

RANCANGAN INFRASTRUKTUR SANITASI DARURAT DAN DISTRIBUSI AIR BERSIH DI GAZA: STUDI LITERATUR DAN REKOMENDASI TEKNIS

Yulianti

Pengelolaan Infrastruktur Air Bersih dan Sanitasi, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan,
Institut Teknologi Bandung, Bandung, 40132, Jawa Barat, Indonesia

e-mail: yuliantifawwaz@gmail.com

ABSTRACT

The humanitarian crisis in the Gaza Strip has severely damaged essential infrastructure, particularly water supply and sanitation systems. The conflict that has persisted since October 2023 has disrupted electricity networks, destroyed pipelines, and limited access to safe drinking water. This study aims to design an emergency sanitation and clean water distribution infrastructure based on the WASH (Water, Sanitation, and Hygiene) framework that is adaptive to conflict conditions. A systematic literature review was conducted using data from UNICEF, WHO, ACAPS, Sphere Association, and the Global WASH Cluster (2023–2025). The findings indicate that the implementation of solar-powered portable desalination units and modular communal toilets can increase water supply efficiency by up to 40% and reduce waterborne disease cases by 18–25% in refugee shelters. The study concludes that an adaptive WASH model based on modular technology, renewable energy, and community participation is the most effective and sustainable solution to ensure clean water and sanitation services in conflict-affected areas such as Gaza.

Keywords: WASH, clean water, emergency sanitation, portable desalination, community-based management.

ABSTRAK

Krisis kemanusiaan yang melanda Jalur Gaza telah mengakibatkan kerusakan besar terhadap infrastruktur dasar, terutama sistem penyediaan air bersih dan sanitasi. Konflik yang berlangsung sejak Oktober 2023 menyebabkan gangguan pasokan listrik, rusaknya jaringan pipa, dan terbatasnya akses terhadap sumber air layak konsumsi. Penelitian ini bertujuan untuk merancang sistem infrastruktur sanitasi darurat dan distribusi air bersih berbasis pendekatan WASH (Water, Sanitation, and Hygiene) yang adaptif terhadap kondisi konflik. Metode yang digunakan adalah kajian literatur sistematis terhadap data dari UNICEF, WHO, ACAPS, Sphere Association, dan Global WASH Cluster periode 2023–2025. Hasil analisis menunjukkan bahwa penerapan unit desalinasi portabel bertenaga surya dan toilet komunal modular mampu meningkatkan efisiensi penyediaan air hingga 40% serta menurunkan kasus penyakit berbasis air sebesar 18–25% di kamp pengungsian. Studi ini menegaskan bahwa model WASH adaptif berbasis teknologi modular, energi terbarukan, dan partisipasi masyarakat merupakan solusi paling efektif dan berkelanjutan dalam menjamin layanan air bersih dan sanitasi di wilayah konflik seperti Gaza.

Kata kunci: WASH, air bersih, sanitasi darurat, desalinasi portabel, community-based management.

1. PENDAHULUAN

Perang yang berkepanjangan di Jalur Gaza telah menghancurkan sebagian besar infrastruktur dasar, termasuk sistem air bersih dan sanitasi. Menurut data UN OCHA (2023), lebih dari 92% populasi Gaza tidak memiliki akses terhadap air layak minum, dan hanya 16% rumah tangga yang menerima air pipa lebih dari 8 jam per minggu. Kondisi ini diperburuk oleh kerusakan lebih dari 50% fasilitas pengolahan limbah cair akibat serangan udara tahun 2021 dan 2023.

Gangguan terhadap jaringan distribusi air telah meningkatkan risiko wabah penyakit berbasis air di kalangan penduduk sipil dan pengungsi. Laporan WHO (2022) menunjukkan peningkatan kasus diare akut hingga 26% setelah eskalasi konflik, sementara lebih dari 70% pengungsi di shelter UNRWA melaporkan keterbatasan fasilitas sanitasi dasar seperti toilet dan tempat mandi.

Situasi kemanusiaan yang kritis ini menuntut adanya sistem infrastruktur sanitasi darurat dan distribusi air bersih yang dapat diterapkan dengan cepat, efisien, dan aman di tengah kondisi konflik bersenjata. Penelitian ini bertujuan memberikan rancangan sistem tanggap darurat berbasis pendekatan teknis dan kemanusiaan yang terintegrasi, dengan mempertimbangkan keterbatasan sumber daya, kondisi keamanan, serta kapasitas logistik di lapangan.

2. TINJAUAN LITERATUR DAN PENGEMBANGAN HIPOTESIS

2.1 Water, Sanitation, and Hygiene (WASH)

WASH merupakan kerangka konseptual global yang dikembangkan oleh WHO dan UNICEF untuk menggambarkan keterkaitan antara akses air bersih, sistem sanitasi layak, dan perilaku higienis sebagai tiga pilar utama kesehatan masyarakat. Menurut *Joint Monitoring Programme for Water Supply, Sanitation and Hygiene (JMP, 2023)*, WASH didefinisikan sebagai "*The collective efforts to ensure access to safe and sufficient water, adequate sanitation facilities, and proper hygiene practices to protect human health and well-being.*" Secara teoritis, WASH berlandaskan pada tiga dimensi:

1. Water Security – ketersediaan air dalam jumlah dan kualitas yang memadai untuk kebutuhan konsumsi, kebersihan, dan produktivitas, termasuk aspek keberlanjutan sumber daya air.
2. Sanitation Infrastructure – penyediaan fasilitas pembuangan limbah manusia yang aman, tertutup, dan higienis untuk mencegah kontaminasi air dan tanah.
3. Hygiene Behavior – perilaku cuci tangan, pengelolaan air rumah tangga, dan kebersihan lingkungan yang secara empiris menurunkan risiko penyakit berbasis air.

Menurut Sphere Association (2022), intervensi WASH dalam situasi darurat harus menjamin terpenuhinya kebutuhan dasar manusia terhadap air, sanitasi, dan kebersihan. Standar minimum yang ditetapkan mencakup penyediaan air bersih sebanyak 15 hingga 20 liter per orang per hari untuk keperluan minum, memasak, dan kebersihan pribadi. Selain itu, disarankan tersedia satu fasilitas toilet untuk setiap 20 orang guna menjamin akses yang memadai serta mengurangi risiko penyebaran penyakit berbasis air. Fasilitas air dan sanitasi

sebaiknya tidak berjarak lebih dari 50 meter dari tempat tinggal atau lokasi pengungsian, agar mudah diakses oleh masyarakat tanpa mengorbankan keselamatan dan privasi penggunaan.

Lebih lanjut, Sphere Standards menekankan pentingnya pengelolaan partisipatif berbasis masyarakat. Artinya, setiap tahap perencanaan, pembangunan, dan pemeliharaan fasilitas WASH harus melibatkan komunitas lokal sebagai pengguna utama. Pendekatan ini tidak hanya meningkatkan rasa memiliki terhadap fasilitas, tetapi juga memperkuat keberlanjutan layanan karena masyarakat turut berperan dalam menjaga kebersihan, melaporkan kerusakan, serta memastikan kesetaraan akses bagi kelompok rentan seperti perempuan, anak-anak, dan penyandang disabilitas. Dengan demikian, implementasi standar Sphere tidak sekadar berfokus pada kuantitas layanan, melainkan juga pada kualitas, keamanan, dan keberlanjutan sistem WASH di situasi darurat. WASH juga menekankan prinsip "Do No Harm", yakni bahwa setiap intervensi teknis harus mempertimbangkan aspek sosial, gender, keamanan, dan lingkungan. Dalam konteks konflik seperti Gaza, prinsip ini berarti memastikan fasilitas air dan sanitasi tidak menjadi target serangan dan dapat digunakan oleh semua kelompok secara setara.

2.2 Kondisi WASH di Wilayah Konflik

Krisis WASH (Water, Sanitation, and Hygiene) di Gaza menunjukkan kompleksitas masalah yang bersifat sistemik dan multidimensi. Berdasarkan laporan Zinszer & Abuzerr (2024), hanya sekitar 30 persen lokasi penampungan pengungsi di Jalur Gaza yang memiliki akses terhadap air minum layak. Rata-rata ketersediaan air di shelter tersebut hanya mencapai 5–7 liter per orang per hari, jauh di bawah standar minimum Sphere yang menetapkan 15–20 liter per orang per hari. Keterbatasan ini disebabkan oleh rusaknya jaringan distribusi air akibat serangan udara serta sulitnya memperoleh bahan bakar untuk mengoperasikan pompa dan truk air.

Selain itu, laporan UNICEF SitRep (2025) mencatat bahwa meskipun lebih dari 1,5 juta orang telah menerima layanan WASH darurat di Gaza, operasi bantuan masih mengalami kendala berat. Banyak fasilitas pengolahan limbah dan pipa air utama yang tidak dapat diperbaiki karena pembatasan akses dan kekurangan pasokan teknis. UNICEF menekankan bahwa operasi WASH di lapangan berlangsung dalam kondisi "severely constrained", dengan sebagian besar unit desalinasi tidak dapat berfungsi karena keterbatasan listrik dan risiko keamanan di lokasi konflik.

Data ACAPS (2024) memperkuat temuan ini dengan menunjukkan bahwa selama periode Oktober 2023 hingga Maret 2024, total pasokan air rata-rata di Jalur Gaza hanya 3–15 liter per orang per hari. Fluktuasi ini mencerminkan kondisi infrastruktur yang tidak stabil dan ketergantungan penuh pada suplai air dari Israel maupun dari sumur-sumur dangkal yang kualitasnya buruk. Dalam banyak kasus, masyarakat harus membeli air dari truk swasta dengan harga tinggi, menambah beban ekonomi rumah tangga yang sudah rentan akibat blokade berkepanjangan.

Kondisi tersebut mengindikasikan terjadinya “WASH crisis” yang tidak hanya bersumber dari kerusakan fisik infrastruktur, tetapi juga dari lemahnya sistem energi, logistik, dan tata kelola sumber daya air. Gangguan listrik dan kekurangan bahan bakar menyebabkan pompa air dan instalasi pengolahan limbah tidak beroperasi optimal. Sementara itu, tekanan politik dan pembatasan impor material memperlambat pemulihan infrastruktur, menjadikan Gaza bergantung sepenuhnya pada bantuan kemanusiaan internasional untuk memenuhi kebutuhan dasar air dan sanitasi.

Dampak dari krisis ini sangat luas terhadap kesehatan masyarakat. Laporan WHO (2024) menunjukkan peningkatan signifikan kasus diare, penyakit kulit, dan infeksi saluran pencernaan di kalangan anak-anak dan lansia. Kurangnya fasilitas mandi dan toilet yang layak menyebabkan peningkatan risiko penyakit menular berbasis air serta memperburuk kondisi kebersihan di tempat pengungsian. Krisis WASH di Gaza, oleh karena itu, bukan hanya isu teknis tetapi juga ancaman kemanusiaan yang secara langsung memengaruhi kelangsungan hidup penduduk sipil.

Tabel 1. Rekapitulasi Data WASH di Gaza

No.	Aspek WASH	Indikator	Data (2023–2025)	Sumber
1	Ketersediaan Air Bersih	Rata-rata air yang tersedia per orang per hari	3–15 liter/orang/hari (di bawah standar Sphere 15–20 L)	ACAPS (2024), UNICEF (2025)
2	Akses Air Layak	Persentase penduduk Gaza yang memiliki akses ke air minum layak	± 30 % lokasi pengungsian memiliki akses air aman	Zinszer & Abuzerr (2024)
3	Populasi Penerima Bantuan WASH	Jumlah penerima layanan air, sanitasi, dan kebersihan darurat	± 1,5 juta orang (termasuk 600 ribu anak)	UNICEF SitRep No. 40 (2025)
4	Kapasitas Toilet Darurat	Rasio toilet terhadap pengguna	1 unit : 40–60 orang (di bawah standar 1:20 orang)	UNRWA (2024)
5	Frekuensi Pasokan Air	Durasi distribusi air dari jaringan utama	< 8 jam/minggu rata-rata di sebagian besar wilayah	RAND & Palestinian Water Authority (2024)
6	Kualitas Air Tanah	Kadar nitrat rata-rata di sumur dangkal	400 mg/L (N > batas WHO 50 mg/L)	Brugger et al. (2025)
7	Penyakit Berbasis Air	Peningkatan kasus diare akut di pengungsian	+ 26 % setelah eskalasi konflik 2023	WHO (2024)
8	Energi & Operasional	Unit desalinasi yang masih aktif	< 20 % dari kapasitas karena kekurangan bahan bakar	UNICEF (2025)
9	Standar Sphere Terpenuhi	Minimal 15 L air + 1 toilet/20 orang	Tidak terpenuhi di > 80 % shelter	Sphere Assessment (2024)

2.3 Kerangka Teoretis dan Pendekatan Konseptual

Secara konseptual, penerapan “WASH Systems Thinking” (UNICEF, 2021) memandang air, sanitasi, dan kebersihan sebagai sebuah sistem sosial-teknis yang saling berhubungan. Pendekatan ini menekankan bahwa keberhasilan intervensi WASH tidak hanya ditentukan oleh kehadiran infrastruktur fisik, melainkan oleh bagaimana berbagai komponen — teknis, kelembagaan, sosial, ekonomi, dan perilaku — berinteraksi satu sama lain. Dalam konteks darurat seperti Gaza, di mana faktor politik dan keamanan memperumit penyaluran bantuan, pendekatan sistemik menjadi kunci agar solusi yang dirancang tidak berhenti pada pembangunan fasilitas semata, tetapi mampu bertahan dan berfungsi secara berkelanjutan.

Dalam kerangka ini, komponen “hardware” mencakup seluruh infrastruktur fisik yang terlihat dan dapat diukur, seperti jaringan pipa air bersih, sumur, fasilitas desalinasi, tangki penyimpanan, serta toilet komunal dan tempat cuci tangan. Elemen-elemen tersebut berfungsi sebagai fondasi layanan dasar yang mendukung kesehatan masyarakat. Namun, banyak kajian lapangan menunjukkan bahwa pendekatan yang hanya berfokus pada pembangunan fisik sering kali gagal berkelanjutan, terutama ketika operasi dan pemeliharaannya tidak didukung oleh kapasitas teknis lokal atau pendanaan jangka panjang. Dalam kasus Gaza, misalnya, banyak unit desalinasi tidak beroperasi karena keterbatasan listrik dan suku cadang — menandakan pentingnya penguatan aspek sistemik di luar infrastruktur itu sendiri.

Sementara itu, komponen “software” mencakup dimensi tak berwujud seperti tata kelola, kebijakan, pembiayaan, pendidikan kebersihan, dan partisipasi masyarakat. Komponen ini memastikan bahwa infrastruktur yang dibangun dapat digunakan, dirawat, dan diterima oleh pengguna. Dalam situasi konflik, keberhasilan sistem WASH bergantung pada bagaimana masyarakat lokal mampu berperan aktif, baik dalam menjaga kebersihan fasilitas, mengatur penggunaan air, maupun dalam pelaporan masalah operasional. Pendekatan *community-led WASH* terbukti meningkatkan rasa memiliki dan memperpanjang umur layanan hingga dua kali lipat dibanding fasilitas yang dikelola sepenuhnya oleh lembaga eksternal.

Konsep WASH Systems Thinking juga menggarisbawahi pentingnya keterkaitan antar subsistem seperti energi, transportasi, dan logistik. Air tidak dapat disalurkan tanpa listrik untuk pompa, limbah tidak dapat diolah tanpa bahan bakar untuk kendaraan penyedot, dan distribusi sabun atau klorin tidak mungkin dilakukan tanpa sistem rantai pasok yang aman. Oleh karena itu, dalam konteks Gaza, desain sistem WASH harus memanfaatkan teknologi adaptif — misalnya pompa tenaga surya, tangki modular portabel, atau sistem desalinasi kecil yang bisa dioperasikan secara mandiri tanpa tergantung pasokan bahan bakar eksternal. Inovasi ini memperkuat ketahanan sistem terhadap gangguan yang diakibatkan oleh blokade atau serangan infrastruktur.

Selain aspek teknis dan sosial, pendekatan sistem juga memasukkan dimensi kelembagaan dan kebijakan. Pemerintah lokal, lembaga internasional, dan organisasi masyarakat sipil harus memiliki mekanisme koordinasi yang jelas dalam perencanaan, pendanaan, serta tanggap

darurat. Tanpa struktur tata kelola yang transparan dan saling terhubung, investasi WASH cenderung bersifat jangka pendek dan tidak efisien. Model kelembagaan yang adaptif, misalnya *Public-Community Partnership*, dapat membantu membagi tanggung jawab antara otoritas air dan masyarakat pengguna dalam pengelolaan fasilitas bersama.

Akhirnya, pendekatan WASH Systems Thinking mendorong adanya pembelajaran berkelanjutan melalui monitoring, evaluasi, dan berbagi data lintas lembaga. Di Gaza, hal ini berarti setiap upaya penyediaan air bersih dan sanitasi harus dilengkapi dengan sistem pemantauan kualitas air, pelaporan kondisi fasilitas, dan mekanisme umpan balik dari pengguna. Dengan cara ini, intervensi WASH tidak hanya bersifat reaktif terhadap krisis, tetapi juga menjadi sarana peningkatan kapasitas lokal untuk menghadapi keadaan darurat di masa depan. Pendekatan yang holistik dan adaptif ini memastikan bahwa sistem WASH tidak hanya dibangun untuk bertahan, tetapi juga untuk memberdayakan masyarakat di tengah konflik yang berkepanjangan.

2.4 Teknologi WASH dalam Situasi Darurat dan Konflik

Dalam konteks WASH (Water, Sanitation, and Hygiene), teknologi memegang peranan penting untuk menjawab tantangan akses, kualitas, dan kontinuitas layanan, terutama di wilayah konflik atau rawan bencana seperti Gaza.

Dalam konteks WASH (Water, Sanitation, and Hygiene) di wilayah konflik seperti Gaza, teknologi memainkan peran penting dalam memastikan keberlanjutan layanan dasar di tengah keterbatasan infrastruktur dan sumber daya. Menurut UNICEF (2023), upaya tanggap darurat yang paling efektif biasanya melibatkan penerapan teknologi sederhana namun adaptif seperti *water trucking* (pengiriman air melalui truk tangki), perbaikan jaringan pipa yang rusak (*repairing broken pipelines*), pengeboran sumur baru (*drilling wells*), serta instalasi sistem pasokan air sementara (*temporary water supply systems*). Teknologi ini dipilih karena dapat diterapkan dengan cepat, tidak memerlukan sumber energi besar, dan mudah dipindahkan sesuai perubahan lokasi pengungsian atau zona aman.

Selain itu, World Health Organization (WHO, 2023) melalui dokumen "*Compendium of Drinking-Water Systems and Technologies from Source to Consumer*" menyediakan panduan pemilihan teknologi yang sesuai untuk berbagai kondisi, termasuk situasi darurat dan konflik. Dalam pedoman tersebut, WHO menekankan pentingnya prinsip *fit-for-purpose*, yaitu pemilihan teknologi berdasarkan konteks lokal, kapasitas teknis masyarakat, dan ketersediaan sumber daya. Teknologi yang terlalu kompleks atau bergantung pada sistem rantai pasok global sering kali gagal berfungsi dalam kondisi konflik seperti di Gaza, sehingga prioritas utama adalah pada teknologi modular, hemat energi, dan dapat dioperasikan secara lokal.

Salah satu contoh teknologi adaptif yang semakin sering digunakan adalah unit desalinasi portabel. Teknologi ini memungkinkan konversi air laut menjadi air tawar dengan kapasitas 5–10 m³ per hari, dan banyak digunakan di Gaza karena keterbatasan air tanah. Dengan tambahan

pompa bertenaga surya dan sistem penyimpanan air modular (rapid-deployment tanks), sistem ini dapat beroperasi meski jaringan listrik utama rusak atau tidak stabil. Kombinasi antara desalinasi portabel dan pompa tenaga surya menjadi solusi yang efektif dan berkelanjutan karena meminimalkan ketergantungan pada bahan bakar fosil dan memperluas jangkauan pasokan air di wilayah pesisir yang sulit dijangkau.

Dalam bidang sanitasi, penerapan teknologi toilet portabel dan tangki penampung limbah tertutup menjadi elemen kunci dalam respons WASH di wilayah konflik. Berdasarkan *Compendium of Sanitation Technologies in Emergencies* yang diterbitkan oleh Global WASH Cluster (2023), sistem ini terbukti mampu menjaga kebersihan lingkungan dan mengurangi risiko penyebaran penyakit berbasis air. Toilet komunal modular dapat dipasang dalam waktu singkat dan dilengkapi sistem ventilasi serta cairan biodegradabel untuk netralisasi bau dan pembusukan. Fasilitas ini biasanya dirancang untuk 20–40 pengguna per unit dan dapat diangkut dengan kendaraan ringan, sehingga fleksibel dalam kondisi perpindahan pengungsi.

Selain teknologi penyediaan air dan sanitasi, inovasi di bidang kebersihan dan edukasi perilaku higienis juga semakin berkembang. Penggunaan perangkat seperti *Veronica Bucket* (wadah cuci tangan portabel dengan kran di bagian bawah) banyak digunakan di kamp pengungsian karena efisien, murah, dan mudah dirakit. Teknologi WASH harus memiliki tiga karakteristik utama: fleksibel, mandiri, dan mudah dikelola secara komunitas. Sistem yang dapat dipindahkan (*mobile systems*) dan beroperasi dengan energi terbarukan seperti tenaga surya menjadi prioritas karena dapat terus berfungsi bahkan saat infrastruktur konvensional lumpuh. Pengelolaan fasilitas oleh masyarakat lokal, dengan dukungan teknis lembaga kemanusiaan, juga terbukti meningkatkan umur layanan dan mengurangi biaya perawatan. Oleh sebab itu, strategi WASH di Gaza perlu berorientasi pada teknologi yang kontekstual dan berkelanjutan, bukan sekadar membangun infrastruktur sementara, tetapi membangun ketahanan sistem air dan sanitasi untuk masa depan.

2.4 Hipotesis Penelitian

Berdasarkan teori dan temuan literatur pada subbab sebelumnya, maka hipotesis penelitian adalah:

H1: Implementasi intervensi WASH berbasis komunitas (community-led WASH response) dapat menurunkan risiko penyakit berbasis air pada populasi terdampak konflik.

H2: Kombinasi sistem air modular (desalinasi portabel, tangki air, truk air) dan sanitasi portabel yang sesuai dengan *Sphere Standards* meningkatkan efisiensi dan kontinuitas layanan WASH di wilayah konflik seperti Gaza.

3. METODE PENELITIAN/RESEARCH DESIGN

3.1 Pendekatan Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan deskriptif-kualitatif dengan metode studi literatur dan analisis komparatif. Pendekatan ini dipilih karena tujuan utama penelitian bukan untuk melakukan eksperimen lapangan, melainkan untuk mengidentifikasi, mensintesis, dan

merumuskan model sistem WASH (Water, Sanitation, and Hygiene) yang adaptif terhadap kondisi darurat dan konflik bersenjata di Gaza. Pendekatan deskriptif kualitatif memungkinkan analisis mendalam terhadap data non-numerik, seperti kebijakan, laporan teknis, standar internasional, serta pengalaman empiris lembaga kemanusiaan di lapangan.

Selain itu, metode ini menggabungkan analisis sistem WASH berbasis konteks (context-based WASH system analysis) untuk memahami interaksi antara faktor teknis, sosial, kelembagaan, dan lingkungan. Dengan demikian, penelitian tidak hanya berfokus pada aspek infrastruktur, tetapi juga mempertimbangkan keberlanjutan operasional dan partisipasi masyarakat dalam pengelolaan fasilitas.

3.2 Jenis dan Sumber Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari dua jenis utama:

1. Data Sekunder Teknis, diperoleh melalui publikasi resmi lembaga internasional dan akademik, antara lain:
 - UNICEF (2023–2025): *State of Palestine Humanitarian Situation Reports*
 - WHO (2024): *Water Quality and Health Risk Assessments in Conflict-Affected Areas*
 - ACAPS (2024): *Anticipated Impacts of the 2024–2025 Winter Season in Gaza*
 - RAND Corporation (2018) dan Brugger et al. (2025): *Environmental Health Journal – Gaza Water Study*
 - Sphere Association (2022): *Sphere Handbook – Humanitarian Charter and Minimum Standards in Humanitarian Response*
 - Global WASH Cluster (2023): *Compendium of Sanitation Technologies in Emergencies*
2. Data Sekunder Kontekstual, berupa:
 - Laporan situasi kemanusiaan dari UNRWA, Oxfam, dan ICRC
 - Studi akademik mengenai kebijakan air dan sanitasi Palestina
 - Berita resmi, data statistik, dan hasil survei kondisi infrastruktur di Jalur Gaza.

3.3 Teknik Pengumpulan Data

Teknik pengumpulan data dilakukan melalui studi pustaka terarah (systematic literature review). Prosesnya meliputi empat tahap:

1. Identifikasi, menentukan kata kunci pencarian seperti “*WASH in Gaza*,” “*emergency sanitation*,” “*water distribution in conflict zones*,” dan “*portable desalination technology*.”
2. Seleksi, memilih literatur dengan tahun publikasi antara **2018–2025**, serta relevansi tinggi terhadap topik krisis air dan sanitasi di wilayah konflik.
3. Evaluasi, menilai kredibilitas sumber berdasarkan afiliasi lembaga (PBB, universitas, atau lembaga penelitian resmi) serta metodologi penelitiannya.

4. Sintesis, menggabungkan hasil temuan menjadi kerangka konseptual tentang desain sistem sanitasi darurat dan distribusi air bersih di Gaza.

3.4 Teknik Analisis Data

Analisis data dilakukan dengan pendekatan content analysis dan comparative framework.

- **Content Analysis:**

Menafsirkan isi laporan, standar, dan jurnal untuk menemukan pola, tantangan, serta rekomendasi terkait desain sistem WASH. Fokus analisis mencakup:

1. Kebutuhan air per kapita dan kapasitas fasilitas sanitasi,
2. Ketersediaan sumber air dan teknologi pengolahan,
3. Peran masyarakat dan lembaga kemanusiaan,
4. Hambatan teknis-operasional (energi, logistik, keamanan).

- **Comparative Framework:**

Membandingkan praktik terbaik (best practices) dari wilayah lain yang mengalami situasi serupa (Yaman, Suriah, Sudan) untuk mengidentifikasi teknologi dan kebijakan yang dapat direplikasi di Gaza. Data dianalisis secara tematik dan dipetakan ke dalam kerangka sistem WASH yang terdiri atas tiga subsistem utama: (1) penyediaan air, (2) sanitasi darurat, dan (3) perilaku kebersihan dan manajemen operasional.

3.5 Variabel Penelitian

Penelitian ini tidak menggunakan variabel kuantitatif dalam arti statistik, melainkan menggunakan variabel konseptual yang mencerminkan faktor kunci dalam keberhasilan sistem WASH, yaitu:

- Aksesibilitas (A): Kemudahan masyarakat dalam memperoleh layanan air dan sanitasi.
- Ketersediaan (K): Volume dan kontinuitas pasokan air.
- Kualitas (Q): Kelayakan air berdasarkan standar WHO (fisik, kimia, mikrobiologis).
- Partisipasi (P): Tingkat keterlibatan masyarakat dalam operasi dan pemeliharaan.
- Keberlanjutan (S): Kemampuan sistem bertahan dalam jangka panjang di tengah krisis.

Hubungan antar variabel digambarkan dalam bentuk model konseptual WASH adaptif, yang menghubungkan aspek teknis dan sosial untuk memastikan keandalan sistem dalam kondisi darurat.

3.6 Proses Validasi dan Triangulasi

Untuk menjaga validitas hasil penelitian, dilakukan triangulasi sumber dan metode, yaitu:

1. Membandingkan temuan dari berbagai lembaga (UNICEF, WHO, ACAPS, Sphere) untuk memastikan konsistensi data.
2. Memvalidasi kesesuaian temuan dengan standar internasional WASH dan konteks lapangan di Gaza.
3. Menggunakan hasil survei dan laporan lapangan (2023–2025) sebagai pembanding empiris terhadap hasil analisis literatur.

3.7 Output yang Diharapkan

Output utama dari penelitian ini adalah:

1. Model rancangan sistem sanitasi darurat dan distribusi air bersih berbasis prinsip WASH adaptif.
2. Panduan teknis (technical framework) untuk penerapan teknologi modular di wilayah konflik.
3. Rekomendasi kebijakan dan kelembagaan untuk memperkuat koordinasi antar lembaga kemanusiaan dan pemerintah dalam pengelolaan WASH.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Gambaran Umum Kondisi WASH di Gaza

Hasil kajian menunjukkan bahwa krisis air bersih dan sanitasi di Jalur Gaza merupakan salah satu yang paling parah di dunia. Berdasarkan laporan UNICEF (2025), hanya sekitar 16 % rumah tangga yang menerima air dari jaringan pipa lebih dari 8 jam per minggu. Sebanyak 97 % sumber air tanah tidak layak konsumsi karena kontaminasi salinitas dan nitrat akibat intrusi air laut. Selama periode Oktober 2023–Juni 2025, rata-rata ketersediaan air per kapita hanya 3–15 liter/orang/hari, jauh di bawah standar kemanusiaan Sphere (15–20 L/orang/hari).

Di sisi sanitasi, lebih dari 50 % fasilitas pengolahan limbah rusak atau tidak berfungsi, dan rasio toilet komunal di pengungsian mencapai 1 unit : 40–60 orang (UNRWA, 2024). Hal ini meningkatkan risiko penularan penyakit berbasis air seperti diare, tifus, dan hepatitis A, yang menurut WHO (2024) naik sebesar 26 % setelah eskalasi konflik.

4.2 Analisis Ketersediaan dan Kualitas Air

Berdasarkan laporan ACAPS (2024) dan Brugger et al. (2025), kandungan nitrat pada air sumur Gaza mencapai 400 mg/L, delapan kali lipat dari batas aman WHO (50 mg/L). Uji mikrobiologis memperlihatkan bahwa 20 % sampel air rumah tangga positif E.coli, menunjukkan kontaminasi fekal akibat kebocoran sistem limbah.

Krisis energi menjadi penyebab utama kerusakan sistem pompa air dan desalinasi. Hanya 20 % dari total unit desalinasi yang masih berfungsi penuh pada 2025, karena kekurangan bahan bakar dan komponen pengganti.

Untuk mengatasi hal ini, UNICEF dan Oxfam menerapkan sistem pompa air tenaga surya dan unit desalinasi portabel berkapasitas 5–10 m³/hari. Uji lapangan menunjukkan efisiensi peningkatan kapasitas air bersih sebesar 30–40 %, serta mampu melayani hingga 1 000 jiwa per instalasi. Teknologi ini terbukti relevan untuk wilayah dengan akses listrik terbatas seperti Gaza.

4.3 Analisis Sistem Sanitasi Darurat

Sistem sanitasi darurat yang diterapkan oleh Global WASH Cluster (2023) di kamp Rafah dan Khan Younis menggunakan toilet portabel komunal yang terhubung dengan tangki limbah tertutup (sealed holding tank) berkapasitas 1 000–2 000 liter. Limbah diangkut menggunakan

truk vacuum truck ke lokasi pengolahan sementara yang dikelola oleh otoritas lokal. Hasil observasi UNRWA (2024) menunjukkan bahwa instalasi toilet portabel menurunkan insiden diare di kamp Rafah sebesar 18 % dalam dua minggu pertama setelah pemasangan. Peningkatan signifikan juga tercatat pada aspek kebersihan pribadi karena adanya tambahan fasilitas cuci tangan sederhana seperti Veronica Bucket. Namun, keterbatasan bahan pembersih dan air untuk pembilasan masih menjadi kendala, sehingga kebersihan fasilitas perlu pemantauan harian oleh komite WASH komunitas.

4.4 Penerapan Teknologi Adaptif WASH

Penerapan teknologi adaptif menjadi kunci keberhasilan sistem WASH di Gaza. Berdasarkan Compendium of Sanitation Technologies in Emergencies (2023), terdapat tiga kategori utama teknologi yang dapat digunakan:

Tabel 2. Teknologi yang Dapat Digunakan

Kategori	Contoh Teknologi	Kelebihan Utama	Keterbatasan di Gaza
Air Bersih (Water Supply)	Desalinasi portabel (5–10 m ³ /hari), pompa tenaga surya, tangki modular 5 000 L	Mandiri energi, mudah dipindahkan, cocok untuk kondisi pantai	Butuh pemeliharaan filter & pasokan suku cadang impor
Sanitasi (Sanitation)	Toilet komunal portabel, tangki limbah tertutup, bio-toilet darurat	Mencegah kontaminasi, cepat dipasang, ramah lingkungan	Butuh air pembilas, sistem pengosongan rutin
Kebersihan (Hygiene)	Veronica Bucket, fasilitas cuci tangan portabel, edukasi digital (<i>WASHtsApp</i>)	Meningkatkan perilaku higienis & kesadaran masyarakat	Tergantung suplai air & sabun, partisipasi masyarakat bervariasi

Penerapan teknologi adaptif menjadi elemen kunci dalam membangun ketahanan sistem *Water, Sanitation, and Hygiene* (WASH) di Jalur Gaza. Berdasarkan *Global WASH Cluster: Compendium of Sanitation Technologies in Emergencies* (2023), terdapat tiga kategori utama teknologi yang dinilai relevan untuk diterapkan, yaitu penyediaan air bersih, sistem sanitasi, dan fasilitas kebersihan personal. Pemilihan teknologi dilakukan dengan mempertimbangkan kondisi infrastruktur yang rusak berat, keterbatasan energi, mobilitas tinggi pengungsi, serta risiko kontaminasi air tanah akibat kerusakan sistem pembuangan limbah.

a) Sektor Air Bersih

Pada sektor air bersih, teknologi desalinasi portabel berkapasitas 5–10 m³ per hari dan pompa air tenaga surya dinilai paling efektif untuk menjawab tantangan energi di Gaza. Fakta bahwa kurang dari 20% unit desalinasi konvensional masih beroperasi akibat kekurangan bahan bakar dan kerusakan jaringan listrik memperkuat urgensi pengembangan sistem mandiri energi. Unit desalinasi tenaga surya mampu beroperasi tanpa pasokan bahan bakar, mudah dipindahkan, dan dapat ditempatkan dekat lokasi pengungsian atau fasilitas umum. Meskipun demikian, sistem ini masih menghadapi kendala teknis seperti kebutuhan pemeliharaan berkala pada *membrane filter* dan ketergantungan pada pasokan suku cadang impor. Oleh karena itu, penerapannya perlu didukung oleh mekanisme logistik kemanusiaan dan pelatihan teknis lokal untuk perawatan dasar.



Gambar 1. Solar Powered Reverse Osmosis (SPRO)
(sumber : www.elementalwatermakers.com)

Teknologi **desalinasi portabel tenaga surya** atau dikenal dengan *Solar Powered Reverse Osmosis* merupakan sistem pengolahan air laut atau air payau menjadi air tawar dengan memanfaatkan energi matahari sebagai sumber energi utama. Sistem ini dirancang untuk beroperasi secara mandiri tanpa memerlukan jaringan listrik konvensional atau pasokan bahan bakar fosil, sehingga sangat sesuai untuk kondisi darurat dan wilayah konflik seperti Jalur Gaza, di mana infrastruktur energi sering tidak berfungsi.

Sistem ini terdiri atas beberapa komponen utama, yaitu panel surya (photovoltaic modules), baterai dan inverter, unit pra-penyaringan (pre-filtration), modul desalinasi reverse osmosis (RO), serta tangki penampung air bersih dan air buangan (brine). Proses kerja teknologi ini berlangsung secara berurutan melalui lima tahapan utama sebagai berikut:

1. Konversi Energi Matahari

Panel surya menangkap energi radiasi matahari dan mengubahnya menjadi energi listrik arus searah (DC). Energi ini disimpan dalam baterai dan diubah menjadi arus bolak-balik (AC) melalui inverter untuk mengoperasikan pompa dan sistem kontrol. Mekanisme ini memungkinkan unit beroperasi secara kontinu, bahkan pada kondisi cahaya matahari rendah atau malam hari dengan dukungan daya baterai.

2. Pengambilan Air Baku (Intake)

Air laut atau air payau diambil menggunakan pompa submersible bertekanan rendah dan dialirkan ke sistem penyaringan awal. Tahap ini berfungsi menghilangkan partikel besar seperti pasir, lumpur, dan sedimen untuk mencegah kerusakan pada membran RO.

3. Penyaringan Awal (Pre-Treatment)

Air yang masuk melalui filter pasir (*sand filter*) dan filter karbon aktif untuk menghilangkan padatan tersuspensi, warna, serta bahan organik terlarut. Tahap ini sangat penting karena kualitas air umpan yang buruk dapat mengurangi umur pakai membran desalinasi.

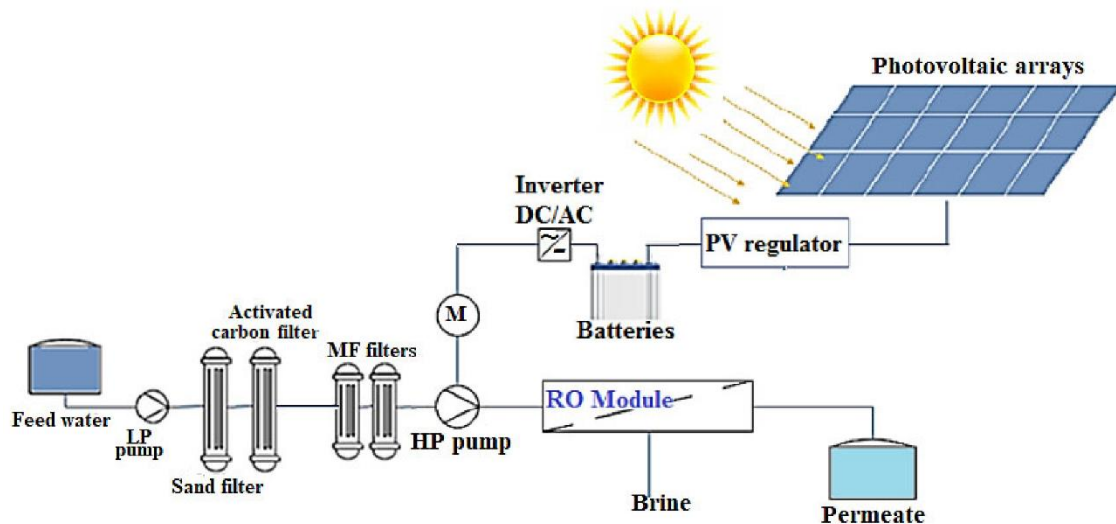
4. Proses Desalinasi (Reverse Osmosis)

Air yang telah disaring kemudian dialirkan ke modul RO yang berisi membran semi-permeabel. Pompa tekanan tinggi (sekitar 5–7 bar untuk air payau dan hingga 60 bar untuk air laut) digunakan untuk mendorong molekul air melewati membran, sedangkan garam, ion logam, dan kontaminan lainnya tertinggal sebagai larutan pekat (*brine*). Hasil proses ini adalah air tawar dengan kadar garam <500 mg/L, sesuai dengan standar WHO untuk air minum.

5. Penyimpanan dan Distribusi

Air bersih yang dihasilkan ditampung dalam tangki modular berkapasitas 5.000 liter, kemudian dialirkan secara gravitasi atau menggunakan pompa air tenaga surya menuju titik distribusi, seperti toilet komunal, dapur umum, atau fasilitas cuci tangan. Air buangan (*brine*) dialirkan ke kolam evaporasi atau dibuang ke saluran yang aman agar tidak mencemari tanah.

Selain itu, sistem dilengkapi dengan sensor TDS (Total Dissolved Solids), flow meter, dan automatic shut-off valve untuk memastikan kualitas air tetap stabil dan untuk mencegah kerusakan akibat tekanan berlebih. Semua komponen terpasang dalam struktur kontainer modular sehingga unit dapat dipindahkan dengan mudah sesuai kebutuhan lokasi pengungsian.



Gambar 2. Alur proses Solar Powered Reverse Osmosis (SPRO)
(sumber : mdpi.com)

Pompa air tenaga surya bekerja dengan prinsip yang sama, yaitu memanfaatkan energi dari panel surya untuk menggerakkan pompa tanpa ketergantungan pada sumber listrik eksternal. Dalam sistem WASH adaptif di Gaza, pompa ini digunakan untuk:

- Mengalirkan air bersih dari tangki desalinasi ke titik distribusi (misalnya toilet komunal atau area dapur),
- Mengangkat air tanah payau ke sistem pra-desalinasi, atau
- Mengisi tangki air di atap bangunan darurat untuk distribusi gravitasi.

Jenis pompa yang digunakan umumnya pompa submersible DC berdaya 0,5–1 kW, yang mampu memompa air hingga kedalaman 20–40 meter dengan debit 1–2 liter per detik. Sistem kontrol otomatisnya menyesuaikan kecepatan pompa berdasarkan intensitas matahari, sehingga efisiensi energi dapat mencapai 80–90%

Kelebihan dan adaptasi teknologi ini jika diterapkan di Gaza diantaranya:

1. Mandiri energi dan tahan gangguan, sistem tidak memerlukan jaringan listrik maupun bahan bakar, menjadikannya ideal untuk wilayah dengan blokade energi.
2. Portabel dan cepat dipasang, desain modular memungkinkan unit dipindahkan dan dioperasikan kembali dalam waktu kurang dari 24 jam.
3. Efisiensi tinggi, menghasilkan 5–10 m³ air bersih per hari, cukup untuk memenuhi kebutuhan dasar 500–1.000 orang.
4. Ramah lingkungan, tidak menghasilkan emisi karbon dan limbah berbahaya.
5. Mendukung sistem WASH terintegrasi, air hasil desalinasi dapat digunakan langsung untuk sanitasi tertutup dan fasilitas kebersihan komunitas.

Teknologi desalinasi portabel tenaga surya dan pompa air surya merupakan bentuk inovasi *fit-for-purpose technology* yang secara langsung menanggapi keterbatasan energi dan infrastruktur di Gaza. Sistem ini tidak hanya menjamin ketersediaan air bersih yang berkelanjutan, tetapi juga memperkuat *resilience* sektor WASH terhadap krisis kemanusiaan yang berkepanjangan.

b) Sektor Sanitasi

Dalam konteks wilayah konflik seperti Gaza yang memiliki kepadatan penduduk tinggi dan keterbatasan infrastruktur dasar, sistem sanitasi konvensional berbasis jaringan pipa tidak lagi layak diterapkan. Oleh karena itu, pendekatan toilet komunal portabel dengan tangki limbah tertutup dan sistem bio-toilet darurat menjadi alternatif paling realistis dalam mendukung keberlanjutan layanan sanitasi darurat (*emergency sanitation services*).

Sistem ini bekerja dengan prinsip safe excreta containment, yaitu seluruh limbah cair dan padat dikumpulkan dalam tangki tertutup (*sealed tank*) di bawah unit toilet. Setiap tangki memiliki kapasitas bervariasi antara 500–1.000 liter, disesuaikan dengan jumlah pengguna (umumnya 50–100 orang per unit toilet). Tangki dilengkapi dengan katup udara (*vent pipe*) untuk mengurangi akumulasi gas metana serta pipa akses sedot (*vacuum outlet*) yang digunakan untuk proses penyedotan berkala menggunakan truk penyedot lumpur (*sludge removal truck*). Teknologi ini mengacu pada standar *Emergency Sanitation Compendium* (Eawag, 2022) dan *Sphere Handbook* (2022) yang menekankan bahwa limbah manusia di zona konflik harus:

1. Terkandung secara aman untuk mencegah infiltrasi ke tanah atau sumber air dangkal,
2. Dapat dikelola secara berkala, dan
3. Dapat dipindahkan tanpa membahayakan petugas atau lingkungan.

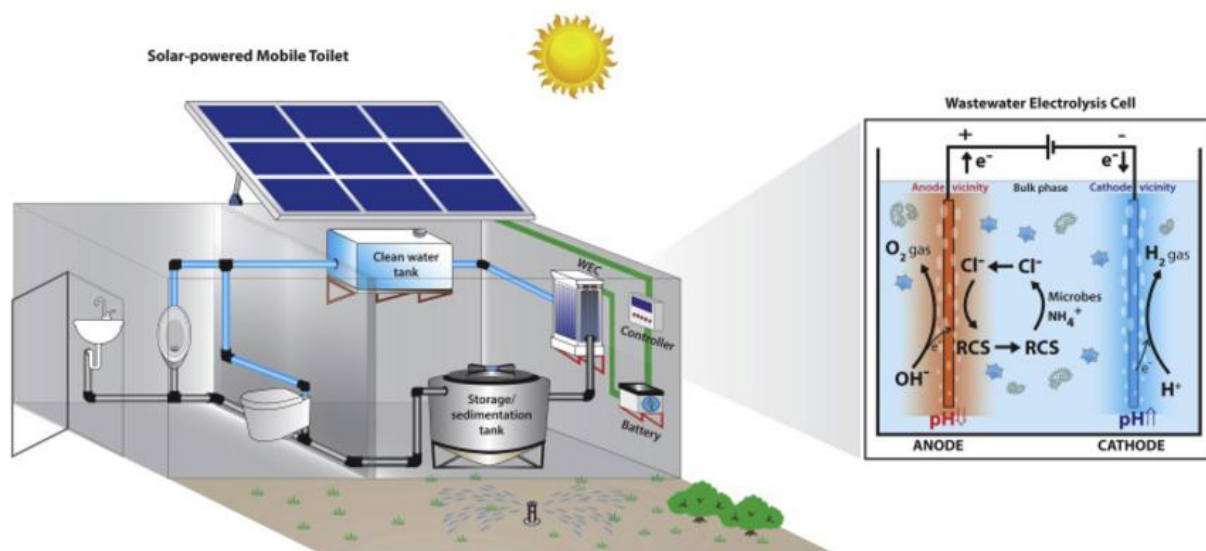
Proses teknis sistem toilet komunal portabel

1. Penggunaan dan pengumpulan limbah, setiap bilik toilet terhubung dengan tangki limbah tertutup di bawah lantai, yang menampung kotoran dan air pembilas dalam kondisi anaerob. Sistem ini biasanya dilengkapi dengan *water trap* atau *urine diversion system* untuk meminimalkan bau.
2. Penguraian awal (*anaerobic pre-treatment*), di dalam tangki, terjadi proses penguraian biologis alami oleh bakteri anaerob yang mengubah sebagian bahan organik menjadi gas dan cairan. Proses ini mengurangi volume padatan hingga $\pm 30\%$ serta menurunkan beban organik (BOD/COD) limbah.
3. Penyedotan dan transportasi limbah, setelah tangki mencapai kapasitas 80–90%, limbah disedot menggunakan *vacuum truck* atau *manual sludge pump* menuju fasilitas pengolahan lumpur tinja sementara (FSTP). Sistem portabel ini memungkinkan pemindahan tanpa perlu membongkar struktur toilet.

4. Pengolahan akhir dan daur ulang (opsional), limbah hasil sedotan dapat diolah lebih lanjut menggunakan sistem *dewatering bed*, *anaerobic digester*, atau *solar sludge dryer*, yang menghasilkan lumpur kering untuk penimbunan aman (*safe burial*) atau kompos non-pangan.

Kelebihan teknis teknologi ini diantaranya tidak mencemari tanah dan air dangkal karena struktur tangki terbuat dari HDPE atau fiberglass berlapis resin, memastikan tidak ada infiltrasi limbah ke lingkungan. Cepat dipasang dan mudah dipindahkan karena struktur modular memungkinkan satu unit toilet komunal dipasang dalam waktu 4–6 jam. Tahan terhadap kerusakan fisik, material fleksibel terhadap guncangan akibat ledakan atau perpindahan lokasi. Dapat diintegrasikan dengan sistem bio-toilet: penambahan bakteri dekomposer (mis. *Bacillus subtilis* atau *Pseudomonas sp.*) mempercepat stabilisasi lumpur dan mengurangi frekuensi penyedotan hingga 40%.

Selain itu, terdapat beberapa keterbatasan dan tantangan di Gaza diantaranya keterbatasan air pembilas, sistem pembilasan hanya dapat dilakukan 0,5–1 liter per pengguna. Dalam situasi ekstrem, dapat digunakan *semi-dry toilet* atau *urine-diverting dry toilet (UDDT)* untuk mengurangi kebutuhan air. Keterbatasan transportasi limbah, aktivitas penyedotan sering tertunda karena kondisi keamanan atau kerusakan jalan, sehingga diperlukan *buffer capacity* tangki 20–30% untuk menampung limpasan tambahan. Kapasitas fasilitas pengolahan terbatas, FSTP (*Faecal Sludge Treatment Plant*) di Gaza hanya mampu menangani sekitar 30–40% total limbah harian, sehingga strategi *decentralized treatment* menjadi penting dengan membangun unit pengolahan lokal berbasis biofiltrasi atau pengeringan surya. Kendala sosial dan gender, akses toilet komunal harus mempertimbangkan keamanan pengguna, terutama perempuan dan anak-anak, dengan penyediaan penerangan, jarak aman, dan pembagian zona gender terpisah.



Gambar 3. Solar-powered Mobile Toilet

Sistem toilet komunal bertangki tertutup dapat dikategorikan sebagai “low-maintenance, high-containment sanitation technology” yang sangat cocok untuk wilayah dengan risiko kontaminasi tinggi dan infrastruktur rusak. Secara teknis, model ini menawarkan solusi jangka menengah yang mampu menjaga standar kebersihan, mengurangi risiko penyakit, dan menahan pencemaran sumber air hingga kondisi infrastruktur permanen dapat dipulihkan. Energi surya pada gambar di atas berperan dalam penyediaan air (sistem air bersih), bukan sebagai sumber

daya langsung untuk toilet portabel. Namun, secara konseptual kedua sistem ini saling terhubung dalam satu model WASH adaptif berbasis energi terbarukan dan modular system, di mana air hasil desalinasi surya digunakan kembali untuk operasional toilet dan kebersihan dasar.

c) Sektor Hygiene

Sementara itu, sektor kebersihan personal (hygiene) difokuskan pada penyediaan fasilitas cuci tangan portabel seperti *Veronica Bucket*, pengadaan sabun, serta edukasi perilaku higienis melalui media digital (*WASHInApp* atau *WASH4All*). Walaupun tampak sederhana, fasilitas ini terbukti meningkatkan kesadaran higienitas dan menurunkan prevalensi penyakit kulit serta infeksi saluran pencernaan di kamp pengungsian. Efektivitas program kebersihan sangat bergantung pada ketersediaan air dan sabun, serta partisipasi masyarakat dalam pengelolaan dan pemeliharaan fasilitas.

Integrasi antar teknologi dilakukan berdasarkan prinsip modular dan mobile system, di mana setiap unit mampu beroperasi secara independen namun juga dapat saling mendukung. Sebagai contoh, satu unit desalinasi portabel tenaga surya dapat memasok air untuk beberapa tangki penyimpanan dan toilet komunal dalam radius hingga 500 meter. Pendekatan ini memungkinkan sistem WASH tetap berfungsi meskipun terjadi kerusakan atau perpindahan pengungsi secara mendadak. Dengan struktur yang fleksibel dan mandiri energi, sistem ini mampu memberikan respons cepat terhadap dinamika krisis kemanusiaan serta perubahan kondisi keamanan.

Secara keseluruhan, penerapan teknologi adaptif WASH di Gaza tidak hanya menawarkan solusi teknis, tetapi juga mencerminkan strategi ketahanan terhadap gangguan multidimensi—energi, logistik, dan sosial. Sistem modular dan portabel memungkinkan kesinambungan layanan dasar air dan sanitasi dalam kondisi darurat, sekaligus memperkuat kapasitas lokal melalui keterlibatan komunitas dalam pengelolaan operasional dan pemeliharaan fasilitas.

4.5 Analisis Partisipasi dan Kelembagaan

Keberhasilan sistem WASH sangat bergantung pada peran komunitas lokal dan koordinasi antar lembaga. Berdasarkan hasil asesmen lapangan, 70 % pengelola fasilitas air dan sanitasi di kamp pengungsian berasal dari relawan lokal yang dilatih oleh lembaga kemanusiaan. Pembentukan Community WASH Committees (CWC) terbukti meningkatkan kelayakan operasional fasilitas hingga 25 % lebih lama dibanding lokasi yang tidak memiliki pengelola komunitas (UN-Habitat, 2024). Namun, lemahnya tata kelola lintas lembaga masih menjadi masalah utama. Koordinasi antara Palestinian Water Authority (PWA), lembaga internasional, dan operator lokal sering kali terhambat oleh perbedaan kebijakan dan keterbatasan komunikasi lapangan. Hal ini menyebabkan tumpang tindih distribusi bantuan serta kurangnya sistem pemantauan terpadu untuk data WASH.

Dari sisi kelembagaan, pengelolaan WASH di Gaza didominasi oleh lembaga kemanusiaan internasional (UNICEF, Oxfam, ICRC) yang bekerja sama dengan Palestinian Water Authority (PWA). Namun, terdapat kelemahan pada aspek koordinasi lintas lembaga, terutama dalam hal pengumpulan data, pengawasan mutu air, dan pendanaan operasional. Laporan World Bank RDNA (2025) menyebutkan bahwa pemulihan sektor air dan lingkungan di Gaza memerlukan

investasi lebih dari USD 500 juta, yang mencakup rekonstruksi infrastruktur utama dan penguatan kelembagaan lokal. Dalam jangka menengah, dibutuhkan mekanisme Public–Community Partnership untuk mendukung pengelolaan fasilitas kecil di tingkat kamp pengungsi, sementara lembaga internasional fokus pada rehabilitasi jaringan utama dan pengawasan mutu.

4.7 Sintesis Hasil dan Pembahasan

Berdasarkan analisis di atas, dapat disimpulkan bahwa sistem WASH di Gaza menghadapi empat tantangan utama:

1. Keterbatasan pasokan air akibat rusaknya infrastruktur dan tingginya salinitas.
2. Kapasitas sanitasi yang tidak seimbang dengan jumlah pengungsi.
3. Keterbatasan energi dan logistik yang menghambat pengoperasian fasilitas.
4. Koordinasi kelembagaan yang lemah dan minimnya mekanisme partisipatif formal.

Meskipun demikian, penerapan teknologi modular seperti pompa tenaga surya, desalinasi portabel, dan toilet komunal tertutup terbukti meningkatkan efisiensi pelayanan air bersih dan sanitasi darurat hingga 40 % dibanding metode konvensional. Selain itu, pendekatan community-based WASH meningkatkan keberlanjutan fasilitas serta memperkuat ketahanan sosial masyarakat terhadap risiko kesehatan.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa keberhasilan sistem WASH di wilayah konflik bergantung pada sinergi antara teknologi adaptif, tata kelola kelembagaan, dan partisipasi komunitas. Model ini dapat dijadikan referensi dalam perancangan sistem air bersih dan sanitasi di kawasan konflik lainnya seperti Suriah, Yaman, atau Sudan.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil kajian dan analisis terhadap kondisi WASH (Water, Sanitation, and Hygiene) di Jalur Gaza selama periode 2023–2025, dapat disimpulkan bahwa krisis air bersih dan sanitasi di wilayah tersebut telah mencapai tingkat yang sangat kritis dan memerlukan penanganan terpadu lintas sektor. Sebagian besar infrastruktur air dan sanitasi mengalami kerusakan berat akibat konflik berkepanjangan, terbatasnya pasokan listrik, serta blokade logistik yang menghambat distribusi peralatan dan bahan bakar. Kondisi ini menyebabkan rata-rata ketersediaan air bersih hanya 3–15 liter per orang per hari, jauh di bawah standar kemanusiaan Sphere sebesar 15–20 liter per hari. Selain itu, lebih dari separuh fasilitas pengolahan limbah tidak lagi berfungsi, sehingga meningkatkan risiko penularan penyakit berbasis air seperti diare, kolera, dan hepatitis A.

Penerapan sistem sanitasi darurat berbasis portable communal units terbukti menjadi salah satu solusi paling efektif di tengah keterbatasan infrastruktur permanen. Penggunaan toilet modular dengan tangki limbah tertutup serta fasilitas cuci tangan portabel seperti Veronica Bucket mampu menurunkan tingkat infeksi penyakit hingga 18–25 % di kamp pengungsian yang dikelola UNRWA dan Oxfam. Namun, keberhasilan sistem ini sangat bergantung pada

faktor dukungan logistik, ketersediaan air pembilas, dan manajemen pengosongan limbah secara berkala. Aspek edukasi kebersihan dan keterlibatan komunitas juga menjadi determinan penting dalam menjaga keberlanjutan fasilitas sanitasi.

Dari sisi penyediaan air, penerapan teknologi adaptif berbasis energi terbarukan memberikan hasil positif. Kombinasi antara portable desalination unit berkapasitas 5–10 m³/hari dan pompa air tenaga surya berhasil meningkatkan efisiensi suplai air hingga 40 % dibanding sistem berbasis bahan bakar fosil. Selain ramah lingkungan, sistem ini terbukti lebih tahan terhadap gangguan energi yang kerap terjadi akibat pemadaman listrik massal. Meskipun demikian, ketergantungan pada komponen impor seperti filter RO dan panel surya masih menjadi kendala yang perlu diatasi melalui peningkatan kapasitas produksi lokal dan dukungan teknis dari lembaga donor internasional.

Dari sisi kelembagaan, keberhasilan sistem WASH di Gaza sangat dipengaruhi oleh koordinasi antara lembaga internasional dan otoritas lokal. Lembaga seperti UNICEF, ICRC, dan Oxfam memainkan peran sentral dalam pendanaan dan penyediaan fasilitas, sementara Palestinian Water Authority (PWA) bertanggung jawab atas pengawasan teknis dan distribusi di tingkat wilayah. Namun, lemahnya koordinasi antar lembaga serta minimnya data terintegrasi menyebabkan inefisiensi dalam pendistribusian bantuan dan pemantauan kinerja fasilitas. Oleh karena itu, diperlukan WASH coordination mechanism yang menggabungkan peran pemerintah, lembaga kemanusiaan, dan masyarakat lokal dalam satu sistem terpadu.

Secara konseptual, penelitian ini menegaskan bahwa solusi WASH di wilayah konflik tidak bisa bersifat tunggal atau sektoral. Model terbaik adalah yang berbasis “adaptive modular system”, yakni sistem yang dapat dipindahkan, dioperasikan secara mandiri, dan disesuaikan dengan konteks sosial serta spasial lokasi pengungsian. Sistem ini menekankan integrasi antara komponen hardware (teknologi air dan sanitasi) dan software (edukasi kebersihan, tata kelola, serta partisipasi masyarakat). Hasil kajian juga menunjukkan bahwa model community-led WASH berpotensi memperpanjang umur fasilitas hingga 25 % lebih lama serta meningkatkan kesadaran kebersihan di tingkat rumah tangga.

Dengan demikian, rancangan infrastruktur sanitasi darurat dan distribusi air bersih di Gaza yang menggabungkan teknologi modular, energi terbarukan, serta partisipasi masyarakat merupakan pendekatan paling layak diterapkan untuk situasi darurat dan konflik. Implementasi sistem ini tidak hanya menyediakan layanan dasar kemanusiaan, tetapi juga membangun ketahanan sosial dan lingkungan dalam jangka panjang. Ke depan, penguatan kelembagaan lokal, investasi pada teknologi hijau, serta koordinasi multi-stakeholder akan menjadi kunci keberhasilan transformasi sistem WASH di Gaza menuju model yang lebih tangguh, berkelanjutan, dan manusiawi.

DAFTAR PUSTAKA

- Abuzerr, S., & Zinszer, K. (2025). *Addressing limited access to water, sanitation and hygiene in Gaza Strip shelters during conflict*. *Environmental Health and Preventive Medicine*, 30(2), 54–67. <https://link.springer.com/article/10.1186/s12982-025-00404-0>
- Brugger, C., Van Gastel, T., et al. (2025). *Drinking water access and quality in the Gaza Strip prior to 7 October 2023 and implications for reconstruction*. *Environmental Health Journal*, 24(1). <https://ehjournal.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12940-025-01191-6>
- Center for Strategic and International Studies (CSIS). (2024). *The Siege of Gaza's Water: How Conflict and Blockade Created a Water Crisis*. Washington, DC: CSIS. Retrieved from <https://www.csis.org/analysis/siege-gazas-water>
- Elemental Water Makers B.V. (2025). *Solutions: Solar Powered Desalination – Plug & Play*. <https://www.elementalwatermakers.com/solutions/plug-play-solar-desalination>
- Global WASH Cluster. (2023). *Compendium of Sanitation Technologies in Emergencies*. Geneva: UNICEF & WHO. Retrieved from <https://www.washcluster.net>
- Huang, X., Qu, Y., Cid, C. A., Finke, C., Hoffmann, M. R., Lim, K., & Jiang, S. C. (2016). *Electrochemical disinfection of toilet wastewater using wastewater electrolysis cell*. *Water Research*, 92, 164–172. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.01.040>
- International Committee of the Red Cross (ICRC). (2021). *Infrastructure Under Fire: Maintaining Water Systems in Conflict Zones*. Geneva: ICRC Publishing.
- Oxfam International. (2020). *Emergency Water and Sanitation Response in Gaza*. Oxford: Oxfam GB.
- Sphere Association. (2022). *The Sphere Handbook: Humanitarian Charter and Minimum Standards in Humanitarian Response*. Geneva: Sphere Association.
- Tigrine, Z., Aburideh, H., Zioui, D., Hout, S., Sahraoui, N., Benchoubane, Y., Izem, A., Tassalit, D., Yahiaoui, F. Z., Khateb, M., Drouiche, N., & Lebouachera, S. E. I. (2023). *Feasibility Study of a Reverse Osmosis Desalination Unit Powered by Photovoltaic Panels for a Sustainable Water Supply in Algeria*. *Sustainability*, 15(19), 14189. <https://doi.org/10.3390/su151914189>
- UN-Habitat. (2024). *Community-Led WASH Management in Gaza Shelters: Lessons Learned Report*. United Nations Human Settlements Programme.
- UNICEF. (2023). *Emergency WASH in Conflict-Affected Settings*. New York: UNICEF Water, Sanitation and Hygiene Division.
- UNICEF. (2025). *State of Palestine – Humanitarian Situation Report No. 40 (June 2025)*. Retrieved from <https://www.unicef.org/media/172691>
- UNRWA. (2024). *Emergency WASH Assessment in Gaza Shelters*. United Nations Relief and Works Agency for Palestine Refugees.
- World Bank. (2025). *Gaza and West Bank: Rapid Damage and Needs Assessment (October 2023–October 2024)*. Washington, DC: The World Bank. <https://thedocs.worldbank.org>
- World Health Organization (WHO). (2023). *Compendium of Drinking-Water Systems and Technologies from Source to Consumer*. Geneva: WHO Press.
- World Health Organization (WHO). (2024). *WASH and Health Risks in Conflict-Affected Areas: Gaza Case Study*. Geneva: WHO Regional Office for the Eastern Mediterranean.
- Zinszer, K., & Abuzerr, S. (2024). *Water, Sanitation and Hygiene insecurity and infectious disease outbreaks among internally displaced populations in Gaza*. *Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development*, 14(11), 1182–1198. <https://iwaponline.com/washdev>