diterapkan pada sektor pengelolaan air, persampahan, industri, dan kesehatan lingkungan modern (Maulidiah, et al., 2025).

4. Pendekatan Climate-Resilient Technology

Teknologi yang dipilih harus mampu beradaptasi terhadap perubahan iklim, seperti banjir, kekeringan, kenaikan suhu, dan berbagai bencana alam lainnya. Kemampuan adaptasi ini penting agar sistem tetap berfungsi secara efektif dalam kondisi lingkungan yang berubah dan risiko bencana yang semakin meningkat. Dalam konteks pembangunan berkelanjutan, teknologi yang tangguh terhadap iklim (*climate-resilient technology*) dinilai mampu mengurangi kerentanan masyarakat, menjaga keberlangsungan layanan dasar, serta meningkatkan kapasitas mitigasi dan adaptasi terhadap dampak perubahan iklim. Oleh karena itu, pendekatan ini menjadi semakin penting dalam menghadapi tantangan global saat ini, terutama pada sektor air bersih, sanitasi, energi, dan kesehatan lingkungan (Agustina et al., 2023).

Contoh Aplikasi Pemilihan Teknologi

Dalam praktiknya, pemilihan teknologi diterapkan pada berbagai bidang kesehatan lingkungan, seperti penyediaan air bersih, pengolahan air limbah, dan sistem sanitasi. Pada penyediaan air bersih, teknologi yang umum digunakan meliputi filtrasi, desinfeksi, dan membran untuk menghasilkan air yang aman dikonsumsi. Sementara itu, pada pengolahan air limbah digunakan metode biologis, kimia, atau fisik sesuai karakteristik limbah agar kualitas buangan memenuhi baku mutu lingkungan. Pemilihan teknologi air dan sanitasi harus mempertimbangkan keamanan, efektivitas, serta kemudahan operasional agar manfaatnya dapat dirasakan secara optimal (WHO, 2022).

Pada sektor sanitasi, teknologi seperti *septic tank* dan instalasi pengolahan air limbah (IPAL) komunal banyak digunakan sesuai kondisi wilayah dan jumlah penduduk. Daerah padat penduduk cenderung membutuhkan sistem komunal, sedangkan wilayah pedesaan lebih sesuai menggunakan sistem individual. Pemilihan teknologi harus mempertimbangkan kondisi lokal, kemampuan pembiayaan, penerimaan masyarakat, serta kapasitas pengelola. Hal ini sejalan dengan teori *appropriate technology* yang menekankan bahwa teknologi akan berhasil apabila sesuai dengan kebutuhan masyarakat dan kondisi setempat (UNICEF, 2023).

Kerangka Pengambilan Keputusan

Proses pemilihan teknologi dilakukan melalui tahapan yang sistematis agar keputusan yang diambil tepat sasaran, efisien, dan berkelanjutan. Tahap awal dimulai dengan identifikasi masalah, yaitu mengenali kebutuhan, sumber permasalahan, dan tujuan yang ingin dicapai. Setelah itu, dilakukan penentuan beberapa alternatif teknologi yang dapat diterapkan sesuai kondisi lapangan.

Menurut teori *problem solving approach*, pemahaman masalah yang tepat akan menentukan keberhasilan solusi yang dipilih, sedangkan teori *innovation diffusion* menjelaskan bahwa teknologi yang sesuai kebutuhan pengguna lebih mudah diterima dan diadopsi Masyarakat (Jauhari et al, 2020).

Tahap selanjutnya adalah evaluasi alternatif teknologi berdasarkan kriteria teknis, ekonomi, sosial, lingkungan, dan kelembagaan. Pendekatan yang sering digunakan adalah *Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA)* karena mampu membandingkan beberapa pilihan secara objektif. Berdasarkan hasil evaluasi tersebut, dipilih teknologi terbaik, yaitu teknologi yang paling efektif, efisien, terjangkau, dan sesuai kondisi lokal. Dalam teori *appropriate technology*, keberhasilan teknologi ditentukan oleh kesesuaiannya dengan kebutuhan masyarakat serta kemampuan memberikan manfaat jangka panjang (Belton & Stewart, 2022; Schumacher, 2021).

Daftar Pustaka

- Agustina, N. A., Prasita, V. D., Kusuma, A., & Rosana, N. (2023). Pemanfaatan sumberdaya lahan pesisir berbasis daya dukung lingkungan dalam menghadapi perubahan iklim global.
- Belton, V., & Stewart, T. (2022). *Multiple criteria decision analysis: An integrated approach*. Springer.
- Boardman, A. E., et al. (2022). *Cost-benefit analysis: Concepts and practice*. Cambridge University Press.
- Drucker, P. F. (2021). *Management challenges for the 21st century*. Harper Business.
- Elkington, J. (2022). *Green swans: The coming boom in regenerative capitalism*. Fast Company Press.
- F. P. E., Mahmud, M. A., & Maqom, I. S. (2023). Pengembangan sistem pemantauan lingkungan berbasis Internet of Things (IoT) di kampus. *Digital Transform*, 3(2), 996–1001.
- Febrianti, N., dkk. (2023). Pengelolaan lingkungan berbasis keberlanjutan dalam rekayasa teknologi. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 24(2), xx–xx.
- Fukuyama, H., & Tan, Y. (2023). Environmental protection and economic development: Research progress of eco-efficiency. *Sustainability*.
- Glauning, I., & van Husen, C. (2025). Eco-efficiency indicators: A literature review and analysis. *Sustainability*.
- Harnawati, R. A. (2024). *Manajemen risiko dengan pendekatan keselamatan, kesehatan, keamanan, dan lingkungan (K3L)*. Penerbit Nem.
- Hasid, H. Z., Se, S. U., Akhmad Noor, S. E., Se, M., & Kurniawan, E. (2022). *Ekonomi sumber daya alam dalam lensa pembangunan ekonomi*. Cipta Media Nusantara.
- Hifni, M., Adhitya, A., & Kurnia, T. (2024). Pendampingan teknologi tepat guna dalam pengelolaan lingkungan masyarakat. *Jurnal Pengabdian Masyarakat dan Riset*

- Pendidikan*.
<https://doi.org/10.31004/jerkin.v4i1.2320>
- ISO 14001. (2015). *Environmental management systems—Requirements with guidance for use*. International Organization for Standardization.
- ISO 14040. (2022). *Environmental management—Life cycle assessment: Principles and framework*. International Organization for Standardization.
- Javed, A., et al. (2024). Accessing the efficacy of green growth, energy efficiency, and green innovation for environmental performance. *Quality & Quantity*.
- Jurnal Teknologi Lingkungan. (2023). Integrasi aspek teknis, sosial, ekonomi, dan kelembagaan dalam pengelolaan lingkungan. *Jurnal Teknologi Lingkungan*.
- Kriswandana, F., et al. (2023). Penerapan teknologi tepat guna dalam penyediaan air bersih berbasis masyarakat. *Ahmar Metakarya: Jurnal Pengabdian Masyarakat*, 3(2), xx-xx.
<https://doi.org/10.53770/amjpm.v3i2.324>
- Mahendra, G. S., Judijanto, L., Tahir, U., Nugraha, R., Dwipayana, A. D., Nuryanneti, I., ... & Rakhmadani, D. P. (2024). *Green technology: Panduan teknologi ramah lingkungan*. PT Sonpedia Publishing Indonesia.
- Morales-Piñero, J., et al. (2024). Technological development and eco-efficiency: Drivers of total factor productivity in OECD countries. *Problems and Perspectives in Management*.
- North, D. C. (2021). *Institutions, institutional change and economic performance*. Cambridge University Press.
- OECD. (2024). *Public governance outlook 2024*. OECD Publishing.
- Ridha, M. A., & Hutagalung, C. A. (2024). Inovasi teknologi dalam pengelolaan air bersih untuk kesehatan lingkungan. *Majority Science Journal*, 3(2), xx-xx.
- Rogers, E. M. (2021). *Diffusion of innovations*. Free Press.

- Sari, U., Rusdiantini, S., Novianti, S., & Maulidiah, M. (2025). Ekonomi sirkular dalam industri manufaktur: Strategi untuk mengurangi limbah dan meningkatkan efisiensi. *Jurnal Ekonomi & Bisnis*, 13(2), 230–239.
- Schilling, M. A. (2022). *Strategic management of technological innovation*. McGraw-Hill.
- Schumacher, E. F. (2021). *Small is beautiful: Economics as if people mattered*. HarperCollins.
- Sterman, J. D. (2021). *Business dynamics: Systems thinking and modeling for a complex world*. McGraw-Hill.
- Sudarmaji, E., Azizah, W., & Herlan, H. (2025). *Adopsi teknologi dan inovasi bisnis hijau: Pendekatan soft system methodology dalam optimalisasi konservasi energi efisiensi*. CV Eureka Media Aksara.
- Supadma, H. P. (2025). *Studi kelayakan bisnis*. Mega Press Nusantara.
- Suratno, T., Selviana, R., Sulistyowati, S., Putra, B. P. P., Alimin, A., Mukaromah, S., ... & Nirsal, N. (2025). *Buku ajar pengantar teknologi informasi*. PT Green Pustaka Indonesia.
- Tidd, J., & Bessant, J. (2023). *Managing innovation*. Wiley.
- Triantaphyllou, E. (2023). *Multi-criteria decision making methods*. Springer.
- UNEP. (2023). *Global environment outlook report*. United Nations Environment Programme.
- UNICEF. (2023). *Sanitation and hygiene progress report*. UNICEF.
- Venkatesh, V., et al. (2023). Extending the Technology Acceptance Model in modern digital systems. *Information Systems Research*.
- Wang, X., Zhang, D., & Gu, J. (2024). Study on the evaluation of eco-economic efficiency in the Yangtze River Economic Zone. *International Journal of Current Science Research and Review*.

- WHO. (2022). *Guidelines for drinking-water quality*. World Health Organization.
- Woodward, D. (2023). *Life cycle costing in practice*. Routledge.
- Zhang, Y., Zhang, J., & Liu, Y. (2024). Does green finance promote the improvement of regional eco-efficiency? *Frontiers in Environmental Science*.
- Zhang, et al. (2024). Technology adoption and assessment of eco-efficiency in water management. *Environmental Impact Assessment Review*.

Profil Penulis



Ihsan Murdani, S.K.M, M.Kes

Penulis di lahirkan di Aceh Selatan pada tanggal 02 Juli 1989. Penulis melanjutkan pendidikan ke Perguruan Tinggi dan berhasil menyelesaikan studi S1 di Universitas Muhammadiyah Aceh pada tahun 2012. Pada tahun 2016, penulis menyelesaikan studi S2 Universitas Sumatera Utara Fakultas Kesehatan Masyarakat . Saat ini penulis bekerja sebagai dosen tetap di Program Studi S1 Keselamatan dan Kesehatan Kerja Fakultas Ilmu Kesehatan Universitas Teuku Umar. Penulis pernah menjabat sebagai Lembaga Penjaminan Mutu di Fakultas Ilmu Kesehatan Prodi Ilmu Gizi Universitas Teuku Umar. Sehari-harinya bekerja sebagai dosen pengampu mata kuliah Dasar Kesehatan Lingkungan dan Kesehatan Lingkungan Pemukiman dan perkotaan Selain itu penulis juga aktif dalam menulis jurnal serta aktif menulis buku ajar dan *book chapter*.

Email Penulis : ihsanmurdani@utu.ac.id

TEKNOLOGI PENYEDIAAN AIR BERSIH

Dr. Sandy Novryanto Sakati, SKM., M.Kes.
Universitas Tompotika Luwuk

Pendahuluan

Air bersih merupakan salah satu kebutuhan dasar manusia yang memiliki peran vital dalam menunjang kehidupan, kesehatan, serta pembangunan sosial dan ekonomi. Ketersediaan air bersih yang memadai tidak hanya berkaitan dengan pemenuhan kebutuhan domestik seperti minum, memasak, dan sanitasi, tetapi juga menjadi faktor kunci dalam menjaga kualitas lingkungan dan produktivitas masyarakat (World Health Organization, 2022). Oleh karena itu, penyediaan air bersih yang aman, terjangkau, dan berkelanjutan menjadi isu strategis di berbagai negara, termasuk Indonesia.

Meskipun air merupakan sumber daya alam yang melimpah, distribusi dan kualitasnya sering kali tidak merata. Banyak wilayah, terutama di negara berkembang, masih menghadapi keterbatasan akses terhadap air bersih yang layak. Berdasarkan laporan WHO dan UNICEF, miliaran orang di dunia masih belum memiliki akses terhadap layanan air minum yang aman (WHO & UNICEF, 2023). Permasalahan ini diperparah oleh meningkatnya jumlah penduduk, urbanisasi yang pesat, serta perubahan iklim yang memengaruhi ketersediaan

sumber air (United Nations, 2021). Selain itu, aktivitas manusia seperti pencemaran industri, limbah domestik, dan penggunaan bahan kimia dalam pertanian turut menurunkan kualitas air, sehingga diperlukan teknologi pengolahan yang efektif untuk menjamin keamanan air yang digunakan (Shannon et al., 2008).

Di Indonesia, tantangan penyediaan air bersih sangat beragam, mulai dari keterbatasan infrastruktur di daerah terpencil hingga kualitas sumber air yang semakin menurun di wilayah perkotaan. Ketimpangan akses antara wilayah perkotaan dan pedesaan juga masih menjadi permasalahan utama. Data nasional menunjukkan bahwa akses terhadap air minum layak masih belum merata di seluruh wilayah Indonesia (Badan Pusat Statistik, 2023). Dalam beberapa kasus, masyarakat harus mengandalkan sumber air yang tidak terlindungi atau membeli air dengan harga yang relatif mahal. Kondisi ini menunjukkan bahwa penyediaan air bersih tidak hanya menjadi persoalan teknis, tetapi juga berkaitan erat dengan aspek sosial, ekonomi, dan kebijakan.

Seiring dengan perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi, berbagai inovasi dalam pengolahan dan distribusi air bersih telah dikembangkan untuk mengatasi tantangan tersebut. Teknologi konvensional seperti koagulasi, filtrasi, dan disinfeksi terus disempurnakan, sementara teknologi modern seperti membran, desalinasi, dan sistem berbasis digital mulai banyak diterapkan (Shannon et al., 2008; Elimelech & Phillip, 2011). Selain itu, pendekatan berbasis alam juga semakin mendapat perhatian karena dinilai lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan (UNESCO, 2020).

Bab ini bertujuan untuk membahas secara komprehensif mengenai teknologi penyediaan air bersih, mulai dari konsep dasar, tantangan yang dihadapi, hingga berbagai

teknologi yang digunakan dalam pengolahan dan distribusi air. Selain itu, bab ini juga mengulas inovasi terkini serta studi kasus implementasi di berbagai wilayah sebagai upaya memberikan gambaran menyeluruh tentang praktik terbaik dalam penyediaan air bersih. Dengan pemahaman yang lebih baik terhadap teknologi dan sistem yang ada, diharapkan dapat dirumuskan solusi yang efektif dan berkelanjutan dalam menjamin ketersediaan air bersih bagi seluruh masyarakat.

Konsep Dasar Air Bersih

1. Definisi Air Bersih dan Air Layak Minum

Air bersih adalah air yang dapat digunakan untuk keperluan sehari-hari seperti mandi, mencuci, dan memasak tanpa menimbulkan gangguan kesehatan. Sementara itu, air layak minum adalah air yang aman untuk dikonsumsi langsung oleh manusia tanpa risiko kesehatan yang signifikan (WHO, 2022). Perbedaan utama antara keduanya terletak pada tingkat kualitas dan standar keamanan yang harus dipenuhi. Menurut WHO, air minum yang aman harus bebas dari mikroorganisme patogen, bahan kimia berbahaya, serta memiliki karakteristik fisik yang dapat diterima seperti tidak berwarna, tidak berbau, dan tidak berasa. Standar ini menjadi acuan global dalam menentukan kualitas air yang aman untuk dikonsumsi manusia.

2. Parameter Kualitas Air

Kualitas air bersih ditentukan berdasarkan tiga parameter utama, yaitu fisik, kimia, dan biologis.

a. Parameter Fisik

Parameter fisik mencakup sifat yang dapat diamati secara langsung, seperti:

- 1) Warna
- 2) Kekeruhan (turbidity)
- 3) Bau dan rasa
- 4) Suhu

Kekeruhan yang tinggi dapat mengindikasikan adanya partikel tersuspensi yang berpotensi membawa mikroorganisme berbahaya (WHO, 2022).

b. Parameter Kimia

Parameter kimia berkaitan dengan kandungan zat kimia dalam air, antara lain:

- 1) pH
- 2) Kandungan logam berat (Fe, Mn, Pb, Hg)
- 3) Nitrat dan nitrit
- 4) Kesadahan (hardness)

Kehadiran zat kimia tertentu dalam konsentrasi tinggi dapat berdampak buruk terhadap kesehatan manusia, seperti keracunan logam berat atau gangguan sistem organ (Shannon et al., 2008).

c. Parameter Biologis

Parameter biologis berhubungan dengan keberadaan mikroorganisme, seperti:

- 1) Bakteri (misalnya *Escherichia coli*)
- 2) Virus
- 3) Protozoa

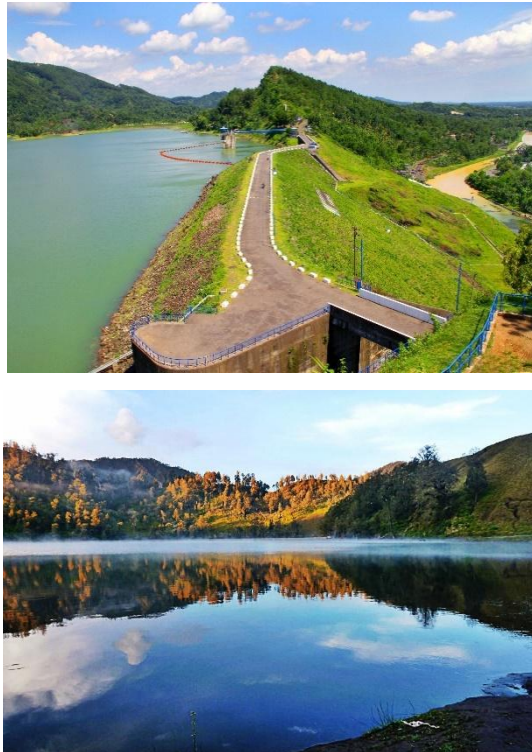
Keberadaan mikroorganisme patogen dalam air merupakan indikator utama pencemaran biologis dan berisiko menyebabkan penyakit seperti diare, kolera, dan tifus (WHO & UNICEF, 2023).

Sumber-Sumber Air Bersih

Air bersih dapat diperoleh dari berbagai sumber, yang masing-masing memiliki karakteristik dan tingkat kualitas yang berbeda.

1. Air Permukaan

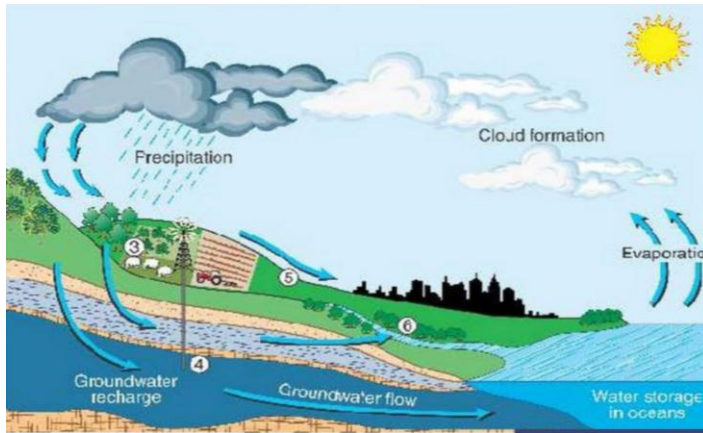
Air permukaan meliputi sungai, danau, dan waduk. Sumber ini relatif mudah diakses, tetapi rentan terhadap pencemaran akibat aktivitas manusia seperti limbah domestik dan industri. Oleh karena itu, air permukaan biasanya memerlukan pengolahan intensif sebelum digunakan sebagai air minum.



Gambar 3.1 Air Permukaan
(Sumber : Direktorat Sumber Daya Air)

2. Air Tanah

Air tanah berasal dari lapisan akuifer di bawah permukaan bumi. Umumnya memiliki kualitas yang lebih baik dibandingkan air permukaan karena telah mengalami proses filtrasi alami. Namun, air tanah dapat mengandung mineral tinggi atau terkontaminasi jika terjadi pencemaran lingkungan.



Gambar 3.2 Air Permukaan
(Sumber : Balai Air Tanah PUPR)

3. Air Hujan

Air hujan merupakan sumber alternatif yang dapat dimanfaatkan terutama di daerah dengan curah hujan tinggi. Teknologi pemanenan air hujan (*rainwater harvesting*) banyak digunakan sebagai solusi di daerah dengan keterbatasan sumber air.

4. Air Laut

Air laut merupakan sumber air yang sangat melimpah, tetapi memerlukan teknologi khusus seperti desalinasi untuk menghilangkan kandungan garam. Teknologi ini umumnya digunakan di wilayah pesisir atau daerah dengan keterbatasan air tawar (Elimelech & Phillip, 2011).

Tantangan dalam Penyediaan Air Bersih

Penyediaan air bersih merupakan salah satu tantangan global yang semakin kompleks seiring dengan perkembangan zaman. Meskipun teknologi pengolahan air terus berkembang, berbagai faktor lingkungan, sosial, dan ekonomi masih menjadi hambatan dalam memastikan akses air bersih yang merata dan berkelanjutan. Tantangan-tantangan ini tidak hanya terjadi di negara berkembang, tetapi juga di negara maju, terutama dalam konteks perubahan iklim dan degradasi lingkungan.

1. Pencemaran Air (Industri, Domestik, dan Pertanian)

Pencemaran air merupakan salah satu tantangan utama dalam penyediaan air bersih. Sumber pencemaran dapat berasal dari berbagai aktivitas manusia, antara lain:

- a. Limbah industri: Mengandung bahan kimia berbahaya seperti logam berat (merkuri, timbal) yang sulit diuraikan dan berbahaya bagi kesehatan.
- b. Limbah domestik: Air limbah rumah tangga yang mengandung deterjen, bahan organik, dan mikroorganisme patogen.
- c. Limbah pertanian: Penggunaan pupuk dan pestisida yang berlebihan dapat mencemari sumber air melalui limpasan (*runoff*).

Pencemaran ini menyebabkan meningkatnya biaya pengolahan air dan menurunkan kualitas sumber air baku. Dalam banyak kasus, sumber air yang tercemar berat bahkan tidak lagi layak untuk diolah menjadi air minum tanpa teknologi canggih.

2. Perubahan Iklim dan Krisis Air

Perubahan iklim memiliki dampak signifikan terhadap ketersediaan air bersih. Perubahan pola curah hujan, peningkatan suhu global, serta frekuensi kejadian ekstrem seperti kekeringan dan banjir memengaruhi siklus hidrologi. Beberapa dampak utama meliputi:

- a. Penurunan debit sumber air saat musim kemarau
- b. Peningkatan risiko pencemaran saat banjir
- c. Ketidakpastian ketersediaan air sepanjang tahun

Krisis air akibat perubahan iklim telah menjadi isu global yang memerlukan pendekatan adaptif dan teknologi yang lebih resilien.

3. Urbanisasi dan Pertumbuhan Penduduk

Pertumbuhan penduduk yang pesat dan urbanisasi meningkatkan tekanan terhadap sistem penyediaan air bersih. Di wilayah perkotaan, peningkatan jumlah penduduk menyebabkan:

- a. Kebutuhan air yang terus meningkat
- b. Eksploitasi sumber air secara berlebihan
- c. Meningkatnya volume limbah yang mencemari air

Di sisi lain, banyak kota berkembang tidak mampu mengimbangi pertumbuhan ini dengan infrastruktur yang memadai, sehingga muncul kawasan permukiman dengan akses air bersih yang terbatas.

4. Infrastruktur yang Terbatas

Keterbatasan infrastruktur menjadi hambatan serius dalam distribusi air bersih. Permasalahan yang sering terjadi meliputi:

- a. Jaringan perpipaan yang tidak merata
- b. Kebocoran pipa yang menyebabkan kehilangan air (*non-revenue water*)
- c. Instalasi pengolahan air yang sudah usang
- d. Keterbatasan kapasitas produksi air bersih

Investasi yang besar dan kebutuhan pemeliharaan rutin menjadi tantangan tersendiri, terutama di negara berkembang.

5. Kesenjangan Akses di Wilayah Terpencil

Kesenjangan akses terhadap air bersih masih menjadi masalah utama, khususnya di wilayah terpencil dan kepulauan. Faktor-faktor yang memengaruhi antara lain:

- a. Letak geografis yang sulit dijangkau
- b. Keterbatasan teknologi dan sumber daya
- c. Minimnya investasi dan perhatian kebijakan

Akibatnya, masyarakat di daerah ini sering mengandalkan sumber air yang tidak terlindungi dan berisiko terhadap kesehatan.

Tantangan dalam penyediaan air bersih bersifat multidimensional, mencakup aspek lingkungan, teknologi, sosial, dan ekonomi. Oleh karena itu, solusi yang diperlukan tidak hanya berupa inovasi teknologi, tetapi juga integrasi kebijakan, peningkatan kapasitas infrastruktur, serta partisipasi masyarakat. Pendekatan yang holistik dan berkelanjutan menjadi kunci dalam mengatasi permasalahan air bersih di masa depan.

Teknologi Pengolahan Air Bersih

Pengolahan air bersih merupakan proses penting untuk mengubah air baku menjadi air yang memenuhi standar

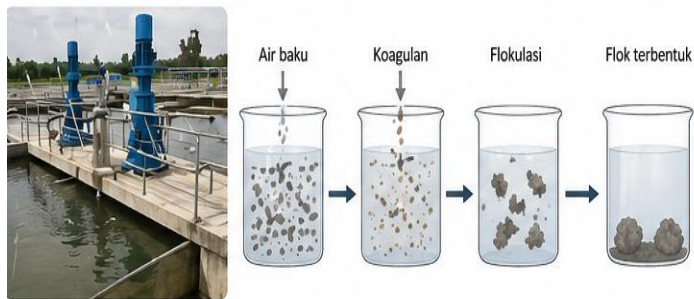
kualitas untuk digunakan atau dikonsumsi. Teknologi yang digunakan sangat beragam, mulai dari metode konvensional hingga teknologi modern dan berbasis alam. Pemilihan teknologi bergantung pada kualitas sumber air, kebutuhan pengguna, serta aspek ekonomi dan lingkungan.

1. Teknologi Konvensional

Teknologi konvensional merupakan metode yang paling umum digunakan dalam instalasi pengolahan air karena relatif sederhana, ekonomis, dan telah terbukti efektif.

a. Koagulasi dan Flokulasi

Koagulasi adalah proses penambahan bahan kimia (koagulan seperti tawas atau alum) untuk menetralkan muatan partikel koloid dalam air. Setelah itu, flokulasi dilakukan untuk menggumpalkan partikel-partikel kecil menjadi flok yang lebih besar sehingga mudah dipisahkan.



Gambar 3.3 Proses Koagulasi dan Flokulasi

Kelebihan: Efektif menghilangkan kekeruhan dan partikel halus, Relatif murah
Keterbatasan: Membutuhkan bahan kimia, Menghasilkan lumpur (*sludge*).

b. Sedimentasi

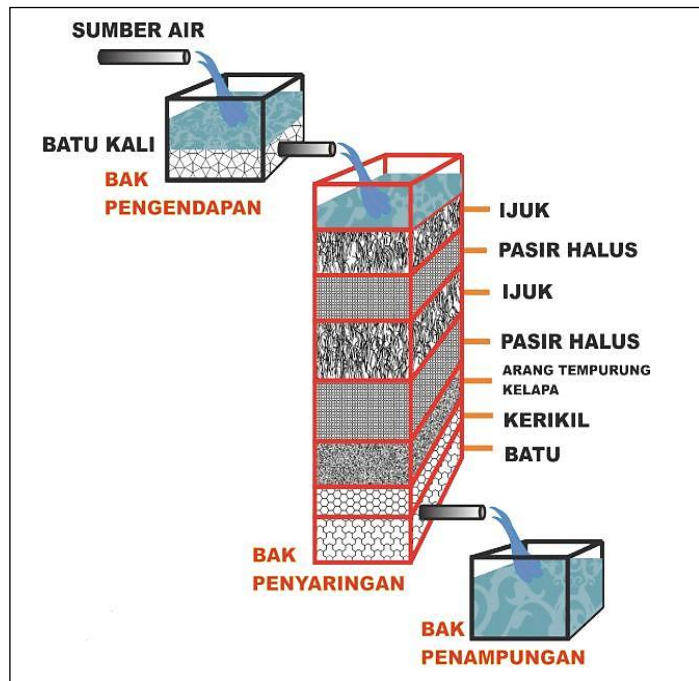
Sedimentasi adalah proses pengendapan partikel padat dalam air akibat gaya gravitasi. Flok yang terbentuk pada tahap sebelumnya akan mengendap di dasar bak. Kelebihan: Proses sederhana dan hemat energi, Efektif untuk partikel besar Keterbatasan: Tidak efektif untuk partikel sangat halus, membutuhkan waktu tinggal (*retention time*)



Gambar 3.4 Proses Sedimentasi Air

c. Filtrasi (Pasir Lambat & Cepat)

Filtrasi bertujuan untuk menyaring partikel yang masih tersisa setelah sedimentasi. Pasir lambat: menggunakan lapisan biologis (*schmutzdecke*) untuk menyaring mikroorganisme. Pasir cepat: menggunakan kecepatan filtrasi tinggi dan memerlukan pencucian balik (*backwash*). Kelebihan: Meningkatkan kejernihan air, Mengurangi mikroorganisme. Keterbatasan: Perawatan rutin diperlukan, Efektivitas tergantung desain.



Gambar 3.5 Proses Sistem Filtrasi

d. Disinfeksi (Klorinasi dan UV)

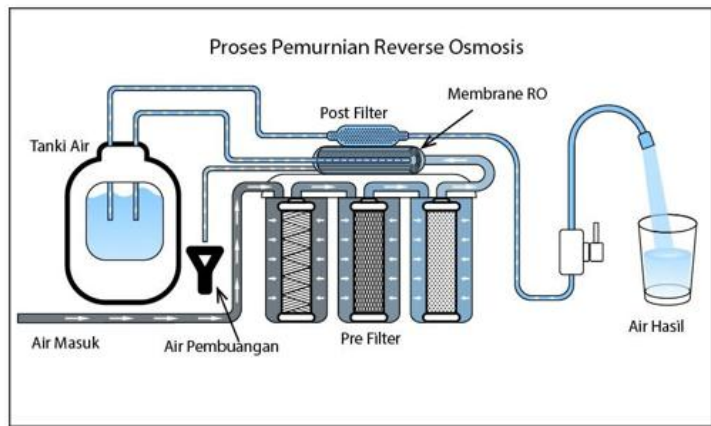
Disinfeksi bertujuan membunuh mikroorganisme patogen dalam air. Klorinasi: menggunakan klorin sebagai desinfektan UV: menggunakan sinar ultraviolet untuk merusak DNA mikroorganisme
Kelebihan: Efektif membunuh patogen, Klorin memberikan efek residual Keterbatasan: Klorin dapat menghasilkan produk samping berbahaya, UV tidak memiliki efek residual

2. Teknologi Modern

Teknologi modern dikembangkan untuk meningkatkan efisiensi dan mampu mengatasi kontaminan yang lebih kompleks.

a. Teknologi Membran (Reverse Osmosis & Ultrafiltrasi)

Teknologi membran menggunakan lapisan semi-permeabel untuk memisahkan kontaminan dari air. Reverse Osmosis (RO): menghilangkan garam, logam berat, dan zat terlarut Ultrafiltrasi (UF): menyaring bakteri dan partikel kecil Kelebihan: Kualitas air sangat tinggi, Efektif untuk berbagai kontaminan Keterbatasan: Biaya tinggi Memerlukan tekanan dan energi besar



Gambar 3.6 Sistem Reverse Osmosis

b. Desalinasi Air Laut

Desalinasi adalah proses menghilangkan garam dari air laut sehingga dapat digunakan sebagai air minum. Kelebihan: Sumber air hampir tidak terbatas, Cocok untuk wilayah pesisir Keterbatasan: Konsumsi energi tinggi, Biaya operasional mahal.

c. Teknologi Ozonisasi

Ozon digunakan sebagai oksidator kuat untuk membunuh mikroorganisme dan menghilangkan

bau serta warna. Kelebihan: Lebih kuat dari klorin, Tidak meninggalkan residu berbahaya Keterbatasan: Biaya tinggi, Tidak memiliki efek residual.

d. Advanced Oxidation Processes (AOP)

AOP menggunakan radikal hidroksil untuk menguraikan polutan organik kompleks yang sulit dihilangkan. Kelebihan: Sangat efektif untuk polutan berbahaya, Menguraikan senyawa kompleks Keterbatasan: Teknologi kompleks, Biaya operasional tinggi

6. Teknologi Berbasis Alam

Teknologi ini mengandalkan proses alami dan ekosistem untuk mengolah air secara berkelanjutan.

a. Constructed Wetlands

Constructed wetlands adalah sistem buatan yang meniru lahan basah alami untuk menyaring dan mengolah air. Kelebihan: Ramah lingkungan, Biaya rendah Keterbatasan: Membutuhkan lahan luas, Proses relatif lambat

b. Biofiltrasi

Biofiltrasi menggunakan mikroorganisme untuk menguraikan kontaminan dalam air. Kelebihan: Efektif untuk bahan organik, Hemat energi Keterbatasan: Sensitif terhadap kondisi lingkungan, Perlu kontrol biologis

c. Sistem Berbasis Ekosistem

Pendekatan ini melibatkan konservasi lingkungan seperti hutan dan daerah aliran sungai (DAS) untuk menjaga kualitas air secara alami. Kelebihan: Berkelanjutan, Menjaga keseimbangan lingkungan Keterbatasan: Membutuhkan waktu lama, Bergantung pada kebijakan dan partisipasi masyarakat.

Teknologi pengolahan air bersih berkembang dari metode konvensional hingga pendekatan modern dan berbasis alam. Setiap teknologi memiliki kelebihan dan keterbatasan, sehingga pemilihan metode harus mempertimbangkan kondisi lokal, kualitas air baku, serta aspek ekonomi dan lingkungan. Integrasi berbagai teknologi sering kali menjadi solusi terbaik untuk menghasilkan sistem penyediaan air bersih yang efektif dan berkelanjutan.

Daftar Pustaka

- Badan Pusat Statistik. (2023). *Statistik air minum Indonesia*. Badan Pusat Statistik.
- Elimelech, M., & Phillip, W. A. (2011). The future of seawater desalination: Energy, technology, and the environment. *Science*, 333(6043), 712–717. <https://doi.org/10.1126/science.1200488>
- Shannon, M. A., Bohn, P. W., Elimelech, M., Georgiadis, J. G., Marinas, B. J., & Mayes, A. M. (2008). Science and technology for water purification in the coming decades. *Nature*, 452(7185), 301–310. <https://doi.org/10.1038/nature06599>
- UNESCO. (2020). *Water and climate change: United Nations world water development report*. UNESCO Publishing.
- United Nations. (2021). *World water development report 2021: Valuing water*. United Nations.
- World Health Organization. (2022). *Guidelines for drinking-water quality* (4th ed.). World Health Organization.
- World Health Organization, & United Nations Children's Fund. (2023). *Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000–2022*. WHO & UNICEF.

Profil Penulis



Dr. Sandy Novryanto Sakati, SKM., M.Kes

Penulis di lahirkan di Luwuk Kabupaten Banggai pada tanggal 03 November 1988 Ketertarikan penulis terhadap ilmu kesehatan lingkungan. Telah menyelesaikan Pendidikan pada program studi strata satu Ilmu Kesehatan Masyarakat Peminatan Kesehatan Lingkungan di perguruan Tinggi Universitas Tompotika Luwuk Banggai (2007-2011) kemudian melanjutkan program strata dua Ilmu Kesehatan Masyarakat Peminatan Kesehatan Lingkungan di Universitas Sam Ratulangi Manado (2013-2015) kemudian menyelesaikan program doktor Ilmu Kesehatan Masyarakat di Universitas Hasanuddin Makassar (2021-2025). Penulis pernah menjabat sebagai Kepala Labkesdas FKM Untika Luwuk, dan sekarang menjabat sebagai sekretaris Program Studi S1 pada FKM Untika Luwuk. Penulis juga aktif dalam kegiatan ilmiah dan organisasi keprofesian yaitu IAKMI, HAKLI, PERSAKMI. Sehari-harinya bekerja sebagai dosen pengampu mata kuliah Dasar Kesehatan Lingkungan, Penyediaan air bersih, Pencemaran Lingkungan, Analisis Kualitas Lingkungan, Pengukuran Kualitas Lingkungan, Pengelolaan Limbah Padat, Cari dan Gas, Analisis risiko kesehatan lingkungan. Selain itu penulis juga aktif dalam menulis jurnal serta aktif menulis buku ajar dan *book chapter*.

Email Penulis : Sandy_novryanto@yahoo.co.id

TEKNOLOGI PENGOLAHAN AIR LIMBAH DOMESTIK DAN INDUSTRI

Dewi Fitria Marlisa, S.T., M.T.
Universitas Malikussaleh

Pendahuluan

Sumber air limbah pada dasarnya berasal dari air buangan aktivitas manusia, baik dari rumah tangga maupun kegiatan industri. Seiring dengan bertambahnya jumlah penduduk dan berkembangnya sektor industri, jumlah air limbah yang dihasilkan juga semakin besar dan semakin kompleks. Air limbah mengandung berbagai macam zat pencemar oleh berbagai zat, seperti bahan kimia, bakteri atau bahan organik sehingga tidak aman lagi digunakan. Jika tidak diolah dengan baik, air limbah dapat mencemari lingkungan sekitar dan mengeluarkan bau busuk, kematian pada ikan hingga dampak buruk pada Kesehatan (Gabriela & Purnomo, 2022).



Gambar 4.1 Ilustrasi Sumber Air Limbah

Pengolahan air limbah tidak hanya bertujuan “membersihkan” air sebelum dibuang, tetapi juga menjadi bagian dari pengelolaan sumber daya (Tchobanoglous, Burton and Stensel, 2003). Artinya, air limbah kini tidak lagi hanya dianggap sebagai buangan, tetapi juga memiliki potensi untuk dimanfaatkan kembali, misalnya melalui proses daur ulang. Pengolahan air limbah juga mendukung pemanfaatan kembali air olahan untuk kebutuhan seperti untuk penyiraman tanaman, irigasi bahkan untuk kegiatan industri dan kegiatan lainnya. Oleh karena itu, diperlukan pengolahan yang tepat agar air limbah aman dibuang ke lingkungan sekaligus dapat dimanfaatkan secara lebih efisien.

Karakteristik Air Limbah

Secara umum, air limbah domestik dan industri memiliki karakteristik yang berbeda, baik dari segi komposisi maupun tingkat kompleksitas pencemarnya. Air limbah domestik cenderung didominasi oleh bahan organik yang mudah terurai (*biodegradable*), seperti sisa makanan, sabun, dan limbah fekal, dengan variasi kualitas yang relatif lebih stabil.

Sedangkan air limbah industri memiliki karakteristik yang jauh lebih beragam karena dipengaruhi oleh jenis proses produksi, sehingga dapat mengandung senyawa kimia kompleks, zat beracun, maupun logam berat. Perbedaan ini menunjukkan bahwa limbah industri umumnya memiliki tingkat pencemaran yang lebih tinggi dan membutuhkan perhatian khusus dalam pengelolaannya.

Perbedaan karakteristik tersebut menjadi dasar utama dalam menentukan pendekatan pengolahan yang tepat, di mana limbah domestik umumnya lebih mudah diolah dengan proses biologis, sedangkan limbah industri seringkali memerlukan kombinasi proses fisik, kimia, dan biologis untuk mencapai hasil yang optimal. Pemahaman terhadap perbedaan karakteristik ini sangat penting sebagai dasar dalam perencanaan sistem pengolahan air limbah yang efektif dan berkelanjutan, dan pada bagian berikutnya akan dijelaskan lebih rinci perbedaan karakteristik masing-masing jenis air limbah tersebut.

1. Air Limbah Domestik

Air limbah domestik berasal dari kegiatan sehari-hari seperti mandi, mencuci, dan penggunaan toilet. Umumnya, limbah ini mengandung bahan organik dari sisa makanan, sabun, serta limbah manusia. Beberapa parameter yang biasa digunakan untuk menggambarkan kualitasnya adalah:

- a. BOD (*Biochemical Oxygen Demand*) yang menunjukkan seberapa banyak oksigen dibutuhkan untuk menguraikan bahan organik
- b. COD (*Chemical Oxygen Demand*) yang menggambarkan total bahan pencemar organik
- c. TSS (*Total Suspended Solids*) yaitu jumlah padatan tersuspensi
- d. Nutrien seperti nitrogen dan fosfor

Menurut berbagai studi, air limbah domestik cenderung lebih stabil dan tidak terlalu bervariasi, sehingga metode pengolahannya relatif lebih mudah dibandingkan limbah industri.

2. Air Limbah Industri

Berbeda dengan limbah domestik, air limbah industri sangat tergantung pada jenis kegiatan industrinya. Misalnya, industri makanan menghasilkan limbah yang kaya bahan organik, sedangkan industri kimia atau logam bisa menghasilkan limbah yang mengandung zat beracun atau logam berat. Beberapa karakter umum limbah industri:

- a. Kandungan pencemar bisa sangat tinggi
- b. Komposisinya kompleks
- c. Bisa bersifat toksik
- d. Debit dan kualitasnya sering berubah-ubah

Banyak penelitian menunjukkan bahwa karena sifatnya yang kompleks, limbah industri biasanya tidak bisa diolah dengan satu metode saja, tetapi perlu kombinasi beberapa proses.

Teknologi Pengolahan Air Limbah Domestik

Pengolahan air limbah domestik berfokus pada pengurangan bahan organik dan mikroorganisme berbahaya. Pengolahan dilakukan secara bertahap yang terdiri dari pengolahan pendahuluan (*preliminary*), pengolahan primer, pengolahan sekunder dan pengolahan tersier.



Gambar 4.2 Alternatif Tahapan Pengolahan Air Limbah Domestik

Pengolahan pendahuluan adalah tahap awal dalam sistem pengolahan air limbah yang bertujuan untuk menghilangkan material berukuran besar dan partikel kasar (Maula, et al 2026).

Pengolahan primer difokuskan pada pemisahan padatan tersuspensi serta kandungan minyak dan lemak dari air limbah. Salah satu metode yang paling sering digunakan adalah proses sedimentasi, yaitu dengan mengalirkan air limbah ke dalam bak pengendap agar partikel padat dapat mengendap secara gravitasi dan terpisah dari fase cair.

Pengolahan sekunder merupakan tahap yang berfokus pada penghilangan bahan organik terlarut melalui proses biologis dengan memanfaatkan aktivitas mikroorganisme. Dalam proses ini, mikroorganisme menguraikan bahan organik menjadi senyawa yang lebih sederhana seperti karbon dioksida, air, dan biomassa. Salah satu teknologi yang paling banyak digunakan adalah sistem lumpur aktif (*activated sludge*), yang terbukti mampu menurunkan kadar BOD hingga sekitar 90% (Kementerian PUPR, 2021). Meskipun cukup efektif, proses ini memerlukan pengendalian kondisi operasional yang baik, seperti pH, suhu, dan ketersediaan oksigen, agar aktivitas mikroorganisme tetap optimal.

Sementara itu, pengolahan tersier merupakan tahap lanjutan yang bertujuan guna meningkatkan kualitas air limbah sebelum dibuang ke lingkungan atau dimanfaatkan kembali. Pada tahap ini dapat digunakan berbagai teknologi seperti filtrasi, proses kimia, dan disinfeksi. Salah satu metode yang sering digunakan adalah ozonasi, yang efektif dalam membunuh mikroorganisme patogen sekaligus menghilangkan kontaminan kimia. Berdasarkan data dari Direktorat Jenderal Cipta Karya (2022), penerapan pengolahan tersier dapat meningkatkan kualitas air limbah hingga mencapai sekitar 95%, sehingga memenuhi standar baku mutu yang ditetapkan.

Seiring dengan perkembangan teknologi, sistem pengolahan air limbah domestik mulai mengarah pada teknologi yang lebih efisien dan kompak. Salah satu teknologi yang banyak dikembangkan adalah *membrane bioreactor* (MBR), yang menggabungkan proses biologis dengan filtrasi membran. Teknologi ini mampu menghasilkan kualitas efluen yang lebih baik dibandingkan sistem konvensional karena mampu menyaring partikel halus dan mikroorganisme secara lebih efektif. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa MBR dapat menghasilkan air olahan yang memenuhi standar untuk digunakan kembali, terutama untuk keperluan non-konsumsi seperti penyiraman atau flushing. Selain MBR, teknologi biofilter dan *constructed wetlands* juga mulai banyak diterapkan, khususnya pada sistem pengolahan skala kecil atau komunal, karena lebih sederhana, hemat energi, dan mudah dioperasikan oleh masyarakat.

Di sisi lain, perkembangan teknologi pengolahan air limbah domestik juga didorong oleh kebutuhan untuk meningkatkan efisiensi penggunaan air melalui konsep *reuse*. Air limbah yang telah diolah dengan baik dapat

dimanfaatkan kembali untuk berbagai keperluan, sehingga dapat mengurangi tekanan terhadap sumber air bersih. Penerapan sistem *decentralized wastewater treatment* atau pengolahan terdesentralisasi menjadi solusi yang cukup efektif, terutama di daerah dengan keterbatasan infrastruktur. Sistem ini memungkinkan pengolahan dilakukan dekat dengan sumber limbah, sehingga lebih fleksibel dan mengurangi kebutuhan jaringan perpipaan yang luas.

Teknologi Pengolahan Air Limbah Industri

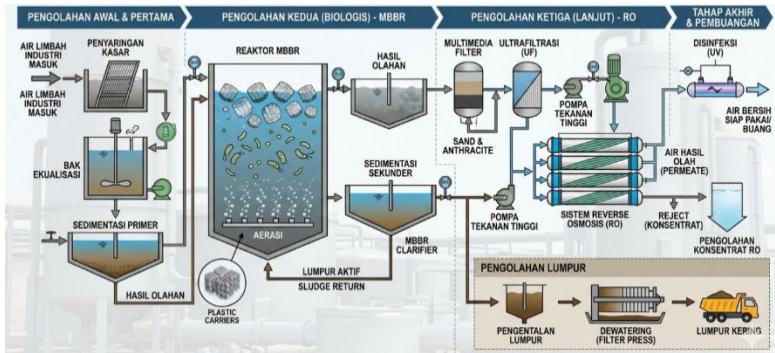
Pengolahan limbah industri biasanya lebih kompleks karena harus menyesuaikan dengan jenis pencemar yang ada. Air limbah industri umumnya memiliki beban pencemar yang tinggi dan komposisi yang beragam, serta sering mengandung senyawa berbahaya atau bersifat toksik (Cendan et al., 2026). Secara umum, teknologi yang digunakan dalam pengolahan air limbah industri melibatkan tiga pendekatan utama: fisik, kimia, dan biologis.

Proses fisik digunakan untuk memisahkan padatan atau minyak dari air, misalnya dengan penyaringan atau flotasi. Proses kimia digunakan untuk menghilangkan zat terlarut, seperti melalui koagulasi atau pengendapan logam berat. Untuk mengolah bahan organik, digunakan proses biologis seperti lumpur aktif atau reaktor anaerob.

Proses biologis masih menjadi metode yang paling banyak digunakan karena relatif ekonomis dan ramah lingkungan, khususnya untuk menguraikan bahan organik melalui aktivitas mikroorganisme dalam sistem seperti lumpur aktif dan berbagai jenis bioreaktor. Namun, efektivitas proses ini sangat bergantung pada karakteristik limbah dan kondisi operasional, sehingga tidak semua jenis limbah industri dapat diolah secara optimal hanya dengan metode konvensional.

Tahap pengolahan lumpur (*sludge treatment*) merupakan fase krusial dalam sistem pemurnian limbah industri yang bertujuan untuk mengelola residu padat hasil dari proses sedimentasi primer maupun sekunder. Lumpur yang terkumpul awalnya memiliki kadar air yang sangat tinggi, sehingga perlu melalui proses pengentalan (*thickening*) dan pengeringan (*dewatering*) menggunakan perangkat seperti *filter press* atau *centrifuge* untuk mengurangi volumenya secara signifikan. Manajemen lumpur yang efektif tidak hanya bertujuan untuk meminimalkan beban biaya transportasi dan pembuangan ke tempat pembuangan akhir tetapi juga untuk memastikan bahwa limbah padat tersebut telah stabil secara biologis dan kimiawi sehingga tidak mencemari lingkungan sekitar saat disingkirkan (Tchobanoglous, Burton and Stensel, 2003).

Dalam perkembangannya, teknologi pengolahan air limbah industri semakin mengarah pada sistem yang lebih canggih dan terintegrasi. Salah satu teknologi yang banyak dikaji dan diterapkan adalah *membrane bioreactor* (MBR), yang menggabungkan proses biologis dengan filtrasi membran dalam satu sistem. Teknologi ini mampu menghasilkan kualitas efluen yang lebih tinggi dibandingkan sistem konvensional, bahkan berpotensi untuk digunakan kembali (*reuse*) dalam proses industri (Fazal et al., 2015). Selain itu, teknologi membran secara umum, seperti ultrafiltrasi dan *reverse osmosis*, juga semakin banyak digunakan karena mampu menyisihkan kontaminan hingga tingkat yang sangat kecil. Meskipun demikian, tantangan seperti *membrane fouling* masih menjadi kendala utama dalam penerapan teknologi ini secara luas (Ezugbe & Rathilal, 2020).



Gambar 4.3 Alternatif Tahapan Pengolahan Air Limbah Industri

Di sisi lain, inovasi dalam teknologi biologis juga terus berkembang, termasuk pengembangan berbagai jenis bioreaktor seperti *moving bed biofilm reactor* (MBBR), *sequencing batch reactor* (SBR), dan reaktor anaerob. Teknologi ini dirancang untuk meningkatkan efisiensi pengolahan sekaligus mengurangi kebutuhan lahan dan energi. Selain itu, tren terbaru dalam pengolahan air limbah industri juga mengarah pada konsep pemanfaatan kembali limbah (*waste-to-resource*), di mana limbah tidak hanya diolah untuk dibuang, tetapi juga dimanfaatkan sebagai sumber energi atau bahan baku lain. Hal ini sejalan dengan kebutuhan global untuk mengurangi eksploitasi sumber daya air dan meningkatkan efisiensi penggunaan air.

Dengan demikian, teknologi pengolahan air limbah industri tidak lagi bersifat statis, tetapi terus berkembang menuju sistem yang lebih efisien, adaptif, dan berkelanjutan. Pemilihan teknologi yang tepat harus mempertimbangkan karakteristik limbah, kebutuhan industri, serta aspek ekonomi dan lingkungan. Integrasi antara teknologi konvensional dan teknologi modern menjadi kunci utama dalam menghasilkan sistem pengolahan yang optimal, sekaligus mendukung upaya pengelolaan lingkungan yang lebih baik di masa depan.

Tantangan dalam Pengolahan Air Limbah

Meskipun teknologi pengolahan air limbah saat ini sudah semakin berkembang pesat, kenyataannya di lapangan masih banyak hambatan yang harus dihadapi. Menurut laporan dari World Bank, sekitar 60% dari populasi di daerah pedesaan Indonesia tidak memiliki akses ke sistem pengolahan air limbah yang layak (2021). Hal ini menyebabkan banyak air limbah yang dibuang langsung ke lingkungan tanpa pengolahan, yang dapat mencemari sumber air bersih. Hal ini disebabkan oleh faktor biaya, karena membangun dan mengoperasikan instalasi pengolahan limbah itu tidak murah. Banyak pihak, baik pemerintah maupun perusahaan, yang akhirnya menunda pembangunan fasilitas ini karena keterbatasan anggaran, padahal fungsinya sangat krusial untuk menjaga lingkungan.

Selain masalah dana, keterbatasan lahan juga sering jadi ganjalan, terutama bagi industri atau perumahan di kota-kota besar. Untuk membangun sistem pengolahan yang lengkap biasanya butuh area yang cukup luas, sementara harga tanah di perkotaan sangat mahal dan ketersediaannya terbatas. Hal ini memaksa para ahli untuk memutar otak mencari teknologi yang lebih ringkas tapi tetap efektif, yang sayangnya seringkali jauh lebih mahal secara biaya operasional.

Tantangan berikutnya datang dari sisi manusia, yaitu rendahnya kesadaran masyarakat dan pengelolaan yang belum profesional. Banyak orang yang masih menganggap pengolahan limbah bukan prioritas, sehingga fasilitas yang sudah dibangun pun seringkali tidak dirawat dengan benar atau hanya dijalankan seadanya. Jika pengelolaannya tidak optimal, mesin secanggih apa pun tidak akan bisa bekerja maksimal dan justru berisiko mencemari lingkungan sekitar.

Jika dilihat dari segi teknis, karakteristik limbah industri yang sangat beragam menambah kerumitan proses pengolahan. Limbah dari pabrik tekstil tentu berbeda jauh dengan limbah domestik rumah tangga atau tambang, sehingga sistem pengolahannya tidak bisa disamakan. Setiap industri butuh rancangan khusus yang disesuaikan dengan jenis zat kimia atau polutan yang mereka hasilkan, yang pastinya membutuhkan riset dan alat yang spesifik.

Selain tantangan diatas efektivitas regulasi dan kebijakan pemerintah terhadap operasional industri mulai menunjukkan perkembangan positif dalam kesadaran industri, yang ditandai dengan kenaikan jumlah peserta PROPER tahun 2024 sebesar 21,68% dibandingkan periode sebelumnya, tantangan terkait kepatuhan terhadap standar pengolahan limbah tetap menjadi isu strategis. Peningkatan partisipasi ini mencerminkan dorongan pemerintah yang lebih kuat dalam memantau kinerja lingkungan korporasi, namun di sisi lain, pengawasan yang ketat tetap diperlukan untuk memastikan bahwa setiap perusahaan benar-benar memenuhi standar baku mutu yang berlaku (Muliawati, 2025). Oleh karena itu, penguatan regulasi dan penegakan hukum menjadi kunci utama agar peningkatan jumlah kepesertaan ini berbanding lurus dengan penurunan tingkat pencemaran air limbah di seluruh Indonesia.

Prospek dan Solusi Masa Depan

Pengembangan teknologi pengolahan air limbah, baik domestik maupun industri, di Indonesia memiliki prospek yang sangat menjanjikan. Hal ini didorong oleh meningkatnya kesadaran terhadap isu lingkungan serta kebutuhan akan pengelolaan sumber daya air yang lebih berkelanjutan. Pendekatan pengolahan air limbah kini

tidak lagi hanya berfokus pada pemenuhan baku mutu sebelum dibuang, tetapi mulai bergeser ke arah *resource recovery*, yaitu memanfaatkan kembali air limbah sebagai sumber daya. Air hasil olahan dapat digunakan kembali untuk berbagai keperluan non-konsumsi, sementara kandungan lain seperti nutrisi dan energi juga dapat dimanfaatkan. Salah satu contoh inovasi yang berkembang adalah teknologi berbasis energi terbarukan, seperti proses anaerobik yang mampu mengolah limbah organik sekaligus menghasilkan biogas sebagai sumber energi alternatif (Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, 2023).

Di sisi teknologi, perkembangan sistem pengolahan juga semakin maju dengan hadirnya teknologi lanjutan seperti membran (*ultrafiltration*, *reverse osmosis*), *advanced oxidation processes* (AOP), serta integrasi sistem biologis dengan teknologi modern seperti *membrane bioreactor* (MBR). Teknologi ini mampu menghasilkan kualitas air olahan yang lebih tinggi dan stabil, bahkan memungkinkan penerapan konsep *reuse* dan *zero liquid discharge* (ZLD), khususnya di sektor industri. Untuk skala domestik, sistem pengolahan terdesentralisasi seperti IPAL komunal menjadi solusi yang lebih fleksibel dan sesuai dengan kondisi masyarakat, terutama di daerah dengan keterbatasan infrastruktur.

Namun demikian, tantangan yang dihadapi masih cukup besar, seperti tingginya biaya investasi, kebutuhan energi, serta keterbatasan sumber daya manusia dalam pengoperasian teknologi yang lebih kompleks. Oleh karena itu, diperlukan kolaborasi yang kuat antara pemerintah, sektor swasta, dan masyarakat. Kemitraan dalam pembangunan dan pengelolaan infrastruktur pengolahan air limbah dapat meningkatkan efisiensi dan efektivitas sistem yang diterapkan. Selain itu, edukasi masyarakat juga menjadi faktor penting untuk

meningkatkan kesadaran akan pentingnya pengelolaan air limbah yang baik, sehingga dapat mengurangi pencemaran sejak dari sumbernya.

Di sisi lain, peran perguruan tinggi dan lembaga penelitian juga sangat penting dalam mendorong inovasi teknologi yang lebih efisien, terjangkau, dan ramah lingkungan. Kerja sama internasional dapat menjadi peluang untuk transfer teknologi dan peningkatan kapasitas dalam bidang pengolahan air limbah. Dengan dukungan teknologi yang tepat, kebijakan yang kuat, serta partisipasi aktif masyarakat, pengelolaan air limbah di Indonesia ke depan tidak hanya mampu melindungi lingkungan, tetapi juga memberikan manfaat ekonomi dan sosial. Dengan demikian, air limbah dapat bertransformasi dari permasalahan lingkungan menjadi peluang strategis dalam mendukung ketahanan air dan pembangunan berkelanjutan.

Daftar Pustaka

- Cendan, B., Arias, A., Est, S., Artiga, P., Feijoo, G., & Teresa, M. (2026). *Sustainability in the treatment of wastewater from canning industry effluents*. 35(February).
<https://doi.org/10.1016/j.wri.2026.100361>
- Dinas Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Bali. (2022). Laporan Proyek Pengolahan Air Limbah di Bali. Denpasar: Dinas PUPR.
- Ezugbe, E. O., & Rathilal, S. (2020). Membrane technologies in wastewater treatment: A review. *Membranes*, 10(5).
<https://doi.org/10.3390/membranes10050089>
- Fazal, S., Zhang, B., Zhong, Z., Gao, L., & Chen, X. (2015). Industrial Wastewater Treatment by Using MBR (Membrane Bioreactor) Review Study. *Journal of Environmental Protection*, 06(06), 584–598.
<https://doi.org/10.4236/jep.2015.66053>
- Gabriela, C., & Purnomo, A. (2022). *Kajian Instalasi Pengolahan Air Limbah Domestik Terpusat di Indonesia*. 11(3).
- Kementerian PUPR. (2021). *Pengelolaan Air Limbah di Indonesia*. Jakarta: Kementerian PUPR.
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2023). Energi Terbarukan dalam Pengolahan Air Limbah. Jakarta: Kementerian ESDM.
- Maula, et al. (2026). *Teknik Lingkungan: Konsep , Metode dan Aplikasi*. Padang: Pustaka Inspirasi Minang
- Muliawati D. (2025). *Jumlah Proper Tahun 2024 Meningkat 21,68%*.
<https://www.cnbcindonesia.com/news/20250224140617-4-613198/jumlah-proper-tahun-2024-meningkat-2168>
- World Bank. (2021). Laporan Pengelolaan Air Limbah di Indonesia. Washington D.C. World Bank.

Tchobanoglous, G., Burton, F.L. and Stensel, H.D., 2003.
Wastewater engineering: Treatment and reuse. 4th ed.
New York: McGraw-Hill.

Profil Penulis



Dewi Fitria Marlisa, S.T., M.T.

Penulis seorang Dosen yang ber-*homebased* di Program Studi Teknik Lingkungan, Jurusan Teknik Sipil, Universitas Malikussaleh. Penulis menyelesaikan Program Sarjana di Jurusan Teknik Lingkungan Universitas Diponegoro.

Setelah lulus sarjana penulis langsung melanjutkan kuliah di Magister Teknik Lingkungan dengan jalur pilihan Pengendalian dan Pencegahan Pencemaran di Institut Teknologi Bandung. Penulis memiliki ketertarikan kuat dalam isu-isu lingkungan dan keahlian di bidang sanitasi dan *wastewater treatment*. Di luar aktivitas akademik dan professional, penulis senang berbagi ide, berdiskusi serta terus belajar hal – hal baru yang bisa memperkaya wawasan. Kontribusi dalam *book chapter* ini adalah salah satu upaya penulis untuk berbagi wawasan sederhana kepada pembaca. Besar harapan penulis agar *chapter* ini dapat menjadi teman berpikir sekaligus sebagai sumber inspirasi bagi para pembaca. *Book chapter* ini merupakan langkah awal bagi penulis untuk terus berkomitmen dalam menghadirkan karya – karya lain bagi masyarakat luas. Bagi penulis, berdiskusi dengan pembaca adalah bagian terbaik dari menulis.

Email Penulis : dewifitriamarlisa@unimal.ac.id

TEKNOLOGI PERSAMPAHAN

Redha Rahmi, SKM, M.Kes.
Universitas Teuku Umar

Pendahuluan

Sampah kini tidak lagi dipandang sekadar sebagai limbah yang harus dibuang, melainkan sebagai sumber daya yang belum dimanfaatkan secara optimal. Pada tahun 2026, paradigma pengelolaan sampah telah mengalami perubahan besar, dari metode penimbunan (dumping) menuju pendekatan berbasis teknologi. Perubahan ini didorong oleh meningkatnya volume sampah yang sudah melampaui kapasitas Tempat Pemrosesan Akhir (TPA), sehingga diperlukan solusi yang lebih inovatif, efisien, dan terintegrasi.

Salah satu teknologi yang paling sederhana namun efektif adalah pengomposan. Pengomposan merupakan proses biologis yang memanfaatkan mikroorganisme seperti bakteri dan jamur untuk menguraikan bahan organik menjadi kompos yang kaya nutrisi. Proses ini membutuhkan kondisi tertentu seperti ketersediaan oksigen (aerobik), kelembaban yang cukup, serta keseimbangan antara bahan kaya karbon (bahan coklat) dan nitrogen (bahan hijau).

Teknologi Waste-to-Energy (WtE) yang mengubah sampah menjadi energi. Teknologi ini bertujuan mengurangi volume sampah sekaligus menghasilkan sumber energi

alternatif. WtE dapat dilakukan melalui berbagai metode, seperti insinerasi (pembakaran), gasifikasi, pirolisis, hingga pencernaan anaerobik yang menghasilkan biogas. Meskipun menawarkan banyak keuntungan seperti pengurangan sampah dan produksi energi, teknologi ini juga menghadapi tantangan berupa biaya investasi yang tinggi serta potensi emisi polutan jika tidak dikelola dengan baik.

Teknologi lain yang berkembang adalah pirolisis, yaitu proses penguraian bahan organik pada suhu tinggi tanpa oksigen. Berbeda dengan pembakaran, pirolisis menghasilkan produk bernilai seperti minyak pirolisis, gas, dan arang (biochar). Proses ini mampu mengurangi volume sampah hingga 90% serta menghasilkan energi alternatif yang dapat dimanfaatkan kembali. Dengan keunggulan tersebut, pirolisis menjadi salah satu solusi potensial dalam pengelolaan sampah modern yang ramah lingkungan.

Selanjutnya, terdapat teknologi *Refuse Derived Fuel* (RDF), yaitu bahan bakar alternatif yang dihasilkan dari sampah padat yang telah melalui proses pemilahan, pencacahan, dan pengeringan. RDF memiliki nilai kalor tinggi sehingga dapat digunakan sebagai pengganti batu bara, terutama di industri semen dan pembangkit listrik. Teknologi ini tidak hanya membantu mengurangi volume sampah di TPA, tetapi juga mendukung konsep ekonomi sirkular.

Di sisi lain, biogas menjadi solusi energi terbarukan yang sangat cocok untuk wilayah pedesaan. Biogas dihasilkan dari fermentasi anaerobik bahan organik seperti kotoran ternak dan limbah pertanian. Gas yang dihasilkan, terutama metana, dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar untuk memasak, pembangkit listrik, bahkan kendaraan setelah dimurnikan. Selain menghasilkan energi, proses ini juga menghasilkan residu berupa pupuk organik yang bermanfaat bagi pertanian.

Perkembangan teknologi juga melahirkan sistem pemilahan sampah cerdas (Smart Waste Sorting) yang memanfaatkan kecerdasan buatan (AI), sensor, dan robotika. Sistem ini mampu mengidentifikasi dan memisahkan sampah secara otomatis dengan tingkat akurasi tinggi. Dengan bantuan kamera, sensor inframerah, dan lengan robotik, proses pemilahan menjadi lebih cepat, efisien, dan aman bagi manusia. Teknologi ini sangat berperan dalam meningkatkan kualitas daur ulang, meskipun masih terkendala oleh biaya investasi dan kebutuhan data untuk pelatihan sistem AI.

Selain teknologi fisik, inovasi juga hadir dalam bentuk aplikasi digital. Platform seperti Mallsampah memungkinkan masyarakat menjual sampah anorganik kepada pengepul secara mudah melalui aplikasi. Di sisi lain, sistem berbasis Internet of Things (IoT) memungkinkan pemantauan tingkat kepenuhan tempat sampah secara real-time, sehingga pengangkutan menjadi lebih efisien. Kehadiran teknologi digital ini tidak hanya meningkatkan efisiensi operasional, tetapi juga mendorong partisipasi masyarakat dalam pengelolaan sampah.

Terakhir, terdapat teknologi sederhana namun berdampak besar yaitu lubang resapan biopori. Biopori merupakan lubang vertikal di tanah yang diisi dengan sampah organik. Teknologi ini berfungsi untuk meningkatkan daya resap air, mengurangi risiko banjir, sekaligus menghasilkan kompos alami.

Secara keseluruhan, berbagai teknologi persampahan yang berkembang saat ini menunjukkan bahwa pengelolaan sampah tidak lagi sekadar membuang, tetapi mengelola dan memanfaatkannya menjadi sumber daya yang bernilai. Pendekatan terbaik tetap mengacu pada prinsip hierarki pengelolaan sampah, yaitu *reduce*, *reuse*, *recycle*, dan *recovery*.

Jenis-Jenis Teknologi Persampahan

Pengomposan

Pengomposan adalah proses biologis penguraian bahan organik (sisa tumbuhan, sisa makanan) oleh mikroorganisme (bakteri, jamur) menjadi material seperti humus yang kaya nutrisi. Kompos berfungsi sebagai pembenah tanah yang meningkatkan kesuburan, struktur tanah, dan kemampuan menahan air.

1. Prinsip Dasar Pengomposan

- a. **Aerobik:** Proses ini membutuhkan oksigen (udara) agar mikroorganisme dapat bekerja optimal.
- b. **Kelembaban:** Kandungan air harus dijaga agar bahan tetap lembab tetapi tidak basah kuyup.
- c. **Nutrisi:** Mikroba membutuhkan karbon (bahan coklat) dan nitrogen (bahan hijau).

2. Bahan Kompos

Bahan organik dibagi menjadi dua kategori utama:

- a. **Bahan Hijau (Sumber Nitrogen/Basah):** Sisa sayuran, buah-buahan, potongan rumput segar, kotoran ternak.
- b. **Bahan Coklat (Sumber Karbon/Kering):** Daun kering, ranting kecil, kertas/kardus bekas, serbuk gergaji.
- c. **Bahan yang Harus Dihindari:** Daging, produk susu, minyak, makanan berminyak, atau tanaman yang sakit berat.

3. Tahapan Proses Pengomposan

- a. **Tahap Mesofilik (Awal):** Mikroorganisme mulai mengurai bahan organik, suhu naik perlahan.

- b. Tahap Termofilik (Panas): Suhu tinggi (50-60°C) membunuh patogen dan benih gulma.
 - c. Tahap Mesofilik (Pendinginan): Bahan organik terurai lebih lanjut.
 - d. Tahap Pematangan: Kompos dingin dan matang (warna coklat gelap/hitam, aroma seperti tanah/humus).
4. Faktor yang Memengaruhi Keberhasilan
- a. Aerasi: Pembalikan tumpukan secara rutin agar udara masuk.
 - b. Rasio C/N: Rasio karbon (coklat) dan nitrogen (hijau) yang ideal (sekitar 30:1).
 - c. Ukuran Partikel: Bahan yang dicacah kecil-kecil (2-5 cm) akan lebih cepat terurai.
 - d. Kelembaban: Kadar air yang ideal adalah 40-60%.
 - e. pH: Lingkungan yang optimal adalah netral hingga sedikit asam.
5. Metode Pembuatan Kompos
- a. Metode Tumpukan/Aerobik: Bahan ditumpuk terbuka, sering dibalik.
 - b. Metode Komposter (Wadah): Menggunakan tong atau wadah khusus untuk menjaga kelembaban.
 - c. Metode Takakura: Cocok untuk rumah tangga terbatas.
 - d. Metode Lubang Resapan Biopori: Mengubur sampah organik dalam lubang vertikal.
 - e. Vermicomposting: Menggunakan cacing tanah untuk mempercepat penguraian.

6. Langkah-langkah Membuat Kompos di Rumah

- a. Pemilahan: Pisahkan sampah organik dari anorganik.
- b. Pencacahan: Cacah bahan organik agar lebih kecil.
- c. Pencampuran/Layering: Campurkan bahan coklat (karbon) dan hijau (nitrogen) dengan perbandingan 2-3 bagian coklat banding 1 bagian hijau.
- d. Penambahan Dekomposer (Opsional): Tambahkan EM4 atau molase untuk mempercepat proses.
- e. Penyiraman: Basahi sedikit (tumpukan harus lembab, bukan basah).
- f. Penutupan: Tutup wadah/tumpukan untuk menjaga suhu dan melindungi dari hujan.
- g. Pembalikan: Balik tumpukan kompos secara berkala (misal: 1-2 minggu sekali) untuk memberikan oksigen.

7. Manfaat Kompos

- a. Tanah: Memperbaiki struktur tanah, meningkatkan retensi air, dan menambah hara.
- b. Lingkungan: Mengurangi timbunan sampah di TPA.
- c. Ekonomi: Menghemat biaya pembelian pupuk kimia.

Waste-to-Energy (WTE)

Waste-to-Energy (WtE) merupakan pendekatan modern dalam pengelolaan sampah yang mengintegrasikan solusi lingkungan dan energi. Secara umum, WtE adalah kumpulan teknologi yang digunakan untuk mengubah

limbah padat terutama yang tidak dapat didaur ulang menjadi energi terbarukan seperti listrik atau panas. Menurut World Bank, pengelolaan sampah global membutuhkan inovasi seperti WtE untuk mengurangi tekanan terhadap Tempat Pembuangan Akhir (TPA) sekaligus menghasilkan energi alternatif. Tujuan utama dari WtE adalah mengurangi ketergantungan pada TPA, mengatasi permasalahan darurat sampah, serta menyediakan sumber energi yang lebih berkelanjutan.

WtE memanfaatkan berbagai teknologi konversi. Metode termal seperti insinerasi atau pembakaran merupakan teknologi yang paling umum digunakan. Dalam proses ini, sampah dibakar pada suhu tinggi (umumnya di atas 850°C) untuk menghasilkan uap yang kemudian menggerakkan turbin pembangkit listrik. Selain itu, terdapat teknologi gasifikasi dan pirolisis yang memanaskan sampah dalam kondisi minim atau tanpa oksigen sehingga menghasilkan gas sintetis (syngas) atau bahan bakar cair. Menurut International Energy Agency, teknologi ini semakin berkembang sebagai alternatif yang lebih efisien dalam pemanfaatan limbah.

Keunggulan WtE cukup signifikan dalam konteks pengelolaan sampah modern. Teknologi ini mampu mengurangi volume sampah secara drastis hingga 70-90%, sehingga mengurangi beban TPA. Selain itu, energi yang dihasilkan bersifat stabil dan dapat membantu mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil. United Nations Environment Programme juga menekankan bahwa WtE dapat berkontribusi dalam mengurangi emisi gas rumah kaca, khususnya metana yang dihasilkan dari pembusukan sampah di TPA. Lebih lanjut, konsep ini mendukung ekonomi sirkular dengan mengubah limbah menjadi sumber daya yang bernilai.

Namun demikian, penerapan WtE juga menghadapi berbagai tantangan. Salah satu isu utama adalah potensi emisi polutan berbahaya seperti dioksin, furan, dan partikulat jika sistem pengolahan gas buang tidak memadai. Dari sisi teknis, efisiensi WtE sangat dipengaruhi oleh karakteristik sampah, terutama nilai kalor. Sampah dengan kadar air tinggi, seperti limbah organik basah, kurang ideal untuk proses pembakaran dibandingkan sampah kering seperti plastik.

Pirolisis

Pirolisis merupakan salah satu teknologi pengolahan limbah yang semakin berkembang dalam kerangka Waste-to-Energy (WtE). Secara umum, pirolisis adalah proses dekomposisi termal bahan organik seperti biomassa, plastik, dan ban pada suhu tinggi, berkisar antara 300 hingga 900 °C, dalam kondisi tanpa atau sangat minim oksigen. Melalui proses ini, limbah tidak hanya berkurang volumenya, tetapi juga diubah menjadi produk bernilai tambah seperti minyak pirolisis (bahan bakar cair), gas (sumber energi), dan char atau arang (yang dapat dimanfaatkan sebagai karbon aktif atau pupuk).

Secara etimologis, istilah pirolisis berasal dari bahasa Yunani, yaitu *pyro* yang berarti api dan *lysis* yang berarti pemisahan. Dengan demikian, pirolisis dapat dipahami sebagai proses penguraian material organik melalui pemanasan. Berbeda dengan pembakaran konvensional, pirolisis tidak melibatkan oksidasi karena berlangsung tanpa oksigen. Hal ini membuat prosesnya cenderung menghasilkan emisi berbahaya yang lebih rendah. Dalam proses ini, molekul-molekul kompleks dalam bahan baku dipecah menjadi molekul yang lebih sederhana dalam bentuk gas, cair, dan padat.

Dalam penerapannya, teknologi pirolisis menggunakan suatu sistem reaktor yang terdiri dari beberapa komponen utama. Reaktor biasanya berbentuk wadah berbahan baja atau stainless steel yang berfungsi sebagai tempat pemanasan bahan baku. Sumber panas dapat berasal dari tungku berbahan bakar gas atau elemen listrik. Uap hasil pemanasan kemudian dialirkan ke kondensor, yaitu alat pendingin yang mengubah uap menjadi cairan berupa minyak pirolisis. Selanjutnya, cairan tersebut ditampung dalam wadah khusus, sementara keseluruhan proses dikendalikan oleh sistem kontrol yang mengatur suhu dan tekanan agar tetap optimal.

Refuse Derived Fuel (RDF)

Refuse Derived Fuel (RDF) merupakan salah satu inovasi penting dalam pengelolaan sampah berbasis energi yang mendukung konsep Waste-to-Energy (WtE). RDF adalah bahan bakar alternatif yang dihasilkan dari pengolahan sampah padat, khususnya sampah perkotaan atau *municipal solid waste* (MSW), melalui serangkaian proses seperti pemilahan, pencacahan, dan pengeringan. Hasil akhirnya adalah material dengan kadar air rendah (kurang dari 25%) dan nilai kalor yang cukup tinggi, yaitu sekitar 4000–5000 kkal/kg. Dengan karakteristik tersebut, RDF dapat dimanfaatkan sebagai pengganti batu bara, terutama di industri semen dan pembangkit listrik tenaga uap (PLTU), sekaligus berkontribusi pada pengurangan emisi dan penerapan ekonomi sirkular.

Secara definisi, RDF atau bahan bakar turunan sampah merupakan material mudah terbakar yang berasal dari limbah rumah tangga maupun industri yang telah melalui proses pengolahan. Tujuan utama pengembangan RDF adalah untuk mengurangi volume sampah yang berakhir di Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) serta menyediakan sumber energi alternatif yang lebih Komposisi RDF

umumnya didominasi oleh material yang kaya karbon, seperti plastik, kertas, kardus, tekstil, dan kayu. Karakteristik penting RDF meliputi kadar air yang harus dijaga di bawah 25% agar efisien sebagai bahan bakar, serta nilai kalor yang relatif tinggi. Dari segi bentuk fisik, RDF dapat berupa cacahan kasar, briket, maupun pelet, tergantung pada proses pengolahannya. Bentuk yang lebih padat seperti pelet atau briket biasanya dipilih karena lebih mudah dalam penyimpanan dan transportasi serta memiliki densitas energi yang lebih tinggi.

Proses produksi RDF melibatkan kombinasi metode mekanis dan biologis. Tahap pertama adalah penerimaan dan pemilahan (sorting), di mana sampah dipisahkan antara material organik, logam, kaca, dan bahan non-terbakar lainnya. Selanjutnya, dilakukan pengecilan ukuran (shredding) menggunakan mesin pencacah agar ukuran material menjadi seragam, biasanya berkisar antara 2 hingga 10 cm.

Biogas

Biogas adalah energi terbarukan ramah lingkungan hasil fermentasi anaerobik (tanpa oksigen) bahan organik seperti kotoran ternak dan limbah pertanian oleh mikroorganisme. Komponen utamanya adalah metana (CH_4) dan karbon dioksida (CO_2), yang berfungsi sebagai bahan bakar alternatif untuk memasak, pembangkit listrik, dan kendaraan, sekaligus mengurangi emisi rumah kaca.

1. Komponen Utama Biogas

Biogas umumnya terdiri dari campuran gas berikut:

- a. Metana (CH_4): 60-70% (komponen mudah terbakar)
- b. Karbondioksida (CO_2): 30-40%

- c. Nitrogen (N_2): 3%
 - d. Hidrogen (H_2): 1-10%
 - e. Hidrogen Sulfida H_2S): Sedikit (gas pengotor)
2. Bahan Baku Pembuatan
- Bahan organik yang dapat digunakan (biodegradable) antara lain:
- a. Kotoran ternak (sapi, kerbau, kambing, ayam).
 - b. Limbah pertanian dan perkebunan (jerami, kulit buah, sisa sayuran).
 - c. Limbah cair rumah tangga atau industri makanan.
3. Proses Pembuatan (Fermentasi Anaerobik)
- Proses ini terjadi dalam reaktor atau digester biogas:
- a. Persiapan: Bahan baku dicampur air (rasio 1:1) dan dihancurkan.
 - b. Pemasukan: Campuran dimasukkan ke dalam digester.
 - c. Fermentasi: Mikroorganisme mengurai bahan organik dalam kondisi tanpa oksigen (anaerobik) selama beberapa hari.
 - d. Produksi Gas: Bakteri menghasilkan gas yang ditampung di bagian atas digester.
 - e. Residu (Slurry): Sisa proses (slurry) dikeluarkan dan dapat dijadikan pupuk organik cair/padat berkualitas tinggi
4. Manfaat Biogas
- a. Energi Terbarukan: Sumber energi alternatif pengganti LPG dan minyak tanah.

- b. Pengelolaan Limbah: Mengatasi masalah limbah organik dan kotoran ternak.
 - c. Ramah Lingkungan: Mengurangi emisi gas rumah kaca (metana) ke atmosfer.
 - d. Pupuk Organik: Residu fermentasi sangat baik untuk pertanian
5. Kelebihan dan Kekurangan
- Kelebihan:
- a. Mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil.
 - b. Menghemat biaya energi rumah tangga.
 - c. Mengurangi bau tidak sedap dan bakteri patogen dari limbah.
- Kekurangan:
- a. Biaya awal pembuatan digester cukup mahal.
 - b. Sangat dipengaruhi oleh suhu lingkungan (bakteri bekerja optimal pada suhu 35-55 °C).
 - c. Masih mengandung kotoran (H₂S) yang bisa korosif jika tidak dibersihkan.
6. Pemanfaatan Biogas
- a. Kompor Biogas: Digunakan langsung untuk memasak.
 - b. Pembangkit Listrik: Menggerakkan generator listrik (generator set).
 - c. Bahan Bakar Kendaraan: Setelah dipurifikasi/dibersihkan, bisa menjadi bahan bakar kendaraan

Secara keseluruhan, biogas adalah solusi energi bersih yang sangat potensial dikembangkan, terutama di pedesaan yang memiliki banyak limbah ternak.

Teknologi Pemilahan Cerdas

Teknologi Pemilahan Sampah Cerdas (*Smart Waste Sorting*) merupakan inovasi penting dalam sistem pengelolaan limbah modern yang memanfaatkan kemajuan Artificial Intelligence, sensor canggih, dan robotika. Sistem ini dirancang untuk mengklasifikasikan serta memisahkan sampah secara otomatis dengan kecepatan dan akurasi tinggi. Berbeda dengan metode manual yang cenderung lambat, tidak konsisten, dan berisiko bagi kesehatan manusia, teknologi ini menghadirkan solusi yang lebih efisien, aman, dan terstandarisasi.

Pada dasarnya, teknologi ini bekerja melalui integrasi tiga komponen utama yang saling terhubung secara real-time. Komponen pertama adalah sistem visi komputer berbasis AI yang berperan sebagai “otak”. Kamera beresolusi tinggi menangkap citra sampah di atas konveyor, lalu algoritma seperti Deep Learning dan Convolutional Neural Network menganalisisnya dalam hitungan milidetik untuk mengenali jenis material, seperti plastik PET atau HDPE, logam, kertas, maupun sampah organik.

Komponen kedua adalah sensor canggih yang berfungsi sebagai “indra”. Teknologi seperti Near-Infrared Spectroscopy digunakan untuk mengidentifikasi karakteristik kimia dan fisik material, khususnya dalam membedakan jenis plastik. Selain itu, sensor logam berbasis induksi mampu mendeteksi keberadaan logam, sementara kamera pintar seperti HuskyLens membantu pengenalan objek secara visual. Sensor ultrasonik atau inframerah juga digunakan untuk mengukur volume atau tingkat kepenuhan tempat sampah.

Komponen ketiga adalah sistem robotika dan mekanis yang bertindak sebagai “tangan”. Setelah sampah diidentifikasi, lengan robotik, semburan udara (*air jets*), atau mekanisme tuas yang dikendalikan mikrokontroler seperti Arduino akan memindahkan sampah ke wadah yang sesuai. Seluruh proses ini berlangsung otomatis dan terintegrasi.

Alur kerja teknologi ini dimulai dari penerimaan sampah campuran yang masuk ke konveyor. Sampah kemudian dipindai oleh kamera dan sensor untuk mengumpulkan data visual serta karakteristik material. Data tersebut dianalisis oleh AI untuk menentukan kategori sampah, seperti organik, anorganik, plastik, atau logam. Setelah itu, sistem robotik melakukan pemisahan secara fisik dengan presisi tinggi. Selain itu, sistem juga dapat terhubung dengan konsep Internet of Things, di mana sensor akan mengirimkan notifikasi ketika tempat sampah sudah penuh.

Aplikasi Digital

Pengelolaan sampah secara konvensional selama ini kerap menghadapi berbagai kendala, mulai dari persoalan logistik, rendahnya kesadaran masyarakat dalam memilah sampah dari sumber, hingga rantai distribusi pengepul yang kurang efisien. Dalam konteks tersebut, kehadiran aplikasi digital menjadi terobosan penting yang mengarah pada sistem *recycling network* dan *smart waste management*. Pendekatan ini tidak hanya berfokus pada pengangkutan sampah, tetapi juga mengintegrasikan nilai ekonomi, efisiensi operasional, dan partisipasi masyarakat dalam satu ekosistem berbasis teknologi.

Salah satu contoh implementasi nyata adalah platform Mallsampah, yang berperan sebagai penghubung antara penghasil sampah baik rumah tangga, sekolah, maupun pelaku usaha dengan pengepul dan pemulung lokal

sebagai mitra. Melalui platform ini, sampah anorganik seperti plastik, kertas, logam, dan kaca tidak lagi dipandang sebagai limbah semata, melainkan sebagai komoditas yang memiliki nilai jual. Pengguna dapat menjadwalkan penjemputan sampah secara langsung melalui aplikasi, kemudian sampah tersebut ditimbang dan dikonversi menjadi saldo digital. Sistem ini secara tidak langsung meningkatkan kesejahteraan sektor informal, sekaligus memperkuat praktik ekonomi sirkular.

Selain itu, Mallsampah juga menyediakan solusi berbasis bisnis (*business-to-business*), seperti kerja sama dengan produsen dalam program *Extended Producer Responsibility* (EPR), di mana perusahaan turut bertanggung jawab terhadap pengelolaan limbah produknya. Fitur-fitur seperti pelacakan mitra, manajemen saldo, dan kemudahan registrasi semakin memperkuat daya tarik aplikasi ini dalam mendorong masyarakat untuk aktif memilah dan mendaur ulang sampah.

Pendekatan berbasis IoT ini memberikan sejumlah manfaat signifikan, antara lain efisiensi penggunaan bahan bakar dan waktu operasional, serta pencegahan penumpukan sampah di tempat pembuangan sementara. Selain itu, sistem monitoring yang terintegrasi memungkinkan pengelola untuk memantau kondisi lapangan melalui dashboard, termasuk tingkat kepenuhan sampah dan notifikasi bagi pengemudi.

Penerapan aplikasi digital dalam pengelolaan sampah membawa dampak yang luas. Dari sisi ekonomi, sampah yang sebelumnya tidak bernilai kini dapat menjadi sumber pendapatan tambahan bagi masyarakat. Dari sisi sosial, teknologi ini mendorong keterlibatan aktif masyarakat dalam memilah dan mengelola sampah secara bertanggung jawab. Sementara itu, dari aspek

lingkungan, penggunaan aplikasi digital berkontribusi pada pengurangan volume sampah yang berakhir di tempat pembuangan akhir (TPA), sehingga mendukung konsep *zero waste*. Tidak kalah penting, efisiensi operasional yang dihasilkan juga membantu pemerintah dan pengelola kebersihan kota dalam mengoptimalkan sumber daya yang ada.

Lubang Biopori

Lubang Resapan Biopori (LRB) merupakan salah satu inovasi sederhana namun efektif dalam upaya konservasi tanah dan air, khususnya di wilayah perkotaan maupun permukiman yang rentan terhadap genangan dan banjir. Secara fisik, biopori berbentuk lubang silindris vertikal dengan diameter sekitar 10–30 cm dan kedalaman mencapai 80–100 cm, yang kemudian diisi dengan sampah organik.

Keberadaan lubang biopori memberikan berbagai manfaat penting. Salah satu fungsi utamanya adalah meningkatkan daya resap air hujan ke dalam tanah, sehingga mampu mengurangi genangan dan potensi banjir. Air yang sebelumnya mengalir di permukaan dapat langsung meresap ke dalam tanah melalui lubang ini, sekaligus membantu mengisi cadangan air tanah. Dengan demikian, biopori juga berperan dalam menjaga ketersediaan air di musim kemarau.

Selain itu, lubang biopori berfungsi sebagai sarana pengolahan sampah organik. Sampah dapur seperti sisa makanan, daun kering, dan limbah sayuran dapat dimasukkan ke dalam lubang, di mana kemudian akan terurai secara alami oleh mikroorganisme dan fauna tanah seperti cacing. Proses ini tidak hanya mengurangi volume sampah yang berakhir di tempat pembuangan akhir (TPA), tetapi juga menghasilkan kompos yang bermanfaat untuk menyuburkan tanah.

Pembuatan lubang biopori tergolong mudah dan tidak memerlukan teknologi yang rumit. Alat utama yang digunakan adalah bor tanah khusus biopori. Proses dimulai dengan memilih lokasi yang tepat, seperti area yang sering tergenang atau di sekitar tanaman. Tanah kemudian dibasahi agar lebih mudah dibor, lalu dibuat lubang vertikal hingga kedalaman tertentu. Untuk menjaga kekuatan bagian atas lubang, dapat dipasang pipa PVC sebagai penguat. Setelah itu, lubang diisi dengan sampah organik dan ditutup menggunakan penutup berlubang atau kawat agar aman.

Perawatan lubang biopori juga relatif sederhana. Sampah organik yang telah terurai akan menyusut, sehingga perlu dilakukan pengisian ulang secara berkala. Kompos yang terbentuk biasanya dapat dipanen setelah 3–4 bulan, terutama di akhir musim kemarau, dan dimanfaatkan sebagai pupuk alami. Setelah panen, lubang dapat digunakan kembali dengan pengisian sampah baru.

Daftar Pustaka

- Brata, K. R., & Nelistya, A. (2008). *Lubang Resapan Biopori*. Jakarta: Penebar Swadaya. (Ini adalah buku pegangan utama dari penemu teknologi biopori, Dr. Kamir R. Brata).
- Stewart, D. & Simmons, M. (2010). *The Business Playground: Where Creativity and Commerce Collide*. Berkeley, AS: New Riders Press.
- Rerung, R. R., Fauzan, M., & Hermawan, H. (2020). Website Quality Measurement of Higher Education Services Institution Region IV Using Webqual 4.0 Method. *International Journal of Advances in Data and Info*
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. (2018). *Pedoman Pengelolaan Sampah Perkotaan*. Jakarta: PUPR.
- World Bank. (2018). *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. Washington, DC: World Bank.
- United Nations Environment Programme. (2015). *Global Waste Management Outlook*. Nairobi: UNEP.
- International Energy Agency. (2020). *Energy from Waste: Policies and Trends*. Paris: IEA.
- Badan Standardisasi Nasional. (2014). *SNI 19-2454-2002 tentang Tata Cara Teknik Operasional Pengelolaan Sampah Perkotaan*. Jakarta: BSN.
- Food and Agriculture Organization. (2013). *Biogas Technology: A Training Manual for Extension*. Rome: FAO.
- Asian Development Bank. (2020). *Waste-to-Energy in Southeast Asia*. Manila: ADB.
- European Commission. (2019). *Refuse Derived Fuel, Current Practice and Perspectives*. Brussels: EC.
- International Renewable Energy Agency. (2021). *Renewable Energy from Waste*. Abu Dhabi: IRENA.

- Ellen MacArthur Foundation. (2019). *Completing the Picture: How the Circular Economy Tackles Climate Change*. UK: EMF
- World Bank. (2018). *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*.
- International Energy Agency. (2020). *Energy from Waste: Trends and Outlook*.
- United Nations Environment Programme. (2019). *Waste-to-Energy: Considerations for Informed Decision-Making*.
- Asian Development Bank. (2021). *Waste-to-Energy in Developing Asia*.
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2022). *Pengembangan Pembangkit Listrik Tenaga Sampah (PLTSa) di Indonesia*
- Brata, K. R. (2008). *Lubang Resapan Biopori untuk Mengurangi Banjir dan Meningkatkan Kesuburan Tanah*. Bogor: Institut Pertanian Bogor.
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia. (2017). *Panduan Pembuatan Lubang Resapan Biopori*. Jakarta: KLHK.
- Suripin. (2004). *Sistem Drainase Perkotaan yang Berkelanjutan*. Yogyakarta: Andi Offset.
- Maryono, A. (2005). *Menangani Banjir, Kekeringan, dan Lingkungan*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- SNI 8456:2017. *Sumur dan Lubang Resapan Air Hujan*. Badan Standardisasi Nasional.

Profil Penulis



Redha Rahmi, S.K.M., M.Kes.

Penulis di lahirkan di Ujong Drien pada tanggal 28 Mei 1990 Ketertarikan penulis terhadap ilmu Kesehatan lingkungan dimulai pada tahun 2005 silam. Hal tersebut membuat penulis memilih untuk masuk ke Sekolah Menengah Atas di SMA 1 Meulaboh. dengan memilih Jurusan Ilmu Pengetahuan Alam (IPA) dan berhasil lulus pada tahun 2008. Penulis kemudian melanjutkan pendidikan ke Perguruan Tinggi dan berhasil menyelesaikan studi S1 di prodi Ilmu Kesehatan Masyarakat Peminatan Kesehatan Lingkungan pada tahun 2013 Kemudian, pada tahun 2018 penulis menyelesaikan studi S2 di prodi Magister Kesehatan Lingkungan Universitas Diponegoro Semarang. Saat ini penulis bekerja sebagai dosen tetap di Program Studi S1 Keselamatan dan Kesehatan Kerja Universitas Teuku Umar Meulaboh. Penulis juga aktif dalam kegiatan ilmiah. Sehari-harinya bekerja sebagai dosen pengampu mata kuliah Toksikologi Industri. Selain itu penulis juga aktif dalam menulis jurnal serta aktif menulis buku ajar dan *book chapter*.

Email Penulis : redharahmi@utu.ac.id

TEKNOLOGI PENYEHATAN UDARA

Fitri Yanti, SKM., M.Kes.
Universitas Mandala Waluya

Pendahuluan

Pencemaran udara merupakan salah satu permasalahan lingkungan terbesar di dunia yang berdampak langsung terhadap kesehatan manusia dan keberlanjutan lingkungan. Secara global, peningkatan konsentrasi polutan udara tidak terlepas dari pertumbuhan industri, urbanisasi yang cepat, peningkatan jumlah kendaraan bermotor, serta ketergantungan terhadap bahan bakar fosil (WHO, 2021).

Polusi udara merupakan faktor risiko lingkungan utama bagi kesehatan masyarakat yang menimbulkan beban morbiditas dan mortalitas global yang substansial. Pada tahun 2023 saja, polusi udara mencapai dikaitkan dengan perkiraan 7,9 juta kematian di seluruh dunia, yang setara dengan kehilangan 232 jutatahun hidup sehat . Sekitar 35% dari kematian ini disebabkan oleh rumah. menyebabkan polusi udara, terutama di negara-negara berpenghasilan rendah dan menengah (Mountzouris et al., 2026).

Polutan udara seperti partikulat halus ($PM_{2.5}$ dan PM_{10}), nitrogen dioksida (NO_2), sulfur dioksida (SO_2), ozon (O_3), dan karbon monoksida (CO) telah terbukti memiliki dampak signifikan terhadap sistem pernapasan dan kardiovaskular (Brook et al., 2010). Di tingkat nasional, Indonesia menghadapi tantangan pencemaran udara yang semakin

kompleks seiring dengan pesatnya pertumbuhan jumlah kendaraan bermotor, aktivitas industri, pembakaran terbuka, serta ekspansi kawasan pertambangan dan konstruksi (Kemenkes RI, 2022).

Kondisi geografis dan meteorologis turut memengaruhi akumulasi polutan di udara ambien, khususnya di wilayah perkotaan dan kawasan industri. Permasalahan pencemaran udara di Indonesia tidak hanya terjadi di udara luar ruangan (*outdoor*), tetapi juga di dalam ruangan (*indoor*) seperti aktivitas rumah tangga, penggunaan bahan bakar biomassa, merokok di dalam rumah. ventilasi yang tidak memadai (Yanti, 2025).

Beban Penyakit Akibat Pencemaran Udara (ISPA dan PM2.5)

Paparan pencemaran udara memberikan kontribusi besar terhadap beban penyakit global. *Global Burden of Disease (GBD) Study* melaporkan bahwa polusi udara, khususnya PM_{2.5}, merupakan salah satu faktor risiko utama penyebab kematian dan kecacatan di seluruh dunia ukuran PM_{2.5} yang sangat kecil memungkinkan partikel ini menembus saluran pernapasan bagian bawah dan masuk ke sistem peredaran darah, sehingga meningkatkan risiko berbagai penyakit (GBD, 2020).

1. Infeksi saluran pernapasan akut (ISPA) merupakan salah satu dampak kesehatan yang paling sering dikaitkan dengan paparan pencemaran udara dan Paparan polutan udara dapat yang menyebabkan iritasi saluran napas, menurunkan fungsi pertahanan mukosilier, dan meningkatkan kerentanan terhadap infeksi bakteri dan virus.
2. Dampak kesehatan beban penyakit akibat pencemaran udara juga menimbulkan konsekuensi sosial dan ekonomi seperti meningkatnya biaya pengobatan, kehilangan hari produktif, tekanan terhadap sistem pelayanan kesehatan.

Berbagai penelitian menunjukkan hubungan yang signifikan antara peningkatan konsentrasi PM_{2.5} dengan peningkatan kejadian ISPA, khususnya pada anak-anak dan balita (Health Effects Institute, 2020) (F. Yanti, Buton, et al., 2024). Di Indonesia, ISPA masih menjadi masalah kesehatan masyarakat utama dan secara konsisten termasuk dalam sepuluh besar penyebab kunjungan ke fasilitas pelayanan kesehatan, kelompok rentan seperti balita, ibu hamil, lansia, serta individu dengan penyakit kronis memiliki risiko lebih tinggi mengalami dampak kesehatan akibat pencemaran udara. Pada balita, paparan polutan udara berhubungan dengan peningkatan kejadian ISPA, gangguan pertumbuhan paru-paru, serta risiko jangka panjang terhadap kesehatan respirasi (WHO, 2018).

Pentingnya Pendekatan Teknologi dalam Penyehatan Udara

Pendekatan teknologi dalam penyehatan udara menjadi salah satu solusi strategis untuk mengatasi permasalahan tersebut. Teknologi penyehatan udara mencakup berbagai metode dan perangkat yang dirancang untuk mengurangi konsentrasi polutan udara, baik melalui peningkatan ventilasi, sistem filtrasi udara, pengendalian emisi, maupun pemantauan kualitas udara. Pendekatan ini memungkinkan intervensi langsung pada lingkungan tempat manusia beraktivitas, terutama di ruang tertutup. Dengan berkembangnya inovasi teknologi dan meningkatnya kesadaran akan pentingnya kualitas udara, teknologi penyehatan udara menjadi komponen penting dalam strategi pengendalian pencemaran udara yang komprehensif dan berkelanjutan, khususnya di wilayah dengan tingkat kerentanan tinggi. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan tambahan yang mampu mengurangi paparan polutan secara langsung dan lebih cepat (Morawska et al., 2020).

Upaya pengendalian pencemaran udara secara tradisional umumnya dilakukan melalui kebijakan regulasi, pengendalian sumber emisi, serta edukasi perubahan perilaku masyarakat. Namun, pendekatan ini sering kali memerlukan waktu yang panjang untuk menghasilkan perbaikan kualitas udara yang signifikan (Bruce et al., 2015; WHO, 2018).

Berbagai studi menunjukkan bahwa penggunaan teknologi seperti sistem ventilasi yang efektif dan air purifier dengan filter efisiensi tinggi (HEPA) mampu menurunkan konsentrasi $PM_{2.5}$ dan polutan lainnya secara signifikan di dalam ruangan dalam perspektif kesehatan masyarakat, penerapan teknologi penyehatan udara merupakan bagian dari upaya pencegahan primer dengan menurunkan paparan faktor risiko lingkungan sebelum menimbulkan dampak kesehatan (Allen et al., 2011).

Konsep Dasar Penyehatan Udara

Definisi Penyehatan Udara

Penyehatan udara merupakan serangkaian upaya terencana untuk meningkatkan dan mempertahankan kualitas udara agar berada pada tingkat yang aman bagi kesehatan manusia dan lingkungan. Dalam perspektif kesehatan lingkungan, penyehatan udara bertujuan untuk mengendalikan faktor risiko lingkungan melalui pengurangan konsentrasi polutan, pencegahan paparan, serta perlindungan kelompok rentan. Selain itu penyehatan udara ditinjau dari kualitas udara yang merupakan kondisi udara di yang dapat dilihat dari parameter fisik, kimia dan biologi. Kualitas udara yang baik yaitu udara yang mengandung sedikit partikel padat dan polutan kimia, dan tidak menimbulkan risiko kesehatan (Purwaningrum, 2024).

Perbedaan Kualitas Udara Dalam Ruangan dan Luar Ruangan

Kualitas udara dalam ruangan (*indoor air quality*) dan luar ruangan (*outdoor air quality*) memiliki karakteristik, sumber pencemar, serta risiko kesehatan yang berbeda.

1. Udara Luar Ruangan

Kualitas udara luar ruangan sangat dipengaruhi emisi kendaraan bermotor, aktivitas industri, pembakaran terbuka, serta faktor meteorologis dan geografis, debu jalan. Polutan utama yang sering ditemukan pada udara ambien antara lain $PM_{2.5}$, PM_{10} , NO_2 , SO_2 , O_3 , dan CO (WHO, 2021).

2. Udara Dalam Ruangan

Kualitas udara luar ruangan sangat dipengaruhi asap rokok, pembakaran bahan bakar biomassa, emisi dari bahan bangunan dan perabot rumah tangga, penggunaan produk kimia rumah tangga, serta kurangnya ventilasi yang memadai.

Berbagai studi menunjukkan bahwa konsentrasi polutan tertentu di dalam ruangan dapat lebih tinggi dibandingkan udara luar ruangan, terutama pada bangunan dengan ventilasi terbatas (Bruce et al., 2015; Baran & Zender-Swiercz, 2026). Perbedaan ini menyebabkan strategi penyehatan udara untuk lingkungan *indoor* dan *outdoor* tidak dapat disamakan. Pada lingkungan outdoor, intervensi lebih banyak difokuskan pada pengendalian sumber emisi dan kebijakan tata ruang. Sementara itu, pada lingkungan indoor, penyehatan udara lebih menekankan pada perbaikan ventilasi, penggunaan teknologi filtrasi, serta pengendalian sumber pencemar di dalam ruangan (Allen et al., 2011; Jones et al., 2024).

Prinsip Pencegahan Penyakit Berbasis Lingkungan

Penyehatan udara merupakan bagian integral dari pencegahan penyakit berbasis lingkungan, khususnya penyakit saluran pernapasan seperti ISPA, asma, PPOK, penyakit kardiovaskular, kematian dini akibat paparan PM_{2.5} dan gas berbahaya, gangguan pertumbuhan paru pada anak (WHO, 2021; Brook et al., 2010). Prinsip utama pencegahan penyakit berbasis lingkungan adalah memutus rantai paparan antara sumber pencemar dan manusia. Dalam konteks pencemaran udara, prinsip ini diwujudkan melalui pengendalian sumber emisi, perbaikan media lingkungan, serta perlindungan kelompok rentan (WHO, 2021). Pendekatan pencegahan primer, sekunder dan tersier menjadi fokus utama dalam penyehatan udara, yaitu mencegah terjadinya penyakit sebelum muncul gejala (Brook et al., 2010).

1. Pendekatan Pencegahan Primer

- a. Mencegah terjadinya penyakit sebelum muncul gejala dengan cara menurunkan tingkat paparan polutan
- b. Penerapan teknologi penyehatan udara, seperti sistem ventilasi yang efektif
- c. Air purifier berfilter hepa, terbukti mampu menurunkan konsentrasi pm_{2.5} dan mengurangi risiko gangguan pernapasan

2. Pendekatan Pencegahan Sekunder

Perbaikan kualitas udara dapat mencegah perburukan penyakit pada individu yang telah terpapar

3. Pendekatan Pencegahan Tersier

Lingkungan udara yang lebih bersih dapat meningkatkan kualitas hidup penderita penyakit kronis akibat pencemaran udara.

Dalam perspektif kesehatan masyarakat, prinsip penyehatan udara sejalan dengan pendekatan promotif dan preventif yang menekankan upaya hulu (*upstream intervention*). Dengan demikian, penyehatan udara tidak hanya menjadi tanggung jawab sektor kesehatan, tetapi juga memerlukan kolaborasi lintas sektor, termasuk lingkungan, perumahan, industri, dan perencanaan wilayah.

Jenis Pencemar Udara dan Dampaknya

Partikulat (PM_{2.5} dan PM₁₀)

Partikulat merupakan salah satu pencemar udara yang paling berbahaya bagi kesehatan manusia. *Particulate Matter* (PM) adalah campuran partikel padat dan cair yang tersuspensi di udara, dengan ukuran yang bervariasi. PM₁₀ memiliki diameter aerodinamis $\leq 10 \mu\text{m}$, sedangkan PM_{2.5} berdiameter $\leq 2,5 \mu\text{m}$ dan termasuk partikulat halus yang paling berisiko terhadap kesehatan (WHO, 2021).

Partikulat halus (PM₁₀ dan PM_{2.5}) dihasilkan dari proses biji nikel pada suhu tinggi yang berpotensi menimbulkan gangguan kesehatan, karena mampu menembus hingga alveoli paru-paru pekerja, selain itu sumber utama PM_{2.5} dan PM₁₀ berasal dari emisi kendaraan bermotor, aktivitas industri, pembakaran bahan bakar fosil dan biomassa, debu jalan, aktivitas pertambangan, serta proses konstruksi. Di wilayah pertambangan dan kawasan pesisir, aktivitas penambangan, pengangkutan material, dan resuspensi debu akibat angin berkontribusi besar terhadap peningkatan konsentrasi partikulat di udara (Amien, 2025).

Ukuran PM_{2.5} yang sangat kecil memungkinkan partikel ini menembus hingga saluran pernapasan bagian bawah dan alveoli paru-paru, bahkan masuk ke dalam sistem peredaran darah. Paparan jangka pendek maupun jangka panjang terhadap PM_{2.5} telah terbukti berhubungan dengan peningkatan kejadian ISPA, asma, Penyakit Paru Obstruktif Kronik (PPOK), penyakit kardiovaskular, serta kematian dini (Pope & Dockery, 2006; Brook et al., 2010; Utami, 2025). Selain itu paparan PM_{2.5} yang terjadi terus menerus terutama berasal dari asap rokok juga bisa berisiko terhadap kesehatan janin pada ibu hamil, berakibat pada risiko kejadian Berat Badan Lahir Rendah (BBLR) (Suzuki *et al.*, 2023; Yanti, Ansariadi and Abdullah, 2015)

Aktivitas industri berpotensi untuk mencemari lingkungan, misalnya pencemaran udara yang berasal dari asap dan debu, menurunkan kualitas lingkungan, dan menurunkan kualitas hidup masyarakat yang bermukim di sekitar kawasan industri. Industri nikel merupakan industri dengan proses produksi energi tinggi, karena membutuhkan banyak bahan bakar pada saat proses pembakaran di kalsiner dan tanur (kiln). Emisi dari industri nikel ke atmosfer meliputi partikulat matter (PM₁₀) dan partikulat matter (PM_{2,5}) (Sitorus & Irawan, 2024; M. Yanti, 2023).

Gas Berbahaya

Selain partikulat, pencemar udara dalam bentuk gas juga memberikan dampak signifikan terhadap kesehatan. Gas berbahaya yang umum ditemukan di udara antara lain :

1. Nitrogen Dioksida (NO₂)

Nitrogen dioksida (NO₂) merupakan bahan polutan udara sebagai salah satu komponen utama yang memberikan kontribusi terhadap kualitas udara maupun kualitas air hujan (hujan asam) Gas Nitrogen

dioksida (NO_2) diperoleh dari hasil kegiatan manusia yang menggunakan proses pembakaran pada temperatur yang cukup tinggi. Orang yang dalam keadaan sehat, maksimal hanya dapat menerima (NO_2) dengan konsentrasi $4700 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (2,5 ppm) selama kurang dari 2 jam, Nitrogen Dioksida (NO_2) juga akan memperburuk penyakit paru-paru yang mengarah ke gejala penyakit pernafasan dan meningkatkan kerentanan terhadap infeksi pernapasan (Fitriana, 2022).

2. Karbon Monoksida (CO)

Karbon monoksida (CO) bersifat toksik karena memiliki afinitas tinggi terhadap hemoglobin, sehingga menghambat pengangkutan oksigen dalam darah. Paparan CO dalam konsentrasi tinggi dapat menyebabkan pusing, gangguan kesadaran, hingga kematian.

3. Ozon (O_3)

Ozon (O_3) di permukaan tanah merupakan polutan sekunder yang terbentuk melalui reaksi fotokimia dan dapat menyebabkan iritasi paru, penurunan fungsi paru, serta memperburuk penyakit pernapasan.

Gas-gas ini sebagian besar dihasilkan dari proses pembakaran, baik dari kendaraan bermotor, pembangkit listrik, industri, maupun pembakaran terbuka (WHO, 2021).

Dampak Kesehatan pada Kelompok Rentan

Dampak pencemaran udara tidak dirasakan secara merata oleh seluruh populasi. Kelompok rentan seperti balita, anak-anak, ibu hamil, lansia, serta individu dengan penyakit kronis memiliki risiko yang lebih tinggi mengalami gangguan kesehatan akibat paparan polutan udara (WHO, 2018).

1. Balita

Sistem pernapasan yang masih berkembang menyebabkan mereka lebih sensitif terhadap paparan $PM_{2.5}$ dan gas berbahaya.

2. Anak - anak

Paparan pencemaran udara pada usia dini dikaitkan dengan peningkatan kejadian ISPA, gangguan pertumbuhan paru, serta risiko penyakit pernapasan jangka panjang.

3. Ibu Hamil

Paparan polutan udara berhubungan dengan peningkatan risiko berat badan lahir rendah, kelahiran prematur, dan gangguan perkembangan janin.

4. Lansia

Lansia yang memiliki sistem kekebalan tubuh yang lebih rentan, adalah kelompok yang paling terpengaruh paparan jangka panjang terhadap $PM_{2.5}$ berkorelasi langsung dengan peningkatan kasus asma dan bronkitis. Lansia dan individu dengan penyakit kardiovaskular atau pernapasan kronis juga sangat rentan terhadap pencemaran udara paparan jangka panjang terhadap polusi udara juga dapat menyebabkan penurunan fungsi paru-paru yang tidak dapat dipulihkan.

Perlindungan kelompok rentan menjadi salah satu prioritas utama dalam upaya penyehatan udara. Dalam perspektif kesehatan masyarakat, pemahaman mengenai jenis pencemar udara dan dampaknya menjadi dasar penting dalam perencanaan dan penerapan teknologi penyehatan udara. Dengan mengidentifikasi polutan dominan dan kelompok rentan, intervensi teknologi dapat dirancang secara lebih tepat sasaran dan efektif (Haya et al., 2025).

Teknologi Penyehatan Udara Dalam Ruangan

Ventilasi Alami dan Ventilasi Mekanik

Ventilasi merupakan bagian penting dari strategi yang lebih besar untuk meningkatkan kualitas udara dalam ruangan. Ventilasi berfungsi untuk mengganti udara dalam ruangan yang tercemar dengan udara luar yang relatif lebih bersih, sehingga menurunkan konsentrasi polutan dan patogen di udara (Kumar, A, 2022).

Ventilasi terbagi menjadi dua :

1. Ventilasi Alami

tetap menjadi intervensi penting untuk meningkatkan IAQ di rumah-rumah yang sudah ada, terutama di rumah-rumah yang lebih tua dan/atau rentan. Namun, tantangannya adalah mengoptimalkan strategi ventilasi alami sehingga IAQ tercapai sekaligus meminimalkan ketidaknyamanan termal (dan potensi konsumsi energi yang terkait) (Carlota, 2024; Irbah et al., 2024). Penerapan strategi ventilasi alami memerlukan pemenuhan dua kondisi dasar:

- a. Memiliki kondisi fisik dan kemampuan untuk melakukannya (yaitu jendela yang berfungsi dan dapat dibuka dan ditutup dengan benar, serta menciptakan aliran udara)
- b. Penghuni pengetahuan tentang cara dan waktu ventilasi yang tepat, dengan mempertimbangkan faktor-faktor seperti kualitas dan suhu udara luar, jumlah penghuni, atau aktivitas yang dilakukan didalam ruangan

2. Ventilasi Mekanik

Menggunakan sistem buatan seperti *exhaust fan*, *supply fan*, dan *Heating, Ventilation, and Air Conditioning* (HVAC) untuk mengatur sirkulasi udara.

Sistem ini memungkinkan kontrol yang lebih baik terhadap laju pertukaran udara dan distribusi udara bersih di dalam ruangan. Penelitian menunjukkan bahwa ventilasi mekanik yang dirancang dengan baik dapat menurunkan konsentrasi PM_{2.5} dan gas berbahaya serta mengurangi risiko penyakit saluran pernapasan (Morawska et al., 2020).

Air Purifier (HEPA, Karbon Aktif, dan Ultraviolet)

Air purifier merupakan teknologi penyehatan udara dalam ruangan yang semakin banyak digunakan, terutama di wilayah dengan tingkat pencemaran udara tinggi. Cara kerja perangkat ini :

1. Perangkat ini bekerja dengan menyaring atau menetralkan polutan udara menggunakan berbagai teknologi filtrasi
2. Filter *High Efficiency Particulate Air (HEPA)* mampu menangkap hingga 99,97% partikel berukuran $\geq 0,3 \mu\text{m}$, termasuk PM_{2.5}.

Studi intervensi menunjukkan bahwa penggunaan air purifier dengan filter HEPA secara signifikan menurunkan konsentrasi PM_{2.5} di dalam ruangan dan berdampak positif terhadap indikator kesehatan pernapasan. Filter karbon aktif digunakan untuk menyerap gas dan senyawa organik volatil (*Volatile Organic Compounds/VOCs*) yang berasal dari asap rokok, bahan bangunan, dan produk rumah tangga. Sementara itu, teknologi ultraviolet (UV) dimanfaatkan untuk menonaktifkan mikroorganisme seperti bakteri dan virus di udara. Meskipun efektif dalam menurunkan kontaminan biologis, teknologi UV umumnya digunakan sebagai pelengkap dan bukan pengganti filtrasi partikulat (WHO, 2021; Oh et al., 2024).

Kelebihan dan Keterbatasan Teknologi Penyehatan Udara Dalam Ruangan

Penerapan teknologi penyehatan udara dalam ruangan memiliki berbagai kelebihan :

1. Teknologi ini mampu memberikan perlindungan langsung terhadap penghuni bangunan, terutama kelompok rentan seperti balita, lansia, dan penderita penyakit pernapasan
2. Intervensi berbasis teknologi relatif cepat dalam menurunkan paparan polutan dibandingkan pendekatan kebijakan jangka panjang.

Teknologi penyehatan udara juga memiliki keterbatasan:

1. Biaya pengadaan dan perawatan perangkat, kebutuhan energi listrik, serta ketergantungan pada perilaku pengguna menjadi tantangan utama dalam implementasinya
2. Efektivitas teknologi juga sangat dipengaruhi oleh karakteristik bangunan, kepadatan penghuni, dan tingkat pencemaran udara luar

Oleh karena itu, teknologi penyehatan udara dalam ruangan sebaiknya diterapkan sebagai bagian dari pendekatan terpadu yang mengombinasikan perbaikan ventilasi, pengendalian sumber pencemar, serta edukasi perilaku hidup bersih dan sehat. Pendekatan ini sejalan dengan prinsip pencegahan penyakit berbasis lingkungan dan upaya promotif-preventif dalam kesehatan masyarakat (WHO, 2018; Yanti et al., 2024).

Teknologi Penyehatan Udara Luar Ruangan

***Green Technology* dalam Penyehatan Udara**

Green technology atau teknologi hijau merupakan pendekatan penyehatan udara luar ruangan yang

menekankan pemanfaatan solusi berbasis alam dan teknologi ramah lingkungan untuk mengurangi pencemaran udara. Pendekatan ini meliputi peningkatan ruang terbuka hijau, penanaman vegetasi penyerap polutan, pengembangan infrastruktur hijau di kawasan perkotaan dan industri. Vegetasi memiliki kemampuan menyerap dan menyaring polutan udara, khususnya partikulat dan gas berbahaya seperti Nitrogen dioksida (NO_2), Ozon (O_3). Penelitian menunjukkan bahwa keberadaan ruang hijau perkotaan dapat menurunkan konsentrasi $\text{PM}_{2.5}$, memperbaiki iklim mikro, serta memberikan manfaat tambahan bagi kesehatan mental dan kesejahteraan masyarakat (Nowak et al., 2014).

Kualitas udara dalam ruangan (IAQ) baru-baru ini mendapatkan perhatian yang cukup besar karena penularan penyakit pernapasan menular melalui udara menjadi masalah kesehatan masyarakat yang semakin meningkat. Polusi udara berdampak signifikan terhadap kesehatan manusia dan dianggap sebagai risiko kesehatan lingkungan terbesar di dunia oleh Organisasi Kesehatan Dunia (WHO). Tingkat polutan di dalam ruangan bisa hingga lima kali, atau bahkan 100 kali, lebih tinggi daripada tingkat polutan di luar ruangan, sehingga menimbulkan kekhawatiran yang signifikan karena rata-rata orang biasanya menghabiskan sekitar 90% waktunya di dalam ruangan (Ibrahim, 2022).

Pengendalian Emisi Pencemar Udara

Emisi kendaraan bermotor merupakan sumber polutan udara antropogenik yang signifikan, polusi udara merupakan masalah lingkungan yang mengkhawatirkan di seluruh dunia, dengan banyak penelitian yang telah dilakukan menunjukkan kemerosotannya yang disebabkan oleh emisi dari berbagai aktivitas antropogenik lainnya. Emisi kendaraan bermotor merupakan salah satu sumber gas dan partikel yang

paling signifikan. Selain itu, urbanisasi dan industrialisasi di banyak wilayah telah menyebabkan peningkatan jumlah kendaraan (Enitan & Piketh, 2026).

Pengendalian emisi merupakan strategi utama dalam pencegahan primer pencemaran udara karena mampu mengurangi polutan sebelum menyebar ke lingkungan dan terhirup oleh manusia. Namun, efektivitasnya sangat bergantung pada kepatuhan industri, pengawasan, serta dukungan kebijakan yang kuat. Pengendalian emisi merupakan teknologi penyehatan udara luar ruangan yang berfokus pada pengurangan polutan langsung dari sumbernya. Upaya ini mencakup penerapan teknologi pengendali emisi pada sektor transportasi, industri, dan pembangkit energi.

Beberapa teknologi yang umum digunakan antara lain *Catalytic converter* pada kendaraan bermotor, *Scrubber* dan *electrostatic precipitator* pada cerobong industri, dan peralihan ke bahan bakar yang lebih bersih. Pada sektor industri dan pertambangan, penerapan teknologi pengendalian debu seperti *Water spraying*, *Dust collector*, dan Penutup material angkutan, terbukti efektif menurunkan emisi partikulat ke udara ambien. Studi menunjukkan bahwa pengendalian emisi yang konsisten dapat menurunkan paparan PM_{2.5} secara signifikan dan berkontribusi terhadap penurunan kejadian penyakit pernapasan di masyarakat sekitar (Health Effects Institute, 2020).

Implementasi Teknologi Penyehatan Udara di Wilayah Rentan

Wilayah rentan merupakan area yang memiliki tingkat paparan pencemar udara tinggi serta kapasitas adaptasi masyarakat yang relatif rendah. Dalam konteks kesehatan lingkungan, wilayah ini memerlukan pendekatan penyehatan udara yang spesifik, terintegrasi, dan

berkelanjutan (WHO, 2021). Beberapa wilayah yang tergolong rentan antara lain kawasan pertambangan, kawasan pesisir, dan permukiman padat penduduk.

Implementasi di Kawasan Pertambangan

Kawasan pertambangan, khususnya pertambangan nikel, merupakan salah satu sumber pencemaran udara utama akibat aktivitas penggalian, pengangkutan material, *crushing*, dan penggunaan alat berat. Aktivitas tersebut menghasilkan debu partikulat ($PM_{2.5}$ dan PM_{10}) yang dapat menyebar ke permukiman sekitar dan meningkatkan risiko penyakit pernapasan, terutama ISPA pada kelompok rentan seperti balita dan lansia. Implementasi teknologi penyehatan udara di kawasan pertambangan perlu menitik beratkan pada pengendalian sumber emisi dan perlindungan lingkungan sekitar (Health Effects Institute, 2020).

Beberapa teknologi yang umum diterapkan meliputi sistem penyiraman debu (*water spraying*), *dust collector* pada fasilitas pengolahan, *green barrier* berupa vegetasi penahan debu, dan pemantauan kualitas udara berbasis sensor.

Pendekatan ini terbukti mampu menurunkan konsentrasi partikulat di udara ambien dan mengurangi paparan langsung masyarakat. Selain teknologi fisik, implementasi di kawasan pertambangan juga memerlukan dukungan kebijakan dan pengawasan lingkungan yang ketat. Integrasi teknologi penyehatan udara ke dalam dokumen analisis mengenai dampak lingkungan (AMDAL) serta program tanggung jawab sosial perusahaan (CSR) menjadi langkah strategis untuk menjamin keberlanjutan perlindungan kesehatan masyarakat sekitar (Gulia et al., 2015).

Implementasi di Kawasan Pesisir

Wilayah pesisir memiliki karakteristik lingkungan yang khas, termasuk pengaruh angin laut, kelembapan tinggi, serta aktivitas transportasi laut dan industri pelabuhan. (WHO, 2016). Kombinasi faktor tersebut dapat memengaruhi kualitas udara, terutama melalui resuspensi debu, emisi kapal, Interaksi polutan dengan aerosol laut.

Implementasi teknologi penyehatan udara di kawasan pesisir menekankan pada pendekatan berbasis ekosistem dan tata ruang. Pengembangan ruang terbuka hijau pesisir, rehabilitasi mangrove, serta penataan permukiman yang memanfaatkan ventilasi alami merupakan strategi utama dalam menurunkan paparan polutan udara. Studi menunjukkan bahwa vegetasi pesisir, khususnya mangrove, berperan sebagai penyaring alami polutan sekaligus pelindung lingkungan dari degradasi ekosistem (Nowak et al., 2014). Selain itu, pemantauan kualitas udara di kawasan pesisir menjadi penting untuk mendeteksi potensi peningkatan polutan akibat aktivitas pelabuhan dan industri maritim. Data pemantauan ini dapat digunakan sebagai dasar perencanaan intervensi kesehatan lingkungan dan pengambilan kebijakan berbasis bukti.

Implementasi di Permukiman Padat Penduduk

Permukiman padat penduduk merupakan wilayah dengan tingkat paparan polusi udara tinggi akibat aktivitas domestik, transportasi, dan keterbatasan ruang terbuka hijau. Kondisi ini diperparah oleh ventilasi lingkungan yang buruk dan tingginya aktivitas pembakaran terbuka, seperti pembakaran sampah rumah tangga (WHO, 2022).

Implementasi teknologi penyehatan udara di permukiman padat perlu mengombinasikan intervensi struktural dan perilaku. Intervensi struktural meliputi pengembangan

ruang terbuka hijau skala mikro, pengaturan tata letak bangunan untuk meningkatkan sirkulasi udara, pengendalian emisi kendaraan bermotor. Intervensi perilaku meliputi edukasi masyarakat tentang pengurangan sumber polusi rumah tangga dan pentingnya lingkungan sehat, pendekatan berbasis komunitas sangat penting dalam konteks permukiman padat, keterlibatan masyarakat dalam perencanaan dan pemeliharaan teknologi penyehatan udara akan meningkatkan efektivitas intervensi, keberlanjutan program kesehatan lingkungan.

Daftar Pustaka

- Amien, F. F. (2025). Paparan Partikulat Matter (PM 10 dan PM 2 , 5) pada Lingkungan Kerja di Pabrik Smelter PT Vale Sorowako , Luwu Timur. 25(2), 301–308.
- Baran, A., & Zender-Swiercz, E. (2026). Concentration of PM 2 . 5 and PM 10 Particulate Matter in Various Indoor Environments : A Literature Review. *Atmosphere*, 17(45), 1–58.
<https://doi.org/Atmosphere> 2026, 17, 45
<https://doi.org/10.3390/atmos17010045>
- Carlota, S. (2024). Energy & Buildings Natural ventilation to improve indoor air quality (IAQ) in existing homes : The development of health-based and context-specific user guidelines. 314(April).
- Enitan, I. T., & Piketh, S. J. (2026). Development of the Vehicular Emission Inventory of Criteria Air Pollutants for Sustainable Air Quality Management in Thulamela Municipality , South Africa. x, 1–19.
- Haya, F., Nisa, K., Ladipasa, R. F., Suriani, A., & Media, A. (2025). Dampak Polusi Udara terhadap Kesehatan Manusia. 3.
- Ibrahim, D. (2022). Hospital indoor air quality and its relationships with building design , building operation , and occupant-related factors : A.
- Irawan, B. (2024). Analisis Kualitas Udara Ambien dengan Parameter PM2,5 dan PM10 Pada Area Pabrik Pengolahan Bijih Nikel di Sulawesi Selatan. *Journal Techno*, 10(2), 11–20.
- Irbah, N., Nurika, G., & Ramani, A. (2024). Implementation of Indoor Air Quality Monitoring Systems of Particulate Matter 2,5 Based on The Internet of Things. *Jurnal Kesehatan Lingkungan*, 16(3), 266–276.
<https://doi.org/10.20473/jkl.v16i3.2024.266-276>
- Jones, E. R., Guillermo, J., Laurent, C., Young, A. S., Coull, B. A., Spengler, J. D., & Allen, J. G. (2024). Indoor Humidity Levels and Associations With

- Reported Symptoms in Office Buildings. 32(1), 1–24.
<https://doi.org/10.1111/ina.12961>.INDOOR
- Kementerian Kesehatan Republik Indonesia. (2022). Profil kesehatan Indonesia tahun 2021. Kementerian Kesehatan RI. <https://www.kemkes.go.id>
- Kumar, A., Moreno-Rangel, A., Khan, M. A. I., & Piasecki, M. (2022). entilation and Indoor Air Quality. Atmosphere.
<https://doi.org/10.3390/atmos13101730>
- Mountzouris, C., Protopsaltis, G., & Gialelis, J. (2026). A GraphRAG-Based Question-Answering System for Explainable and Advanced Reasoning over Air Quality Insights.
- Morawska, L., Tang, J. W., Bahnfleth, W., Bluyssen, P. M., Boerstra, A., Buonanno, G., Cao, J., Dancer, S., Floto, A., Franchimon, F., Haworth, C., Hogeling, J., Isaxon, C., Jimenez, J. L., Kurnitski, J., Li, Y., Loomans, M., Marks, G., Marr, L. C., Yao, M. (2020). How can airborne transmission of COVID-19 indoors be minimised? Environment International, 142, 105832.
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105832>
- Pope, C. A., & Dockery, D. W. (2006). Health effects of fine particulate air pollution: Lines that connect. Journal of the Air & Waste Management Association, 56(6), 709–742.
<https://doi.org/10.1080/10473289.2006.10464485>
- Oh, S., Chang, J., Jeong, J., Sik, D., Jin, D., Jae, H., Choi, H., Kim, M., Ha, J., Heo, H., Vervoort, R., & Chul, H. (2024). Effects of air purifiers and ventilation on particulate matter concentration at semi-outdoor space. Journal of Cleaner Production, 434(July 2023), 139903.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139903>
- Purwaningrum, S. I. (2024). Pemantauan Kualitas Udara. Penerbit Widina Media Utama.
- Sitorus, I. P. U., & Irawan, A. B. (2024). Analisis Kualitas Udara Ambien dengan Parameter PM2,5 dan PM10

- Pada Area Pabrik Pengolahan Bijih Nikel di Sulawesi Selatan. *Journal Techno*, 10(2), 11–20.
- Suzuki, D., Wariki, W. M. V, Octawijaya, I. H., Umboh, A., & Ota, E. (2023). Health Effects of Secondhand Smoke During Pregnancy on Maternal and Perinatal Outcome in Tomohon City, North Sulawesi, Indonesia. *The Indonesian Journal of Public Health*, 18(2). <https://doi.org/10.20473/ijph.v18i2.2023.179-193>
- Utami, P. (2025). Systematic Review: The Impact of Particulate Matter 2.5 (PM_{2.5}) Exposure on Public Health Around Coal Mines. 4(3), 938–952. <https://doi.org/10.55123/sehatmas.v4i3.6060>
- Yanti, F., Ansariadi, A., & Abdullah, A. Z. (2015). Analisis Paparan Particulate Matter (PM_{2.5} dan PM₁₀) Bersumber Lalulintas pada Ibu Hamil di Kota Makassar. Universitas Hasanuddin.
- Yanti, F., Buton, L. D., & Fitri. (2024). The Factors Influencing to Acute Respiratory Tract Infections in Toddlers In Besu Village. *Indonesian Journal of Health Sciences Research and Development*, 6(2), 26–38. <https://doi.org/10.36566/ijhsrd/Vol6.Iss2/239>
- Yanti, F., Mulyani, S., & Rafiuddin, A. T. (2024). Analysis of PHBS Indicators on Double Burden Disease in Toddlers in Nii Tanasa Village, Konawe District. *Miracle Journal of Public Health (MJPH)*, 7(2), 143–154. <https://doi.org/10.36566/mjph/Vol7.Iss2/386>
- Yanti, M. (2023). Hubungan Kadar Debu (PM₁₀) dengan Kejadian ISPA pada Industri Kota Padang. *Jurnal Media Ilmu*, 1(2).
- World Health Organization. (2018). WHO guidelines for indoor air quality: Household fuel combustion. World Health Organization. <https://www.who.int>
- World Health Organization. (2021). WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. World Health Organization. <https://www.who.int>

Zahra Fitriana, A. (2022). Gambaran Kadar Nitrogen Dioksida (NO₂) Udara Di Kota Yogyakarta Pada Tahun 2021 (Doctoral dissertation, Poltekkes Kemenkes Yogyakarta). 41, 13–28.

Profil Penulis



Fitri Yanti, SKM., M.Kes

Penulis dilahirkan di Kota Raha Kabupaten Muna Provinsi Sulawesi Tenggara pada Tanggal 29 Mei 1989. Merupakan anak ke-dua dari pasangan Bapak Mas'Uddin (Alm) dan ibu Nur Aeni. Penulis menyelesaikan program S1 di Program Studi Kesehatan Masyarakat Peminatan Epidemiologi Fakultas Kesehatan Masyarakat Universitas Hasanuddin lulus tahun 2012 dan menyelesaikan program S2 di Peminatan Epidemiologi Fakultas Kesehatan Masyarakat Universitas Hasanuddin lulus tahun 2015. Saat ini penulis sedang bekerja sebagai tenaga pengajar di Program Studi Sarjana Kesehatan Masyarakat Fakultas Ilmu-Ilmu Kesehatan Masyarakat Universitas Mandala Waluya, dan di Program Studi DIV Teknologi Laboratorium Medis Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Mandala Waluya. Penulis juga aktif dalam pengelolaan dua Jurnal di Program Studi Sarjana Kesehatan Masyarakat Universitas Mandala Waluya. Sehari-harinya bekerja sebagai dosen pengampu mata kuliah Surveilans Kesehatan Masyarakat, Manajemen Data Kesehatan Masyarakat, dan Biostatistik. Selain itu penulis juga aktif dalam menulis jurnal serta aktif menulis buku ajar dan *book chapter*.

Email Penulis: fitrililiyanti@gmail.com

TEKNOLOGI PENGENDALIAN VEKTOR DAN BINATANG PEMBAWA PENYAKIT

Fachry Rumaf, S.K.M., M.Kes.

Institut Kesehatan dan Teknologi Graha Medika

Pengantar Teknologi Pengendalian Vektor

Pengendalian vektor dan binatang pembawa penyakit adalah suatu aspek penting dalam kesehatan masyarakat yang bertujuan untuk mengurangi risiko penyakit yang ditularkan oleh hewan, seperti nyamuk, tikus, dan kutu. Menurut Organisasi Kesehatan Dunia (WHO), penyakit yang ditularkan oleh vektor menyebabkan sekitar 700.000 kematian setiap tahun di seluruh dunia (WHO, 2021). Dengan meningkatnya perubahan iklim dan urbanisasi, tantangan dalam pengendalian vektor semakin kompleks. Oleh karena itu, teknologi pengendalian vektor menjadi semakin relevan dan diperlukan untuk mengatasi masalah ini.

Teknologi pengendalian vektor mencakup berbagai metode, mulai dari penggunaan insektisida hingga teknik biologi dan genetika. Sebagai contoh, penggunaan insektisida berbasis biologi seperti *Bacillus thuringiensis israelensis* (Bti) telah terbukti efektif dalam mengendalikan populasi larva nyamuk tanpa membahayakan organisme non-target (WHO, 2020).

Selain itu, teknologi genetika seperti pengeditan gen CRISPR juga mulai diterapkan untuk mengubah sifat-sifat vektor agar tidak dapat menularkan penyakit. Contoh konkret dari penerapan ini dapat dilihat pada proyek yang dilakukan oleh Oxitec di mana mereka menciptakan nyamuk jantan yang dapat menurunkan populasi nyamuk *Aedes aegypti*, vektor utama penyakit dengue dan Zika.

Statistik menunjukkan bahwa negara-negara yang menerapkan teknologi pengendalian vektor yang inovatif mengalami penurunan signifikan dalam kasus penyakit yang ditularkan oleh vektor. Misalnya, di Brasil, program pengendalian nyamuk yang melibatkan teknologi genetika berhasil mengurangi populasi nyamuk *Aedes aegypti* hingga 90% dalam beberapa daerah (Faria et al., 2016). Hal ini menunjukkan bahwa inovasi teknologi dapat memberikan dampak positif yang signifikan dalam pengendalian penyakit.

Namun, tantangan tetap ada dalam penerapan teknologi ini. Resistensi terhadap insektisida adalah salah satu masalah utama yang dihadapi, di mana banyak vektor telah mengembangkan daya tahan terhadap bahan kimia yang digunakan. Menurut laporan dari Pusat Pengendalian dan Pencegahan Penyakit (CDC), lebih dari 60% populasi nyamuk di Amerika Serikat menunjukkan resistensi terhadap insektisida tertentu (CDC, 2019). Oleh karena itu, pengembangan dan penerapan teknologi baru harus terus dilakukan untuk memastikan efektivitas pengendalian vektor.

Dengan demikian, teknologi pengendalian vektor tidak hanya penting untuk kesehatan masyarakat, tetapi juga berperan dalam menjaga keseimbangan ekosistem. Mengingat dampak yang luas dari penyakit yang ditularkan oleh vektor, investasi dalam penelitian dan pengembangan teknologi ini harus menjadi prioritas bagi pemerintah dan lembaga kesehatan di seluruh dunia.

Metode Pengendalian Vektor

Metode pengendalian vektor dapat dibagi menjadi beberapa kategori utama, yaitu pengendalian fisik, kimia, biologi, dan genetika. Pengendalian fisik meliputi tindakan-tindakan seperti pengeringan genangan air, penggunaan jaring nyamuk, dan pengaturan lingkungan untuk mengurangi tempat berkembang biak vektor. Menurut studi yang dilakukan oleh Gubler (2011), pengendalian fisik terbukti efektif dalam mengurangi populasi nyamuk *Aedes* di daerah perkotaan.

Pengendalian kimia, di sisi lain, melibatkan penggunaan insektisida untuk membunuh vektor. Namun, penggunaan insektisida harus dilakukan dengan hati-hati karena dapat menyebabkan resistensi. Data menunjukkan bahwa penggunaan insektisida yang berlebihan di beberapa negara telah meningkatkan resistensi nyamuk terhadap beberapa jenis insektisida, sehingga mengurangi efektivitas pengendalian (Hemingway et al., 2016). Oleh karena itu, penting untuk mengembangkan strategi pengendalian yang berkelanjutan.

Metode biologi, seperti penggunaan predator alami atau patogen untuk mengendalikan populasi vektor, juga semakin populer. Misalnya, penggunaan bakteri *Wolbachia* yang dapat menginfeksi nyamuk *Aedes aegypti* telah menunjukkan hasil yang menjanjikan dalam mengurangi penularan virus dengue (Hoffmann et al., 2011). Penelitian menunjukkan bahwa nyamuk yang terinfeksi *Wolbachia* memiliki kemampuan yang lebih rendah untuk menularkan virus dengue, sehingga dapat mengurangi penyebaran penyakit.

Teknologi genetika merupakan metode yang paling inovatif dan menjanjikan dalam pengendalian vektor. Dengan menggunakan teknik seperti CRISPR, para

ilmuwan dapat memodifikasi gen vektor untuk mengurangi kemampuannya dalam menularkan penyakit. Sebagai contoh, proyek Oxitec yang telah disebutkan sebelumnya berhasil menciptakan nyamuk jantan yang menghasilkan keturunan yang tidak dapat bertahan hidup, sehingga mengurangi populasi nyamuk secara signifikan (Oxitec, 2020).

Meskipun berbagai metode pengendalian vektor telah dikembangkan, penting untuk memahami bahwa tidak ada satu metode pun yang dapat menjadi solusi tunggal. Pendekatan yang terintegrasi, yang menggabungkan berbagai metode pengendalian, akan memberikan hasil yang lebih efektif dan berkelanjutan. Oleh karena itu, kolaborasi antara ilmuwan, pemerintah, dan masyarakat sangat diperlukan untuk mencapai tujuan pengendalian penyakit yang ditularkan oleh vektor.

Teknologi Inovatif dalam Pengendalian Vektor

Dalam beberapa tahun terakhir, teknologi inovatif telah muncul sebagai solusi baru dalam pengendalian vektor. Salah satu teknologi yang paling menarik perhatian adalah penggunaan drone untuk pemantauan dan pengendalian populasi vektor. Drone dapat digunakan untuk memetakan daerah-daerah yang berisiko tinggi terkena penyakit yang ditularkan oleh vektor dan melakukan penyemprotan insektisida secara efisien. Menurut penelitian oleh Khanna et al. (2018), penggunaan drone dalam pengendalian nyamuk dapat meningkatkan efektivitas penyemprotan hingga 80% dibandingkan dengan metode konvensional.

Selain itu, teknologi Internet of Things (IoT) juga mulai diterapkan dalam pengendalian vektor. Dengan menggunakan sensor yang terhubung, para peneliti dapat memantau populasi vektor secara real-time dan mengidentifikasi pola penyebaran penyakit. Data yang

diperoleh dari sensor ini dapat digunakan untuk mengambil keputusan yang lebih tepat dan cepat dalam pengendalian vektor. Sebuah studi oleh Shakya et al. (2020) menunjukkan bahwa penerapan IoT dalam pengendalian nyamuk dapat meningkatkan respons terhadap wabah penyakit.

Teknologi pengeditan gen, seperti CRISPR, juga menawarkan potensi besar dalam pengendalian vektor. Dengan kemampuan untuk mengedit gen secara presisi, para ilmuwan dapat menciptakan vektor yang tidak dapat menularkan penyakit. Sebagai contoh, proyek yang dilakukan oleh Harvard University berhasil mengembangkan nyamuk yang dapat mengurangi penularan virus malaria dengan mengubah gen yang terlibat dalam reproduksi nyamuk (Gantz et al., 2015). Hal ini membuka peluang baru dalam pengendalian penyakit yang selama ini sulit diatasi.

Penggunaan vaksin untuk vektor juga menjadi area penelitian yang menarik. Vaksin yang dirancang untuk meningkatkan kekebalan vektor terhadap patogen dapat membantu mengurangi penyebaran penyakit. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa vaksin berbasis protein dapat meningkatkan ketahanan nyamuk terhadap virus dengue, sehingga mengurangi penularan (Morrison et al., 2020). Meskipun masih dalam tahap penelitian, teknologi ini menunjukkan potensi yang besar untuk diterapkan di lapangan.

Dengan adanya teknologi inovatif ini, pengendalian vektor dapat dilakukan dengan cara yang lebih efektif dan efisien. Namun, tantangan dalam penerapan teknologi ini tetap ada, termasuk isu etika dan keamanan. Oleh karena itu, penting untuk melakukan penelitian yang mendalam dan melibatkan berbagai pemangku kepentingan dalam pengembangan dan penerapan teknologi ini.

Tantangan dalam Pengendalian Vektor

Meskipun teknologi pengendalian vektor telah menunjukkan kemajuan yang signifikan, masih ada banyak tantangan yang harus dihadapi. Salah satu tantangan terbesar adalah resistensi terhadap insektisida. Banyak vektor, terutama nyamuk, telah mengembangkan resistensi terhadap berbagai jenis insektisida yang digunakan dalam pengendalian. Menurut laporan dari WHO, resistensi insektisida telah dilaporkan di lebih dari 80 negara (WHO, 2019). Hal ini mengharuskan peneliti untuk mencari alternatif yang lebih efektif dan berkelanjutan.

Selain itu, perubahan iklim juga memberikan dampak signifikan terhadap populasi vektor dan penyebaran penyakit. Perubahan suhu dan pola curah hujan dapat mempengaruhi siklus hidup dan distribusi vektor. Sebuah studi oleh Ryan et al. (2019) menunjukkan bahwa perubahan iklim dapat meningkatkan risiko penyebaran penyakit yang ditularkan oleh nyamuk di daerah yang sebelumnya tidak terpengaruh. Oleh karena itu, pemahaman yang lebih baik tentang bagaimana perubahan iklim mempengaruhi vektor sangat penting dalam merancang strategi pengendalian yang efektif.

Faktor sosial dan ekonomi juga memainkan peran penting dalam pengendalian vektor. Di banyak negara berkembang, kurangnya akses terhadap layanan kesehatan dan pendidikan menyebabkan peningkatan risiko penyakit yang ditularkan oleh vektor. Menurut Bank Dunia, lebih dari 1,3 miliar orang di seluruh dunia hidup dalam kemiskinan ekstrem, yang membuat mereka lebih rentan terhadap penyakit (World Bank, 2020). Oleh karena itu, pendekatan yang berfokus pada peningkatan kualitas hidup masyarakat juga diperlukan untuk mengurangi risiko penyakit.

Tantangan lain yang tidak kalah penting adalah masalah etika dan regulasi dalam penerapan teknologi baru. Penggunaan teknologi genetika dalam pengendalian vektor, misalnya, menimbulkan pertanyaan tentang dampak jangka panjang terhadap ekosistem. Beberapa kelompok masyarakat mungkin menolak penggunaan teknologi ini karena kekhawatiran akan konsekuensi yang tidak terduga. Oleh karena itu, penting untuk melibatkan masyarakat dalam diskusi tentang penggunaan teknologi baru dan memastikan bahwa regulasi yang ada dapat mengakomodasi perkembangan teknologi.

Dengan memahami dan mengatasi tantangan-tantangan ini, pengendalian vektor dapat dilakukan dengan lebih efektif. Kolaborasi antara ilmuwan, pemerintah, dan masyarakat sangat penting untuk menciptakan solusi yang berkelanjutan dan dapat diimplementasikan di lapangan.

Kesimpulan dan Rekomendasi

Dalam kesimpulan, teknologi pengendalian vektor dan binatang pembawa penyakit memainkan peran penting dalam menjaga kesehatan masyarakat dan mengurangi beban penyakit yang ditularkan oleh vektor. Meskipun berbagai metode telah dikembangkan, tantangan seperti resistensi insektisida, perubahan iklim, dan faktor sosial ekonomi masih harus dihadapi. Oleh karena itu, pendekatan yang terintegrasi dan inovatif sangat diperlukan untuk mencapai tujuan pengendalian penyakit yang efektif.

Rekomendasi untuk pengembangan teknologi pengendalian vektor mencakup peningkatan investasi dalam penelitian dan pengembangan, serta kolaborasi antara berbagai pemangku kepentingan. Pendidikan dan kesadaran masyarakat juga harus ditingkatkan untuk memastikan dukungan dalam penerapan teknologi baru.

Selain itu, regulasi yang jelas dan etis harus diterapkan untuk memastikan bahwa teknologi yang digunakan aman bagi manusia dan lingkungan.

Dengan pendekatan yang tepat, penggunaan teknologi pengendalian vektor dapat memberikan dampak positif yang signifikan dalam mengurangi penyebaran penyakit yang ditularkan oleh vektor. Hal ini akan berkontribusi pada peningkatan kualitas hidup masyarakat dan pencapaian tujuan kesehatan global.

Daftar Pustaka

- CDC. (2019). Insecticide Resistance in Mosquitoes. Retrieved from CDC
- Faria, N. R., et al. (2016). Genomic and Epidemiological Characterization of Zika Virus in Brazil. *Nature*, 534(7606), 247-251.
- Gantz, V. M., et al. (2015). Highly efficient Cas9-mediated transcriptional gene activation in *Drosophila*. *Nature*, 528(7581), 524-529.
- Hemingway, J., et al. (2016). Averting a global crisis in insecticide resistance. *Nature*, 545(7655), 218-224.
- Hoffmann, A. A., et al. (2011). Successful establishment of *Wolbachia* in *Aedes* populations to suppress dengue transmission. *Nature*, 476(7361), 454-457.
- Khanna, P., et al. (2018). Drones in vector control: A review. *Geospatial Health*, 13(1), 1-10.
- Morrison, A. C., et al. (2020). The role of mosquito-borne viruses in the emergence of zoonotic diseases. *Nature Reviews Microbiology*, 18(1), 23-34.
- Oxitec. (2020). Our Technology. Retrieved from Oxitec
- Ryan, S. J., et al. (2019). The impact of climate change on global malaria distribution. *Nature Climate Change*, 9(10), 830-835.
- Shakya, H. M., et al. (2020). Internet of Things for vector control: A review. *Environmental Science & Technology*, 54(3), 1677-1690.
- WHO. (2019). World Malaria Report 2019. Retrieved from WHO.
- WHO. (2020). Vector control. Retrieved from WHO.
- WHO. (2021). Vector-borne diseases. Retrieved from WHO.
- World Bank. (2020). Poverty and Shared Prosperity 2020: Reversals of Fortune. Retrieved from World Bank.

Profil Penulis



Fachry Rumaf, S.K.M., M.Kes

Penulis dilahirkan di Kota Tual Provinsi Maluku pada Tanggal 25 Desember 1994. Anak pertama dari 5 bersaudara. Orang Tua Ayah bernama Samsuddin Rumaf, S.Pd. dan Ibu Ija Elewarin, S.Pd.I. Penulis menyelesaikan program S1 di Program Studi Kesehatan Masyarakat Universitas Tamalatea Makassar lulus tahun 2017. Menyelesaikan Program S2 di Program Studi Ilmu Kesehatan Masyarakat Program Pascasarjana Universitas Tamalatea Makassar lulus tahun 2019. Saat ini penulis sedang melanjutkan pendidikan di Program Studi S3 Entomologi Universitas Sam Ratulangi. Pengalaman organisasi Jaringan Muda Sarjana Kesehatan Masyarakat (JMKMI) 2019-2021. Saat ini Penulis menjabat sebagai Ketua Lembaga Penjaminan Mutu Institut Kesehatan dan Teknologi Graha Medika. Penulis juga aktif sebagai dosen pengajar di Program Studi Kesehatan Masyarakat Institut Kesehatan dan Teknologi Graha Medika. Dengan mata kuliah Kesehatan Lingkungan Dasar, Analisis Kualitas Lingkungan, Teknologi Kesehatan Digital, dan Teknologi Kesehatan Lingkungan. Selain itu penulis juga aktif dalam menulis jurnal dan *book chapter*.

Email Penulis: fachryrumaf5@gmail.com

PENERAPAN IOT DAN BIG DATA DALAM PENGAWASAN LINGKUNGAN

Angki Irawan, M.P.H.
Poltekkes Kemenkes Jayapura

Konsep Dasar Integrasi IoT dan Big Data dalam Ecowatch

Konsep dasar “*Ecowatch*” berakar pada integrasi sinergis Internet of Things (IoT) dan Big Data, menciptakan ekosistem pemantauan yang menghubungkan dunia fisik dengan analisis digital secara seamless. Dalam kerangka kerja ini, IoT berfungsi sebagai “indra penglihatan” atau sistem saraf sensoris yang terhubung langsung dengan lingkungan. Perangkat sensor yang ditempatkan di berbagai titik lokasi strategis bertindak sebagai reseptor aktif yang mengumpulkan data fisik seperti suhu, kelembaban, intensitas cahaya, dan kualitas udara secara *real-time* dan terus-menerus. Melalui kemampuan ini, IoT mengubah fenomena alam yang abstrak menjadi sinyal digital yang terukur, memungkinkan pengawasan lingkungan yang tidak lagi bergantung pada pengambilan sampel manual yang sporadic dan rentan kesalahan, melainkan pada aliran data yang dinamis dan menyeluruh (Gholami et al., 2021).

Seiring dengan membanjirnya data yang dihasilkan oleh “indra penglihatan” IoT, peran Big Data menjadi krusial sebagai “otak pemroses” yang bertugas mengelola kompleksitas informasi tersebut. Teknologi Big Data menyediakan infrastruktur komputasi yang diperlukan untuk menangani karakteristik data lingkungan yang dikenal sebagai 3V (Volume data yang sangat besar dari ribuan sensor yang tersebar luas, Velocity atau kecepatan tinggi dalam aliran data ‘*streaming*’ yang harus diproses sesaat, serta Variety atau keragaman forma data yang heterogeny. Sistem ini tidak hanya sekedar menyimpan data, tetapi juga mengolahnya melalui teknik pemrosesan lanjutan untuk menemukan bola tersembunyi di balik angka-angka acak. Dengan demikian, Big Data menerjemahkan data mentah yang massif menjadi informasi yang terstruktur dan berharga, mengatasi keterbatasan pemrosesan database konvensional yang tidak mampu menampung laju dan kompleksitas data IoT (Chen & Zhang, 2014; Tsai et al., 2015a).

Sinergi antara kedua teknologi ini pada akhirnya bertujuan untuk mewujudkan pengawasan lingkungan cerdas (*smart surveillance*) yang memiliki tingkat akurasi tinggi dan kemampuan respons cepat. Tujuan utamanya adalah mendeteksi anomaly lingkungan secara dini, seperti peringatan dini kebakaran hutan, deteksi tumpahan limbah berbahaya, atau lonjakan polusi udara, sehingga langkah mitigasi dapat dilakukan seketika sebelum kerusakan meluas. Lebih jauh, integrasi ini mendorong penerapan pengambilan keputusan berbasis data (*data-driven decision making*) dalam manajemen lingkungan. Para pengambil kebijakan dan pemangku kepentingan kini dapat merancang strategi konservasi dan regulasi yang lebih efektif berdasarkan pada bukti empiris dari analisis prediktif, bukan sekedar asumsi, sehingga menciptakan tata kelola lingkungan yang proaktif dan berkelanjutan (Al-Garadi et al., 2020; Bibri & Krogstie, 2017).

Arsitektur Sensor Jaringan dan Pengumpulan Data (IoT Layer)

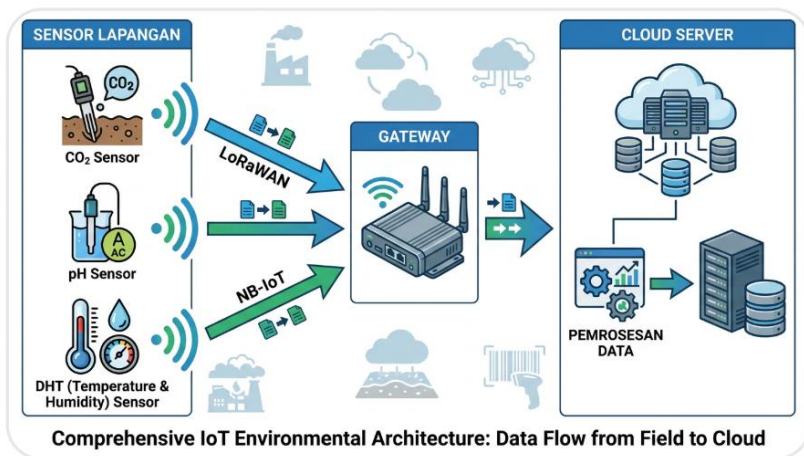
Pada lapisan persepsi (*perception layer*) dalam arsitektur pengawasan lingkungan, perangkat keras bertindak sebagai antarmuka langsung dengan elemen fisik, dimana keragaman jenis sensor menentukan cakupan parameter yang dapat dipantau. Untuk mencapai pemantauan yang komprehensif, sistem *Ecowatch* mengintegrasikan berbagai sensor spesifik seperti sensor gas elektrokimia untuk mendeteksi konsentrasi polutan berbahaya seperti CO₂ dan NO₂, serta sensor optik untuk mengukur partikulat halus PM2,5 yang berdampak pada kesehatan pernapasan. Selain kualitas udara, pemantauan ekosistem air juga dilakukan menggunakan sensor pH air dan sensor kekeruhan, sementara sensor suhu dan kelembaban digital seperti tipe DHT (DHT11/DHT22) ditempatkan secara luas untuk merekam data iklim mikro. Kombinasi perangkat keras ini memastikan bahwa data fisik yang dikumpulkan mencakup seluruh aspek vital lingkungan dengan tingkat sensitivitas yang tinggi (Sheth et al., 2020).

Data yang berhasil ditangkap oleh sensor tersebut kemudian diteruskan melalui *Wireless Sensor Networks* (WSN) yang memanfaatkan berbagai topologi jaringan dan protokol komunikasi yang disesuaikan dengan kondisi lapangan yang luas. Topologi jaringan seperti *mesh* sering digunakan karena kemampuannya merutekan data melalui beberapa node perantara, sehingga memperluas jangkauan dan meningkatkan redundansi jika salah satu node gagal, sedangkan topologi *star* digunakan untuk struktur yang lebih sederhana dan terpusat. Mengingat lokasi pengawasan lingkungan seringkali berada di area terpencil, pemilihan protokol komunikasi menjadi kunci efisiensi energi; teknologi LPWAN (*Low Power Wide Area Network*) seperti LoRaWAN dan Sigfox sangat populer

karena mampu mentransmisikan data hingga jarak kilometer dengan konsumsi daya sangat rendah, sementara NB-IoT menawarkan kestabilan sinyal seluler untuk area yang tercover jaringan operator, seperti yang ditunjukkan pada diagram berikut (Mekki et al., 2019).

Lingkungan adalah ilmu yang mempelajari

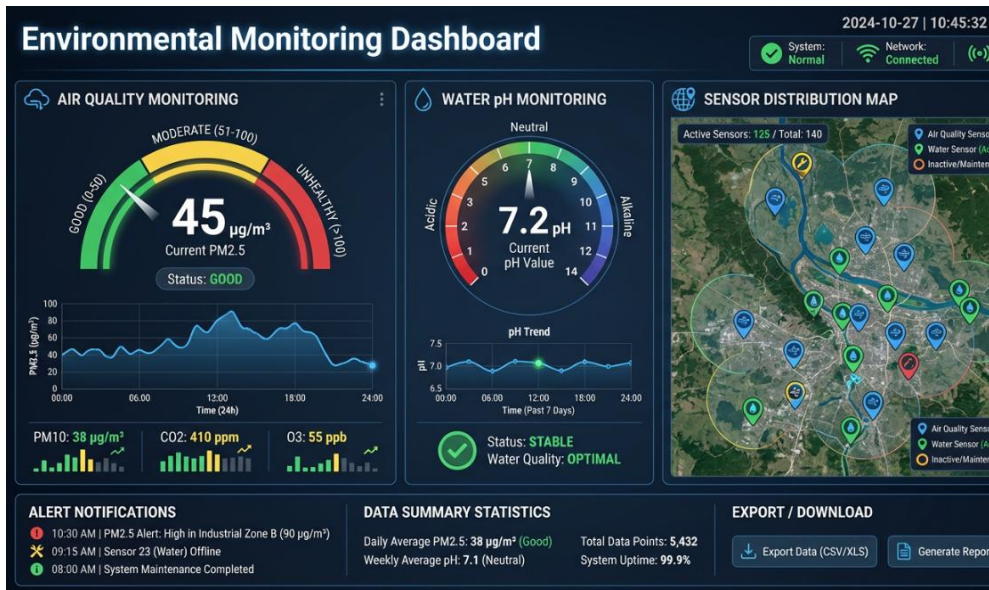
1. Lingkungan



Gambar 8.1 Diagram Arsitektur IoT Lingkungan

Tingkat akuisisi data (*data acquisition*) berfungsi sebagai jembatan krusial antara dunia analog sensor dan dunia digital sistem pemrosesan, yang melibatkan proses konversi dan pengiriman data dari *edge device*. Karena sensor lingkungan umumnya menghasilkan sinyal analog (seperti tegangan variabel yang bergantung pada suhu atau pH), mikrokontroler yang tertanam dalam *edge device* melakukan konversi sinyal analog ke digital (ADC) untuk menerjemahkan besaran fisik tersebut menjadi format biner yang dapat dibaca oleh computer. Data digital ini kemudian dikemas dan dikirimkan melalui jaringan menuju *gateway* atau server pusat untuk diagregasi dan divisualisasikan. Hasil akhir dari proses

akuisisi ini adalah representasi data yang dapat diakses pengguna melalui antarmuka yang user-friendly, seperti yang terlihat pada contoh tampilan pemantauan *real-time* berikut (Islam et al., 2015) :



Gambar 8.1 Contoh Tampilan Dashboard Pemantauan Lingkungan

Teknologi Big Data dalam Pemrosesan Data Lingkungan

Di sisi perangkat lunak, fondasi utama dari teknologi Big Data dalam pemrosesan lingkungan terletak pada manajemen penyimpanan yang mampu mengakomodasi karakteristik data sensor yang kontinu dan masif. Data lingkungan yang dikirim oleh perangkat IoT umumnya bersifat *time-series* (deret waktu) yang mengalir terus-menerus 24/7, sehingga sistem manajemen basis data relasional tradisional seringkali gagal menangani beban tersebut karena keterbatasan skala. Untuk mengatasi hal ini, digunakan teknologi penyimpanan terdistribusi seperti

Hadoop HDFS (*Hadoop Distributed File System*) yang memungkinkan penyimpanan file berukuran besar di dalam kluster computer secara parallel. Selain itu, database *NoSQL* seperti *MongoDB* atau *Cassandra* sering menjadi pilihan utama karena kemampuannya dalam menangani data yang tidak terstruktur atau semi-terstruktur dengan fleksibilitas skema yang tinggi, serta mendukung operasi tulis yang secepat untuk mencatat log sensor secara *real-time* tanpa hambatan (Gall & Brost, 2016; Jing Han et al., 2011).

Setelah mekanisme penyimpanan terbangun, teknik pemrosesan data diterapkan melalui dua pendekatan utama, yaitu *batch processing* dan *stream processing*, yang masing-masing memiliki fungsi spesifik dalam analisis lingkungan. *Batch processing* digunakan untuk menganalisis data historis dalam volume besar yang telah tersimpan, misalnya untuk membuat laporan tren jangka panjang mengenai perubahan iklim bulanan atau tahunan. Sebaliknya *stream processing* sangat krusial untuk deteksi bahaya *real-time* yang membutuhkan latensi rendah; teknologi seperti *Apache Spark* (dengan kemampuan *in-memory processing*) dan *Apache Kafka* (sebagai *messaging broker*) memungkinkan sistem memproses data *on-the-fly* saat data tersebut tiba. Pendekatan *streaming* ini memungkinkan sistem *Ecowatch* untuk mendeteksi lonjakan polusi mendadak atau perubahan suhu ekstrem dalam hitungan detik dan segera memicu peringatan dini sebelum data tersebut disimpan ke dalam *data warehouse* (Kreps, 2015; Zaharia et al., n.d.).

Lapisan analitik paling maju dalam ekosistem ini diwujudkan melalui penerapan *data mining* dan *machine learning*, yang berfungsi untuk menggali wawasan prediktif dari data yang telah dikumpulkan. Algoritma pembelajaran mesin (*machine learning*) dilatih

menggunakan data historis untuk memodelkan pola-perubahan alam yang kompleks, yang kemudian digunakan untuk memprediksi kejadian di masa depan. Dalam konteks lingkungan, teknologi ini dapat dimanfaatkan untuk memprediksi potensi kebakaran hutan berdasarkan kombinasi data kelembaban tanah, suhu udara, dan kecepatan angin, serta memproyeksikan kualitas udara di masa depan dengan menganalisis pola emisi industri dan kondisi meteorologi. Dengan demikian, teknologi Big Data tidak hanya berfungsi sebagai arsip data, tetapi berkembang menjadi alat peramal cerdas yang mendukung mitigasi bencana dan perencanaan lingkungan yang proaktif (Bibri & Krogstie, 2017; Witten et al., 2017).

Implementasi Sektor Pengawasan Lingkungan

1. Pemantauan Kualitas Udara Perkotaan (*Smart City*)

Implementasi pengawasan lingkungan di sektor pemantauan kualitas udara perkotaan dalam kerangka *Smart City* telah mengubah cara kota mengelola krisis polusi melalui penerapan sensor IoT yang tertanam pada infrastruktur perkotaan yang sudah ada, seperti tiang lampu jalan dan atap gedung-gedung tinggi. Pendekatan ini memungkinkan dilakukannya pemetaan polusi udara (*pollution mapping*) dengan resolusi spasial yang sangat detail dan *granular*, di mana sensor-sensor mikro bekerja secara *real-time* untuk mendeteksi tingkat partikulat (PM_{2,5}, PM₁₀) dan gas beracun di setiap sudut kota, sehingga mengatasi keterbatasan stasiun pemantauan konvensional yang hanya mampu memberikan data agregat. Sebagai contoh nyata dari implementasi yang sukses Beijing, China telah membangun jaringan pemantauan udara yang sangat luas dengan mengintegrasikan ribuan sensor IoT di

seluruh penjuru kota, memungkinkan pemerintah setempat untuk memvisualisasikan penyebaran polusi secara akurat, mengidentifikasi sumber emisi spesifik, dan mengambil tindakan mitigasi cepat saat kualitas udara mencapai tingkat berbahaya (Lu et al., 2020; Singh et al., 2018).

2. Pengawasan Kualitas Air dan Lautan

Pengawasan kualitas air dan lautan dalam ekosistem *Ecowatch* dilaksanakan melalui penerapan *buoy* cerdas dan *drone* tak berawak yang berfungsi untuk memantau parameter kritis seperti pH, kekeruhan (*turbidity*), dan kadar oksigen terlarut (DO) di perairan sungai maupun laut. Sistem ini sangat vital untuk deteksi dini pencemaran industri limbah cair, dimana sensor yang terintegrasi mampu mendeteksi anomali kimia secara instan saat terjadi pembuangan limbah berbahaya, sehingga memungkinkan pihak berwenang untuk segera mengambil tindakan sebelum polutan menyebar luas. Sebagai contoh nyata penerapan yang sukses, Irlandia melalui *Smart Bay* di Teluk Galway telah mengerahkan jaringan sensor *buoy* yang terhubung satelit untuk memantau kualitas air laut secara *real-time*, memberikan data akurat bagi peneliti dan otoritas untuk mengelola sumber daya perairan dalam mendeteksi dampak aktivitas industri pesisir secara efektif (Ge et al., 2017; O'Connor et al., 2017).

3. Manajemen Limbah dan Daur Ulang (*Smart Waste Management*)

Implementasi pengawasan lingkungan pada sektor manajemen limbah dan daur ulang, atau *Smart Waste Management*, berfokus pada pemanfaatan sensor kapasitas di dalam tempat sampah pintar (*smart bins*) untuk memantau volume sampah secara *real-time*,

yang kemudian diintegrasikan dengan sistem manajemen armada untuk mengoptimalkan jalur pengangkutan truk sampah secara dinamis. Sistem ini menggantikan jadwal pengangkutan statis dengan pendekatan berbasis permintaan, dimana truk hanya dikirim ke lokasi yang telah terdeteksi penuh oleh sensor, sehingga secara signifikan mengurangi konsumsi bahan bakar, kemacetan lalu lintas, dan jejak karbon. Lebih jauh lagi, teknologi Big Data diterapkan untuk menganalisis data historis pengisian tempat sampah guna mengidentifikasi pola pembuangan sampah spesifik di setiap wilayah, memberikan wawasan strategis bagi pemerintah kota dalam perencanaan lokasi penempatan *bin* baru dan perumusan kebijakan daur ulang yang lebih efektif. Sebagai contoh nyata penerapan yang sukses, Kota Amsterdam, Belanda, telah mengadopsi infrastruktur *smart bins* (seperti teknologi Bigbelly) yang terhubung ke jaringan IoT, memungkinkan pengurangan frekuensi pengangkutan sampah hingga 90% dan meningkatkan efisiensi operasional kebersihan kota secara keseluruhan (Berman, 2012; Dutta et al., 2015).

4. Mitigasi Bencana Alam

Implementasi pengawasan lingkungan dalam sektor mitigasi bencana alam berfokus pada penerapan sistem peringatan dini yang terintegrasi untuk mengurangi risiko kerugian jiwa dan property melalui gabungan sensor lapangan dan teknologi penginderaan jauh. Dalam konteks penanggulangan banjir, pemasangan sensor tinggi muka air otomatis atau *Automatic Water Level Recorder* (AWLR) di titik-titik strategis sepanjang sungai dan waduk memungkinkan pemantauan elevasi air secara *real-time*, ketika data menunjukkan lonjakan volume yang

melampaui ambang batas aman, sistem otomatis mengirimkan peringatan dini kepada otoritas dan warga sekitar. Sementara itu, untuk mitigasi kebakaran hutan, sistem menggabungkan pembacaan sensor suhu dan kelembaban lingkungan yang ekstrem dengan analisis citra satelit untuk mendeteksi *hotspot* atau titik panas yang menjadi indikasi awal kebakaran, sehingga memungkinkan pemadaman dilakukan sebelum api meluas. Sebagai contoh nyata yang telah menerapkan teknologi ini secara signifikan, Indonesia membangun jaringan pemantauan banjir cerdas menggunakan ratusan unit AWLR yang terhubung secara online di daerah aliran sungai (DAS) prioritas seperti Jakarta dan Jawa Barat, serta memanfaatkan sistem satelit pemantauan *hotspot* untuk mengelola ancaman kebakaran hutan di wilayah Sumatera dan Kalimantan secara lebih efektif (Efendi et al., 2021; Saputro et al., 2020).

Visualisasi Data dan Dashboard Pemantauan

Visualisasi data dan dashboard pemantauan memegang peran kunci sebagai antarmuka utama yang menerjemahkan kompleksitas data *Big Data* menjadi informasi yang mudah dicerna oleh pengguna akhir, menjembatani kesenjangan antara teknis pemrosesan data dan pemahaman manusia. Dashboard *real-time* dirancang dengan prinsip *User Interface* (UI) yang intuitif dan responsive, memungkinkan pemangku kepentingan, mulai dari pemerintah hingga masyarakat umum, untuk melihat status lingkungan saat ini melalui representasi visual yang dinamis. Fitur utama dari dashboard ini adalah integrasi yang erat dengan *Geographic Information Systems* (GIS) untuk menampilkan peta sebaran polusi atau indikator kesehatan ekosistem secara spasial. Serta grafik *time-series* yang memperlihatkan fluktuasi parameter lingkungan seperti suhu atau kualitas udara.

Desain visual yang efektif ini memastikan bahwa pola data yang tersembunyi di dalam ribuan titik sensor dapat diidentifikasi secara instan, menciptakan transparansi dan situasional awareness yang tinggi terhadap kondisi lingkungan yang sedang dipantau (Mamduhi et al., 2020; Silva et al., 2018).

Selain menyajikan data secara pasif, sistem pengawasan lingkungan cerdas dilengkapi dengan mekanisme Sistem Peringat Dini (*Early Warning System* atau *Alert System*) yang berfungsi sebagai garda depan respons keamanan dan mitigasi resiko. Sistem ini beroperasi berdasarkan logika ambang batas (*threshold*), dimana notifikasi otomatis akan segera dikirimkan ke pengguna melalui berbagai kanal komunikasi seperti SMS, email, atau *push notification* pada aplikasi mobile ketika sensor mendeteksi pelanggaran ambang batas aman (*threshold violation*). Mekanisme ini sangat krusial dalam situasi darurat, seperti saat terjadi lonjakan kadar gas beracun, kenaikan muka air yang berbahaya, atau deteksi titik panas kebakaran hutan. Dengan mengirimkan peringatan yang tepat waktu dan terarah, sistem ini memastikan bahwa otoritas dan warga yang berisiko dapat segera melakukan tindakan evakuasi atau penanganan sebelum dampak lingkungan tersebut meluas menjadi bencana yang lebih besar (Kim et al., 2019; Rathore et al., 2016).

Tantangan dan Kendala Penerapan

Meskipun menawarkan kemampuan pemantauan yang canggih, penerapan IoT dalam pengawasan lingkungan menghadapi tantangan mendasar pada aspek perangkat keras, khususnya terkait keterbatasan sumber daya dan ketahanan fisik. Sensor yang ditempatkan di lokasi terpencil seperti hutan lebat atau tengah samudera sangat sulit dijangkau untuk pemeliharaan rutin atau penggantian baterai, sehingga ketergantungan pada

sumber daya energi yang terbatas menjadi titik kelemahan kritis yang dapat menghentikan aliran data (Mekki et al., 2019). Selain itu, ketahanan perangkat sensor terhadap kondisi cuaca ekstrem, seperti suhu tinggi di kebakaran hutan, korosi akibat air laut, atau kelembaban berlebih, seringkali tidak memadai untuk jangka panjang. Kegagalan perangkat keras ini tidak hanya merugikan dari sisi finansial, tetapi juga mengakibatkan *blind spots* (titik buta) dalam data, yang dapat mengancam integritas seluruh sistem pemantauan jika tidak di desain dengan redundansi yang tepat (Lazarescu, 2013).

Tantangan signifikan berikutnya terletak pada infrastruktur konektivitas jaringan, yang menjadi pembatas utama dalam menyebarkan cakupan pengawasan ke area yang paling kritis sekalipun. Di daerah pedalaman atau wilayah geografis yang kompleks seperti lereng gunung dan dasar hutan tropis, jangkauan sinyal seluler atau internet konvensional seringkali tidak tersedia, sehingga menghambat transmisi data secara *real-time* (Al-Garadi et al., 2020). Masalah ini semakin rumit dalam aplikasi pemantauan lingkungan bawah air, dimana gelombang radio konvensional mengalami redaman yang sangat tinggi memaksa penggunaan teknologi komunikasi khusus yang mahal dan memiliki kapasitas (*latency*) atau kehilangan paket informasi, yang secara langsung mengurangi efektivitas sistem peringatan dini bencana yang mengharuskan respons sesegera mungkin (Jawhar et al., 2018).

Disisi *software* dan analitik, isu keamanan data (*cybersecurity*) dan kualitas data muncul sebagai ancaman serius terhadap kredibilitas *Ecowatch*. Sistem IoT yang terhubung ke internet rentan terhadap serangan siber, dimana peretas berpotensi memanipulasi data sensor untuk menyembunyikan pelanggaran lingkungan atau memicu atau memicu alarm palsu yang dapat

menimbulkan kepanikan publik mengganggu operasional (Sicari et al., 2015). Selain risiko eksternal tersebut, tantangan intrinsik berupa kualitas dan konsistensi data juga harus dikelola secara kritis. Sensor lingkungan seringkali menghasilkan data yang mengandung *noise*, *outlier* akibat kesalahan kalibrasi, atau bahkan *missing data* karena gangguan jaringan. Jika data yang *kotor* ini tidak dibersihkan dan diproses dengan teknik imputasi yang tepat sebelum masuk ke analisis Big Data, hasil prediksi atau pengambilan keputusan yang dihasilkan akan menjadi bias, tidak akurat, dan berpotensi menyesatkan dalam kebijakan pengelolaan lingkungan (Tsai et al., 2015b).

Tren Masa Depan: Environmental Digital Twins

Melangkah melampaui kapabilitas pemantauan masa kini, masa depan pengawasan lingkungan akan ditandai oleh konsep *Environmental Digital Twins* atau Kembar Digital Ekosistem, yang merevolusi cara manusia berinteraksi dengan alam. Konsep ini melibatkan pembuatan replika virtual yang sangat akurat dan dinamis dari Kawasan fisik, entah itu sebuah kawasan hutan, sungai, maupun seluruh ekosistem perkotaan, yang terus-menerus diperbaharui oleh data sensor *real-time*. Tujuan utama dari inovasi ini adalah menyediakan wadah simulasi canggih (*what-if scenarios*) bagi para perencana dan pengambil keputusan; misalnya, memprediksi dampak lingkungan dari Pembangunan pabrik baru atau perubahan tata ruang sebelum keputusan konstruksi diambil secara fisik. Dengan menjalankan simulasi ini di *Digital Twin*, otoritas dapat mengevaluasi risiko banjir, penyebaran polusi, atau gangguan biodiversitas tanpa harus mengorbankan lingkungan nyata, sehingga memungkinkan perencanaan yang berkelanjutan dan bebas kesalahan mahal (Barnaghi et al., 2020; Leng et al., 2021).

Sejalan dengan evolusi representasi digital disisi *cloud*, tren pemanfaatan *AI Edge* (atau *Edge AI*) muncul sebagai Solusi vital untuk mengatasi hambatan konektivitas dan efisiensi energi disisi perangkat. Dalam paradigma ini, kemampuan kecerdasan buatan tidak hanya terpusat di server pusat, tetapi juga ditanamkan langsung ke dalam *microcontroller* pada sensor atau *gateway*. Sensor-sensor ini akan dilengkapi dengan model *machine learning* yang ringan (*lightweight models*) yang memungkinkan mereka melakukan analisis sederhana secara lokal, seperti membedakan suara hujan dengan suara ranting patah untuk deteksi penebangan liar, atau mengidentifikasi pola asap dari kamera pengawas hutan. Dengan melakukan pemrosesan data awal ini di “tepi” jaringan (*edge*), sistem tidak perlu mengirimkan aliran data mentah yang besar (seperti video atau log frekuensi tinggi) ke *cloud*, sehingga menghemat bandwidth secara signifikan, mengurangi latensi, dan meningkatkan ketahanan sistem jaringan internet terputus di area terpencil (Deepa et al., 2020; PremSankar et al., 2018).

Konvergensi antara *Environmental Digital Twins* dan *AI Edge* pada akhirnya akan menciptakan ekosistem pengawasan lingkungan yang otonom dan prediktif. Data yang telah disaring dan dianalisis oleh *Edge AI* akan menjadi input yang bersih dan bernilai tinggi bagi *Digital Twin*, yang kemudian menyempurnakan model simulasinya untuk akurasi yang lebih baik. Siklus umpan balik ini memungkinkan transisi dari pendekatan reaktif dimana tindakan baru diambil setelah kerusakan terjadi menuju pendekatan proaktif, dimana sistem mampu mempredikan anomaly dan menyarankan tindakan pencegahan secara otomatis. Integrasi mendalam ini tidak hanya meningkatkan efisiensi operasional, tetapi juga memperkuat ketahanan (*resilience*) lingkungan terhadap perubahan iklim dan bencana alam melalui manajemen berbasis data yang lebih cerdas (Kim et al., 2019; Qi & Tao, 2018).

Daftar Pustaka

- Al-Garadi, M. A., Mohamed, A., Al-Ali, A., Du, X., & Guizani, M. (2020). A Survey of Machine and Deep Learning Methods for Internet of Things (IoT) Security. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 3(22), 1686–1721.
- Barnaghi, P., Sheth, A., & Henson, C. (2020). From Data-Centric to Cognitive IoT. In *Cognitive Internet of Things: Foundations, Technologies, and Applications* (pp. 3–26). Springer.
- Berman, B. (2012). 3-D printing: The new Industrial Revolution. *Business Horizons*, 55(2), 155–162.
- Bibri, S. E., & Krogstie, J. (2017). Smart sustainable cities of the future: An extensive interdisciplinary literature review. *Sustainable Cities and Society*, 31, 183–212. <https://doi.org/10.1016/J.SCS.2017.02.016>
- Chen, P., & Zhang, C. (2014). Data-intensive applications, challenges, techniques and technologies: A survey on Big Data. *Inf. Sci.*, 275, 314–347. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:10082337>
- Deepa, N., Khan, M. Z., Prabadevi, B., Vincent P.M., D. R., Maddikunta, P. K. R., & Gadekallu, T. R. (2020). Multiclass Model for Agriculture Development Using Multivariate Statistical Method. *IEEE Access*, 8, 183749–183758. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3028595>
- Dutta, S., Narang, A., Bhattacharjee, S., Das, A. S., & Krishnaswamy, D. (2015). Predictive Caching Framework for Mobile Wireless Networks. *2015 16th IEEE International Conference on Mobile Data Management*, 179–184. <https://doi.org/10.1109/MDM.2015.14>
- Efendi, R., Lesmana, L. S., Putra, F., Yandani, E., & Wulandari, R. A. (2021). Design and Implementation of Computer Based Test (CBT) in vocational education. *Journal of Physics: Conference Series*, 1764(1),

012068. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1764/1/012068>
- Gall, M., & Brost, G. (2016). K-Word Proximity Search on Encrypted Data. *2016 30th International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops (WAINA)*, 365–372. <https://doi.org/10.1109/WAINA.2016.104>
- Ge, M., Bang, Y., & Kim, D.-S. (2017). A New Water Quality Monitoring System using Zigbee based Wireless Sensor Network. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 13(6).
- Gholami, H., Sharifi, R., & Sadeghi-Niaraki, A. (2021). *The Role of the Internet of Things (IoT) in Environmental Sustainability*. Springer.
- Islam, S. M. R., Kwak, D., Kabir, Md. H., Hossain, M., & Kwak, K. (2015). The Internet of Things for Health Care: A Comprehensive Survey. *IEEE Access*, 3, 678–708. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2015.2437951>
- Jawhar, I., Mohamed, N., & Al-Jaroodi, J. (2018). Networking architectures and protocols for smart city systems. *Journal of Internet Services and Applications*, 9. <https://doi.org/10.1186/s13174-018-0097-0>
- Jing Han, Haihong E, Guan Le, & Jian Du. (2011). Survey on NoSQL database. *2011 6th International Conference on Pervasive Computing and Applications*, 363–366. <https://doi.org/10.1109/ICPCA.2011.6106531>
- Kim, Y., Gaul, T., & Köhler, B. (2019). Improved SH0 Guided Wave Transducers Based on Piezoelectric Fiber Patches. *Sensors*, 19(13), 2990. <https://doi.org/10.3390/s19132990>
- Kreps, J. (2015). *Kafka: The Definitive Guide: Real-time Data and Stream Processing at Scale*. O'Reilly Media.
- Lazarescu, M. T. (2013). Design of a WSN Platform for Long-Term Environmental Monitoring for IoT Applications. *IEEE Journal on Emerging and Selected*

- Topics in Circuits and Systems*, 3(1), 45–54.
<https://doi.org/10.1109/JETCAS.2013.2243032>
- Leng, J., Wang, D., Shen, W., Li, X., Liu, Q., & Chen, X. (2021). Digital twins-based smart manufacturing system design in Industry 4.0: A review. *Journal of Manufacturing Systems*, 60, 119–137.
<https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.05.011>
- Lu, J., Zhou, H., Zhu, H., Zhang, Y., Liang, Q., & Xiao, G. (2020). DCEM: A data cell evolution model for service composition based on bigraph theory. *Future Generation Computer Systems*, 112, 330–347.
<https://doi.org/10.1016/j.future.2020.05.006>
- Mamduhi, M. H., Champati, J. P., Gross, J., & Johansson, K. H. (2020). Where Freshness Matters in the Control Loop: Mixed Age-of-Information and Event-Based Co-Design for Multi-Loop Networked Control Systems. *Journal of Sensor and Actuator Networks*, 9(3), 43.
<https://doi.org/10.3390/jsan9030043>
- Mekki, K., Bajic, E., Chaxel, F., & Meyer, F. (2019). A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment. *ICT Express*, 5(1), 1–7.
<https://doi.org/10.1016/j.ict.2017.12.005>
- O'Connor, R., O'Grady, M., O'Hare, G. M., & O'Flynn, B. (2017). Smart Bay: A Testbed for Sensor Based Water Monitoring in Galway Bay. *Proceeding of the 12th International Conference on Sensor Networks (SENSORNETS 2017)*.
- PremSankar, G., Di Francesco, M., & Taleb, T. (2018). Edge Computing for the Internet of Things: A Case Study. *IEEE Internet of Things Journal*, 5(2), 1275–1284.
<https://doi.org/10.1109/JIOT.2018.2805263>
- Qi, Q., & Tao, F. (2018). Digital Twin and Big Data Towards Smart Manufacturing and Industry 4.0: 360 Degree Comparison. *IEEE Access*, 6, 3585–3593.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2793265>
- Rathore, M. M., Ahmad, A., Paul, A., & Rho, S. (2016). Urban Planning and Building Smart Cities Based on

- the Internet of Things using Big Data Analytics. *Computer Networks*, 101, 63–80.
- Saputro, D. S., Wibowo, S., & Prasetyo, P. K. (2020). IoT-based Flood Monitoring System using AWLR and Weather Sensor. *2020 2nd International Conference on Cybernetics and Intelligent System (ICORIS)*, 1–6.
- Sheth, A., Anantharam, P., & Ryoo, J. (2020). IoT and Smart Cities: A Survey of Application Architectures and Technologies. *GetMobile: Mobile Computing and Communications*, 24(2), 18–22.
- Sicari, S., Rizzardi, A., Grieco, L. A., & Coen-Porisini, A. (2015). Security, privacy and trust in Internet of Things: The road ahead. *Computer Networks*, 76, 146–164. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2014.11.008>
- Silva, B. N., Khan, M., & Han, K. (2018). Towards sustainable smart cities: A review of trends, architectures, components, and open challenges in smart cities. *Sustainable Cities and Society*, 38, 697–713. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.01.053>
- Singh, K., Heulot, N., & Hamida, E. Ben. (2018). Towards Anonymous, Unlinkable, and Confidential Transactions in Blockchain. *2018 IEEE International Conference on Internet of Things (IThings) and IEEE Green Computing and Communications (GreenCom) and IEEE Cyber, Physical and Social Computing (CPSCom) and IEEE Smart Data (SmartData)*, 1642–1649. https://doi.org/10.1109/Cybermatics_2018.2018.00274
- Tsai, C.-W., Lai, C.-F., Chao, H.-C., & Vasilakos, A. V. (2015a). Big Data Analytics: A Survey. *Journal of Big Data*, 2, 21.
- Tsai, C.-W., Lai, C.-F., Chao, H.-C., & Vasilakos, A. V. (2015b). Big data analytics: a survey. *Journal of Big Data*, 2(1), 21. <https://doi.org/10.1186/s40537-015-0030-3>

- Witten, I. H., Frank, E., Hall, M. A., & Pal, C. J. (2017). *Data Mining Practical Machine Learning Tools and Techniques Fourth Edition*. <https://www.elsevier.com>
- Zaharia, M., Chowdhury, M., Das, T., Dave, A., Ma, J., Mccauley, M., Franklin, M. J., & Shenker, S. (n.d.). Resilient Distributed Datasets: A Fault-Tolerant Abstraction for In-Memory Cluster Computing. *Proceedings of the 9th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation (NSDI)*.

Profil Penulis



Angki Irawan, M.P.H

Penulis lahir di Kuantan Singingi Provinsi Riau pada tanggal 23 Januari 1989. Penulis menyelesaikan pendidikan S1 Kesehatan Masyarakat minat Kesehatan Lingkungan di Fakultas Ilmu Kesehatan Prodi Kesehatan Masyarakat Universitas Hang Tuah Pekanbaru Tahun 2011 dan menyelesaikan studi S2 Master of Public Health (M.P.H) minat kesehatan lingkungan di Fakultas Kedokteran, Kesehatan Masyarakat dan Keperawatan (FKKMK) Universitas Gadjah Mada pada tahun 2016. Penulis memiliki kepakaran dibidang Kesehatan Lingkungan. Saat ini penulis bekerja sebagai dosen tetap di Jurusan Kesehatan Lingkungan Politeknik Kesehatan Kementerian Kesehatan Jayapura. Sebagai dosen, penulis aktif melaksanakan Tri Dharma Perguruan Tinggi, baik kegiatan Penelitian, Pengabdian Masyarakat, dan Pengajaran dibidang kesehatan lingkungan. Beberapa penelitian dan pengabdian kepada masyarakat yang telah dilakukan didanai oleh internal perguruan tinggi, dan publikasi telah diterbitkan di jurnal nasional terakreditasi maupun nasional berISBN

Email Penulis : angkiph@gmail.com

TEKNOLOGI TEPAT GUNA BERBASIS MASYARAKAT

Muhamad Faisal Pataha, S.Kom., M.P.H.
Poltekkes Kemenkes Ternate

Paradigma Baru Sanitasi di Era Digital

Filosofi Teknologi Tepat Guna (TTG) 5.0 menandai evolusi besar dalam dunia sanitasi, di mana solusi fisik yang sederhana tidak lagi berdiri sendiri, melainkan diperkuat oleh keterhubungan data digital (Pitriyanti & Daswito, 2024). Di era ini, sebuah alat penjernih air atau pengolah limbah tidak hanya berfungsi secara mekanis, tetapi juga mampu "berbicara" melalui data. Hubungan ini menciptakan transparansi informasi, jika dahulu efektivitas sebuah alat hanya bisa dirasakan secara subjektif, kini teknologi digital memungkinkan parameter kualitas lingkungan dipantau secara presisi (Nur Yuhenita et al., 2025). Filosofi ini menekankan bahwa integrasi digital bukan bertujuan untuk merumitkan teknologi, melainkan untuk memberikan kepastian dan efisiensi yang lebih tinggi dalam upaya pemutusan rantai penularan penyakit berbasis lingkungan (Nur Yuhenita et al., 2025).

Karakteristik utama dari TTG modern tetap memegang teguh prinsip ekonomi dan kemudahan, namun dengan nilai tambah berupa keterukuran digital. Sebuah teknologi dikatakan tepat guna di era digital jika tetap

ekonomis sehingga terjangkau oleh masyarakat, namun memiliki desain yang standar agar mudah direplikasi di berbagai wilayah, termasuk daerah kepulauan (Saleh et al., 2024). Perbedaan mendasar terletak pada sifatnya yang "terukur secara digital"; penggunaan sensor murah dan sistem pelaporan berbasis aplikasi membuat performa alat dapat diverifikasi secara *real time*. Dengan demikian, efektivitas teknologi tidak lagi hanya berdasarkan asumsi, melainkan berdasarkan data akurat yang dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah namun tetap operasional bagi orang awam.

Kehadiran teknologi digital menuntut transformasi peran bagi para dosen, mahasiswa, dan praktisi kesehatan lingkungan menjadi "*Sanitarian Digital*". Peran ini bukan lagi sekadar memberikan instruksi teknis pembuatan sarana sanitasi, melainkan menjadi fasilitator yang menjembatani masyarakat dengan literasi teknologi. Dosen dan mahasiswa di institusi seperti Pendidikan diharapkan mampu membimbing masyarakat dalam memanfaatkan perangkat digital sederhana untuk monitoring mandiri. Transformasi ini mengubah pola pengabdian masyarakat dari yang bersifat konvensional menjadi lebih kolaboratif, di mana sanitarian berperan sebagai analis data dan pendamping teknologi, memastikan bahwa setiap inovasi yang diterapkan di lapangan tidak hanya terbangun secara fisik, tetapi juga berkelanjutan secara sistemik melalui pengawasan berbasis teknologi (Nur Yuhanita et al., 2025).

Digitalisasi Analisis Kebutuhan Sanitasi Partisipatif

1. Mobile Surveying dalam Pemetaan Risiko Sanitasi

Digitalisasi analisis kebutuhan dimulai dengan pemanfaatan mobile surveying sebagai pengganti instrumen survei berbasis kertas yang cenderung lambat dan berisiko kehilangan data. Penggunaan

aplikasi seperti KoboToolbox atau Google Forms memungkinkan kader desa dan sanitarian untuk melakukan pendataan risiko sanitasi secara langsung di lapangan dengan hasil yang masuk ke sistem secara *real time*. Dengan fitur validasi data otomatis dan kemampuan bekerja tanpa sinyal internet (*offline*), aplikasi ini memastikan informasi mengenai akses jamban, kualitas air minum, hingga perilaku pembuangan sampah terkumpul secara akurat. Kecepatan pengolahan data ini menjadi kunci dalam pengambilan keputusan yang cepat, sehingga intervensi teknologi tepat guna dapat segera direncanakan berdasarkan fakta lapangan yang paling mutakhir (Makmur et al., 2025).

2. Pemetaan Partisipatif Berbasis GIS dan GPS Smartphone

Pemetaan partisipatif kini semakin kuat dengan integrasi sistem informasi geografis (GIS) yang dapat diakses hanya melalui smartphone milik masyarakat atau petugas lapangan. Melalui fitur GPS, setiap titik sumber air, lokasi tumpukan sampah, atau pemukiman dengan sanitasi buruk dapat ditandai secara spasial (*geotagging*). Masyarakat diajak untuk terlibat aktif dalam memetakan lingkungan mereka sendiri, yang memberikan perspektif visual mengenai sebaran masalah kesehatan lingkungan di wilayah tersebut. Peta digital yang dihasilkan tidak hanya berfungsi sebagai alat pendataan, tetapi juga sebagai media advokasi bagi pengambil kebijakan di tingkat desa untuk memprioritaskan pembangunan infrastruktur sanitasi di titik-titik yang paling kritis dan berisiko tinggi terhadap penularan penyakit (Pahude & Purnomo, 2025).

3. Dashboard Komunitas sebagai Media Visualisasi Data

Tahap akhir dari digitalisasi analisis ini adalah transformasi data mentah hasil STBM (Sanitasi Total Berbasis Masyarakat) ke dalam bentuk dashboard komunitas yang interaktif dan mudah dimengerti oleh warga awam. Alih-alih menyajikan tabel angka yang rumit, data ditampilkan dalam bentuk grafik warna-warni atau peta tematik yang menunjukkan progres capaian sanitasi desa. Visualisasi ini berfungsi sebagai alat pemicu semangat warga; mereka dapat melihat secara transparan area mana yang sudah "*Open Defecation Free*" (ODF) dan mana yang masih memerlukan perbaikan. Dengan menghadirkan data ke ruang publik melalui dashboard digital, transparansi dan akuntabilitas pembangunan sanitasi di tingkat akar rumput dapat terjaga, sekaligus meningkatkan rasa percaya diri masyarakat untuk terus berinovasi dalam memelihara lingkungan mereka (Nur Yuhenita et al., 2025).

TTG Penyediaan Air Bersih & Sensor Monitoring

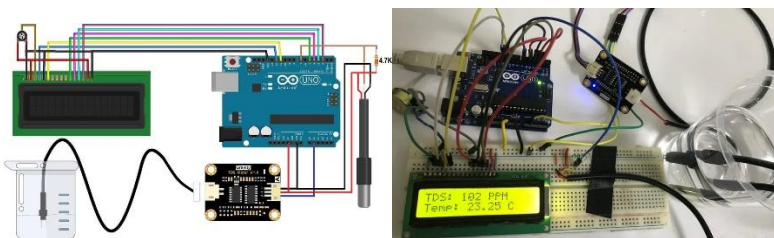
1. Inovasi Filtrasi Lokal: Desain Saringan Pasir dan Karbon Aktif

Inovasi penyediaan air bersih berbasis masyarakat menitikberatkan pada pemanfaatan material yang tersedia melimpah di lingkungan sekitar untuk menciptakan sistem filtrasi yang efektif namun murah. Desain saringan pasir lambat (SPL) dimodifikasi dengan menggunakan susunan bertingkat yang terdiri dari kerikil, pasir kuarsa, dan karbon aktif yang dibuat dari tempurung kelapa hasil olahan lokal (MENTERI KESEHATAN, 2024). Kombinasi bahan-bahan ini terbukti mampu menyaring partikel suspensi, menetralkan bau, serta memperbaiki rasa air secara signifikan. Dengan

menekankan pada kemudahan replikasi, masyarakat diajak untuk memahami prinsip kerja kapilaritas dan adsorpsi melalui alat yang mereka bangun sendiri, sehingga ketergantungan pada filter pabrikan yang mahal dapat dikurangi tanpa mengorbankan standar kualitas air bersih yang dihasilkan.

2. Integrasi Sensor Kualitas Air Digital

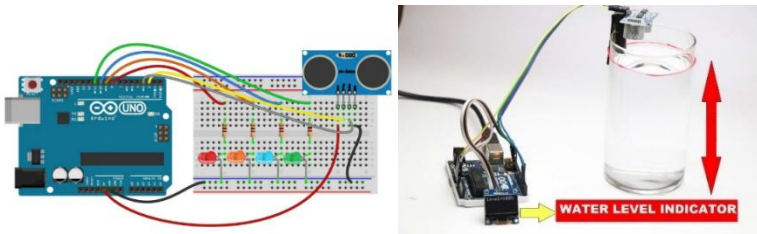
Untuk meningkatkan kepercayaan masyarakat terhadap hasil filtrasi, teknologi fisik tersebut diintegrasikan dengan sensor kualitas air digital yang bersifat ekonomis. Penggunaan mikrokontroler sederhana seperti Arduino yang dihubungkan dengan sensor *Total Dissolved Solids* (TDS) dan sensor pH memungkinkan masyarakat untuk memantau kelayakan air secara mandiri dan presisi (Suhanto, 2025). Alat ini dirancang dengan antarmuka yang sederhana, memberikan pembacaan angka digital yang langsung menunjukkan apakah air tersebut memenuhi syarat fisik untuk digunakan. Integrasi teknologi ini mengubah kebiasaan masyarakat yang sebelumnya hanya mengandalkan indra penglihatan dan penciuman dalam menilai air, menjadi penilaian objektif berbasis data ilmiah yang mudah dioperasikan oleh orang awam sekalipun.



Gambar 9.1 Pemantauan Kualitas Air Arduino
(Sumber: <https://www.arduinoindonesia.id/>)

3. Sistem Peringatan Dini Kekeringan pada Penampungan Air Hujan (PAH)

Di wilayah yang sangat bergantung pada air hujan, pengelolaan cadangan air menjadi sangat krusial, terutama menjelang musim kemarau. Implementasi sensor tingkat kedalaman air (*ultrasonic level sensor*) pada bak Penampung Air Hujan (PAH) komunal berfungsi sebagai sistem peringatan dini kekeringan yang cerdas. Masyarakat dapat secara kolektif mengatur strategi penghematan air atau merencanakan pengisian ulang sebelum cadangan benar-benar habis (Saleh et al., 2024). Sistem ini tidak hanya berfungsi sebagai alat monitoring teknis, tetapi juga sebagai sarana komunikasi sosial yang memperkuat tata kelola air berbasis komunitas di era digital.



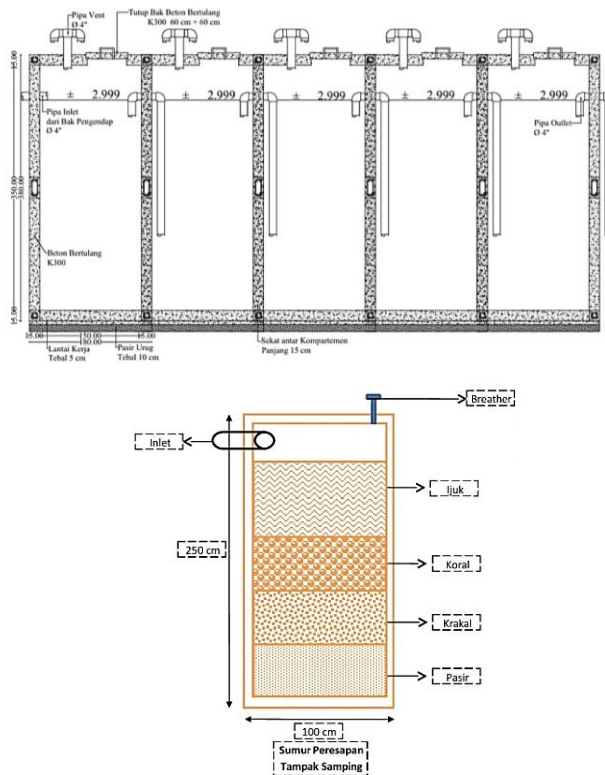
Gambar 9.2 Ultrasonic Water Level Indicator Arduino
(Sumber: <https://www.arduinoindonesia.id/>)

TTG Limbah Cair & Smart Monitoring System

1. Desain IPAL Komunal Sederhana dan Lahan Basah Buatan

Pengelolaan limbah cair domestik pada skala komunitas memerlukan pendekatan yang alami namun tetap teknis melalui pembangunan Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) komunal yang adaptif (MENTERI KESEHATAN, 2024). Desain ini menggabungkan unit filtrasi anaerob yang berfungsi

menguraikan polutan organik tanpa membutuhkan energi listrik dengan sistem lahan basah buatan (*constructed wetlands*) (Abdi et al., 2025). Dalam sistem lahan basah ini, tanaman air lokal seperti eceng gondok atau melati air digunakan sebagai agen fitoremediasi untuk menyerap sisa-sisa nutrisi dan logam berat secara biologis.

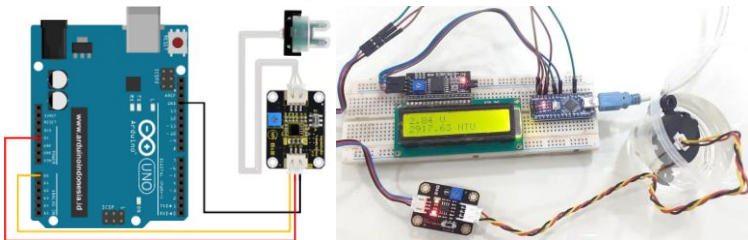


Gambar 9.3 Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL)
(Sumber: (Abdi et al., 2025))

2. Sensor Kekeruhan Digital untuk Pemantauan Efektivitas Pengolahan

Keberlanjutan fungsi sarana sanitasi seperti tangki septik dan IPAL sering kali terkendala oleh kelalaian dalam pemeliharaan rutin. Sebagai solusi digital,

untuk menjamin bahwa air limbah yang telah diproses benar-benar aman sebelum dilepas kembali ke lingkungan, teknologi IPAL fisik tersebut dilengkapi dengan sensor kekeruhan (*turbidity sensor*) digital yang bersifat ekonomis. Alat pemantau ini bekerja dengan mengukur tingkat kejernihan air pada bak outlet akhir dan menampilkan hasilnya dalam parameter yang mudah dipahami. Dengan adanya perangkat elektronik sederhana ini, masyarakat tidak lagi menebak-nebak efektivitas kinerja filternya, mereka dapat melihat secara objektif kapan unit filter anaerob memerlukan pembersihan atau kapan tanaman pada lahan basah perlu diremajakan. Integrasi sensor ini memberikan standar kendali mutu yang ilmiah pada teknologi tepat guna, memastikan fungsi perlindungan lingkungan berjalan secara optimal dan terukur (Suhanto, 2025).



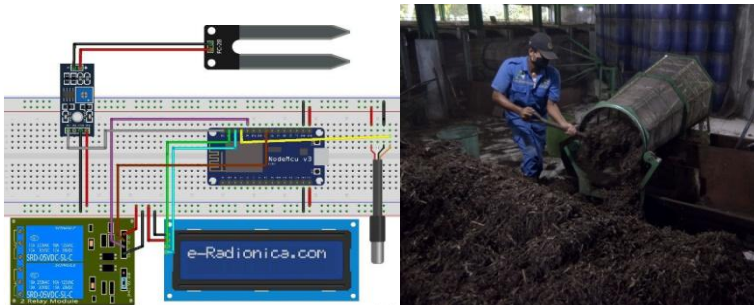
Gambar 9.4 *Turbidity Sensor* (Kekeruhan Air) Arduino
(Sumber: <https://www.arduinoindonesia.id/>)

Smart Waste Management Berbasis Masyarakat

1. Komposting Digital: Optimalisasi Suhu untuk Hasil Berkualitas

Transformasi pengelolaan sampah organik di tingkat rumah tangga dilakukan dengan mengadopsi teknik komposting digital yang menjamin keberhasilan proses dekomposisi. Penggunaan termometer digital probe memungkinkan masyarakat untuk memantau

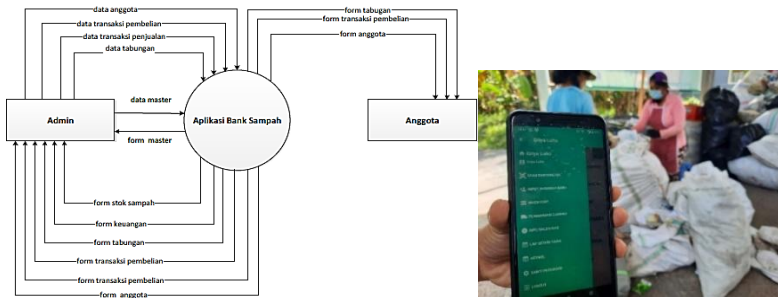
suhu di dalam tumpukan kompos secara akurat, yang merupakan indikator krusial bagi aktivitas mikroorganisme termofilik (Sandi & Hartono, 2020). Dengan mengetahui fluktuasi suhu secara *real time*, warga dapat menentukan waktu yang tepat untuk melakukan pembalikan atau pengaturan kelembaban tumpukan. Pendekatan ini mengubah cara pengomposan tradisional yang sering kali gagal karena pembusukan anaerob atau suhu yang terlalu rendah, menjadi proses yang terukur secara ilmiah sehingga menghasilkan pupuk organik berkualitas tinggi dalam waktu yang lebih singkat (Saiful Amin et al., 2021).



Gambar 9.5 Monitoring Suhu dan Kelembaban Arduino
(Sumber: (Saiful Amin et al., 2021))

2. Aplikasi Bank Sampah Digital dan Transparansi Keuangan

Dalam pengelolaan sampah anorganik, digitalisasi melalui Aplikasi Bank Sampah Digital menjadi pilar utama untuk meningkatkan partisipasi masyarakat melalui transparansi data. Penggunaan aplikasi pencatatan tabungan sampah menggantikan buku kas manual yang rentan rusak atau hilang, sehingga setiap transaksi penimbangan dan konversi nilai rupiah tercatat secara otomatis dan dapat diakses oleh nasabah melalui ponsel mereka (Sansprayada & Mariskhana, 2020).



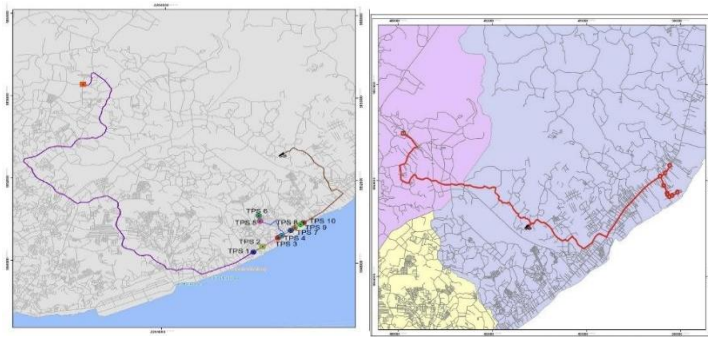
Gambar 9.6 Aplikasi Bank Sampah Digital
(Sumber: (Sansprayada & Mariskhana, 2020))

Sistem ini tidak hanya mempermudah administrasi bagi pengurus, tetapi juga membangun kepercayaan warga karena data keuangan dan volume sampah yang terkumpul dikelola secara akurat. Integrasi teknologi digital ini mendorong terciptanya sirkulasi ekonomi hijau di tingkat desa, di mana sampah tidak lagi dipandang sebagai beban, melainkan aset produktif yang terkelola secara profesional (Sansprayada & Mariskhana, 2020).

3. Tracking Pengangkutan dan Optimalisasi Rute berbasis GPS

Tantangan logistik dalam pengangkutan sampah, terutama di wilayah dengan geografis yang unik seperti kepulauan atau pemukiman padat, dijawab dengan teknologi tracking dan optimalisasi rute menggunakan GPS sederhana. Dengan memasang perangkat pelacak pada kendaraan pengangkut atau memanfaatkan fitur berbagi lokasi dari ponsel petugas, pengurus lingkungan dapat memantau pergerakan armada secara real-time (Putri et al., 2023). Data spasial yang terkumpul digunakan untuk mengevaluasi efisiensi rute, memastikan seluruh titik penjemputan terlayani, dan meminimalkan konsumsi bahan bakar. Bagi masyarakat, kepastian jadwal angkut yang terpantau secara digital memberikan

kenyamanan dan mencegah terjadinya penumpukan sampah di tempat penampungan sementara (Chaerul et al., 2022), sehingga kebersihan wilayah tetap terjaga secara konsisten.

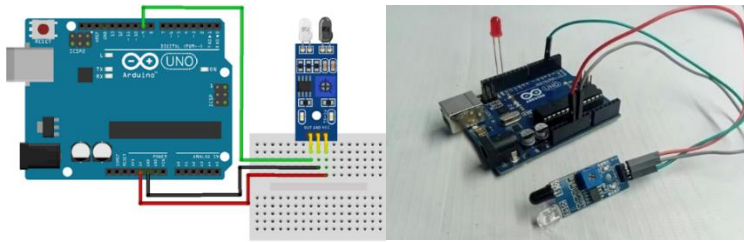


Gambar 9.7 Optimasi Rute Pengangkutan Sampah Berbasis SIG
(Sumber: (Putri et al., 2023))

Teknologi Digital dalam Pengendalian Vektor

1. *Smart Ovitrap* dan Otomatisasi Monitoring Vektor

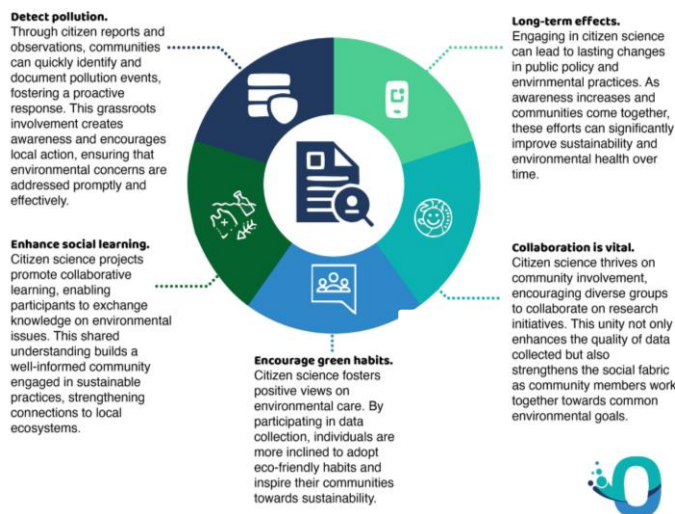
Pengendalian penyakit tular vektor memasuki babak baru melalui pengembangan *Smart Ovitrap*, yaitu sebuah inovasi yang menggabungkan perangkat nyamuk fisik dengan sensor penghitung otomatis berbasis mikrokontroler. Berbeda dengan ovitrap konvensional yang memerlukan pemeriksaan manual secara berkala, perangkat cerdas ini dilengkapi dengan sensor optik atau sensor inframerah yang mampu mendeteksi dan menghitung jumlah larva atau nyamuk yang terperangkap secara real-time. Teknologi ini sangat efisien untuk memutus rantai penularan penyakit secara preventif karena memberikan peringatan dini jika populasi vektor di suatu titik mulai melampaui ambang batas normal.

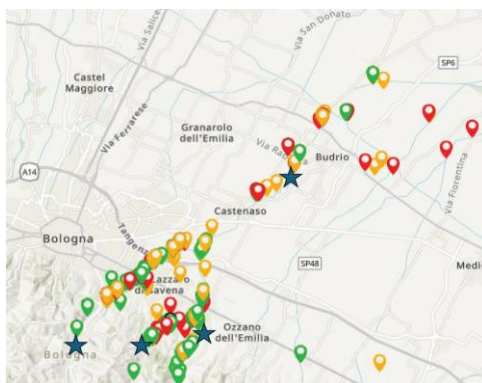


Gambar 9.8 Infrared (IR) detektor Arduino(Sumber: <https://www.arduinoindonesia.id/>)

2. Citizen Science dan Pelaporan Berbasis Geotagging

Kekuatan pengendalian vektor di era digital terletak pada keterlibatan aktif masyarakat melalui konsep *Citizen Science* yang didukung oleh aplikasi seluler. Masyarakat tidak lagi hanya menjadi penonton, tetapi berperan sebagai pengumpul data lapangan dengan melaporkan keberadaan sarang nyamuk atau jentik di lingkungan sekitar mereka melalui foto yang dilengkapi fitur geotagging (Gumiero et al., 2025).





Gambar 9.9 Keuntungan dari Citizen Science
(Sumber: (Gumiero et al., 2025))

Foto tersebut secara otomatis merekam titik koordinat lokasi, sehingga tenaga sanitarian dapat memetakan area risiko tinggi dengan akurasi yang sangat presisi. Partisipasi publik berbasis digital ini menciptakan rasa tanggung jawab bersama dalam menjaga kebersihan lingkungan, sekaligus memangkas jalur birokrasi pelaporan yang selama ini menghambat kecepatan respons penanggulangan wabah di tingkat komunitas (Yusdartono & Nur R, 2026).

Implementasi Khusus: Wilayah Kepulauan & Pesisir

1. Teknologi Desalinasi Surya dan Monitoring

Implementasi teknologi di wilayah kepulauan menghadapi tantangan utama berupa terbatasnya sumber air tawar, sehingga penggunaan teknologi desalinasi surya menjadi solusi tepat guna yang sangat relevan. Alat ini bekerja dengan memanfaatkan panas matahari untuk menguapkan air laut dan mengondensasikannya menjadi air tawar yang layak konsumsi. Untuk memastikan keberlanjutan alat di lokasi terpencil, sistem ini diintegrasikan dengan teknologi Internet of Things (IoT) yang memungkinkan pemantauan produksi air dan kualitas salinitas

secara jarak jauh (Firdaus et al., 2026), sehingga kepastian akses air bersih bagi masyarakat pesisir tetap terjaga secara konsisten.



Gambar 9.10 Desalinasi Surya
(Sumber : (Kadang et al., 2025))

2. Sanitasi Apung dengan Sistem Informasi Terpadu

Masyarakat yang tinggal di pemukiman atas air memerlukan pendekatan sanitasi khusus melalui desain jamban apung yang kedap dan dilengkapi unit pengolahan limbah mandiri. Teknologi tepat guna ini dirancang untuk mencegah pembuangan tinja dan limbah domestik langsung ke laut yang dapat merusak ekosistem terumbu karang (Saleh et al., 2024). Inovasi ini diperkuat dengan Sistem Informasi Terpadu yang menggunakan sensor pencemaran laut sederhana di sekitar area pemukiman untuk memantau parameter seperti oksigen terlarut (DO) dan kadar amonia, sekaligus menjadi alat kontrol bagi warga untuk memastikan bahwa sistem pengolahan limbah pada rumah-rumah apung berfungsi dengan baik dan tidak mencemari ruang hidup mereka sendiri.



Gambar 9.11 Desain Jamban Apung
(Sumber : (Saleh et al., 2024))

3. Telesanitasi: Konsultasi Digital untuk Pulau Terpencil

Hambatan geografis dan jarak antar pulau yang sering kali menyulitkan akses terhadap tenaga ahli kesehatan lingkungan diatasi melalui konsep Telesanitasi. Melalui layanan konsultasi berbasis video konferensi dan aplikasi pesan instan, masyarakat di pulau-pulau kecil dapat berinteraksi langsung dengan sanitarian atau akademisi untuk mendiskusikan masalah lingkungan atau mendapatkan panduan perbaikan sarana sanitasi secara *real time* (Ian R Tofure et al., 2025). Layanan ini tidak hanya berfungsi sebagai media edukasi, tetapi juga sebagai sarana supervisi teknis saat masyarakat melakukan pembangunan teknologi tepat guna secara mandiri. Telesanitasi mentransformasi cara pelayanan kesehatan lingkungan di wilayah kepulauan menjadi lebih inklusif, memastikan bahwa

keterbatasan transportasi laut tidak lagi menjadi penghalang bagi warga untuk mendapatkan bimbingan teknis yang berkualitas (Saleh Salihi et al., 2025).

Daftar Pustaka

- Chaerul, M., Puturuhu, M., & Artika, I. (2022). Optimasi Rute Pengangkutan Sampah dengan Menggunakan Metode Nearest Neighbour (Studi Kasus: Kabupaten Manokwari, Papua Barat). *Jurnal Wilayah Dan Lingkungan*, 10(1), 55–68. <https://doi.org/10.14710/jwl.10.1.55-68>
- Firdaus, M. R. A., Asmoro, N., & Murtiana, S. (2026). Pemanfaatan Energi Surya Pada Alat Desalinasi Air Laut Berbasis IoT Dalam Ketahanan Energi Nasional. *Citizen : Jurnal Ilmiah Multidisiplin Indonesia*, 6(1), 47–53. <https://doi.org/10.53866/jimi.v6i1.1165>
- Gumiero, B., Veronesi, L., Cirrone, R. G., Galgani, L., Corsi, A., Tafi, A., & Loiselle, S. A. (2025). The role of citizen science within WFD and SDGs, and how to incentivize the collaboration with environmental regulators. *Open Research Europe*, 5, 45. <https://doi.org/10.12688/openreseurope.19162.1>
- Ian R Tofure, Baringga Aurico De Erwada, & Abdul M Ukratalo. (2025). Telemedicine Sebagai Media Konsultasi Layanan Kesehatan Bagi Masyarakat di Wilayah Pesisir. *Jurnal Anestesi*, 3(1), 121–134. <https://doi.org/10.59680/anestesi.v3i1.1549>
- Kadang, L., Vaniesa, V., Widodo, M., & Nitti, F. (2025). *Perancangan Dan Evaluasi Sistem Desalinasi Berbasis Tenaga Surya Sebagai Alternatif Produksi Air Bersih Menggunakan Air Laut*.
- Makmur, M., Nov, E., Razak, P., Angela, A., Mangiri, P., Putra, M. H., & Ali, P. (2025). Analisis Kesiapan Infrastruktur Desa Pesisir Dalam Mendukung Program Smart Village: Studi Kasus Desa Leppe, Kecamatan Soropia Kabupaten Konawe. In *JOCET: Journal of Civil Engineering & Technology* (Vol. 1, Number 3). <https://jocet.uho.ac.id/index.php/journal>
- MENTERI KESEHATAN, R. (2024). *Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia nomor 2 tahun 2023 tentang peraturan Pelaksanaan Peraturan Pemerintah*

Nomor 66 tahun 2014 Tentang Kesehatan Lingkungan.
www.peraturan.go.id

- Nur Yuhanita, N., Cindy Ayunda, A., Nurdin, A., Mima Risenda, B., Leady Yuane, C., Amelinda, D., Sampurna, D., Septiyanto, A., Sofyan Hafid, G., Hanan Bayu Romansah, M., & Setianto, D. (2025). *Strategi Penguatan Kapasitas Desa Melalui Digitalisasi, Edukasi Lingkungan, dan Pemanfaatan Toga.*
- Pahude, M. S., & Purnomo, D. (2025). *Revitalisasi dan Transformasi Penanganan Kawasan Kumuh di Kabupaten Tolitoli melalui Implementasi GIS dan Rekayasa Teknologi Informasi Hijau berbasis Ekologi.*
- Pitriyanti, L., & Daswito, R. (2024). *Tantangan Program Klinik Sanitasi di Era Society 5.0.*
- Prastyo, M. E., Soedtejo, A., & Yuwono, A. H. (n.d.). *Sistem Monitoring Panel Surya Dan Solar Irradiance Untuk Pembangkit Listrik Alat Monitoring Kualitas Air Limbah IPAL Komunal.*
- Putri, I. A., Dwi, I., Rini, W. S., & Hayati, R. N. (2023). Studi Optimalisasi Rute Pengangkutan Sampah Stationary Container System Berbasis Sistem Informasi Geospasial (SIG) di Kecamatan Balikpapan Timur. *Jurnal Pengendalian Pencemaran Lingkungan (JPPL)*, 5(2).
- Saiful Amin, M., Susanti, A., & Airlangga, P. (2021). Sistem Monitoring Suhu Dan Kelembaban Berbasis IoT Pada Proses Pembuatan Pupuk Organik Padat. *SAINTEKBU: Jurnal Sains dan Teknologi.*
- Saleh, Muh., Amansyah, M., Bujawati, E., Khaer, A., & Rachmat, M. (2024). Implementasi Teknologi Tepat Guna Jamban Sehat untuk Optimasi Sanitasi Aman di Wilayah Pesisir Kabupaten Pangkep. *Jurnal Abmas Negeri (JAGRI)*, 5(1), 96–104.
<https://doi.org/10.36590/jagri.v5i1.997>
- Saleh Salihi, S., Pradana, D., Kunci, K., Tepat Guna, T., Sampah, P., Pesisir atau Kawasan Pesisir, W., &

- Masyarakat, P. (2025). Penerapan Teknologi Tepat Guna Untuk Pengelolaan Limbah Rumah Tangga di Kawasan Pesisir Desa Kadacua, Kecamatan Kulisusu, Kabupaten Buton Utara. *JICS: Journal of International Community Service JICS*, 4(1), 21–28. <https://doi.org/10.62668/jics.v4i01.1807>
- Sandi, & Hartono, R. (2020). Sistem Kendali Dan Monitoring Kelembapan, Suhu, dan pH Pada Proses Dekomposisi Pupuk Kompos Dengan Kendali Logika Fuzzy. *Telekontran: Jurnal Ilmiah Telekomunikasi, Kendali Dan Elektronika Terapan*, 8(2), 154–164. <https://doi.org/10.34010/telekontran.v8i2.4710>
- Sansprayada, A., & Mariskhana, K. (2020). *Implementasi Aplikasi Bank Sampah Berbasis Android Studi Kasus Perumahan Vila Dago Tangerang Selatan* (Number 1).
- Suhanto, R. N. (2025). Kajian Penggunaan Sensor dalam Sistem Pengujian dan Pemantauan Kualitas Air Minum Layak Konsumsi. *Polygon: Jurnal Ilmu Komputer Dan Ilmu Pengetahuan Alam*, 3(1), 59–68. <https://doi.org/10.62383/polygon.v3i1.396>
- Yusdartono, N. A., & Nur R, S. H. (2026). Penerapan E-Government dengan Model Government to Citizen Melalui Aplikasi Medan Smart City. *Jurnal Ilmu Sosial Dan Ilmu Politik Malikussaleh (JSPM)*, 7(1), 248–258. <https://doi.org/10.29103/jspm.v7i1.25790>

Profil Penulis



Muhamad Faisal Pataha, S.Kom., M.P.H.

Dilahirkan di Ambon pada tanggal 16 Januari 1989. Ketertarikan mendalam terhadap dunia teknologi informasi membawanya untuk menempuh pendidikan sarjana di STMIK Amikom Yogyakarta pada program studi Teknik Informatika dan berhasil lulus pada tahun 2010. Melalui visi untuk mengintegrasikan teknologi ke dalam sektor kesehatan, penulis kemudian melanjutkan pendidikan magister di peminatan Sistem Informasi Manajemen Kesehatan (SIMKES), Universitas Gadjah Mada (UGM) Yogyakarta, dan menyelesaikannya pada tahun 2014. Saat ini, penulis mengabdikan diri sebagai Dosen Tetap di Poltekkes Kemenkes Ternate. Selain aktif menjalankan Tridarma Perguruan Tinggi, penulis memegang amanah strategis sebagai Koordinator Kemahasiswaan dan Alumni serta mengelola berbagai pangkalan data institusi seperti PDDIKTI, SIAKAD dan SISTER. Sehari-harinya bekerja sebagai dosen pengampu mata kuliah Teknologi Informasi dan Digitaisasi, Sistem Informasi Kesehatan, Kewirausahaan dan Etika Keperawatan dan Hukum Kesehatan. Fokus riset dan dedikasi profesional penulis tertuju pada transformasi digital kesehatan, khususnya dalam pengembangan Nursing Informatics dan solusi teknologi kesehatan berbasis masyarakat. Sebagai seorang akademisi yang inovatif, penulis telah melahirkan berbagai karya nyata, di antaranya aplikasi pemantauan gizi anak "SyaffaMED", media game edukasi bencana "KiePOLY", serta buku referensi "Sistem Informasi Keperawatan". Buku "Teknologi Kesehatan Lingkungan" ini merupakan manifestasi dari kepakaran penulis dalam menjembatani teknologi digital dengan kebutuhan praktis sanitasi, khususnya untuk menjawab tantangan geografis di wilayah kepulauan dan pesisir.

Email Penulis: muhammadfaisalpataha@gmail.com

ANALISIS BIAYA MANFAAT DAN KELAYAKAN TEKNOLOGI

Yunita Sari Thirayo, SKM., M.P.H.
Universitas Tompotika Luwuk

Konsep Analisis Biaya-Manfaat

Analisis Biaya-Manfaat atau *Cost-Benefit Analysis* (CBA) merupakan salah satu metode evaluasi ekonomi yang digunakan untuk menilai kelayakan suatu program atau kebijakan dengan cara membandingkan seluruh biaya yang dikeluarkan dengan seluruh manfaat yang dihasilkan, yang keduanya dinyatakan dalam satuan moneter. Pendekatan ini memungkinkan pengambil keputusan untuk menentukan apakah suatu intervensi memberikan nilai bersih positif bagi masyarakat.

Menurut Anthony E. Boardman, CBA adalah suatu teknik analisis yang sistematis untuk mengidentifikasi, mengukur, dan membandingkan manfaat serta biaya dari suatu proyek guna menentukan apakah proyek tersebut layak dilaksanakan dari sudut pandang sosial. Sementara itu, Ezra J. Mishan menyatakan bahwa CBA merupakan alat untuk mengevaluasi dampak ekonomi dari suatu kebijakan publik dengan mempertimbangkan kesejahteraan sosial secara keseluruhan.

Dalam konteks sektor kesehatan, CBA digunakan untuk menilai intervensi seperti program imunisasi, pembangunan fasilitas kesehatan, maupun pengadaan teknologi medis. Semua manfaat, termasuk peningkatan kesehatan dan produktivitas, dikonversi ke dalam nilai uang agar dapat dibandingkan secara langsung dengan biaya yang dikeluarkan.

Tujuan utama dari analisis biaya-manfaat adalah untuk membantu pengambilan keputusan yang rasional dan berbasis bukti (*evidence-based decision making*). Secara lebih rinci, tujuan CBA meliputi:

1. Menilai kelayakan suatu program

CBA digunakan untuk menentukan apakah suatu program layak dilaksanakan dengan melihat apakah manfaat yang diperoleh lebih besar dibandingkan biaya yang dikeluarkan.

2. Membandingkan berbagai alternatif kebijakan

Dalam kondisi sumber daya terbatas, CBA membantu memilih alternatif yang memberikan manfaat terbesar.

3. Meningkatkan efisiensi alokasi sumber daya

Dengan menggunakan CBA, sumber daya dapat dialokasikan pada program yang memberikan dampak paling optimal.

4. Mendukung transparansi dan akuntabilitas

Proses analisis yang sistematis membuat keputusan lebih transparan dan dapat dipertanggungjawabkan.

Menurut World Health Organization, analisis ekonomi seperti CBA sangat penting dalam sistem kesehatan karena membantu pemerintah menentukan prioritas intervensi yang memberikan manfaat terbesar bagi populasi dengan biaya yang tersedia.

Selain memiliki tujuan tertentu, CBA juga memiliki fungsi strategis dalam perencanaan dan evaluasi kebijakan, yaitu:

1. Fungsi Evaluatif

CBA digunakan untuk mengevaluasi apakah suatu program yang telah atau akan dilaksanakan memberikan manfaat bersih bagi masyarakat.

2. Fungsi Perbandingan

CBA memungkinkan perbandingan antar program atau intervensi yang berbeda, bahkan jika outputnya tidak sejenis, karena semuanya dikonversi dalam nilai moneter.

3. Fungsi Perencanaan

Dalam tahap perencanaan, CBA membantu merancang program yang efisien dan efektif dengan memperkirakan biaya dan manfaat di masa depan.

4. Fungsi Pengendalian

CBA juga berfungsi sebagai alat kontrol untuk memastikan bahwa pelaksanaan program tetap berada pada jalur yang direncanakan.

5. Fungsi Pengambilan Keputusan

Dalam kebijakan publik, CBA menjadi dasar dalam menentukan apakah suatu kebijakan layak didanai oleh pemerintah atau tidak.

Menurut Michael F. Drummond, fungsi utama analisis ekonomi dalam kesehatan adalah untuk memastikan bahwa keputusan yang diambil memberikan nilai terbaik (*value for money*) dalam penggunaan sumber daya yang terbatas.

Prinsip Dasar Analisis Ekonomi

Analisis biaya-manfaat didasarkan pada beberapa prinsip ekonomi fundamental yang menjadi landasan dalam proses evaluasi, yaitu:

1. Prinsip Kelangkaan

Sumber daya seperti dana, tenaga kerja, dan fasilitas kesehatan bersifat terbatas, sementara kebutuhan manusia tidak terbatas. Oleh karena itu, diperlukan mekanisme untuk menentukan penggunaan sumber daya secara optimal.

2. Prinsip Biaya Peluang

Setiap keputusan untuk menggunakan sumber daya pada suatu program berarti mengorbankan kesempatan untuk menggunakan sumber daya tersebut pada alternatif lain. Oleh karena itu, biaya yang diperhitungkan dalam CBA adalah biaya peluang, bukan hanya biaya finansial.

3. Prinsip Efisiensi Ekonomi

Efisiensi terjadi ketika sumber daya digunakan sedemikian rupa sehingga menghasilkan manfaat maksimum. Dalam CBA, efisiensi tercapai apabila manfaat bersih (*benefit minus cost*) bernilai positif.

4. Prinsip Analisis Tambahan

Keputusan ekonomi didasarkan pada perbandingan antara tambahan biaya (*marginal cost*) dan tambahan manfaat (*marginal benefit*). Suatu intervensi layak jika manfaat marginal lebih besar daripada biaya marginal.

5. Prinsip Diskonto

Dalam analisis ekonomi, nilai uang saat ini lebih tinggi dibandingkan nilai uang di masa depan karena

adanya faktor waktu, inflasi, dan preferensi individu. Oleh karena itu, manfaat dan biaya di masa depan harus didiskontokan ke nilai saat ini.

6. Prinsip Ketersediaan Membayar

Nilai manfaat dalam CBA sering diukur berdasarkan seberapa besar individu bersedia membayar untuk memperoleh manfaat tersebut. Prinsip ini digunakan untuk menilai manfaat yang tidak memiliki harga pasar.

7. Prinsip Kesejahteraan Sosial

CBA bertujuan untuk meningkatkan kesejahteraan masyarakat secara keseluruhan, bukan hanya keuntungan individu atau kelompok tertentu.

Analisis biaya-manfaat merupakan alat penting dalam evaluasi ekonomi yang memungkinkan pengambil keputusan untuk menilai kelayakan suatu program secara objektif dan sistematis. Dengan memahami definisi, tujuan, fungsi, serta prinsip dasar analisis ekonomi, CBA dapat digunakan secara optimal dalam menentukan kebijakan yang efisien dan berorientasi pada kesejahteraan masyarakat, khususnya dalam sektor kesehatan yang memiliki keterbatasan sumber daya.

Komponen Biaya

Dalam analisis ekonomi, khususnya *Cost-Benefit Analysis* (CBA), identifikasi dan klasifikasi biaya merupakan langkah krusial untuk memastikan bahwa seluruh pengorbanan sumber daya dapat diukur secara akurat. Biaya tidak hanya mencakup pengeluaran finansial yang terlihat, tetapi juga mencerminkan nilai sumber daya yang digunakan, termasuk biaya peluang (*opportunity cost*). Oleh karena itu, pemahaman terhadap berbagai jenis komponen biaya menjadi dasar penting dalam evaluasi ekonomi suatu program atau intervensi kesehatan.

Menurut Michael F. Drummond, klasifikasi biaya dalam ekonomi kesehatan bertujuan untuk memberikan gambaran menyeluruh mengenai konsekuensi ekonomi dari suatu intervensi, baik yang bersifat langsung maupun tidak langsung.

1. Biaya Langsung (*Direct Cost*)

Biaya langsung adalah biaya yang secara langsung berkaitan dengan pelaksanaan suatu intervensi atau pelayanan kesehatan. Biaya ini biasanya mudah diidentifikasi dan diukur karena memiliki hubungan yang jelas dengan aktivitas pelayanan. Biaya langsung dibagi menjadi dua kategori utama yaitu biaya langsung medis (seperti biaya obat-obatan, biaya pemeriksaan laboratorium, biaya tenaga medis, dan biaya rawat inap), dan biaya langsung non-medis (seperti biaya transportasi pasien dan biaya akomodasi keluarga pasien).

Menurut *World Health Organization*, biaya langsung merupakan komponen utama dalam analisis ekonomi kesehatan karena mencerminkan penggunaan sumber daya dalam sistem pelayanan kesehatan (WHO, 2003).

2. Biaya Tidak Langsung (*Indirect Cost*)

Biaya tidak langsung adalah biaya yang timbul akibat dampak suatu penyakit atau intervensi terhadap produktivitas individu dan masyarakat. Biaya ini sering kali tidak terlihat secara langsung dalam sistem pelayanan kesehatan, tetapi memiliki dampak ekonomi yang signifikan. Contoh biaya tidak langsung diantaranya seperti kehilangan pendapatan akibat sakit, penurunan produktivitas kerja, waktu yang hilang karena perawatan atau pemulihan, dan kehilangan produktivitas akibat kematian dini.

Menurut Anthony E. Boardman, biaya tidak langsung mencerminkan kerugian ekonomi yang terjadi di luar sistem pasar kesehatan, namun tetap harus diperhitungkan dalam analisis biaya-manfaat karena mempengaruhi kesejahteraan sosial secara keseluruhan.

3. Biaya Tetap dan Biaya Variabel

Biaya tetap adalah biaya yang tidak berubah meskipun terjadi perubahan dalam volume output atau jumlah layanan yang diberikan. Biaya ini bersifat konstan dalam jangka pendek. Contoh biaya tetap dalam sektor kesehatan adalah biaya pembangunan gedung, pembelian peralatan medis, dan gaji tenaga kerja tetap. Sementara biaya variabel adalah biaya yang berubah sesuai dengan tingkat produksi atau jumlah layanan yang diberikan. Contoh biaya variabel adalah obat-obatan, bahan habis pakai, dan biaya makanan pasien.

Menurut Gregory Mankiw, pemahaman tentang biaya tetap dan variabel sangat penting dalam analisis ekonomi karena berkaitan dengan efisiensi produksi dan pengambilan keputusan dalam penggunaan sumber daya.

4. Biaya Investasi Awal

Biaya investasi awal adalah biaya yang dikeluarkan pada tahap awal suatu proyek sebelum program mulai berjalan. Biaya ini biasanya bersifat besar dan digunakan untuk membangun kapasitas awal. Contoh biaya investasi awal dalam sektor kesehatan diantaranya biaya pembangunan fasilitas kesehatan (rumah sakit, puskesmas), biaya pengadaan alat kesehatan, biaya pelatihan tenaga kerja, dan biaya pengembangan sistem informasi kesehatan.

Menurut *Asian Development Bank*, biaya investasi awal merupakan komponen penting dalam evaluasi proyek karena menentukan kebutuhan pendanaan awal dan keberlanjutan proyek dalam jangka panjang.

5. Biaya Operasional dan Biaya Pemeliharaan

Biaya operasional adalah biaya yang dikeluarkan untuk menjalankan kegiatan sehari-hari dari suatu program atau fasilitas, seperti gaji tenaga kerja, biaya listrik dan air, biaya logistik dan distribusi, serta bahan habis pakai. Sementara biaya pemeliharaan adalah biaya yang dikeluarkan untuk menjaga agar fasilitas dan peralatan tetap berfungsi dengan baik, seperti perbaikan alat medis, pemeliharaan gedung, dan kalibrasi alat kesehatan.

Konsep Kelayakan Teknologi

Pengembangan teknologi, khususnya dalam sektor kesehatan, menuntut adanya proses evaluasi yang komprehensif sebelum suatu teknologi diimplementasikan. Tidak semua inovasi teknologi dapat langsung diterapkan, karena harus mempertimbangkan berbagai aspek seperti kesiapan teknis, kemampuan finansial, penerimaan masyarakat, serta aspek hukum dan etika.

Menurut Kenneth E. Kendall, analisis kelayakan merupakan proses evaluasi untuk menentukan apakah suatu sistem atau teknologi layak dikembangkan dan diimplementasikan berdasarkan berbagai kriteria tertentu. Dalam konteks kesehatan, analisis ini sangat penting untuk memastikan bahwa teknologi yang digunakan benar-benar memberikan manfaat optimal tanpa menimbulkan risiko yang tidak diinginkan.

Kelayakan teknologi adalah proses penilaian terhadap kemampuan suatu teknologi untuk diterapkan secara efektif dan efisien dalam suatu lingkungan tertentu dengan mempertimbangkan berbagai aspek, termasuk teknis, ekonomi, operasional, hukum, etika, dan sosial.

Menurut *World Health Organization*, evaluasi teknologi kesehatan (*health technology assessment/HTA*) merupakan pendekatan multidisiplin yang digunakan untuk menilai dampak medis, sosial, ekonomi, dan etika dari suatu teknologi kesehatan. Hal ini menunjukkan bahwa kelayakan teknologi tidak hanya dilihat dari aspek teknis, tetapi juga dari dampaknya terhadap masyarakat secara luas.

Dengan demikian, kelayakan teknologi bertujuan untuk memastikan bahwa suatu inovasi tidak hanya dapat digunakan, tetapi juga memberikan manfaat maksimal, aman, dan dapat diterima oleh pengguna serta masyarakat.

Dimensi Kelayakan

Analisis kelayakan teknologi mencakup beberapa dimensi utama yang saling berkaitan. Setiap dimensi memberikan perspektif yang berbeda dalam menilai apakah suatu teknologi layak diterapkan.

1. Kelayakan Teknis

Kelayakan teknis berkaitan dengan kemampuan teknologi untuk diimplementasikan secara teknis dalam lingkungan yang tersedia. Aspek ini menilai apakah infrastruktur yang dibutuhkan tersedia, apakah teknologi dapat berfungsi dengan baik, apakah sumber daya manusia memiliki kompetensi yang memadai, dan apakah teknologi kompatibel dengan sistem yang sudah ada.

Menurut Kenneth E. Kendall, kelayakan teknis merupakan langkah awal dalam analisis kelayakan karena tanpa dukungan teknis yang memadai, teknologi tidak dapat diimplementasikan secara efektif. Dalam sektor kesehatan, contoh kelayakan teknis adalah kesiapan rumah sakit dalam mengoperasikan alat diagnostik canggih seperti MRI atau sistem rekam medis elektronik.

2. Kelayakan Ekonomi

Kelayakan ekonomi menilai apakah manfaat yang diperoleh dari penggunaan teknologi lebih besar dibandingkan biaya yang dikeluarkan. Analisis ini biasanya menggunakan metode seperti *Cost-Benefit Analysis* (CBA), *Cost-Effectiveness Analysis* (CEA), dan *Cost-Utility Analysis* (CUA).

Menurut Michael F. Drummond, suatu teknologi dikatakan layak secara ekonomi jika memberikan *value for money*, yaitu manfaat yang optimal dengan biaya yang efisien. Dalam praktiknya, kelayakan ekonomi sangat penting dalam sektor kesehatan karena keterbatasan anggaran dan tingginya biaya teknologi medis.

3. Kelayakan Operasional

Kelayakan operasional berkaitan dengan kemampuan organisasi dalam mengoperasikan dan memanfaatkan teknologi secara efektif dalam kegiatan sehari-hari. Aspek ini diantaranya mencakup kemudahan penggunaan teknologi, kesiapan tenaga kerja, integrasi dengan prosedur kerja yang ada, dan dukungan manajemen.

Menurut Joseph S. Valacich, kelayakan operasional menilai sejauh mana sistem atau teknologi dapat diterima dan digunakan oleh pengguna dalam

organisasi. Dalam sektor kesehatan, teknologi yang canggih tetapi sulit digunakan oleh tenaga medis dapat menyebabkan kegagalan implementasi.

4. Kelayakan Hukum dan Etika

Kelayakan hukum dan etika menilai apakah teknologi yang akan diterapkan sesuai dengan peraturan perundang-undangan serta norma etika yang berlaku. Aspek ini mencakup kepatuhan terhadap regulasi, perlindungan data dan privasi pasien, keamanan penggunaan teknologi, dan pertimbangan etika medis.

Menurut *World Health Organization*, penerapan teknologi kesehatan harus memperhatikan prinsip etika seperti keadilan (*equity*), keamanan (*safety*), dan manfaat (*beneficence*). Sebagai contoh, penggunaan sistem rekam medis elektronik harus mematuhi regulasi perlindungan data pasien.

5. Kelayakan Sosial

Kelayakan sosial berkaitan dengan tingkat penerimaan masyarakat terhadap teknologi yang akan diterapkan. Aspek ini diantaranya mencakup budaya dan nilai masyarakat, tingkat kepercayaan terhadap teknologi, dampak sosial yang ditimbulkan, dan kesetaraan akses terhadap teknologi.

Menurut World Bank, keberhasilan suatu teknologi sangat dipengaruhi oleh penerimaan sosial dan dampaknya terhadap kesejahteraan masyarakat. Dalam sektor kesehatan, teknologi yang tidak sesuai dengan nilai budaya atau tidak dapat diakses oleh masyarakat luas berpotensi gagal meskipun secara teknis dan ekonomi layak.

Kelayakan teknologi merupakan proses penting dalam memastikan bahwa suatu inovasi dapat diterapkan secara efektif, efisien, dan berkelanjutan. Analisis kelayakan

tidak hanya berfokus pada aspek teknis, tetapi juga mencakup dimensi ekonomi, operasional, hukum dan etika, serta sosial. Pendekatan yang komprehensif terhadap seluruh dimensi ini sangat diperlukan untuk mendukung pengambilan keputusan yang tepat, khususnya dalam sektor kesehatan yang memiliki kompleksitas tinggi dan dampak luas terhadap masyarakat.

Contoh Kasus: Implementasi “Smart Water Monitoring” Berbasis *Internet of Things (IoT)* untuk Pencegahan Penyakit Berbasis Air di Daerah Pinggiran Kota

Pemerintah daerah menghadapi masalah berulang berupa meningkatnya kasus diare dan penyakit kulit akibat kualitas air yang tidak terpantau dengan baik. Selama ini, pengujian kualitas air dilakukan secara manual setiap beberapa bulan, sehingga sering terlambat mendeteksi pencemaran. Sebagai Solusi, pemerintah mempertimbangkan penerapan teknologi “*Smart Water Monitoring*” berbasis *Internet of Things (IoT)*, yaitu sensor yang dipasang di sumber air (sumur dan penampungan) untuk memantau kualitas air secara *real-time* (pH, kekeruhan, bakteri indikator).

Sebelum implementasi, diperlukan analisis diantaranya menilai apakah teknologi ini layak secara ekonomi (CBA)? Serta apakah teknologi ini layak diterapkan (*feasibility*)?

Jika hasil analisis menunjukkan total manfaat lebih besar dibandingkan total biaya, maka teknologi dianggap hal positif untuk diimplementasikan. Pertimbangan kelayakan implementasi teknologi tersebut dilakukan dengan memperhatikan kelayakan teknis dengan tujuan mitigasi risiko, dan mempertimbangkan kelayakan ekonomi, operasional, hukum etika juga sosial.

Penerapan analisis biaya, analisis manfaat, serta analisis kelayakan diperlukan untuk menentukan teknologi tersebut layak diimplementasikan dan tidak hanya menguntungkan.

Kasus ini menunjukkan beberapa hal penting, diantaranya:

1. Teknologi tidak cukup hanya efisien, meski CBA menunjukkan hasil positif, jika masyarakat menolak maka program dianggap gagal.
2. Kelayakan bersifat multidimensi, dimana suksesnya implementasi program bergantung pada kombinasi dari ekonomi, sosial dan teknis.
3. Pencegahan lebih murah daripada pengobatan. Investasi teknologi monitoring menghasilkan penghematan besar di sektor kesehatan.

Kasus “*Smart Water Monitoring*” menunjukkan bahwa integrasi antara analisis biaya-manfaat dan analisis kelayakan teknologi memberikan gambaran yang lebih komprehensif dalam pengambilan keputusan. Teknologi yang layak bukan hanya yang menguntungkan secara ekonomi, tetapi juga yang dapat diimplementasikan secara teknis, diterima secara sosial, dan berkelanjutan dalam jangka panjang.

Pendalaman Analisis dan Implikasi Kebijakan

Selain melihat hasil perhitungan biaya dan manfaat serta dimensi kelayakan teknologi, penting untuk memahami bahwa implementasi teknologi seperti *Smart Water Monitoring berbasis IoT* juga memiliki implikasi jangka panjang terhadap sistem kesehatan dan tata kelola pemerintahan daerah. Analisis biaya-manfaat yang menunjukkan nilai positif (*benefit* lebih besar daripada *cost*) sebenarnya hanya menggambarkan sebagian dari potensi dampak yang dihasilkan. Dalam praktiknya,

keberhasilan suatu teknologi sangat dipengaruhi oleh faktor keberlanjutan (*sustainability*) dan kemampuan adaptasi terhadap perubahan lingkungan.

Dari perspektif ekonomi kesehatan, investasi dalam teknologi pemantauan kualitas air ini dapat dikategorikan sebagai bentuk intervensi preventif. Intervensi preventif umumnya memiliki karakteristik biaya awal yang relatif tinggi, tetapi memberikan manfaat yang besar dalam jangka panjang melalui pengurangan beban penyakit. Hal ini sejalan dengan teori yang dikemukakan oleh Michael F. Drummond bahwa intervensi kesehatan yang efektif sering kali menghasilkan efisiensi sistem melalui pengurangan kebutuhan layanan kuratif di masa depan (Drummond et al., 2015). Dengan demikian, meskipun biaya investasi awal terlihat signifikan, nilai ekonominya menjadi lebih jelas ketika dilihat dalam horizon waktu yang lebih panjang.

Dari sisi kelayakan teknologi, salah satu aspek penting yang sering diabaikan adalah dinamika penggunaan teknologi oleh manusia (*human-technology interaction*). Teknologi yang canggih tidak selalu menjamin keberhasilan jika pengguna tidak memiliki kesiapan atau motivasi untuk menggunakannya. Oleh karena itu, keberhasilan implementasi sistem IoT ini sangat bergantung pada strategi pelatihan dan pendampingan bagi petugas lapangan serta edukasi masyarakat. Dalam konteks ini, pendekatan partisipatif menjadi penting, di mana masyarakat tidak hanya menjadi penerima manfaat, tetapi juga terlibat dalam proses pemantauan dan pelaporan.

Lebih lanjut, dari perspektif sosial, teknologi ini berpotensi menciptakan perubahan perilaku masyarakat dalam menjaga kualitas lingkungan. Ketika masyarakat memiliki akses terhadap informasi kualitas air secara real-time, mereka cenderung lebih sadar terhadap pentingnya

sanitasi dan kebersihan. Hal ini menunjukkan bahwa manfaat teknologi tidak hanya bersifat langsung (misalnya penurunan penyakit), tetapi juga tidak langsung melalui perubahan perilaku yang lebih sehat.

Namun demikian, terdapat beberapa risiko yang perlu dipertimbangkan. Salah satunya adalah ketergantungan pada teknologi. Jika sistem mengalami gangguan atau kerusakan, maka kemampuan pemantauan dapat terganggu. Selain itu, terdapat risiko ketimpangan akses apabila teknologi hanya diterapkan di wilayah tertentu. Oleh karena itu, dalam tahap perencanaan, perlu disusun strategi mitigasi risiko, seperti sistem cadangan (*backup system*) dan kebijakan distribusi teknologi yang merata.

Dari sudut pandang kebijakan publik, hasil analisis ini dapat menjadi dasar bagi pemerintah daerah dalam menentukan prioritas investasi. Pendekatan berbasis bukti (*evidence-based policy*) seperti ini memungkinkan pengambilan keputusan yang lebih rasional dan transparan. Selain itu, integrasi antara analisis biaya-manfaat dan analisis kelayakan teknologi juga membantu menghindari keputusan yang hanya berfokus pada satu aspek saja, misalnya hanya mempertimbangkan biaya tanpa melihat dampak sosial.

Secara keseluruhan, kasus ini menunjukkan bahwa keberhasilan implementasi teknologi kesehatan tidak hanya ditentukan oleh hasil analisis ekonomi, tetapi juga oleh kesiapan sistem secara menyeluruh. Oleh karena itu, pendekatan yang holistik dan multidisiplin menjadi kunci dalam memastikan bahwa teknologi yang diadopsi benar-benar memberikan manfaat optimal bagi masyarakat.

Daftar Pustaka

- Anthony E. Boardman, Greenberg, D. H., Vining, A. R., & Weimer, D. L. (2018). *Cost-Benefit Analysis: Concepts and Practice*. Cambridge University Press.
- Asian Development Bank. (2017). *Guidelines for the economic analysis of projects*. ADB.
- Ezra J. Mishan & Quah, E. (2007). *Cost-Benefit Analysis*. Routledge.
- Kendall, K. E., & Kendall, J. E. (2011). *Systems analysis and design* (8th ed.). Pearson.
- Mankiw, N. G. (2021). *Principles of economics* (9th ed.). Cengage Learning.
- Michael F. Drummond, et al. (2015). *Methods for the Economic Evaluation of Health Care Programmes*. Oxford University Press.
- Valacich, J. S., & George, J. F. (2017). *Modern systems analysis and design* (8th ed.). Pearson.
- World Bank. (2017). *World development report: Governance and the law*. World Bank Publications.
- World Health Organization. (2003). *Making Choices in Health: WHO Guide to Cost-Effectiveness Analysis*. WHO Press.
- World Health Organization. (2011). *Health technology assessment of medical devices*. WHO Press.

Profil Penulis



Yunita Sari Thirayo, SKM., MPH

Penulis di lahirkan di Palu pada tanggal 13 Desember 1991. Penulis melanjutkan pendidikan ke Perguruan Tinggi dan berhasil menyelesaikan studi S1 di prodi Kesehatan Masyarakat Universitas Ahmad Dahlan Yogyakarta pada tahun 2015. Dua tahun kemudian, penulis menyelesaikan studi S2 di prodi Ilmu Kesehatan Masyarakat Program Pasca Sarjana Fakultas Kedokteran Universitas Gadjah Mada Yogyakarta. Saat ini penulis bekerja sebagai dosen tetap di Program Studi S1 Kesehatan Masyarakat Universitas Tompotika Luwuk. Penulis juga saat ini menjabat sebagai Ketua Unit Penjaminan Mutu Fakultas Kesehatan Masyarakat Universitas Tompotika Luwuk. Sehari-harinya bekerja sebagai dosen pengampu mata kuliah administrasi kebijakan kesehatan, ekonomi kesehatan dan perencanaan kesehatan. Selain itu penulis juga aktif dalam menulis jurnal serta aktif menulis buku ajar dan *book chapter*.

Email Penulis: yunitathirayo@gmail.com

EVALUASI KINERJA SISTEM PENYEHAATAN LINGKUNGAN

Dr. Fitrianty Sutadi Lanyumba, SKM, M.Kes.
Universitas Tompotika Luwuk

Pendahuluan

Dalam meningkatkan derajat kesehatan masyarakat, maka salah satu upaya yang bisa diusahakan yaitu dengan memperkuat sistem penyehatan lingkungannya. Kualitas air, pengelolaan limbah, sanitasi permukiman, pengendalian sampah, keamanan pangan, serta pengendalian vektor penyakit merupakan faktor-faktor lingkungan yang dapat menjadi sumber risiko apabila tidak dikelola dengan baik. Begitu juga dengan munculnya berbagai penyakit berbasis lingkungan seperti diare, demam berdarah, malaria, infeksi kulit, gangguan pernapasan, hingga masalah gizi pada anak ketika kondisi lingkungan tidak memenuhi standar kesehatan. Sehingga perihal penyehatan lingkungan tidak hanya dipahami sebagai kegiatan menjaga kebersihan, tetapi sebagai suatu sistem yang terencana untuk mencegah penyakit, melindungi masyarakat, dan menciptakan lingkungan yang aman, sehat, serta berkelanjutan.

Dalam pelaksanaannya, sistem penyehatan lingkungan perlu dikaitkan dengan konsep evaluasi kinerja agar setiap program yang dijalankan dapat dinilai efektivitas, efisiensi, dan dampaknya terhadap kesehatan

masyarakat. Program-program pemerintah seperti Sanitasi Total Berbasis Masyarakat, penyediaan air minum dan sanitasi berbasis masyarakat, pengelolaan sampah, pengendalian DBD, eliminasi malaria, serta kesehatan lingkungan fasilitas pelayanan kesehatan merupakan contoh nyata intervensi yang membutuhkan pemantauan dan evaluasi secara berkelanjutan. Evaluasi kinerja menjadi penting untuk memastikan bahwa kegiatan yang dilakukan tidak hanya menghasilkan output administratif, seperti jumlah sosialisasi atau sarana yang dibangun, tetapi juga menghasilkan perubahan nyata berupa peningkatan perilaku hidup bersih dan sehat, perbaikan kualitas lingkungan, penurunan faktor risiko, serta berkurangnya penyakit berbasis lingkungan.

Pengertian Sistem Penyehatan Lingkungan

Sistem penyehatan lingkungan adalah rangkaian upaya yang dilakukan secara terencana, terpadu, dan berkelanjutan untuk mengendalikan faktor risiko lingkungan yang dapat menimbulkan penyakit atau gangguan kesehatan Masyarakat (Kemenkes, 2023). Dalam Peraturan Pemerintah No. 66 Tahun 2014 yang mengatur tentang kesehatan lingkungan menjelaskan bahwa media lingkungan meliputi air, udara, tanah, pangan, sarana dan bangunan, serta vektor dan binatang pembawa penyakit.

Sehingga secara sederhana, tujuan dari sistem penyehatan lingkungan yaitu untuk menciptakan lingkungan yang aman, bersih, sehat, dan tidak menjadi sumber penularan penyakit. Sistem ini tidak hanya berhubungan dengan kebersihan fisik, tetapi juga mencakup pengawasan kualitas air, pengelolaan limbah, sanitasi makanan, rumah sehat, tempat umum, tempat kerja, serta pengendalian vektor penyakit.

Komponen Sistem Kesehatan Lingkungan

1. Penyediaan Air Bersih dan Air Minum

Penyediaan air bersih dan air minum merupakan komponen utama dalam sistem penyehatan lingkungan. Air yang digunakan masyarakat harus memenuhi persyaratan kesehatan, baik dari segi fisik, kimia, mikrobiologi, maupun radioaktif. Air yang tidak memenuhi syarat dapat menjadi media penularan penyakit seperti diare, kolera, tifoid, hepatitis A, dan penyakit kulit. Air termasuk salah satu media lingkungan yang memiliki standar baku mutu kesehatan lingkungan dan persyaratan kesehatan. Standar ini digunakan untuk memastikan bahwa air aman digunakan oleh Masyarakat. Contohnya meliputi pengawasan sumber air, pemeriksaan kualitas air minum, perlindungan sumur, pengolahan air, klorinasi, serta pemantauan depot air minum (Kemenkes, 2023).

Hasil penelitian (Rehana et al, 2021) pada balita penderita diare di wilayah kerja puskesmas di Surabaya menunjukkan bahwa banyak faktor sanitasi lingkungan masih belum memenuhi syarat. Penelitian tersebut menemukan bahwa 62,2% sumber air minum balita tidak memenuhi syarat, 86,5% perilaku cuci tangan ibu tidak memenuhi syarat, 89,2% saluran pembuangan air limbah tidak memenuhi syarat, dan 83,8% fasilitas pembuangan sampah tidak memenuhi syarat. Temuan ini menunjukkan bahwa air minum, perilaku higiene, air limbah, dan sampah berhubungan erat dengan risiko penyakit berbasis lingkungan seperti diare.

2. Pengelolaan Air Limbah dan Tinja

Pengelolaan air limbah dan tinja bertujuan mencegah pencemaran tanah, air permukaan, air tanah, dan

lingkungan permukiman. Limbah cair rumah tangga, limbah fasilitas umum, limbah pasar, limbah industri, dan limbah fasilitas kesehatan harus dikelola agar tidak menjadi sumber penyakit. Komponen ini mencakup jamban sehat, septic tank kedap, saluran pembuangan air limbah, instalasi pengolahan air limbah atau IPAL, serta pengelolaan lumpur tinja. Jika tidak dikelola dengan baik, air limbah dapat menyebabkan pencemaran sumber air dan meningkatkan risiko penyakit berbasis lingkungan. Dalam konteks kesehatan masyarakat, diatur juga pengelolaan tinja melalui pelaksanaan STBM dengan lima pilar sanitasi (Kemenkes, 2014).

3. Pengelolaan Sampah

Pengelolaan sampah mencakup kegiatan pengurangan, pemilahan, pengumpulan, pengangkutan, pengolahan, pemanfaatan kembali, dan pembuangan akhir sampah. Sampah yang tidak dikelola dapat menimbulkan bau, mencemari lingkungan, menyumbat drainase, menyebabkan banjir, serta menjadi tempat berkembang biaknya lalat, tikus, kecoa, dan vektor penyakit lainnya.

Dalam sistem penyehatan lingkungan, pengelolaan sampah tidak hanya dilihat sebagai kegiatan kebersihan, tetapi juga sebagai upaya pencegahan penyakit. Contohnya adalah pemilahan sampah organik dan anorganik, komposting, bank sampah, pengangkutan rutin, serta pengelolaan tempat pembuangan akhir yang memenuhi syarat.

4. Penyehatan Makanan dan Minuman

Penyehatan makanan dan minuman bertujuan memastikan makanan yang dikonsumsi masyarakat aman, bersih, dan bebas dari kontaminasi. Komponen ini mencakup kebersihan bahan makanan, proses

pengolahan, penyimpanan, penyajian, kebersihan penjamah makanan, serta sanitasi tempat pengolahan makanan. Penyehatan makanan penting dilakukan di rumah tangga, kantin sekolah, pasar, restoran, rumah makan, jasa boga, rumah sakit, dan fasilitas umum lainnya. Makanan yang tidak higienis dapat menyebabkan keracunan makanan, diare, infeksi saluran pencernaan, dan kejadian luar biasa penyakit bawaan makanan. Permenkes No. 2 Tahun 2023 juga memasukkan pangan sebagai salah satu media lingkungan yang harus memenuhi standar baku mutu kesehatan lingkungan dan persyaratan kesehatan.

5. Penyehatan Rumah dan Permukiman

Penyehatan rumah dan permukiman berkaitan dengan kondisi fisik rumah dan lingkungan tempat tinggal. Rumah yang sehat harus memiliki ventilasi cukup, pencahayaan memadai, lantai yang mudah dibersihkan, tidak lembap, tidak terlalu padat penghuni, memiliki akses air bersih, jamban sehat, tempat sampah, serta saluran drainase yang baik. Permukiman yang tidak sehat dapat meningkatkan risiko penyakit ISPA, TBC, diare, DBD, penyakit kulit, dan gangguan kesehatan lainnya. Oleh karena itu, penyehatan permukiman tidak hanya berfokus pada bangunan rumah, tetapi juga lingkungan sekitarnya seperti jalan lingkungan, saluran air, genangan, kepadatan penduduk, dan pengelolaan sampah.

Suatu kajian menunjukkan bahwa pengelolaan lingkungan dapat membantu menurunkan risiko penyakit berbasis vektor. Pengelolaan genangan, kebersihan lingkungan, pengurangan tempat perkembangbiakan nyamuk, dan sanitasi permukiman menjadi bagian penting dalam pengendalian penyakit seperti malaria dan penyakit tular vektor lainnya (Agyemang-Badu, S. Y et al, 2023).

6. Penyehatan Tempat-Tempat Umum

Tempat-tempat umum adalah lokasi yang digunakan masyarakat secara bersama-sama, seperti sekolah, pasar, terminal, pelabuhan, tempat ibadah, hotel, tempat wisata, dan pusat perbelanjaan. Karena digunakan banyak orang, tempat umum memiliki risiko tinggi menjadi tempat penularan penyakit jika tidak dikelola dengan baik. Penyehatan tempat umum mencakup ketersediaan air bersih, toilet bersih, pengelolaan sampah, ventilasi, drainase, kebersihan lantai dan ruangan, pengendalian vektor, serta keamanan makanan dan minuman yang dijual di lokasi tersebut (Kemenkes, 2023).

7. Penyehatan Tempat Kerja

Penyehatan tempat kerja bertujuan menciptakan lingkungan kerja yang aman dan sehat bagi pekerja. Aspek yang diperhatikan meliputi kualitas udara, suhu, kelembapan, pencahayaan, kebisingan, getaran, bahan kimia, limbah, ergonomi, dan sanitasi tempat kerja. Tempat kerja yang tidak sehat dapat menyebabkan penyakit akibat kerja, kecelakaan kerja, gangguan pernapasan, stres kerja, gangguan pendengaran, serta paparan bahan berbahaya. Karena itu, penyehatan tempat kerja harus dilakukan melalui identifikasi risiko, pengendalian bahaya, penggunaan alat pelindung diri, dan pemantauan lingkungan kerja (ILO, 2001).

8. Pengelolaan Drainase Lingkungan

Drainase lingkungan berfungsi mengalirkan air hujan atau air permukaan agar tidak menimbulkan genangan. Genangan air dapat menjadi tempat perkembangbiakan nyamuk, menyebabkan banjir, mencemari lingkungan, dan mengganggu aktivitas masyarakat. Sistem drainase yang baik harus lancar,

tidak tersumbat sampah, memiliki kemiringan yang sesuai, serta terhubung dengan saluran pembuangan yang aman. Dalam konteks permukiman, drainase menjadi salah satu indikator penting dalam penyehatan lingkungan (WHO, 2018).

9. Penyehatan Lingkungan Fasilitas Pelayanan Kesehatan

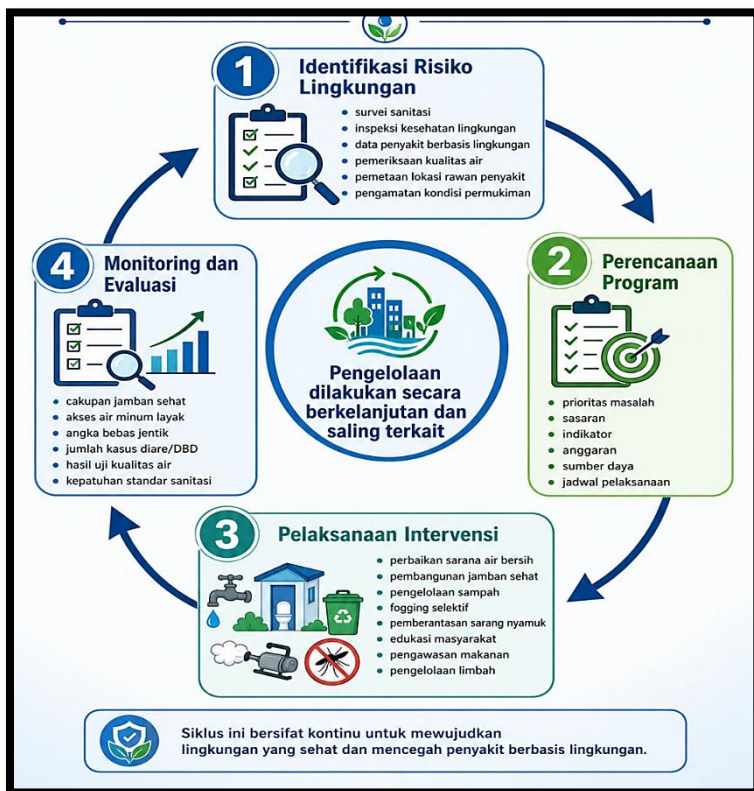
Bagi Fasilitas kesehatan seperti Rumah Sakit, Puskesmas, Klinik Kesehatan, dan fasilitas pelayanan kesehatan lainnya, penyehatan lingkungan menjadi sangat penting karena terdapat risiko infeksi, limbah medis, limbah cair, bahan kimia, dan paparan biologis (Kemenkes, 2019). Aspek yang diperhatikan meliputi air, udara, pangan, sarana dan bangunan, pengelolaan limbah medis dan nonmedis, pengendalian vektor, linen, sterilisasi, serta kebersihan lingkungan rumah sakit (Kemenkes, 2020).

Siklus Pengelolaan Sistem Penyehatan Lingkungan

Sistem penyehatan lingkungan idealnya dilakukan melalui empat tahap besar (WHO, 2018).

1. Identifikasi risiko lingkungan. Tahap ini dilakukan dengan survei sanitasi, inspeksi kesehatan lingkungan, pengumpulan data penyakit berbasis lingkungan, pemeriksaan kualitas air, pemetaan lokasi rawan penyakit, serta pengamatan kondisi permukiman.
2. Perencanaan program. Setelah risiko diketahui, pemerintah daerah, dinas kesehatan, puskesmas, atau fasilitas terkait menyusun rencana intervensi. Perencanaan mencakup prioritas masalah, sasaran, indikator, anggaran, sumber daya, dan jadwal pelaksanaan.

3. Pelaksanaan intervensi. Intervensi dapat berupa perbaikan sarana air bersih, pembangunan jamban sehat, pengelolaan sampah, fogging selektif, pemberantasan sarang nyamuk, edukasi masyarakat, pengawasan makanan, atau pengelolaan limbah.
4. Monitoring dan evaluasi. Tahap ini bertujuan menilai apakah program berjalan efektif. Evaluasi dapat dilakukan melalui indikator cakupan jamban sehat, akses air minum layak, angka bebas jentik, jumlah kasus diare/DBD, hasil uji kualitas air, serta kepatuhan tempat umum atau fasilitas kesehatan terhadap standar sanitasi.



Gambar 11.1 Siklus Pengelolaan Sistem Penyehatan Lingkungan

Konsep Dasar Evaluasi Kinerja Sistem Penyehatan Lingkungan

Menurut Azwar (2010), evaluasi dalam administrasi kesehatan merupakan proses penilaian terhadap pelaksanaan dan hasil suatu program kesehatan dengan membandingkannya terhadap tujuan atau standar yang telah ditetapkan. Evaluasi bertujuan untuk mengetahui tingkat keberhasilan program, mengidentifikasi masalah dalam pelaksanaan, serta memberikan dasar bagi pengambilan keputusan dan perbaikan program kesehatan.

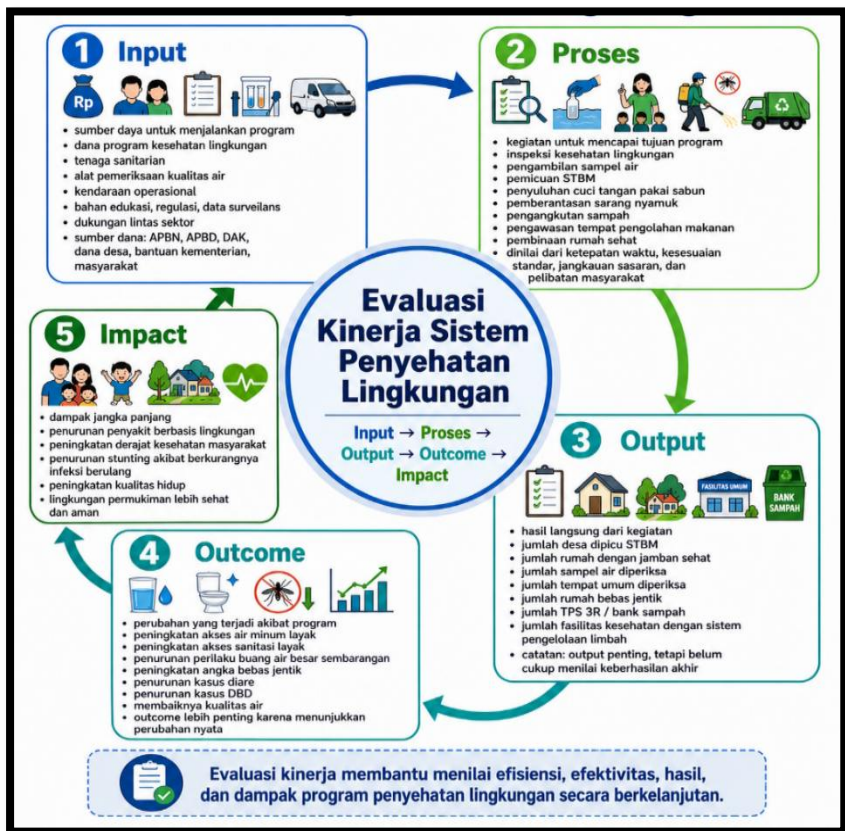
Sedangkan evaluasi kinerja program kesehatan merupakan proses penilaian terhadap pelaksanaan dan hasil program kesehatan dengan membandingkan pencapaian program terhadap tujuan, standar, indikator, atau rencana yang telah ditetapkan. Evaluasi ini bertujuan untuk mengetahui tingkat keberhasilan program, menilai efektivitas dan efisiensi penggunaan sumber daya, mengidentifikasi kendala pelaksanaan, serta memberikan dasar bagi pengambilan keputusan dan perbaikan program kesehatan Masyarakat (Muninjaya, 2011).

Evaluasi kinerja sistem penyehatan lingkungan adalah proses menilai apakah program penyehatan lingkungan sudah berjalan sesuai tujuan, menggunakan sumber daya secara efisien, menghasilkan output yang jelas, dan berdampak pada perbaikan kesehatan masyarakat. Dalam konteks ini, evaluasi tidak hanya menilai apakah kegiatan sudah dilaksanakan, tetapi juga menilai apakah kegiatan tersebut benar-benar memperbaiki kondisi lingkungan dan menurunkan risiko penyakit (Azwar, 2010).

Misalnya, program jamban sehat tidak cukup dievaluasi dari jumlah jamban yang dibangun, tetapi melihat juga dampak dari program tersebut yaitu melihat apakah jamban digunakan, apakah tidak mencemari sumber air, apakah perilaku buang air besar sembarangan menurun, dan apakah kasus diare ikut menurun.

Kerangka Evaluasi Kinerja yang Dapat Digunakan

Dalam sistem penyehatan lingkungan, evaluasi kinerja berfungsi sebagai alat untuk menilai keberhasilan program dalam mengendalikan faktor risiko lingkungan. Evaluasi ini tidak hanya berfokus pada pelaksanaan kegiatan, tetapi juga pada perubahan kondisi lingkungan dan dampaknya terhadap kesehatan masyarakat. Oleh karena itu, pendekatan evaluasi perlu mencakup aspek input, proses, output, outcome, dan impact.



Gambar 11.2 Siklus Evaluasi Kinerja Pada Sistem Penyehatan Lingkungan

Gambar diatas menjelaskan tentang siklus evaluasi kinerja sistem penyehatan lingkungan dengan kerangka input, proses, output, outcome, dan impact. Input menggambarkan seluruh sumber daya yang dibutuhkan untuk menjalankan program, seperti dana, tenaga sanitarian, alat pemeriksaan kualitas air, kendaraan operasional, bahan edukasi, regulasi, data surveilans, serta dukungan lintas sektor. Setelah input tersedia, program masuk ke tahap proses, yaitu pelaksanaan kegiatan seperti inspeksi kesehatan lingkungan, pengambilan sampel air, pemucian STBM, penyuluhan cuci tangan pakai sabun, pemberantasan sarang nyamuk, pengangkutan sampah, pengawasan tempat pengolahan makanan, dan pembinaan rumah sehat. Pada tahap ini, evaluasi menilai apakah kegiatan dilakukan sesuai standar, tepat waktu, menjangkau sasaran, dan melibatkan masyarakat.

Tahap berikutnya adalah output, yaitu hasil langsung dari kegiatan, misalnya jumlah desa yang dipicu STBM, jumlah rumah dengan jamban sehat, jumlah sampel air yang diperiksa, jumlah tempat umum yang diawasi, jumlah rumah bebas jentik, jumlah TPS 3R atau bank sampah, serta fasilitas kesehatan yang memiliki sistem pengelolaan limbah. Namun, output belum cukup untuk menilai keberhasilan akhir program karena masih perlu dilihat perubahan yang terjadi pada masyarakat atau outcome, seperti meningkatnya akses air minum dan sanitasi layak, menurunnya perilaku buang air besar sembarangan, meningkatnya angka bebas jentik, menurunnya kasus diare dan DBD, serta membaiknya kualitas air. Jika outcome berjalan baik secara berkelanjutan, maka akan menghasilkan impact berupa penurunan penyakit berbasis lingkungan, peningkatan derajat kesehatan masyarakat, penurunan stunting akibat berkurangnya infeksi berulang, peningkatan kualitas hidup, dan terciptanya permukiman yang lebih sehat dan aman.

Tabel 11.1 Contoh Matriks Evaluasi Kinerja Sistem Penyehatan Lingkungan

Komponen	Program Pemerintah	Indikator Output	Indikator Outcome
Air bersih dan air minum	Pamsimas, program air minum aman	Jumlah sarana air terbangun, jumlah sampel air diperiksa	Akses air minum layak meningkat, kualitas air memenuhi syarat
Sanitasi dasar	STBM, PPSP	Desa ODF, jamban sehat, pemicuan STBM	BABS menurun, diare menurun
Sampah	SIPSN, TPS 3R, bank sampah	Jumlah TPS 3R, bank sampah, volume sampah terangkut	Sampah tidak terkelola menurun, lingkungan lebih bersih
Air limbah domestic	PPSP, SANIMAS, IPAL komunal	Jumlah IPAL komunal, saluran limbah terbangun	Pencemaran lingkungan menurun
Vektor DBD	PSN 3M Plus, 1 rumah 1 jumantik	Rumah diperiksa, jumantik aktif, PSN rutin	ABJ meningkat, kasus DBD menurun
Malaria	Eliminasi malaria	Pemeriksaan kasus, distribusi kelambu, surveilans vektor	API menurun, wilayah bebas malaria meningkat
Fasyankes	Kesehatan lingkungan RS/puskesmas	Inspeksi kesling, pengelolaan limbah, uji kualitas air	Risiko infeksi dan pencemaran menurun
Tempat umum	Inspeksi kesehatan lingkungan	Pasar/sekolah/tempat ibadah diperiksa	Tempat umum memenuhi syarat kesehatan

Tabel tersebut menggambarkan contoh matriks evaluasi kinerja sistem penyehatan lingkungan dengan menghubungkan antara komponen penyehatan lingkungan, program pemerintah yang relevan, indikator output, dan indikator outcome. Matriks ini menunjukkan bahwa evaluasi kinerja tidak hanya berfokus pada pelaksanaan kegiatan atau jumlah sarana yang dibangun, tetapi juga perlu melihat perubahan nyata yang terjadi pada lingkungan dan kesehatan masyarakat. Setiap

komponen, seperti air bersih, sanitasi dasar, sampah, air limbah domestik, vektor DBD, malaria, fasilitas pelayanan kesehatan, dan tempat umum, memiliki program pemerintah yang berbeda, tetapi semuanya saling berkaitan dalam upaya mencegah penyakit berbasis lingkungan.

Pada komponen air bersih dan air minum, misalnya, program seperti Pamsimas dan program air minum aman dapat dievaluasi dari jumlah sarana air yang terbangun serta jumlah sampel air yang diperiksa. Namun, keberhasilan akhirnya dilihat dari meningkatnya akses air minum layak dan terpenuhinya kualitas air sesuai standar. Pada sanitasi dasar, program STBM dan PPSP dapat dinilai dari desa ODF, jamban sehat, dan kegiatan pemicuan STBM, sedangkan outcome yang diharapkan adalah menurunnya perilaku buang air besar sembarangan dan kasus diare. Hal yang sama juga berlaku pada pengelolaan sampah, air limbah domestik, serta pengendalian vektor, di mana output berupa kegiatan atau sarana harus dihubungkan dengan outcome berupa lingkungan yang lebih bersih, penurunan pencemaran, peningkatan angka bebas jentik, dan penurunan penyakit.

Matriks ini juga menunjukkan pentingnya evaluasi lintas sektor dalam sistem penyehatan lingkungan. Program pengelolaan sampah, air limbah, dan drainase tidak hanya menjadi tanggung jawab sektor kesehatan, tetapi juga melibatkan pemerintah daerah, dinas lingkungan hidup, PUPR, pemerintah desa, fasilitas pelayanan kesehatan, serta masyarakat. Oleh karena itu, evaluasi kinerja sistem penyehatan lingkungan perlu dilakukan secara terpadu dengan indikator yang jelas, mulai dari output jangka pendek sampai outcome yang menunjukkan manfaat langsung bagi masyarakat. Dengan demikian, tabel ini dapat digunakan sebagai

dasar untuk menilai apakah program pemerintah yang berjalan telah memberikan hasil nyata dalam memperbaiki kualitas lingkungan, menurunkan risiko penyakit, dan meningkatkan derajat kesehatan masyarakat.

Daftar Pustaka

- Agyemang-Badu, S. Y., Okyere, D., Adusei, S., & colleagues. (2023). Environmental management and sanitation as a malaria vector control strategy: A qualitative study. *Malaria Journal*.
- Azwar, A. (2010). *Pengantar administrasi kesehatan*. Binarupa Aksara.
- International Labour Organization. (2001). *Guidelines on occupational safety and health management systems, ILO-OSH 2001*. International Labour Office.
- Kementerian Kesehatan Republik Indonesia. (2019). *Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 7 Tahun 2019 tentang Kesehatan Lingkungan Rumah Sakit*. Kementerian Kesehatan Republik Indonesia.
- Kementerian Kesehatan Republik Indonesia. (2020). *Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 18 Tahun 2020 tentang Pengelolaan Limbah Medis Fasilitas Pelayanan Kesehatan Berbasis Wilayah*. Kementerian Kesehatan Republik Indonesia
- Kementerian Kesehatan Republik Indonesia. (2023). *Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 2 Tahun 2023 tentang Peraturan Pelaksanaan Peraturan Pemerintah Nomor 66 Tahun 2014 tentang Kesehatan Lingkungan*.
- Kementerian Kesehatan Republik Indonesia. (2014). *Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 3 Tahun 2014 tentang Sanitasi Total Berbasis Masyarakat*.
- Muninjaya, A. A. G. (2011). *Manajemen kesehatan*. EGC
- Rehana, A., Setiabudi, R. J., Sulistiawati, & Wahyunitisari, M. R. (2021). Implementation of hygiene and environmental sanitation in under five years old diarrhea patients at Surabaya Primary Health Center. *Jurnal Ilmiah Kesehatan*, 3(2), 45–53.
- World Health Organization. (2018). *Guidelines on sanitation and health*. World Health Organization.

Profil Penulis



Dr. Fitrianty Sutadi Lanyumba, SKM, M.Kes

Penulis di lahirkan di Raha pada tanggal 30 Mei 1987. Ketertarikan penulis terhadap ilmu Kesehatan Masyarakat dimulai pada tahun 2005, dimana penulis menjadi mahasiswi S1 Kesmas di FKM Universitas Tompotika Luwuk dan menyelesaikan study di tahun 2009. Tahun 2010 penulis telah diangkat menjadi Dosen tetap Yayasan Tompotika Luwuk dan melanjutkan kuliah S2 tahun 2011-2013 di FKM Universitas Hasanuddin Makassar. Pada tahun 2021 penulis menguatkan keilmuan Kesehatan Masyarakat dalam bidang Ilmu Manajemen Pelayanan Kesehatan dengan melanjutkan study S3 lagi di FKM Universitas Hasanuddin Makassar, dan menyelesaikan program doctoral pada tahun 2024. Pada perjalanan selama menjadi dosen, penulis pernah menjabat sebagai Wakil Dekan 3, Wakil Dekan 2 dan saat ini sementara menjabat sebagai Wakil Dekan 1 di FKM Universitas Tompotika Luwuk. Penulis juga aktif dalam kegiatan ilmiah dan organisasi keprofesian yaitu IAKMI dan Forum AKK Indonesia. Sehari-harinya bekerja sebagai dosen pengampu mata kuliah Administrasi dan Kebijakan Kesehatan; Perencanaan dan Evaluasi Kesehatan; serta Ekonomi dan Pembiayaan Kesehatan. Selain itu penulis juga aktif dalam menulis jurnal serta aktif menulis buku ajar dan *book chapter*.

Email Penulis : fitri.sutadi@gmail.com

STUDI KASUS TEKNOLOGI KESEHATAN LINGKUNGAN

Dr. Ir. Sugiarto, M.S.
Universitas Bhamada

Teknologi Kesehatan Lingkungan

Kesehatan lingkungan saat ini menghadapi tantangan kompleks akibat urbanisasi cepat, industrialisasi yang masif, dan degradasi ekosistem yang berkelanjutan. Di era Industri 4.0, teknologi kesehatan lingkungan tidak lagi dipandang sebagai entitas terpisah, melainkan sebuah ekosistem yang mengintegrasikan perangkat keras cerdas (sensor), perangkat lunak analitik (*Big Data, AI*), dan sistem manajemen risiko yang komprehensif. Tujuan utamanya adalah untuk memitigasi risiko kesehatan masyarakat yang timbul akibat polusi, manajemen limbah yang buruk, serta dampak perubahan iklim global.

Secara historis, pengelolaan kesehatan lingkungan sering kali bersifat reaktif; intervensi dilakukan setelah terjadi kontaminasi atau munculnya kluster penyakit di masyarakat. Namun, keterbatasan metode tradisional dalam mendeteksi polutan secara instan menuntut adanya pergeseran paradigma menuju pendekatan preventif berbasis data (proaktif). Peran teknologi mutakhir, seperti sistem sensor jarak jauh dan otomatisasi, memungkinkan otoritas kesehatan dan industri untuk memantau parameter kualitas lingkungan

secara kontinu. Dengan kemampuan *Early Warning System* (EWS), intervensi dapat dilakukan jauh sebelum polutan melampaui Ambang Batas Aman (ABA) atau Baku Mutu Lingkungan yang ditetapkan pemerintah. Hal ini sangat relevan dengan standar keselamatan kerja (K3) dan tanggung jawab lingkungan di sektor-sektor strategis seperti pertambangan, energi, dan fasilitas pelayanan kesehatan (Idhan, 2025).

Urgensi Implementasi Teknologi

Implementasi teknologi kesehatan lingkungan menjadi urgensi nasional karena beberapa alasan strategis:

1. Akurasi Data: Mengurangi ketergantungan pada pengambilan sampel manual yang rentan terhadap *human error* dan keterlambatan hasil laboratorium.
2. Efisiensi Sumber Daya: Optimalisasi biaya operasional melalui sistem pemantauan terpusat yang dapat diakses secara *remote*.
3. Kepatuhan Regulasi: Memastikan transparansi data emisi dan limbah sesuai dengan amanat UU Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup.

Perkembangan Teknologi Kesehatan Lingkungan

1. Evolusi Teknologi Sanitasi dan Kesehatan Lingkungan
Perjalanan teknologi kesehatan lingkungan bermula dari rekayasa sanitasi dasar (penyediaan air bersih dan jamban) menuju sistem cerdas berbasis *Internet of Things* (IoT). Dalam satu dekade terakhir, integrasi ISO 14001:2015 (Sistem Manajemen Lingkungan) dengan teknologi digital telah menciptakan standar baru dalam operasional industri yang ramah lingkungan.

2. Parameter Kualitas Lingkungan dan Digitalisasi

Pemantauan kesehatan lingkungan kini merujuk pada standar internasional dan regulasi nasional yang lebih ketat. Tabel di bawah ini menunjukkan transformasi signifikan antara metode konvensional dengan metode berbasis teknologi Industri 4.0.

Tabel 12.1 Perbandingan Metode Monitoring Lingkungan

Parameter	Metode Konvensional	Metode IoT/Otomatis	Keunggulan Strategis
Frekuensi Data	Periodik (Mingguan/Bulanan)	<i>Real-time</i> (Detik/Menit)	Deteksi dini terhadap lonjakan polutan
Akurasi & Presisi	Bergantung pada <i>human error</i>	Kalibrasi digital otomatis	Reliabilitas data untuk audit K3
Biaya Operasional	Tinggi (Tenaga kerja & logistik lab)	Efisien (Investasi awal tinggi, OPEX rendah)	ROI jangka panjang yang lebih baik
Integrasi Data	Terpisah-pisah (<i>Silo Data</i>)	Terpusat di <i>Cloud Server</i>	Pengambilan keputusan berbasis bukti
Aksesibilitas	Laporan fisik/cetak	Dasbor digital (<i>Web/Mobile</i>)	Transparansi <i>stakeholder</i>

3. Peran *Artificial Intelligence* (AI) dalam Prediksi Risiko

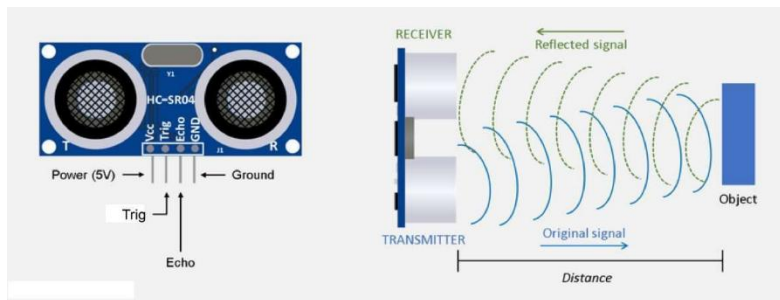
Penggunaan algoritma *Machine Learning* kini memungkinkan praktisi kesehatan lingkungan untuk memprediksi pola pencemaran udara atau air berdasarkan data historis dan variabel cuaca. Hal ini meminimalkan paparan risiko pada populasi rentan sebelum pencemaran benar-benar terjadi.

Studi Kasus I: Implementasi IoT Pada Pengolahan Limbah Padat (*Smart Waste Managament*)

1. Deskripsi Kasus

Implementasi teknologi ini dilakukan pada kawasan perkotaan dengan kepadatan tinggi yang memiliki lebih dari 100 titik Tempat Pembuangan Sampah (TPS) komunal. Fokus utama adalah pemasangan

Sensor *Ultrasonic HC-SR04* atau tipe industri yang setara pada tutup kontainer sampah public (Gambar 13.1). Sensor ini berfungsi untuk memantau ketinggian tumpukan sampah (*fill-level*) secara *real-time* tanpa kontak fisik, guna mencegah terjadinya *overcapacity* yang dapat mencemari estetika dan kesehatan lingkungan sekitar (Aji *et al.*, 2021). Penggunaan sensor ultrasonik dalam pemantauan limbah telah menjadi standar dalam arsitektur kota cerdas (*Smart City*). Hal ini sejalan dengan temuan bahwa "integrasi sensor level secara *real-time* mampu memberikan visibilitas aset hingga 98% terhadap status keterisian wadah limbah di area urban" (WHO, 2024).



Gambar 12.1 Sensor Ultrasonic HC-SR04 (UNESA, 2024).

2. Analisis Masalah

Manajemen limbah padat konvensional di Indonesia umumnya menggunakan sistem *fixed-route*, di mana truk pengangkut sampah mengunjungi seluruh titik TPS setiap hari pada jam yang sama. Hal ini memicu beberapa inefisiensi kritis:

- a. Inefisiensi Logistik: Truk seringkali mendatangi kontainer yang hanya terisi 20-30%, mengakibatkan pemborosan bahan bakar (BBM) dan waktu. Inefisiensi rute bukan sekadar masalah logistik, melainkan masalah kesehatan

lingkungan yang sistemik. Menurut EPA (2023), emisi dari kendaraan berat pengangkut sampah menyumbang porsi signifikan terhadap polutan udara lokal jika tidak dikelola melalui optimasi rute yang berbasis data aktual.

- b. Dampak Lingkungan: Mobilitas truk sampah yang tidak perlu meningkatkan emisi karbon (CO₂) dan mempercepat kerusakan infrastruktur jalan.
- c. Risiko Kesehatan: Pada titik tertentu yang mengalami lonjakan volume sampah secara tiba-tiba, kontainer sering meluap sebelum jadwal pengangkutan tiba, sehingga menjadi sarang vektor penyakit (lalat dan tikus) serta menimbulkan bau busuk (H₂S).

3. Solusi Teknologi: Ekosistem LoRaWAN

Solusi yang diterapkan adalah integrasi sensor level dengan jaringan **LoRaWAN (Long Range Wide Area Network)**. Pilihan teknologi ini didasarkan pada kebutuhan transmisi data jarak jauh (hingga 5-15 km) dengan konsumsi daya baterai yang sangat rendah, sehingga sensor dapat bertahan hingga 2-3 tahun tanpa penggantian baterai.

Alur Kerja Sistem:

- a. *Data Acquisition*: Sensor mengukur jarak dari tutup kontainer ke permukaan sampah.
- b. *Data Transmission*: Data dikirim dalam paket kecil ke *Gateway* LoRaWAN terdekat.
- c. *Cloud Analysis*: Server memproses data dan memvisualisasikannya ke dalam peta rute dinamis (*dynamic routing*).

- d. Implementasi: Pengemudi truk menerima notifikasi rute harian yang hanya mencakup kontainer dengan tingkat kepenuhan >80%.

Pilihan pada protokol LoRaWAN didukung oleh keunggulannya dalam penetrasi sinyal di area padat bangunan. Dalam kajian manajemen risiko infrastruktur, teknologi nirkabel berdaya rendah (LPWAN) adalah solusi paling efisien untuk sensor lingkungan yang tersebar luas karena meminimalkan biaya penggantian baterai dan pemeliharaan lapangan.

4. Analisis Teknis dan Perhitungan Efisiensi

Untuk memperkuat pengambilan keputusan teknologi yang akan digunakan berikut adalah tabel perbandingan performa operasional (Tabel 12.2):

Tabel 12.2 Metrik Keberhasilan Implementasi
Smart Waste Management

Indikator Kinerja (KPI)	Sistem Konvensional	Sistem Berbasis IoT	Efisiensi / Perbaikan
Rata-rata Jarak Tempuh	120 km/hari	78 km/hari	Penurunan 35%
Konsumsi BBM (Solar)	40 Liter/hari	26 Liter/hari	Penghematan 14 Liter/hari
Waktu Operasional	8 Jam/hari	5,5 Jam/hari	Penghematan 31% waktu
Kapasitas Angkut	Random (Variatif)	Maksimal (>85%)	Optimalisasi Ruang Bak
Emisi CO ₂ (Estimasi)	106,4 kg CO ₂ /hari	69,1 kg CO ₂ /hari	Reduksi Jejak Karbon

5. Analisis Biaya (Cost-Benefit Analysis)

Data analisis biaya sangat penting untuk disertakan. Penghematan dari sisi BBM dan pemeliharaan kendaraan dalam jangka waktu 1 tahun umumnya

mampu menutup biaya investasi awal (*Payback Period* nya sekitar 14-18 bulan).

Formula Penghematan Tahunan (S):

$$S = \sum_{n=1}^{365} (\Delta D_n \times C_{km}) + \Delta M$$

Keterangan:

ΔD_n : adalah selisih jarak tempuh, dengan n: jumlah hari ke 1 - 365

C_{km} : biaya operasional per km,

ΔM : adalah pengurangan biaya *maintenance*.

6. Dampak terhadap Kesehatan Lingkungan

Secara kualitatif, teknologi ini mendukung program Sanitasi Total Berbasis Masyarakat (STBM) dengan memastikan tidak ada sampah yang terbengkalai lebih dari 24 jam dalam kondisi penuh. Hal ini secara signifikan menurunkan angka kepadatan lalat (Indeks Lalat) di sekitar area pemukiman, yang berkorelasi langsung dengan penurunan kasus penyakit diare dan infeksi saluran pencernaan. Kaitan antara ketepatan waktu pengangkutan sampah dengan vektor penyakit sangatlah erat. Studi terbaru menunjukkan bahwa sistem pengangkutan yang responsif terhadap data sensor dapat menurunkan risiko perkembangbiakan vektor *Musca domestica* (lalat rumah) secara signifikan di TPS komunal.

Studi Kasus II: Sistem Monitoring Kualitas Udara Secara Real-Time

1. Dampak Kesehatan dan Urgensi Pemantauan

Kualitas udara merupakan determinan kesehatan lingkungan yang paling dinamis. Paparan polutan

udara, khususnya partikulat halus ($PM_{2.5}$) dan gas belerang dioksida (SO_2), telah terbukti secara klinis berkorelasi langsung dengan peningkatan prevalensi penyakit pernapasan kronis seperti Penyakit Paru Obstruktif Kronis (PPOK), asma, dan penurunan fungsi paru pada anak-anak. Menurut WHO (2024), partikulat berukuran < 2.5 mikron atau μm memiliki kemampuan untuk menembus penghalang darah-paru dan masuk ke sistem peredaran darah, yang pada jangka panjang memicu risiko kardiovaskular. Oleh karena itu, pemantauan statis bulanan sudah tidak lagi memadai untuk melindungi populasi di kawasan industri dan pemukiman padat.

2. Implementasi Teknologi Sensor dan *Machine Learning*

Implementasi teknologi ini melibatkan pemasangan jaringan sensor *low-cost* namun presisi tinggi di titik-titik rawan polusi. Berbeda dengan stasiun pemantauan konvensional yang besar dan mahal, sensor ini bersifat modular dan terdistribusi. Sistem ini tidak hanya membaca data saat ini, tetapi juga menggunakan model prediktif berbasis *Machine Learning* untuk memprediksi puncak polusi (*pollution spikes*). Hal ini memungkinkan otoritas terkait untuk memberikan peringatan dini kepada masyarakat atau instruksi pengurangan aktivitas industri sementara.

Model Prediksi Polusi

Model yang digunakan adalah pendekatan regresi linier berganda untuk mengestimasi konsentrasi polutan di masa depan berdasarkan variabel lingkungan dan aktivitas manusia.

Persamaan Prediksi Polusi:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \epsilon$$

Keterangan Variabel:

Y: Konsentrasi polutan terprediksi (misalnya dalam $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

β_0 : Konstanta (intersep).

X_1 : Kecepatan angin (m/detik). Kecepatan angin yang tinggi biasanya berkorelasi negatif dengan Y karena efek dispersi.

X_2 : Volume lalu lintas kendaraan (satuan mobil penumpang/jam). Variabel ini biasanya memiliki korelasi positif yang kuat dengan polutan primer.

ϵ atau epsilon: *Error term* (mewakili variabel lain seperti kelembaban atau arah angin yang tidak masuk dalam model sederhana ini).

3. Analisis Data dan Visualisasi

Data, yang dihasilkan oleh sensor dikirimkan setiap 5-10 menit ke pusat data. Tabel 12.3 di bawah ini menunjukkan ambang batas dan efektivitas sistem peringatan dini. Untuk mengukur parameter partikel pencemar udara ukuran 2,5 mikron ($\text{PM}_{2.5}$) digunakan alat *Optical Particle Counter* (Gambar 12.3).

Tabel 12.3 Matriks Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU) dan Respons Sistem

Parameter ($\text{PM}_{2.5}$)	Kategori	Dampak Kesehatan	Tindakan Sistem IoT
0 - 15.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Baik	Tingkat kualitas udara yang sangat baik	Monitoring Rutin
15.6 - 55.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Sedang	Kualitas udara yang dapat diterima	Notifikasi Harian
55.5 - 150.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Tidak Sehat	Peningkatan gejala kardiovaskular pada kelompok rentan	Alert Level 1 (<i>Push Notification</i>)
> 150.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Sangat Tidak Sehat	Penurunan daya tahan tubuh secara umum	Alert Level 2 (Instruksi Evakuasi/Masker)



Gambar 12.2 *Optical Particle Counter* untuk mengukur PM 2,5 mikron (Kanomax, 2025)

4. Integrasi dalam Manajemen Risiko Industri

Dalam konteks operasional perusahaan, sistem monitoring ini sangat krusial bagi industri pertambangan dan energi. Transparansi data emisi udara secara *real-time* merupakan manifestasi dari implementasi ISO 14001 yang proaktif, di mana perusahaan dapat mengontrol emisi dari cerobong asap (*stack*) secara otomatis berdasarkan kondisi udara ambien di sekitarnya (KLH, 2024).

Studi Kasus III: Inovasi Teknologi Pengolahan Air limbah Domestik

1. Teknologi Membrane Bio-Reactor (MBR)

Teknologi *Membrane Bio-Reactor* (MBR) merupakan salah satu inovasi paling signifikan dalam teknik kesehatan lingkungan dekade ini. MBR mengintegrasikan proses biologis lumpur aktif (*activated sludge*) dengan filtrasi membran (biasanya *microfiltration* atau *ultrafiltration*) sebagai pengganti bak pengendap sekunder (*secondary clarifier*) konvensional (Gambar 12.3).

Keunggulan utama teknologi ini adalah kemampuannya untuk beroperasi pada konsentrasi *Mixed Liquor Suspended Solids* (MLSS) yang jauh lebih

tinggi (antara 8.000 hingga 15.000 mg/L) dibandingkan sistem konvensional. Sebagaimana dicatat oleh Idhan (2025) teknologi ini menghasilkan effluen dengan kualitas sangat tinggi yang memenuhi standar ketat untuk penggunaan kembali (*water reuse*) non-konsumsi, seperti penyiraman lahan hijau, pencucian kendaraan, atau kebutuhan air pemadam kebakaran.



Gambar 12.3 Sistem Membrane Bio-Reactor (Goorui, 2025).

2. Analisis Efisiensi Pengolahan

Untuk memberikan gambaran komparatif yang jelas, Tabel 12.4 menyajikan perbedaan performa antara sistem pengolahan biologis konvensional dengan sistem MBR.

Tabel 12.4 Perbandingan Teknis Sistem Konvensional vs. Sistem MBR

Kriteria	Sistem Konvensional	Sistem MBR	Keunggulan MBR
<i>BOD Removal</i>	80 - 85%	> 95%	Kualitas effluen lebih stabil
<i>TSS Removal</i>	Sedang	~ 100%	Bebas padatan tersuspensi
Kebutuhan Lahan	Luas	Sangat Kompak	Efisiensi lahan s.d. 60%
<i>Footprint</i>	Tinggi	Rendah	Cocok untuk area perkotaan
Residu Lumpur	Tinggi	Rendah	Meminimalkan limbah padat
<i>Water Reuse</i>	Perlu pengolahan lanjut	Langsung (Non-Potabel)	Mendukung Ekonomi Sirkular (<i>Circular Economy</i>)

3. Mekanisme Filtrasi dan Pemisahan Biomasa

Pemisahan fisik menggunakan membran berpori mikro (approx 0.04 hingga 0.1 μ m) memastikan bahwa bakteri dan sebagian besar virus tertahan di dalam bioreaktor. Hal ini secara signifikan mengurangi kebutuhan akan desinfeksi kimiawi (seperti klorinasi) yang seringkali menghasilkan produk sampingan berbahaya (*Disinfection By-Products*). Menurut WHO (2024), penggunaan membran dalam pengolahan air limbah domestik merupakan langkah preventif yang efektif terhadap penyebaran patogen tular-air (*water-borne*) di pemukiman padat penduduk yang dekat dengan sumber air tanah.

4. Implementasi Strategis di Sektor Domestik dan Industri

Dalam konteks penerapan MBR sangat direkomendasikan untuk instalasi pengolahan air limbah (IPAL) mandiri pada gedung-gedung bertingkat atau fasilitas fasyankes. Kemampuannya yang "kompak" menjawab tantangan keterbatasan lahan di wilayah urban tanpa mengorbankan kualitas kesehatan lingkungan sekitar.

Integrasi Data dan Tantangan Regulasi

Implementasi teknologi kesehatan lingkungan di era Industri 4.0 bukan sekadar masalah pengadaan perangkat keras, melainkan sebuah transformasi sistemik yang melibatkan integritas data dan kepatuhan hukum. Berdasarkan ketiga studi kasus sebelumnya, ditemukan beberapa tantangan fundamental yang harus diatasi untuk menjamin keberlanjutan sistem.

1. Interoperabilitas Data

Salah satu kendala teknis utama dalam digitalisasi kesehatan lingkungan adalah perbedaan protokol komunikasi antar perangkat sensor (*Interoperability*).

- a. Masalah: Banyak vendor menggunakan protokol tertutup (*proprietary*), sehingga sensor udara dari merek A tidak dapat berkomunikasi dengan sistem manajemen limbah dari merek B.
- b. Solusi: Diperlukan standarisasi protokol komunikasi (seperti penggunaan MQTT atau protokol berbasis JSON) agar seluruh data dari media lingkungan (air, udara, limbah) dapat mengalir ke satu dasbor terpadu. Hal ini sejalan dengan prinsip integrasi data di lingkungan perusahaan untuk menciptakan sistem monitoring yang holistik.

2. Keamanan Siber (*Cybersecurity*) pada Infrastruktur Kritis

Seiring dengan pemindahan data ke sistem *Cloud*, risiko serangan siber menjadi ancaman nyata (Nurhidayat *et.al.*, 2024).

- a. Analisis Risiko: Peretasan pada sistem pemantauan limbah atau emisi udara dapat mengakibatkan manipulasi data laporan (misalnya, emisi berbahaya terlihat aman di dasbor padahal sedang terjadi kebocoran).
- b. Strategi Mitigasi: Sesuai dengan ISO 27001 (2022), setiap sistem monitoring digital wajib dilengkapi dengan enkripsi *end-to-end* dan autentikasi berlapis untuk menjaga integritas data kesehatan lingkungan.

3. Kesiapan SDM (Multidisiplin)

Teknologi kesehatan lingkungan modern menuntut profil tenaga ahli baru. Tidak cukup hanya menguasai teknik sanitasi konvensional, praktisi saat ini harus memiliki literasi digital yang kuat.

- a. Kesenjangan Skill: Masih banyak tenaga sanitarian yang belum terbiasa dengan analisis *Big Data* atau interpretasi model prediktif *Machine Learning*.
- b. Rekomendasi: Universitas dan lembaga pelatihan terkait perlu menyusun kurikulum yang menggabungkan ilmu kesehatan lingkungan dengan *Data Science* untuk mencetak SDM yang siap mengoperasikan teknologi cerdas.

4. Tantangan Regulasi di Indonesia

Sering kali implementasi teknologi perkembangannya lebih cepat daripada perkembangan regulasi (Tabel 12.5).

Tabel 12.5 Implementasi teknologi sering kali berjalan lebih cepat daripada perkembangan regulasi.

Tantangan Regulasi	Kondisi Saat Ini	Kebutuhan Masa Depan
Legalitas Data Digital	Beberapa laporan masih mewajibkan bukti fisik lab	Pengakuan data sensor <i>real-time</i> sebagai bukti kepatuhan hukum resmi
Baku Mutu Emisi	Masih berbasis ambang batas statis	Regulasi dinamis yang mempertimbangkan beban polutan kumulatif
Insentif Teknologi	Biaya investasi teknologi tinggi sepenuhnya ditanggung industri	Pemberian insentif pajak bagi industri yang menerapkan <i>Green Tech</i> berbasis IoT

Kesimpulan

Berdasarkan analisis mendalam terhadap ketiga studi kasus yang telah dipaparkan, dapat ditarik beberapa peran strategis teknologi kesehatan lingkungan:

1. Transformasi Paradigma: Teknologi kesehatan lingkungan telah mengubah wajah manajemen risiko dari pendekatan reaktif (menangani setelah terjadi dampak) menjadi prediktif dan proaktif. Penggunaan sensor IoT dan pemodelan regresi memungkinkan mitigasi sebelum parameter lingkungan melampaui baku mutu.
2. Efisiensi Terukur: Implementasi *Smart Waste Management* dan teknologi MBR membuktikan bahwa inovasi tidak hanya berdampak positif pada aspek kesehatan lingkungan, tetapi juga memberikan efisiensi biaya operasional yang signifikan (hingga 35%) dan penghematan lahan yang krusial bagi area urban.
3. Kualitas Data: Integrasi sistem monitoring *real-time* meminimalkan kesalahan manusia dalam pencatatan data dan memberikan tingkat akurasi yang lebih tinggi, yang sangat penting bagi audit K3L dan kepatuhan regulasi di lingkungan Kementerian ESDM maupun fasilitas publik.

Daftar Pustaka

- Aji, F.P., A. Solehudin dan C. Rozikin. (2021). *Implementasi Sensor Ultrasonik Dalam Mendeteksi Volume Limbah B3 Pada Tempat Sampah Berbasis IoT*. Jurnal Ilmiah Informatika 6 (2):117-125. <https://journal.ibrahimy.ac.id/index.php/JIMI>
- EPA. (2023). *Smart Sensors for Environmental Monitoring: Guidelines and Best Practices*. Washington DC: Environmental Protection Agency Office of Mission Support.
- EPA. (2023). *Technical Assistance Document for the Reporting of Daily Air Quality – the Air Quality Index (AQI)*. Washington DC: Environmental Protection Agency Office of Mission Support.
- Goorui (2025). Membrane Bioreactor (MBR) Technology for Efficient Wastewater Treatment. Udhana <https://www.goorui.com/2025/02/26/membrane-bioreactor-mbr-technology-for-efficient-wastewater-treatment/>
- Idhan, M.A. (2025). *Pengaruh Penerapan Teknologi Iot Pada Monitoring Kualitas Air Tambang Terhadap Efisiensi Pengelolaan Lingkungan Di Area Pertambangan*. Journal of Artificial Intelligence and Digital Business (RIGGS) Vol.4(3):8680–8686. <https://journal.ilmudata.co.id/index.php/RIGGS/>
- International Organization for Standardization. (2022). *ISO/IEC 27001: Information security, cybersecurity and privacy protection*. Geneva: ISO.
- Kanomax. (2025). Particle Counters. <https://kanomax-usa.com/products/particle-counters/>

- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. (2024). *Pedoman Integrasi Data Lingkungan dalam Sistem Informasi Nasional*. Jakarta: KLHK.
- Metcalf & Eddy. (2025). *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery (6th Edition)*. New York: McGraw-Hill.
- Nurhidayat, T. et al. (2024). *Kajian Ketahanan Keamanan Siber, Manajemen Kerentanan*. Penerbit: Politeknik Siber dan Sandi Negara. Bogor
- Sugiarto. (2025). *Diktat Kuliah Manajemen Audit dan Tinjau Ulang K3*. Sekolah Pascasarjana Universitas Sahid Jakarta.
- UNESA (2024). Bagian-Bagian Sensor Ultrasonik HC-SR04.
<https://pendidikan-elektro.ft.unesa.ac.id/post/bagian-bagian-sensor-ultrasonik>
- WHO. (2024). *Environmental Health Technologies in Urban Settings: A Global Perspective*. Geneva: World Health Organization Press.
- WHO. (2024). *Guidelines for Safe Use of Wastewater, Excreta and Greywater*. Geneva: World Health Organization Press.
- WHO. (2024). *Global Air Quality Guidelines: Particulate Matter (PM_{2.5} and PM₁₀), Ozone, Nitrogen Dioxide, Sulfur Dioxide and Carbon Monoxide*. Geneva: World Health Organization Press.

Profil Penulis



Dr. Ir. Sugiarto, M.S.

Ia dilahirkan di Banjarnegara, Brebes (Jateng) pada tanggal 16 Mei 1958. Ketertarikannya dalam bidang K3L (HSE) dimulai pada tahun 1990 silam. Berkariir lebih dari 40 tahun di beberapa perusahaan migas asing: Conoco Inc, ConocoPhillips Inc, TAC Pertamina Elnusa Ramba Ltd, PTTEP Thailand dan MontD'Or Petroleum. Sebelum dan pasca pensiun penulis mengajar di beberapa universitas: Universitas Bhamada Slawi Tegal sebagai dosen tetap. Selain itu mengajar sebagai dosen luar biasa di Prodi S2 MM K3L di Sekolah Pasca Sarjana Universitas Sahid Jakarta, dan di Prodi S1 Teknik Perminyakan ITSB. Juga mengajar sebagai dosen tamu rutin di Prodi S2 Teknik Kelautan ITB, pernah jadi dosen tamu Prodi Teknik Kimia UI, Prodi Teknik Geologi Universitas Trisakti, Fakultas Teknik Universitas Pancasila, Fakultas Hukum UGM, Fakultas Perikanan & Kelautan IPB University, dan di Universitas Pertamina Jakarta. Penulis masih aktif sebagai anggota Tim Independen Pengendalian Keselamatan Migas (TIPKM), Kementerian ESDM. Selain itu aktif sebagai Auditor Akomodasi (*Camp*) dan Catering di Industri Migas (Survei Seismik, Rig Pengeboran, Anjungan Operasi Produksi, FPSO, dan FSO), Trainer Profesional dan Asesor Kompetensi BNSP di LSP PPSDM Migas untuk Bimtek Kepala Teknik Migas dan Wakilnya, Auditor SMK3 & ISO 45001, Pengawas Utama K3 BNSP, Pengawas Utama K3 Migas, Bidang K3LL (HSE), HAZOPs, PSM, Manajemen Risiko K3, CSMS, dll nya. Penulis pernah menjadi konsultan dan trainer di beberapa perusahaan migas, geothermal, PT. Pelabuhan Indonesia (PELINDO) Holding, PT. Biro Klasifikasi Indonesia (PT. BKI), PT. PLN Distribusi DKI Jaya, SITRA – ITS, PT. Wide & Pin Academy, PT. Alpha Petroleum dan lain-lainnya. Memiliki beberapa sertifikat kompetensi: Ahli K3 Umum – BNSP, Auditor SMK3 – BNSP, Pengawas Ahli Utama K3 – BNSP dan Asesor Kompetensi - BNSP. Certified OSHA Manager – US OSHA. Sertifikat AMDAL A dan AMDAL C dari BAPEDAL, KLH. Pernah menulis buku Penghijauan Pantai – PT Penebar Swadaya, buku K3LL Untuk Industri Migas dan Geothermal – penerbit ITSB, buku Komunikasi K3 – PT. Prosafe secara tim, Book Chapter K3 Pertambangan dan Migas – CV. Media Sains Indonesia secara tim, Book Chapter: K3 Kelautan, K3 Kelistrikan, K3 Pariwisata, K3 Di Wilayah Agraris, K3 Keselamatan Pasien, Imunologi Dan Nutrisi, Manajemen Penanggulangan Penyakit Tropis, Sanitasi Transportasi,

Pariwisata & Matra dan Teknik Penyehatan Udara - CV. Media Sains Indonesia secara tim (*in progress*), serta Book Chapter Ekologi dan Lingkungan – PT. Star Digital Publishing secara tim (*in progress*).

Email Penulis : sugiarto.hse@gmail.com

- 1 KONSEP DAN RUANG LINGKUP TEKNOLOGI DALAM KESEHATAN LINGKUNGAN
Jordan Syah Gustav
- 2 PRINSIP DASAR PEMILIHAN TEKNOLOGI
Ihsan Murdani
- 3 TEKNOLOGI PENYEDIAAN AIR BERSIH
Sandy Novryanto Sakati
- 4 TEKNOLOGI PENGOLAHAN AIR LIMBAH DOMESTIK DAN INDUSTRI
Dewi Fitria Marlisa
- 5 TEKNOLOGI PERSAMPAHAN
Redha Rahmi
- 6 TEKNOLOGI PENYEHATAN UDARA
Fitri Yanti
- 7 TEKNOLOGI PENGENDALIAN VEKTOR DAN BINATANG PEMBAWA PENYAKIT
Fachry Rumaf
- 8 PENERAPAN IOT DAN BIG DATA DALAM PENGAWASAN LINGKUNGAN
Angki Irawan
- 9 TEKNOLOGI TEPAT GUNA BERBASIS MASYARAKAT
Muhamad Faisal Pataha
- 10 ANALISIS BIAYA MANFAAT DAN KELAYAKAN TEKNOLOGI
Yunita Sari Thirayo
- 11 EVALUASI KINERJA SISTEM PENYEHATAN LINGKUNGAN
Fitrianty Sutadi Lanyumba
- 12 STUDI KASUS TEKNOLOGI KESEHATAN LINGKUNGAN
Sugiarto

Editor:

Hairil Akbar

Untuk akses **Buku Digital**,
Scan **QR CODE**



Media Sains Indonesia
Melong Asih Regency B.40, Cijerah
Kota Bandung - Jawa Barat
Email : penerbit@medsan.co.id
Website : www.medsan.co.id

