

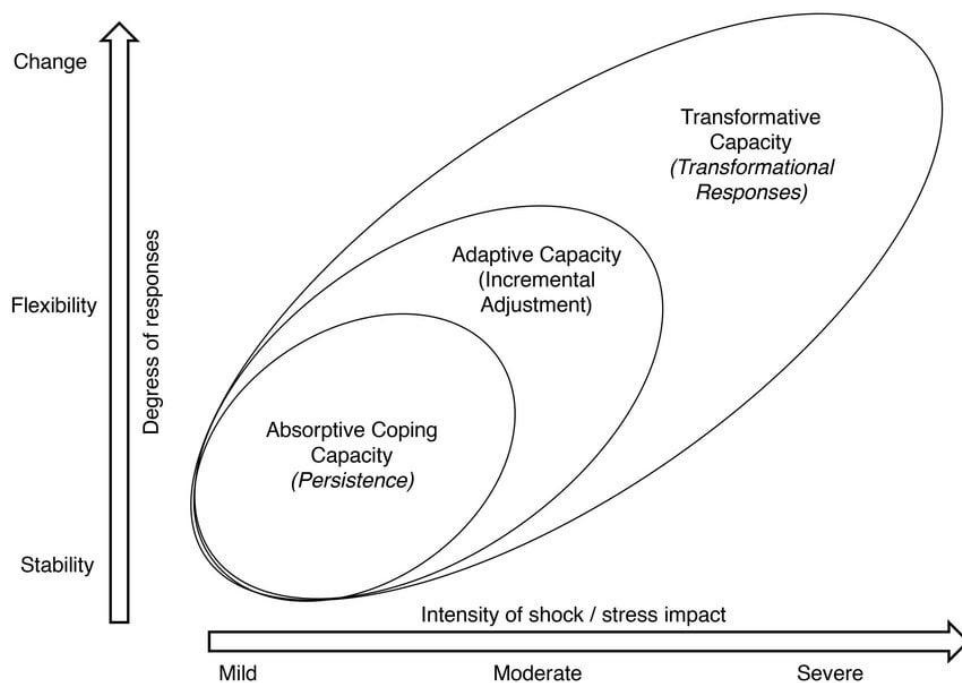
## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1. Konsep Resiliensi Air

##### 2.1.1. Definisi Resiliensi

Konsep resiliensi telah mengalami evolusi yang signifikan dalam literatur ilmiah, bergerak dari akar disiplin ekologi menuju penerapan yang luas dalam analisis sistem sosial-ekologi dan perencanaan infrastruktur. Secara historis, gagasan ini pertama kali diperkenalkan secara komprehensif dalam ilmu ekologi oleh Holling (1973), yang mendefinisikan resiliensi sebagai ukuran persistensi suatu sistem ekologis serta kemampuannya untuk menyerap perubahan dan gangguan eksternal sambil tetap mampu mempertahankan fungsi utamanya (Holling, 1973). Seiring dengan bertambahnya kompleksitas tantangan global, konsep ini diadopsi dan diperluas ke dalam sistem sosial dan lingkungan terbangun. Dalam konteks modern, resiliensi didefinisikan sebagai sebuah kapasitas komprehensif dari sebuah sistem, komunitas, atau infrastruktur untuk bertahan (*withstand*), beradaptasi (*adapt*), dan pulih (*recover*) dari berbagai bentuk gangguan atau guncangan eksternal (Simonovic & Peck, 2013).



Gambar 1. Diagram Konsep Tiga Dimensi Resiliensi

Sumber: Papworth, et al., 2022

Penerapan konsep resiliensi dalam sistem permukiman dan infrastruktur menekankan pada proses yang dinamis. Resiliensi bukan sekadar atribut statis, melainkan serangkaian kemampuan inheren dan adaptif yang merespons tekanan lingkungan secara efisien. Dalam literatur kebencanaan, resiliensi masyarakat dan infrastruktur dijabarkan sebagai kapasitas untuk menahan dampak bahaya melalui pertahanan fisik, mengakomodasi kondisi yang terus berubah, serta mempercepat waktu pemulihan menuju tingkat kinerja yang dapat diterima (Arup & The Rockefeller Foundation, 2015). Pemahaman ini mengindikasikan bahwa sistem yang tangguh harus dirancang dengan asumsi bahwa kegagalan akibat bencana ekstrem adalah sesuatu yang mungkin terjadi, sehingga fokus utama dialihkan pada bagaimana sistem tersebut dapat meminimalkan konsekuensi kegagalan dan melakukan reorganisasi secara cepat (Folke, 2006).

Dalam diskursus akademik, sangat penting untuk membedakan resiliensi dari konsep-konsep yang berdekatan seperti stabilitas, resistensi, dan keberlanjutan ( *sustainability* ). Stabilitas dan resistensi sering kali merujuk pada kemampuan suatu sistem untuk tetap tidak berubah dan melawan gangguan dengan cara mempertahankan ekuilibrium tunggal yang kaku. Sebaliknya, resiliensi mengakui adanya dinamika dan fleksibilitas, di mana sistem dapat berubah wujud, beradaptasi, atau bertransformasi ke tatanan ekuilibrium baru ketika tatanan lama tidak lagi dapat dipertahankan akibat guncangan luar biasa (Ayyub, 2020). Sementara itu, keberlanjutan ( *sustainability* ) didefinisikan sebagai serangkaian kondisi lingkungan, ekonomi, dan sosial di mana masyarakat dapat mempertahankan dan meningkatkan kualitas hidup secara tak terbatas tanpa merusak sumber daya alam bagi generasi mendatang (Ayyub, 2020). Resiliensi bertindak sebagai karakteristik fungsional yang memastikan bahwa tujuan-tujuan keberlanjutan tersebut dapat tetap tercapai meskipun sistem dihadapkan pada ketidakpastian dan ancaman krisis iklim (Redman, 2014)

### **2.1.2. Konsep Resiliensi Air**

Sejalan dengan perkembangan teori resiliensi secara umum, konsep resiliensi air ( *water resilience* ) muncul sebagai pengembangan kerangka kerja komprehensif yang diaplikasikan secara spesifik pada sistem pengelolaan sumber daya dan infrastruktur air. Perkembangan ini menandai sebuah pergeseran paradigma ( *paradigm shift* ) yang sangat krusial dalam dunia keteknikan dan pengelolaan lingkungan; yaitu transisi dari pendekatan penyediaan air ( *water supply/provision* ) konvensional menuju pemikiran ketahanan atau resiliensi air (Simonovic, 2016). Pendekatan konvensional yang berlandaskan pada manajemen risiko tradisional umumnya mengedepankan prinsip *fail-safe* (anti-gagal), di mana infrastruktur

dirancang semata-mata untuk memenuhi kapasitas penyediaan air dengan asumsi ilusif bahwa infrastruktur pelindung tidak akan pernah rusak (Butler et al., 2017). Sebaliknya, paradigma resiliensi air mengadopsi prinsip *safe-to-fail* (aman saat terjadi kegagalan), yang menyadari bahwa gangguan drastis akibat iklim ekstrem tidak selalu dapat dicegah, sehingga perancangan sistem harus difokuskan pada kemampuan meminimalkan durasi dan tingkat keparahan saat pelayanan air terputus (Butler et al., 2017).

Konsep resiliensi air menekankan pada kemampuan sistem tata air untuk secara konsisten mempertahankan fungsi krusialnya, beradaptasi terhadap perubahan lingkungan secara perlahan maupun tiba-tiba, serta pulih secara efisien dari gangguan fisik maupun hidrologis seperti kekeringan panjang, variabilitas iklim, atau kehancuran infrastruktur perpipaan (Rodina, 2019). Dalam operasionalisasinya, para peneliti telah merumuskan sejumlah kemampuan fundamental yang harus dimiliki oleh sistem air yang tangguh. Kemampuan tersebut mencakup kapasitas menahan ( *withstanding* ) untuk menjaga fungsionalitas normal selama ada tekanan, kapasitas menyerap ( *absorptive* ) untuk meminimalkan kerusakan awal, kapasitas memulihkan ( *restorative* ) untuk memperbaiki kegagalan pasokan dengan cepat, serta kapasitas beradaptasi dan bertransformasi ( *adaptive and transformative* ) guna mengubah perilaku dan struktur pelayanan merespons lanskap ancaman masa depan yang tidak menentu (Shin et al., 2018; Crozier, Lence, & Weijs, 2024).

Lebih jauh, resiliensi air tidak dapat dicapai hanya melalui penguatan struktur fisik perpipaan, melainkan menuntut integrasi yang holistik antara infrastruktur terbangun (sistem teknis), perlindungan sumber daya lingkungan (sistem ekologis), dan kapasitas manajemen komunitas (sistem sosial) (Rodina, 2019). Hal ini menjadi sangat krusial ketika diterapkan pada kawasan perdesaan, pesisir, dan permukiman di pulau-pulau kecil. Wilayah-wilayah seperti *Small Island Developing States* (SIDS) memiliki kerentanan ganda berupa keterisolasian geografis, minimnya dukungan kelembagaan yang memadai, serta paparan langsung terhadap cuaca ekstrem maritim (Perera et al., 2019). Dalam konteks geografis yang rentan ini, resiliensi air diwujudkan melalui perpaduan tata kelola air yang memberdayakan kearifan lokal, pelestarian bentang alam pesisir untuk melindungi daerah resapan, serta desain infrastruktur skala kecil yang adaptif dan tanggap bencana (Welsh & Bowleg, 2022).

### 2.1.3. Redundansi Infrastruktur

Sebagai bagian dari upaya merealisasikan infrastruktur air yang tangguh, redundansi infrastruktur ( *infrastructure redundancy* ) menempati posisi yang sangat esensial. Dalam kerangka kerja sistem yang tangguh, redundansi merujuk pada keberadaan kapasitas cadangan, rute alternatif, atau ketersediaan elemen dan komponen infrastruktur yang sengaja dirancang ganda ( *multiple elements* ) agar sebuah sistem dapat terus beroperasi dan melayani kebutuhan dasar masyarakat meskipun terdapat satu atau beberapa komponen yang mengalami kegagalan fungsi (Bruneau et al., 2003; Arup & The Rockefeller Foundation, 2015). Konsep redundansi menentang prinsip efisiensi ekonomi jangka pendek yang sering kali memangkas komponen-komponen penyokong dengan dalih penghematan biaya; alih-alih, redundansi menganggap ketersediaan elemen cadangan sebagai penyerap kejutan ( *shock absorber* ) yang vital dalam manajemen krisis (Linkov et al., 2014).

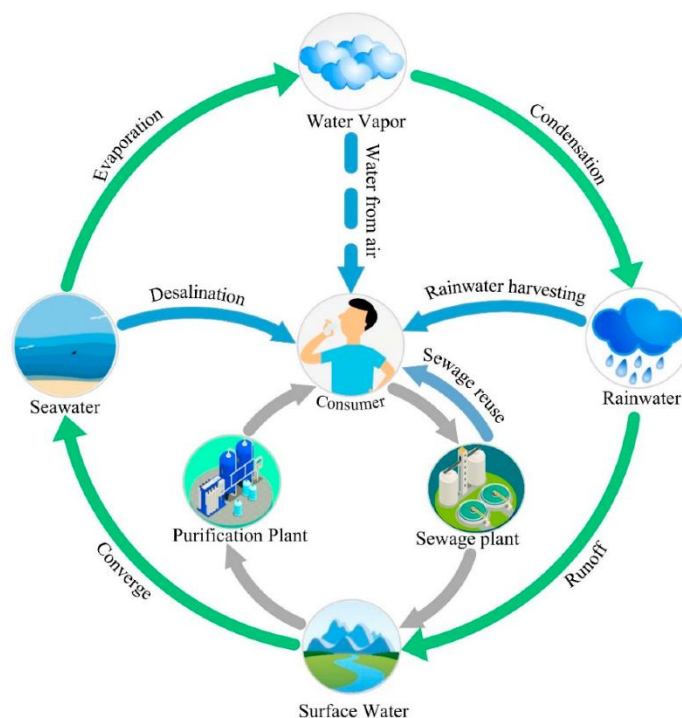
Dalam konteks jaringan infrastruktur persediaan air, wujud dari redundansi sangat beragam dan berpengaruh langsung terhadap keberlangsungan suplai. Redundansi fisik direpresentasikan melalui penyediaan rute penyaluran air alternatif, pencadangan pompa dan generator energi, pengadaan sistem penampungan air terdistribusi (reservoir ganda) di berbagai titik permukiman, serta implementasi infrastruktur yang bersifat desentralisasi atau komunal alih-alih bergantung penuh pada satu pabrik pengolahan sentral (Crozier, Lence, & Weijs, 2024; Leigh & Lee, 2019). Apabila sebuah sistem terdesentralisasi—seperti modul-modul pemanenan air komunal—terpasang di berbagai pelosok kawasan secara mandiri, maka kerusakan pada satu titik perpipaan akibat tanah longsor atau likuifaksi tidak akan menyebabkan kelumpuhan pasokan air minum secara menyeluruh di satu kota (Wutich et al., 2023).

Selain keberadaan komponen cadangan, tingkat resiliensi sebuah infrastruktur jaringan air juga sangat dipengaruhi oleh topologi jaringannya ( *network topology* ). Topologi menggambarkan konfigurasi geometris dan bagaimana pipa-pipa distribusi di bawah tanah saling terhubung. Literatur menunjukkan bahwa jaringan pipa yang dirancang dengan pola melingkar dan saling terhubung ( *looped networks* ) memiliki ketangguhan mekanis dan tingkat keandalan yang jauh lebih superior dibandingkan dengan sistem distribusi berpola cabang ( *branched networks* ) (Creaco et al., 2016). Dalam sistem loop, fluida air memiliki berbagai macam opsi rute jalur alternatif untuk mencapai titik konsumen akhir (Meng et al., 2018). Oleh karena itu, topologi jaringan yang terpadu bertindak sebagai perisai topologis; apabila satu segmen pipa hancur akibat gempa bumi, aliran air dapat diputar secara otomatis

melalui ruas pipa yang lain untuk menghindari area kerusakan, sehingga distribusi pasokan esensial tetap terjaga, dan dampak kegagalan terhadap kelangsungan hidup masyarakat pesisir dapat direduksi secara signifikan (Pagano et al., 2019).

#### 2.1.4. Disversifikasi Sumber Air

Aspek krusial terakhir dalam merancang permukiman pesisir yang tangguh adalah penerapan diversifikasi sumber air ( *water source diversification* ). Konsep ini merupakan langkah mitigasi berbasis perencanaan ruang dan utilitas yang dikembangkan untuk mengurangi risiko kelangkaan air ekstrem. Menggantungkan nasib permukiman pada satu jenis sumber air tunggal—seperti semata-mata mengandalkan ekstraksi air tanah dangkal (sumur) atau satu aliran sungai—menciptakan kerentanan sistemik yang sangat berbahaya terhadap terjadinya gangguan (Yang et al., 2025). Jika sumber air tunggal tersebut mengalami kontaminasi racun industri, mengering akibat kemarau panjang anomali iklim, atau terintrusi oleh limpasan gelombang badai laut, maka komunitas tersebut tidak memiliki jaring pengaman ( *safety net* ) untuk bertahan hidup (Welsh & Bowleg, 2022).



Gambar 2. Diagram Konsep Disfersifikasi Air

Sumber: Zhang et al., 2022

Oleh sebab itu, diversifikasi sumber air berupaya memadukan pemanfaatan sumber-sumber air konvensional dengan pengembangan portofolio teknologi pasokan air non-

konvensional untuk menghasilkan sistem air hibrida yang saling melengkapi (Campisano et al., 2017). Praktik diversifikasi ini dapat berupa penggabungan antara eksploitasi air tanah yang diatur secara ketat, pembangunan sistem pemanenan air hujan ( *rainwater harvesting* ) komunal untuk menangkap presipitasi (Feloni & Nastos, 2024), adopsi teknologi desalinasi air laut skala kecil berbasis energi terbarukan yang mampu memberikan air bebas iklim (Baggio et al., 2023), serta penerapan sistem penyaringan membran osmosis balik untuk mengolah potensi air payau menjadi air konsumsi harian (Hermawan et al., 2022).

Strategi diversifikasi sumber pasokan memiliki relevansi strategis dan esensial, terutama bagi lingkungan pesisir pantai dan kawasan kepulauan kecil yang sering kali tidak memiliki cekungan cadangan air tanah permanen, serta hanya bergantung pada formasi lensa air tawar ( *freshwater lens* ) yang sangat tipis dan mudah rusak (Perera et al., 2019; Welsh & Bowleg, 2022). Dengan mendiversifikasi penyediaan sumber air baku, tingkat keandalan ( *reliability* ) serta kemampuan adaptasi masyarakat perdesaan atau pulau kecil akan tereskalasi secara optimal. Ketangguhan ini memungkinkan suatu permukiman terpencil untuk mengalihkan beban tumpuan dari akuifer tanah yang semakin surut di musim kemarau kepada penampungan curah hujan atau hasil instalasi penyulingan air payau lokal, memastikan bahwa roda perekonomian pariwisata, fasilitas kesehatan primer, dan kebutuhan sanitasi komunal dapat dipertahankan dari berbagai skala turbulensi kebencanaan hidrologis maupun kegagalan infrastruktur eksternal (Yang et al., 2025).

## **2.2.Karakteristik Pulau Kecil sebagai Rural**

Dalam diskursus geografi dan perencanaan wilayah, definisi pulau kecil secara legal dan ekologis merujuk pada daratan kepulauan yang memiliki luas area kurang dari atau sama dengan 2.000 kilometer persegi beserta kesatuan ekosistem di dalamnya (Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 27 Tahun 2007). Dalam pandangan geomorfologis, pulau-pulau ini memiliki batas fisik yang sangat jelas, terpencil dari habitat pulau induk (mainland), dan dicirikan oleh sifatnya yang insular (Hehanussa, 1993; Kementerian Kelautan dan Perikanan, 2023). Karakteristik spasial ini secara langsung membentuk identitas pulau kecil sebagai kawasan rural (perdesaan) yang khas. Sebagai kawasan rural, pulau kecil menghadapi berbagai hambatan struktural seperti isolasi geografis, keterbatasan sarana transportasi dan komunikasi, serta rendahnya tingkat kepadatan penduduk jika dibandingkan dengan wilayah perkotaan di daratan utama. Selain itu, masyarakat pesisir di pulau kecil umumnya memiliki tingkat kebergantungan yang sangat tinggi terhadap sumber daya alam lokal untuk menopang kehidupan sosial-ekonomi mereka (Kementerian Kelautan dan

Perikanan, 2023; UNCTAD, 2021). Serangkaian karakteristik rural dan isolasi geografis ini pada akhirnya sangat memengaruhi dan membatasi kemampuan masyarakat serta pemerintah daerah dalam melakukan pengelolaan infrastruktur dasar, terutama terkait dengan ketersediaan dan manajemen sumber daya air bersih yang adaptif.

Krisis air tawar merupakan fenomena kerentanan yang secara persisten menghantui sebagian besar wilayah pulau kecil. Sekitar 70 persen dari Negara Kepulauan Kecil Berkembang (*Small Island Developing States / SIDS*) di seluruh dunia dilaporkan terus menghadapi masalah kekurangan air (UNCTAD, 2021). Secara fundamental, penyebab utama krisis air di wilayah pesisir dan pulau kecil berpangkal pada keterbatasan struktural lingkungannya. Tidak seperti daratan besar yang memiliki cekungan air tanah dalam atau aliran sungai yang panjang, pulau kecil memiliki daerah tangkapan air (*catchment area*) yang relatif sangat sempit. Kondisi ini menyebabkan sebagian besar curah hujan yang jatuh sebagai aliran air permukaan (*run-off*) akan segera mengalir dan terbuang langsung ke laut dalam waktu yang sangat singkat, sehingga membatasi volume air hujan yang dapat meresap menjadi cadangan air tanah (Kementerian Kelautan dan Perikanan, 2023; Tatas, Budipriyanto, Khoiria, Lestaria, & Rahman, 2015). Absennya sumber air permukaan alami yang stabil menjadikan komunitas di pulau kecil sangat rentan terhadap guncangan kelangkaan air, memaksa mereka untuk sangat bergantung pada presipitasi curah hujan sesaat dan cadangan air tanah yang jumlahnya terbatas (Welsh & Bowleg, 2022).

Tingginya kerentanan krisis air di pulau kecil dipicu secara signifikan oleh berbagai faktor lingkungan yang saling beririsan. Pertama, pulau-pulau kecil sering kali tidak memiliki akuifer dengan kapasitas penyimpanan air tanah yang memadai akibat dari karakteristik geologis penyusunnya. Banyak pulau kecil, khususnya yang terbentuk dari batuan karbonat atau endapan gamping koral, tidak memiliki Cekungan Air Tanah (CAT) yang permanen (Sumaryati, Prihatinningsih, & Kuswadi, 2022). Air tanah pada formasi geologi ini umumnya hanya hadir dalam wujud lensa air tawar (*freshwater lens*), yakni lapisan tipis air tawar yang secara hidrostatik mengapung di atas lapisan air laut yang lebih padat di dalam akuifer (Welsh & Bowleg, 2022; White & Falkland, 2010). Keberadaan lensa air tawar ini sangat rentan terhadap fenomena intrusi air laut, di mana air asin dari laut menyusup ke wilayah pesisir daratan dan mencemari cadangan air tawar di bawah tanah. Kondisi intrusi ini sering diperparah oleh variabilitas iklim lokal dan pola curah hujan musiman. Karena lensa air tawar murni dikendalikan oleh imbuhan (*recharge*) dari air hujan, terjadinya kekeringan panjang akibat anomali cuaca dapat menyusutkan ketebalan lensa air

tawar secara drastis (White & Falkland, 2010). Lebih jauh, dampak nyata dari perubahan iklim global membawa ancaman eksistensial bagi ketersediaan air tawar di pemukiman pesisir rural. Peningkatan suhu udara permukaan memicu laju evapotranspirasi yang lebih tinggi, yang pada gilirannya mengurangi kapasitas air tanah (Wu et al., 2020). Selain itu, fenomena kenaikan muka air laut dan kejadian badai ekstrem berpotensi memicu gelombang tinggi yang meluap ke daratan (*wave overwash*). Luapan ini mengakibatkan pencampuran fisik secara langsung antara air laut yang bersalinitas tinggi dengan lensa air tawar di bawah tanah, sehingga mengkontaminasi persediaan air minum yang dikonsumsi oleh masyarakat setempat (Storlazzi et al., 2018; Yang, Graf, Luo, & Lu, 2021).

Ketersediaan air yang secara alami sudah terbatas di pulau kecil semakin diperburuk oleh berbagai faktor sosial dan dinamika demografi. Pertumbuhan populasi yang terjadi di lingkungan kepulauan mendorong lonjakan kebutuhan domestik terhadap pasokan air bersih yang aman (Welsh & Bowleg, 2022). Selain populasi lokal, tekanan pariwisata yang masif sering kali menjadi beban tambahan bagi ekologi perairan pulau kecil. Perkembangan ekonomi lokal yang mengarah pada ekowisata bahari dan pembangunan fasilitas akomodasi wisata di kawasan pesisir pedesaan menyebabkan perubahan radikal dalam pola konsumsi air harian (Gheuens, Nagabhatla, & Perera, 2019). Kompetisi penggunaan ruang dan sumber daya air antara kebutuhan dasar penduduk lokal dengan permintaan industri pariwisata memicu penyedotan air secara berlebihan (*over-abstraction*). Di tengah tekanan kebutuhan yang eksponensial ini, masyarakat pulau kecil juga dihadapkan pada keterbatasan kapasitas institusional. Pengelolaan sumber daya air sering kali terhambat oleh kurangnya sumber daya manusia yang ahli, keterbatasan dukungan finansial, regulasi dan kebijakan yang tidak memadai, serta lemahnya tata kelola institusi dalam merencanakan pemanfaatan air jangka panjang (White & Falkland, 2010; UNCTAD, 2021).

Dari perspektif keruangan dan utilitas, kawasan pedesaan di pulau kecil ditandai oleh tingginya keterbatasan infrastruktur air. Mayoritas wilayah di negara berkembang kepulauan tidak terlayani oleh sistem penyediaan air bersih terpusat atau perpipaan komprehensif yang dikelola oleh entitas pemerintah (Molina-Rivera & Irizarry-Ortiz, 2021). Ketiadaan jaringan distribusi air berskala besar ini memaksa kelompok masyarakat pedesaan atau komunitas terpencil untuk bergantung sepenuhnya pada sistem-sistem suplai air yang bersifat desentralisasi, berskala kecil, dan sering kali dikelola secara swadaya di tingkat rumah tangga (Yang et al., 2025). Selain ketiadaan jaringan pipa, pulau-pulau kecil rural juga kekurangan infrastruktur penampungan air (*water storage*) yang memadai, baik berupa

embung komunal maupun tandon-tandon panen air hujan yang mampu menyimpan cadangan air saat musim penghujan (Yang et al., 2025). Kerentanan infrastruktur ini akan mencapai titik krisis ketika dihadapkan pada cuaca ekstrem atau musim kemarau. Ketika infrastruktur penampungan buatan gagal menyuplai air akibat kemarau panjang, sistem pengelolaan air komunitas dapat mengalami kelumpuhan total, menjadikan permukiman di wilayah pedesaan pulau kecil berada dalam bayang-bayang instabilitas pasokan kehidupan dasar.

Sebagai akibat dari minimnya infrastruktur air permukaan dan jaringan distribusi terpusat, masyarakat pesisir di pulau kecil memiliki ketergantungan yang nyaris absolut terhadap sumur dangkal sebagai sumber air kehidupan (Ramdhan et al., 2021). Sumur-sumur dangkal yang digali di sekitar area permukiman ini langsung menyadap bagian atas dari lensa air tawar. Namun, posisi akuifer dangkal di bawah tanah yang berpori dan berpasir ini menjadikannya sangat rentan terhadap berbagai kontaminasi silang. Sumur dangkal penduduk sangat mudah tercemar oleh patogen biologis maupun bahan kimia dari kegiatan manusia di atas permukaan, seperti rembesan dari sistem sanitasi (tangki septik), pembuangan kotoran hewan, fasilitas tempat pembuangan akhir sampah, hingga residu bahan kimia pertanian (White & Falkland, 2010). Kerentanan kualitas air sumur dangkal ini diperburuk oleh ancaman penyusutan debit pada saat defisit presipitasi di musim kemarau. Ketika musim kering melanda, suplai debit air di dalam sumur gali cenderung menurun drastis dan masyarakat akan mendapati kualitas air berubah menjadi payau (Pryambodo et al., 2021; Hadi, Arsadi, Hartanto, & Marganingrum, 2006). Ketergantungan yang terus-menerus terhadap sumur dangkal berujung pada eksploitasi berlebihan. Pemompaan sumur dangkal yang tidak terkendali akan mengganggu keseimbangan tekanan hidrostatik, menarik batas air laut di bagian bawah akuifer naik ke atas (*fenomena upconing*) atau memicu intrusi salin dari arah pesisir pantai. Apabila kontaminasi intrusi air laut ini telah menembus sumur-sumur dangkal warga, pemulihan alami lensa air tawar akan membutuhkan waktu bertahun-tahun, meninggalkan masyarakat rural dalam kondisi krisis ketersediaan air minum yang akut (Holding & Allen, 2016; Welsh & Bowleg, 2022).

### **2.3. Sistem Penyediaan Air Bersih**

Dalam konteks operasional fisiknya, infrastruktur air bersih terpusat (jaringan perpipaan) secara hierarkis dibangun atas empat unit infrastruktur utama beserta bangunan penunjangnya, yaitu:

### 2.3.1. Unit Air Baku

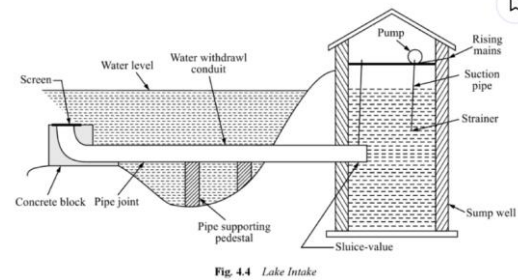
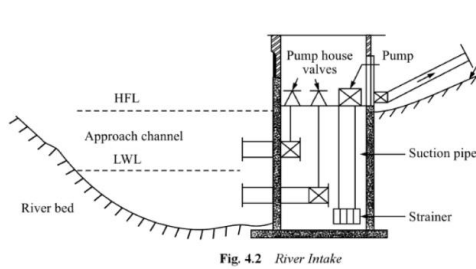
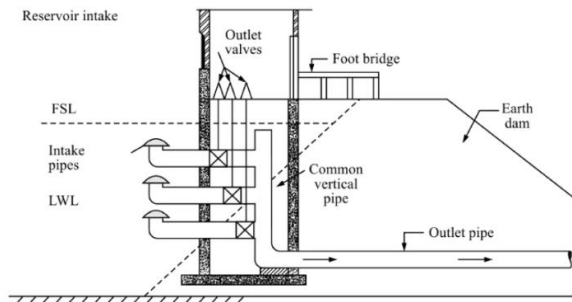
Unit air baku adalah sarana dan prasarana pengambilan dan/atau penyedia air baku sebelum diolah menjadi air minum (PERMEN PU, 2007). Sementara itu, terminologi "air baku" merujuk pada air yang berasal dari alam—seperti air permukaan, cekungan air tanah, atau curah hujan—yang telah memenuhi standar baku mutu tertentu untuk diolah menjadi air minum rumah tangga

Ketersediaan dan keandalan SPAM sangat ditentukan oleh pemilihan sumber air yang berkelanjutan. Secara geohidrologis, sumber air yang dapat dieksploitasi meliputi air permukaan (seperti aliran sungai, danau, rawa, dan waduk), air tanah (yang terdiri atas air tanah dangkal/bebas dan air tanah dalam/tertekan), mata air, air hujan, serta air laut

Di Indonesia, eksploitasi air permukaan, khususnya sungai, merupakan sumber utama yang paling sering dimanfaatkan untuk jaringan perpipaan terpusat. Namun dalam konteks Kemujan—sebuah pulau kecil yang dikelilingi oleh laut dan ketiadaannya cekungan air tanah maupun sungai—membuatnya hanya bisa bergantung pada air hujan dan air laut.

Pendukung Infrastruktur fisik pada unit air baku dirancang secara spesifik mengikuti karakteristik topografi dan jenis sumber airnya. Komponen utama di dalam unit ini meliputi:

- 1) **Bangunan Penyadapan (*Intake*):** Merupakan struktur sipil awal tempat air masuk dari alam. Tipologinya bervariasi, antara lain *intake* sungai (dapat berupa *intake* bebas, *intake* ponton, atau *intake* bendung), sumur bor atau casing khusus untuk pengambilan air tanah, serta *broncaptering* (bangunan penangkap) yang digunakan secara spesifik untuk menyadap aliran mata air.



Gambar 3. Macam-macam bentuk intake

Sumber: google.com

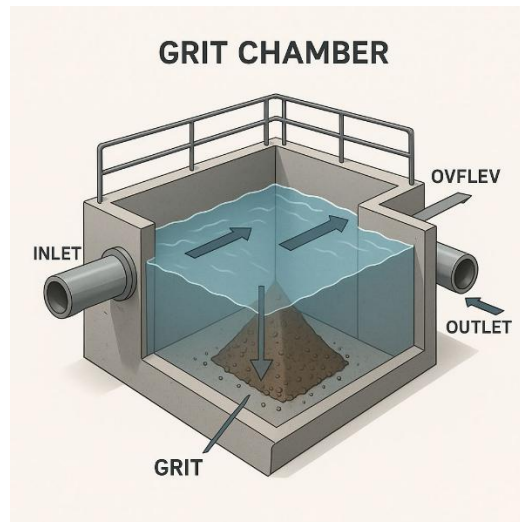
- 2) **Bangunan Penampung Air Konservasi:** Meliputi bendung, embung, atau long storage yang difungsikan untuk menahan aliran air sementara waktu, menjaga stabilitas level muka air, dan menyimpan cadangan air terutama di musim kemarau



Gambar 4. Embung

Sumber: IDNtimes.com

- 3) **Saringan (Screen) dan Grit Chamber:** Pintu masuk air (*inlet*) wajib dilengkapi dengan *screen* (saringan sampah) untuk memblokir masuknya materi padat makro seperti kayu, plastik, dan dedaunan



Gambar 5. Ilustrasi Grit Chamber

Sumber: LinkedIn.com

- 4) Setelahnya, air memasuki *grit chamber* (bak penangkap lumpur) yang berfungsi mengendapkan partikel tersuspensi berat seperti pasir secara gravitasi agar tidak menyumbat atau merusak baling-baling pompa
- 5) **Sistem Perpompaan:** Instalasi pompa (umumnya tipe sentrifugal poros horizontal atau *submersible*) yang berfungsi untuk memberikan tenaga dorong hidrolis guna mengangkat air dari level sumber menuju elevasi unit pengolahan
- 6) **Jaringan Pipa Transmisi Air Baku:** Ruas perpipaan, baik berupa saluran tertutup bertekanan maupun saluran terbuka, yang digunakan untuk mengalirkan dan mentransmisikan air hasil sadapan langsung ke lokasi Unit Produksi
- 7) **Peralatan Pengukuran dan Pemantauan:** Terdiri dari perangkat mekanikal, hidrolis, dan elektronika seperti flowmeter (meter air induk), bendung ukur Cipoletti atau V-notch Thompson untuk memantau fluktuasi debit secara presisi, serta alat peil penduga muka air atau *water level control*



Gambar 6. (kiri) flowmeter; (kanan) bendung ukur Cipoletti

Sumber: Google.com

Sistem kerja unit air baku berpusat pada penarikan air alamiah secara aman, terkontrol, dan berkelanjutan. Secara operasional, air disadap langsung dari sumbernya dan masuk ke dalam struktur *intake* atau sumuran

Pada titik pemasukan awal ini, aliran air dipaksa menembus jeruji *screen* untuk menyisihkan kontaminan padat, dan kemudian diretas kecepatannya di dalam *grit chamber* agar pasir dan lumpur kasar dapat terendapkan ke dasar bak.

Setelah tahapan pemisahan material kasar ini selesai, pompa air baku diaktifkan untuk menghisap air jernih awal tersebut dan mendistribusikannya melalui jaringan pipa transmisi menuju Instalasi Pengolahan Air (IPA) untuk dimurnikan lebih lanjut.

Sebagai pengecualian yang efisien secara ekonomis, apabila kondisi topografi menunjukkan bahwa elevasi sumber air baku jauh lebih tinggi dibandingkan posisi wilayah IPA, maka pengaliran air dapat dilakukan sepenuhnya memanfaatkan energi potensial (gaya gravitasi bumi), sehingga mengeliminasi kebutuhan operasional pompa mekanis

Perancangan teknis untuk unit air baku tidak dapat dilakukan secara empiris semata, melainkan wajib tunduk pada tiga pilar standar perencanaan berikut:

- 1) Standar Kuantitas: Debit dan kapasitas pengambilan (*intake capacity*) wajib didesain dengan toleransi keandalan yang tinggi. Kapasitas pengambilan harus dirancang sekurang-kurangnya sebesar 130% dari total kebutuhan rata-rata air minum (mencerminkan kebutuhan hari puncak) untuk mengantisipasi potensi kehilangan air, kebocoran transmisi, dan kebutuhan air cuci filter di IPA
- 2) Standar Kualitas: Karakteristik fisis, biologis, dan kimiawi air yang disadap harus secara ketat memenuhi parameter baku mutu untuk peruntukan air baku. Standar acuan di Indonesia merujuk pada regulasi mutakhir Kelas 1 di dalam Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, yang merupakan pembaruan dari instrumen terdahulu yakni Peraturan Pemerintah Nomor 82 Tahun 2001
- 3) Standar Konstruksi dan Keamanan: Lokasi dan konstruksi bangunan pengambilan harus diposisikan di area yang resistan dan terlindungi dari segala bentuk polusi antropogenik eksternal

Secara struktural bangunan sipilnya harus stabil dalam meredam gaya guling, aman terhadap rambatan banjir ekstrem, rembesan, dan bencana alam lain seperti longsor, serta secara material direncanakan memiliki umur pakai operasi (*lifetime*) yang panjang, minimal selama 25 tahun

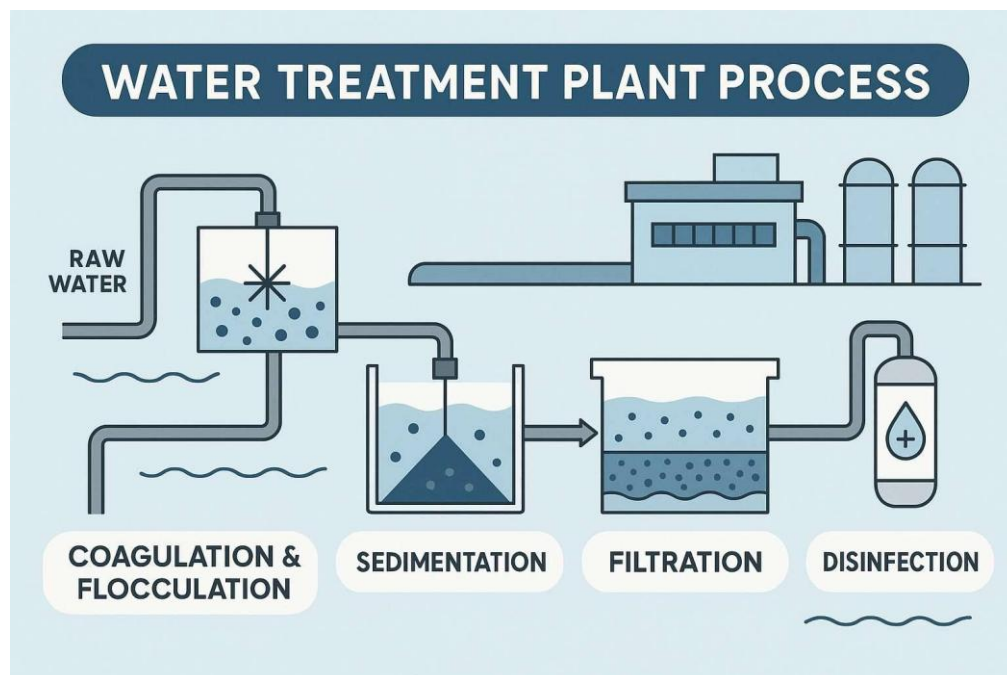
### 2.3.2. Unit Produksi

Secara regulasi dan teknis, Unit Produksi didefinisikan sebagai sarana dan prasarana infrastruktur yang digunakan untuk mengolah air baku—yang kualitas alamiahnya belum memenuhi syarat—menjadi air minum yang aman dan layak konsumsi

Pengolahan ini dicapai melalui serangkaian tahapan proses yang melibatkan rekayasa fisika, kimiawi, dan/atau biologi, yang di dalamnya mencakup bangunan pengolahan beserta perlengkapannya, perangkat operasional, alat pemantauan kualitas, hingga bangunan penampungan air minum akhir

#### a. Proses Produksi Konvensional

Rangkaian proses pengolahan air umumnya terdiri dari satuan operasi dan satuan proses yang dikonfigurasi untuk memisahkan material kasar, partikel tersuspensi, material terlarut, serta melakukan netralisasi dan desinfeksi.

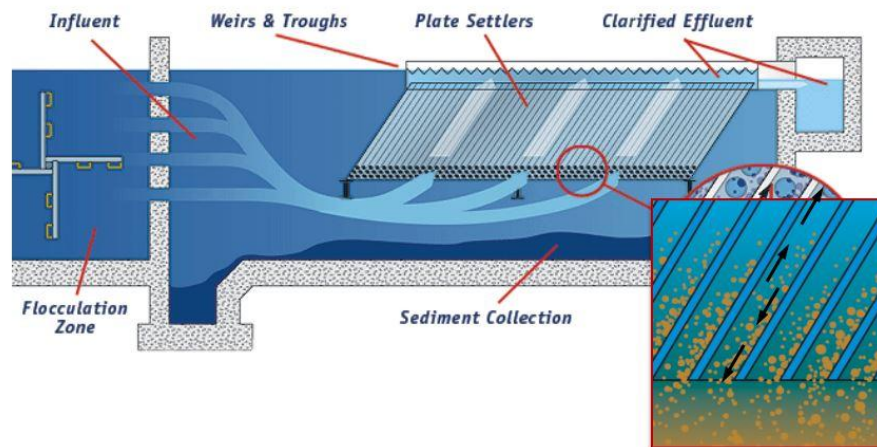


Gambar 7. Proses Pengolahan Air Konvensional

Sumber: romeagamart.com

Tahapan pengolahan konvensional umumnya meliputi:

- 1) **Prasedimentasi:** Merupakan pengolahan pendahuluan yang bertujuan untuk mengendapkan partikel padat diskrit (seperti pasir, kerikil, dan lumpur kasar) secara murni memanfaatkan gaya gravitasi tanpa adanya pembubuhan bahan kimia tambahan. Proses ini sangat krusial untuk mereduksi beban pengolahan pada unit-unit berikutnya



Gambar 8. Komponen-Komponen pada Bak Prasedimentasi

Sumber: Water.mecc

- 2) **Koagulasi (Pengadukan Cepat):** Adalah proses pencampuran bahan kimia (koagulan seperti Aluminium Sulfat/tawas atau PAC) secara cepat dan turbulen ke dalam air baku. Tujuannya adalah untuk mendestabilisasi partikel koloid bermuatan negatif, sehingga campuran menjadi homogen dan partikel kotoran menjadi tidak stabil.
- 3) **Flokulasi (Pengadukan Lambat):** Merupakan kelanjutan dari koagulasi, di mana air diaduk secara lambat untuk menggumpalkan partikel-partikel koloid yang tidak

stabil menjadi butiran flok (agregat) yang berukuran lebih besar, berat, dan stabil



Gambar 9. Tangki Flokulasi

Sumber: [qiankunhb.en.made-in-china.com](http://qiankunhb.en.made-in-china.com)

- 4) **Sedimentasi:** Proses pemisahan fisik berdasarkan perbedaan berat jenis, di mana flok-flok kotoran berukuran besar yang terbentuk dari tahap flokulasi dibiarkan mengendap ke dasar bak pengendap secara gravitasi, sehingga terpisah dari lapisan air yang jernih di bagian atasnya
- 5) **Filtrasi (Penyaringan):** Langkah pemolesan akhir (*polishing*) yang berfungsi untuk menghilangkan flok sisa dan sisa partikel halus yang tidak terendapkan pada bak sedimentasi. Air dilewatkan melalui media penyaring (seperti saringan pasir cepat atau lambat) dan kerikil untuk menghasilkan air dengan tingkat kekeruhan yang sangat rendah.
- 6) **Desinfeksi:** Tahap pembubuhan zat kimia (seperti gas klor, kaporit) atau pemanfaatan proses fisis (seperti injeksi ozon atau paparan sinar UV) untuk menghancurkan mikroorganisme dan bakteri patogen yang dapat menyebabkan penyakit, serta untuk menghambat pertumbuhan lumut dalam jaringan



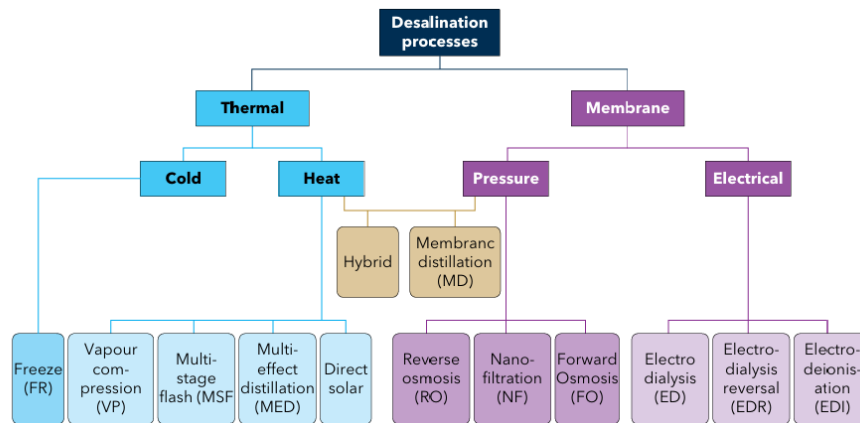
Gambar 10. UV Lamp

Sumber: beta.co

Untuk mengoperasikan tahapan di atas, infrastruktur Unit Produksi dilengkapi dengan serangkaian peralatan mekanikal, sipil, dan elektrik. Komponen utamanya meliputi bak prasedimentasi, koagulator (dengan mekanisme hidrolis atau mekanis), bak flokulator, clarifier atau bak sedimentasi (umumnya dilengkapi dengan *tube* atau *plate settler* untuk mempercepat pengendapan), bak filtrasi pasir, tangki/pompa pembubuh bahan kimia (*dosing pump*), ruang disinfeksi, reservoir produksi (*clear well*), serta laboratorium pengujian

#### **b. Proses Produksi Non-Konvensional**

Desalinasi merupakan intervensi teknologi yang krusial untuk memitigasi kelangkaan air, terutama di wilayah kepulauan dan kawasan terpencil yang mengalami krisis sumber daya air konvensional. Secara klasifikasi teknis, teknologi ini dibagi ke dalam dua kategori utama: proses termal dan proses membran.



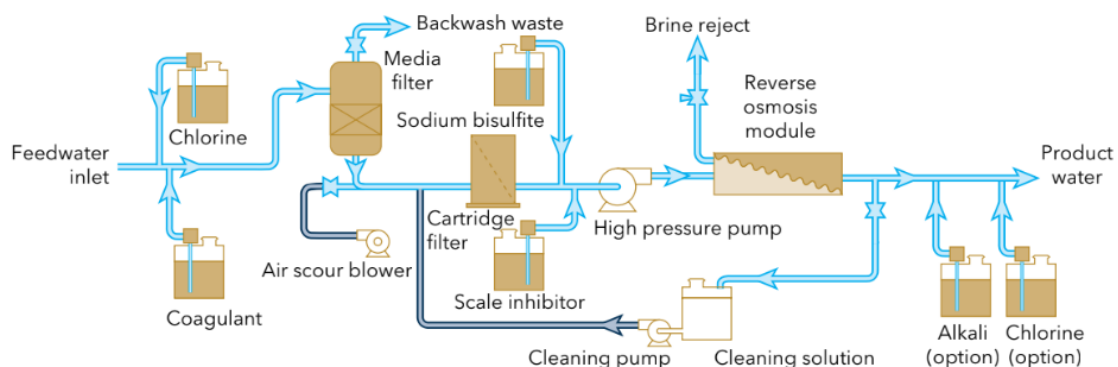
Gambar 11. Pembagian Kategori Teknologi Desalinasi

Sumber: World Bank, 2025

## 1) Teknologi Berbasis Membran

### a) Reverse Osmosis

RO saat ini merupakan standar industri yang paling luas diaplikasikan dalam desalinasi. Sistem ini bekerja dengan memaksa air laut atau air payau melewati membran semipermeabel yang berfungsi menahan garam serta kontaminan lainnya. Skema pengolahannya mencakup prapengolahan fisik untuk menyisihkan residu kasar, penyaringan utama melalui modul membran RO, dan pascapengolahan kimiawi menggunakan klorin agar air aman dikonsumsi. Tingkat pemulihan air (*recovery rate*) pada sistem ini berkisar antara 25-50 persen. Kendala operasional utama dari sistem RO adalah tingginya kebutuhan energi untuk mengatasi tekanan osmotik, kerentanan membran terhadap *fouling* (penumpukan sedimen/kotoran) yang menuntut perawatan intensif, serta produksi limbah konsentrat (*brine*) yang memerlukan manajemen spasial khusus.



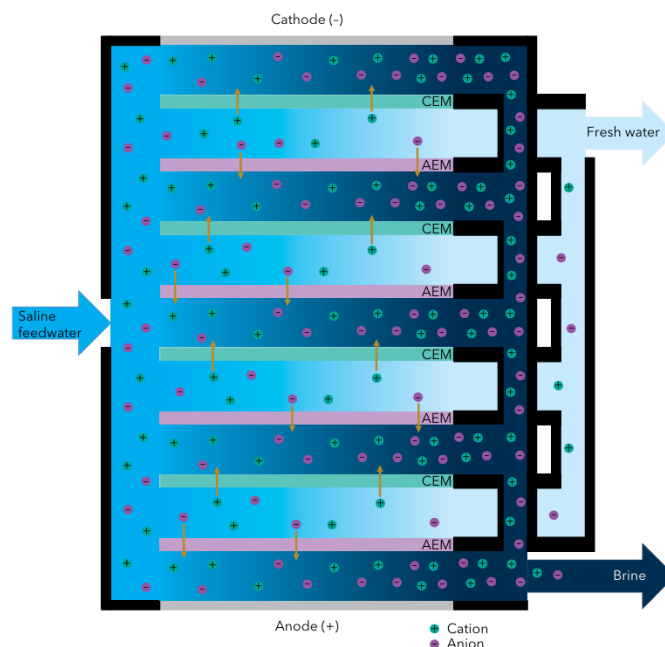
Source: World Bank 2019.

Gambar 12. Proses Reverse Osmosis

Sumber: World Bank, 2025

## b) Electrodialysis (ED) dan Electrodialysis Reversal (EDR)

Berbeda dengan RO yang menggunakan tekanan fisik, sistem ED mengaplikasikan tegangan listrik pada anoda dan katoda untuk memisahkan molekul air dan garam. Air umpan dialirkan melalui tumpukan membran penukar anion dan kation; ion negatif bergerak ke anoda namun diblokir oleh membran penukar kation sehingga tertahan di ruang konsentrat. Mekanisme yang sama berlaku untuk kation yang bergerak menuju katoda. Untuk mengatasi penumpukan garam dan material organik pada membran, polaritas tegangan pada sistem dapat dibalik secara berkala (EDR) guna membersihkan dan memulihkan efektivitas membran. Dalam konteks air payau dengan tingkat salinitas yang tidak terlalu ekstrem, ED dapat beroperasi dengan rasio efisiensi biaya dan energi yang lebih baik dibandingkan RO.



Gambar 13. Proses Electrodialysis

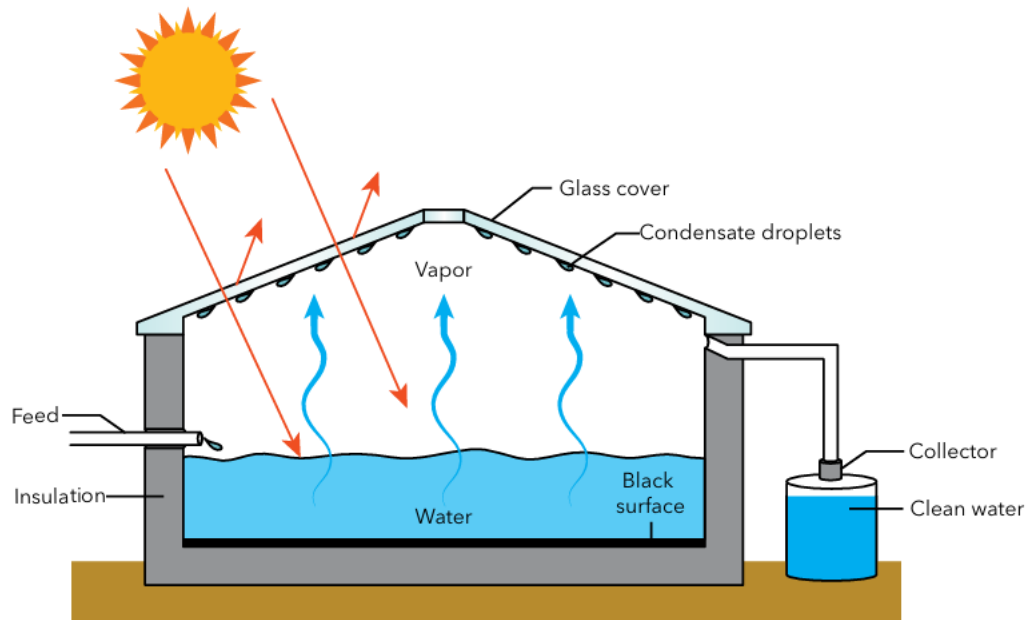
Sumber: World Bank, 2025

## 2) Teknologi Berbasis Termal Skala Kecil

### a) *Solar Still Distillation (SSD)*

SSD merupakan alternatif teknologi berbasis termal berskala kecil yang ditenagai langsung oleh radiasi matahari. Secara struktural, air ditempatkan dalam tangki tertutup kedap udara yang dilengkapi reservoir dasar berwarna hitam dan penutup transparan. Pemanasan global menyebabkan air menguap, naik, lalu mengembun pada bagian penutup, dan akhirnya mengalir ke dalam sistem kolektor terpisah sebagai air tawar murni.

Keunggulan SSD terletak pada kesederhanaan desain dan kemampuannya memanfaatkan material lokal. Namun, teknologi ini memiliki tingkat produktivitas yang sangat rendah (2-30 liter per meter persegi per hari), sehingga implementasinya menuntut alokasi luasan tapak (*footprint*) lahan yang sangat masif untuk dapat melayani kebutuhan suatu komunitas.



Gambar 14. Proses Solar Still

Sumber: World Bank, 2025

### c. Standar Acuan dan Kriteria Perencanaan

Kinerja dan perancangan Unit Produksi harus mengikuti standar baku rekayasa dan regulasi pemerintah guna menjamin keamanan pasokan, dengan kriteria sebagai berikut:

- 1) **Kualitas Air Olahan:** Keluaran (*output*) air minum dari instalasi produksi diwajibkan secara ketat untuk memenuhi Standar Kualitas Air Minum yang telah ditetapkan oleh Kementerian Kesehatan. Parameter fisik, kimia, biologis, dan radioaktif wajib merujuk pada regulasi seperti Permenkes No. 492/MENKES/PER/IV/2010 atau regulasi pembaruan pada Permenkes No. 2 Tahun 2023 tentang Kesehatan Lingkungan
- 2) **Kapasitas Perencanaan:** Dimensi dan kapasitas hidrolis unit produksi dirancang tidak murni berdasarkan kebutuhan rata-rata harian (debit rata-rata). Unit produksi wajib dirancang untuk mampu menampung kebutuhan hari maksimum (atau kebutuhan hari puncak), yang besarnya rata-rata dirancang pada kisaran 120% (bahkan hingga

130% untukantisipasi kehilangan/*backwash*) dari kebutuhan rata-rata air minum masyarakat

- 3) Standar Bangunan dan Konstruksi: Setiap pembangunan sipil, modul baja, maupun paket mekanikal instalasi pengolahan harus mengacu secara legal pada standar yang diterbitkan oleh Badan Standardisasi Nasional (BSN), seperti panduan perancangan unit paket penjernihan pada dokumen SNI 19-6774-2002 tentang Tata Cara Perencanaan Unit Paket Instalasi Penjernihan Air, atau SNI teknis lainnya yang mengatur struktur baja dan struktur instalasi saringan pasir lambat

### **2.3.3. Unit Distribusi**

Secara teknis dan regulasi, Unit Distribusi didefinisikan sebagai kesatuan sarana dan prasarana yang berfungsi untuk mengalirkan air minum secara aman dari titik akhir pipa transmisi air minum atau instalasi pengolahan menyebar hingga ke seluruh area unit pelayanan pelanggan. Fungsi pokok dari infrastruktur distribusi ini adalah untuk memastikan bahwa air yang telah memenuhi syarat kualitas kesehatan dapat dihantarkan kepada masyarakat luas dengan menjaga keseimbangan antara kuantitas pasokan dan kontinuitas pengaliran

Sistem distribusi air bersih merupakan jaringan fisik yang sangat masif dan kompleks. Infrastruktur utamanya terbagi menjadi beberapa komponen fungsional sebagai berikut:

- a) Bangunan Penampung (Reservoir): Reservoir merupakan bangunan yang berfungsi sebagai tempat penyimpanan air sementara sebelum didistribusikan secara langsung kepada para konsumen.  
Berdasarkan lokasi perletakkannya terhadap permukaan tanah, reservoir dibedakan menjadi ground reservoir (reservoir permukaan yang diletakkan di bawah atau sejajar tanah) dan elevated reservoir (menara air yang diletakkan di atas tanah guna memperoleh ketinggian jatuh air)
- b) Sistem Perpompaan: Fasilitas pemompaan digunakan untuk meningkatkan energi tekan pada fluida apabila wilayah pelayanan memiliki topografi yang relatif datar atau elevasi instalasi pengolahan tidak sanggup memberikan gaya jatuh gravitasi yang cukup. Sistem perpompaan ini umumnya melibatkan pompa distribusi utama, pompa penguat (*booster pump*) untuk menambah tekanan pada area tertentu yang jauh serta tangki hydrophor atau tangki *anti water-hammer* yang berfungsi krusial untuk meredam lonjakan energi dan tekanan balik yang berpotensi memecahkan pipa

- c) Jaringan Perpipaan: Sistem perpipaan bawah tanah diklasifikasikan secara hierarkis ke dalam beberapa tingkatan, yaitu:
- a. Pipa Transmisi Air Minum yang menghubungkan instalasi produksi ke bangunan reservoir
  - b. Jaringan Distribusi Utama (JDU) atau pipa primer berdiameter besar yang membentuk blok zona wilayah pelayanan
  - c. Jaringan Distribusi Pembawa (sekunder) yang menghubungkan pipa primer ke blok permukiman
  - d. dan Jaringan Distribusi Pembagi (tersier) yang merupakan ranting pipa terkecil untuk mengalirkan air tepat ke depan persil atau pipa pelayanan konsumen
- d) Aksesoris Jaringan (Bangunan Pelengkap): Guna menunjang sistem distribusi agar berfungsi secara terkendali, perpipaan dilengkapi dengan perangkat mekanis pelengkap. Perangkat ini mencakup katup pengisolasi aliran (*gate valve* atau *butterfly valve*), katup pelepas udara (*air valve*) di titik elevasi tertinggi untuk mencegah akumulasi udara merusak tekanan, katup penguras (*wash out*) di titik terendah elevasi guna membuang endapan sedimen yang terbawa, katup pengurang tekanan (*pressure reducing valve*) guna mengatasi gaya hidrolis berlebih, serta meter air distrik/induk (seperti pada *District Meter Area/DMA*) untuk merekam debit distribusi dan mendeteksi kerugian kebocoran teknis

Prinsip operasional jaringan distribusi berlandaskan pada keseimbangan hidrolis dan jaminan kelayakan layanan. Mekanisme pengaliran bermula ketika air bersih dari Instalasi Pengolahan Air (IPA) dialirkan dan ditampung ke dalam bangunan reservoir

Reservoir ini bertindak sebagai penyeimbang (*balance reservoir*); ia akan menampung sisa produksi pada malam hari ketika pemakaian rendah, dan kemudian melepaskan cadangan air tersebut secara masif untuk menutupi defisit pasokan pada jam-jam puncak (*peak hour*), seperti aktivitas mandi serentak di pagi dan sore hari. Dari titik reservoir ini, air disalurkan ke kawasan permukiman menggunakan prinsip gaya gravitasi alamiah, pemompaan dinamis, atau sistem pengaliran gabungan dari keduanya.

Di wilayah permukiman, topologi geometri perpipaan bawah tanah memainkan peran vital dalam perataan fluida. Susunan pipa dapat dirancang menggunakan sistem cabang (*branch system*), di mana air mengalir satu arah dari pipa induk menuju pipa yang lebih kecil

namun memiliki kerentanan berupa adanya "titik mati" (*dead-end*) di ujung pipa yang dapat menurunkan kualitas air sisa. Sebagai alternatif yang lebih andal, diterapkan sistem melingkar (*loop system*) di mana seluruh pipa saling terhubung membentuk suatu sirkuit tertutup. Pada pola loop, air tidak memiliki batas henti dan secara otomatis dapat diputar melalui ruas jalur lain bila suatu ruas mengalami kebocoran atau perbaikan, sehingga tekanan hidrolis tetap terjaga merata di seluruh jaringan.

Sebagai standar kriteria keteknikan dan pelayanan, skema operasional unit distribusi ini diwajibkan mampu menyuplai air bersih ke rumah-rumah pelanggan secara terus-menerus (kontinu) selama 24 jam sehari.

Selain itu, perancangan hidrolika di dalam pipa harus sanggup menghasilkan energi sisa tekan minimum sebesar 10 meter kolom air (mka) atau setara dengan tekanan 1 atm pada titik pelanggan yang terjauh dan tertinggi

#### **2.3.4. Unit Pelayanan**

Dalam hierarki Sistem Penyediaan Air Minum (SPAM), Unit Pelayanan didefinisikan sebagai ujung terakhir (hilir) dari keseluruhan sistem jaringan infrastruktur yang bersentuhan secara langsung dengan para pelanggan atau konsumen (Kementerian Pekerjaan Umum, 2007). Unit ini merupakan bentuk sarana fisik nyata di mana masyarakat pengguna mengambil, menerima, dan memanfaatkan air minum yang telah memenuhi syarat kesehatan dan kualitas untuk mendukung kehidupan yang bersih dan produktif. Keandalan dan kesuksesan dari suatu SPAM secara utuh pada akhirnya dinilai dan diukur dari indikator terpenuhinya kebutuhan dasar pada unit pelayanan ini.

Bentuk pelayanan air minum kepada pelanggan didistribusikan melalui beberapa jenis infrastruktur spesifik yang dirancang sesuai dengan tingkat kemampuan ekonomi masyarakat, tata ruang wilayah, dan peruntukannya. Sarana tersebut meliputi:

- 1) Sambungan Rumah (SR) / Sambungan Langanan (SL): Sambungan rumah merupakan jenis sarana yang mendistribusikan air secara langsung ke dalam persil atau rumah-rumah individu konsumen melalui instalasi pipa (Kementerian Pekerjaan Umum, 2007). Pelayanan jenis ini pada umumnya diperuntukkan bagi kelompok masyarakat yang memiliki hunian permanen atau kemampuan ekonomi yang memadai. Kelengkapan infrastruktur pada sambungan rumah terdiri atas titik penyadapan pada pipa distribusi (*clamp saddle*), pipa pelayanan, katup

penutup/pembuka aliran (*valve*), serta meter air pelanggan yang umumnya dilindungi oleh kotak pengaman atau instrumen *flow restrictor* (Swantara, 2023).



Gambar 15. Sambungan Rumah

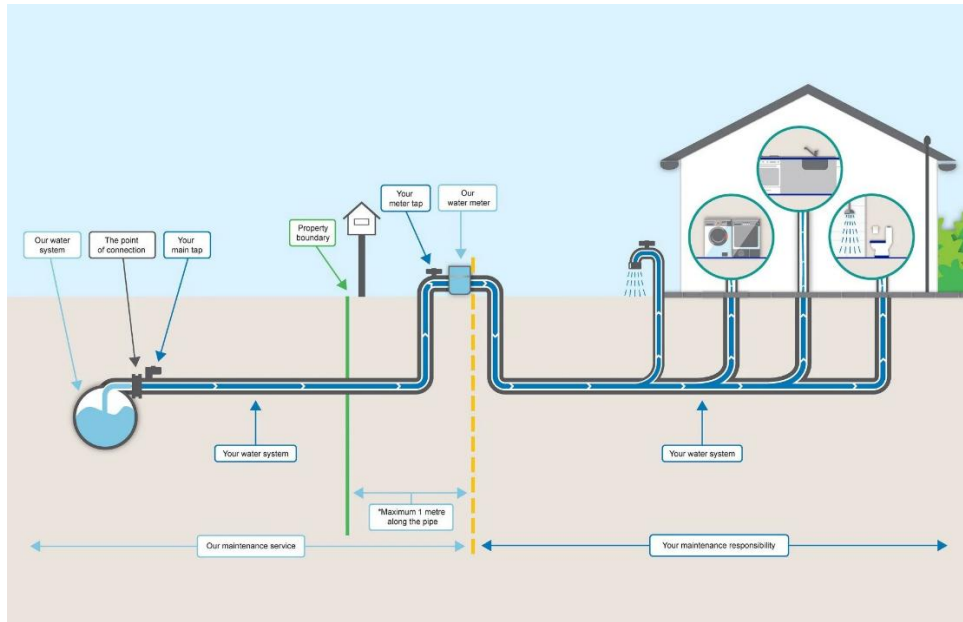
Sumber: Lazada.com

- 2) Hidran Umum (HU) / Kran Umum (KU): Berbeda dengan sambungan individu, hidran umum atau kran umum adalah sarana pelayanan air minum komunal (berkelompok). Sistem ini menyediakan air melalui titik kran atau bak penampung bersama di suatu lokasi tertentu untuk mencukupi kebutuhan sanitasi dan konsumsi masyarakat. Pemasangan KU sangat diprioritaskan untuk melayani penduduk di kawasan permukiman berpenghasilan rendah, area padat dan kumuh, serta kawasan rawan air yang belum terjangkau jaringan perpipaan rumah sepenuhnya. Konstruksi sipil instalasi ini umumnya mencakup pembuatan bantalan beton, penyediaan kotak pengaman meter, saluran pembuangan air bekas ke selokan terdekat, dan meter air berdiameter  $\frac{3}{4}$  inci (Swantara, 2023).
- 3) Terminal Air: Terminal air merupakan sarana pelayanan air minum darurat dan komunal yang berupa bak penampung air berdimensi besar dan ditempatkan di atas permukaan tanah atau sebuah pondasi. Pengisian terminal air ini tidak selalu bertumpu pada jaringan pipa bawah tanah, melainkan disuplai menggunakan sistem curah (*bulk*) yang dibawa oleh mobil tangki air maupun kapal tangki air (Pemerintah Kabupaten Jepara, 2023; Swantara, 2023).

- 4) Hidran Kebakaran (*Fire Hydrant*): Hidran kebakaran adalah sambungan tegak (pilar) yang terpasang pada jalur pipa distribusi atau pipa induk yang diperuntukkan secara khusus untuk mengambil air bertekanan pada keadaan darurat pemadaman kebakaran kota, atau untuk keperluan pengurasan pipa berkala. Unit ini wajib dipasang dengan interval jarak maksimum setiap 300 meter, yang diletakkan di depan bangunan-bangunan komersial, gedung perkantoran, atau lokasi yang rawan akan bencana kebakaran (Swantara, 2023)

### **Mekanisme Kerja dan Standar Operasional**

Mekanisme pengoperasian pada unit pelayanan melibatkan instrumen pengukuran dan penjagaan kualitas hidrolika secara ketat. Pada Sambungan Rumah (SR), aliran air bertekanan dari pipa distribusi tersier disadap dan dialirkan masuk ke instalasi persil pelanggan. Aliran fluida tersebut akan menggerakkan mekanik baling-baling atau sensor di dalam meter air pelanggan. Meter air ini berperan vital untuk merekam dan mencatat akumulasi volume air (dalam satuan  $m^3$ ) yang dikonsumsi secara presisi, yang mana datanya akan digunakan sebagai basis tagihan (rekening) bulanan pelanggan (Swantara, 2023). Pada sistem Kran Umum (KU), warga mengambil air secara langsung dengan membawa wadah, dan total air yang didistribusikan secara berkelompok tersebut diakumulasikan melalui meter air induk milik KU yang dikelola oleh perwakilan masyarakat setempat untuk penarikan retribusi (Kementerian Pekerjaan Umum, 2007). Setiap instrumen meter air ini diwajibkan untuk ditera secara berkala oleh badan berwenang guna menjaga keakuratannya (Kementerian Pekerjaan Umum, 2007).



Gambar 16. Diagram Sistem SPAM

Sumber: water.co.id

Terkait dengan standar kelayakan pelayanannya, operasional pada unit pelayanan diawasi menggunakan pedoman Kualitas, Kuantitas, dan Kontinuitas atau 3K. Sistem SPAM harus menjamin bahwa:

- 1) Kuantitas (Tekanan Air): Air harus mengalir dengan kuantitas yang cukup dan energi tekan sisanya harus dijaga minimal sebesar 1 atm (atau 10 meter kolom air / mka) di titik layanan pelanggan terjauh. Tekanan positif ini sangat krusial untuk mencegah masuknya intrusi (infiltrasi) air tanah kotor dari luar pipa yang dapat mencemari air bersih (Kementerian Pekerjaan Umum, 2007).
- 2) Kualitas (Desinfeksi): Sistem bekerja untuk mendistribusikan air minum yang higienis, dengan pH ideal 6,0–7,5, terbebas dari bakteriologis (*E. coli* = 0), dan yang paling penting, senantiasa mempertahankan sisa klorin (*residual chlorine*) minimal sebesar 0,2 mg/L (ppm) agar air tetap aman dari bibit penyakit hingga keluar dari kran di rumah penduduk (Kementerian Pekerjaan Umum, 2007).
- 3) Kontinuitas: Infrastruktur pelayanan wajib dioperasikan sedemikian rupa agar masyarakat dapat mengakses air minum secara terus-menerus selama 24 jam penuh setiap harinya (Kementerian Pekerjaan Umum, 2007)..

## 2.4.Studi Preseden Infrastruktur Air

#### 2.4.1. Obyek Studi Banding 1 : Sistem Ketahanan Air Singapura (Four National Taps)



Gambar 17. Singapore's Desalination Plant

Sumber: Today Online

##### a.) Profil dan Latar Belakang

Singapura merupakan negara kota (*city-state*) dengan luas wilayah hanya sekitar 728 km<sup>2</sup> yang terletak di ujung selatan Semenanjung Malaya. Meskipun menerima curah hujan tahunan rata-rata 2.400 mm—jauh di atas rerata global 1.050 mm—Singapura dikategorikan sebagai salah satu negara paling terancam krisis air di dunia akibat keterbatasan lahan untuk menampung dan menyimpan air hujan, serta absennya sumber daya air alami seperti akuifer bawah tanah, mata air besar, atau sungai-sungai perennial.

Sejak kemerdekaannya pada tahun 1965, Singapura sangat bergantung pada impor air dari Malaysia melalui perjanjian bilateral jangka panjang. Kondisi ketergantungan ini tidak saja rentan secara geopolitik, tetapi juga menempatkan ketahanan air nasional dalam posisi yang rapuh. Merespons ancaman eksistensial tersebut, pemerintah Singapura melalui Public Utilities Board (PUB)—lembaga air nasional—memulai transformasi fundamental dalam pengelolaan sumber daya air yang berlangsung selama beberapa dekade.

### **b.) Permasalahan yang Dihadapi**

Permasalahan inti yang dihadapi Singapura bersifat multidimensional. Dari aspek geografis, keterbatasan lahan menjadikan penampungan air hujan tidak optimal meskipun curah hujan relatif tinggi. Dari aspek sumber daya, absennya akuifer alami dan sungai-sungai besar menghalangi pemanfaatan air tanah dan air permukaan secara mandiri. Dari aspek geopolitik, ketergantungan penuh terhadap air impor dari Johor, Malaysia menciptakan kerentanan yang berulang kali menjadi titik sengketa diplomatik—termasuk ketika Malaysia mengusulkan kenaikan harga air baku dari RM 0,03 menjadi RM 6,40 per 1.000 galon imperial pada tahun 2002.

Dari aspek perubahan iklim, pola curah hujan yang semakin tidak menentu mengancam keandalan reservoir sebagai sumber air utama. Sementara itu, permintaan air diproyeksikan hampir dua kali lipat pada tahun 2065 seiring pertumbuhan populasi dan ekspansi industri, terutama sektor *wafer fabrication* yang membutuhkan kualitas air ultramurni. Keseluruhan tekanan ini membentuk kondisi krisis air struktural yang tidak dapat diselesaikan dengan pendekatan tunggal.

### **c.) Strategi Respons: Four National Taps**

Singapura merespons krisis ini dengan mengembangkan strategi diversifikasi sumber air yang dikenal sebagai Four National Taps (Empat Kran Nasional). Strategi ini mengintegrasikan empat sumber air yang saling melengkapi sehingga jika satu sumber terganggu—baik oleh variabilitas iklim, kegagalan teknis, maupun ketegangan geopolitik—sumber lain dapat mengompensasi secara otomatis.

Kran Pertama — Air Tangkapan Lokal: Singapura mengembangkan sistem tangkapan air hujan yang mencakup lebih dari dua pertiga luas pulau, menghubungkan lebih dari 8.000 km jaringan drainase, kanal, dan sungai menuju 17 reservoir yang tersebar di seluruh wilayah. Marina Barrage (2008) menjadi tonggak penting: sebuah bendungan terbaru yang mengubah muara sungai Marina menjadi reservoir air tawar seluas 590 hektar di tengah kota—merupakan tangkapan air urban pertama di Singapura. Inovasi ini memerlukan rekayasa hati-

hati untuk memisahkan air laut dari air tawar, sekaligus berfungsi sebagai pengendali banjir dan ruang rekreasi publik.

Kran Kedua — Air Impor: Air dari Reservoir Linggiu di Johor, Malaysia, dipompa melalui pipa transmisi sepanjang dua kilometer melewati Causeway. Meskipun ketergantungan ini secara bertahap dikurangi, perjanjian pasokan air tetap berlangsung sebagai buffer. Ketika perjanjian 1961 berakhir pada Agustus 2011, Singapura mampu membiarkannya berakhir tanpa gangguan pasokan—sebuah pencapaian ketahanan air yang historis.



Gambar 18. NEWater

Sumber: Karmactive.com

Kran Ketiga — NEWater (Air Daur Ulang Tingkat Tinggi): NEWater merupakan air olahan dari limbah cair domestik yang dimurnikan melalui tiga tahap proses lanjut: (1) Mikrofiltrasi/Ultrafiltrasi untuk menyaring partikel mikro dan bakteri; (2) Osmosis Balik (Reverse Osmosis/RO) menggunakan membran semipermeable berukuran sangat kecil untuk menyaring virus, bakteri, logam berat, dan senyawa organik; serta (3) Desinfeksi Ultraviolet (UV) sebagai lapisan keamanan terakhir untuk menonaktifkan sisa jejak bakteri dan virus. NEWater melampaui standar air minum WHO dan kini diproduksi oleh empat pabrik NEWater, memenuhi hingga 40% kebutuhan air total Singapura—terutama untuk industri wafer fabrication, air pendingin komersial, dan dalam kondisi kering

ditambahkan ke reservoir untuk dicampur dengan air baku sebelum diolah kembali.

Kran Keempat — Desalinasi: Pabrik desalinasi pertama beroperasi pada tahun 2005, mengolah air laut menjadi air tawar melalui teknologi Osmosis Balik. Pada tahun 2060, NEWater dan desalinasi bersama-sama ditargetkan memenuhi hingga 80% kebutuhan air total Singapura, menjadikan keduanya sebagai backbone ketahanan air jangka panjang yang sepenuhnya bebas ketergantungan cuaca.

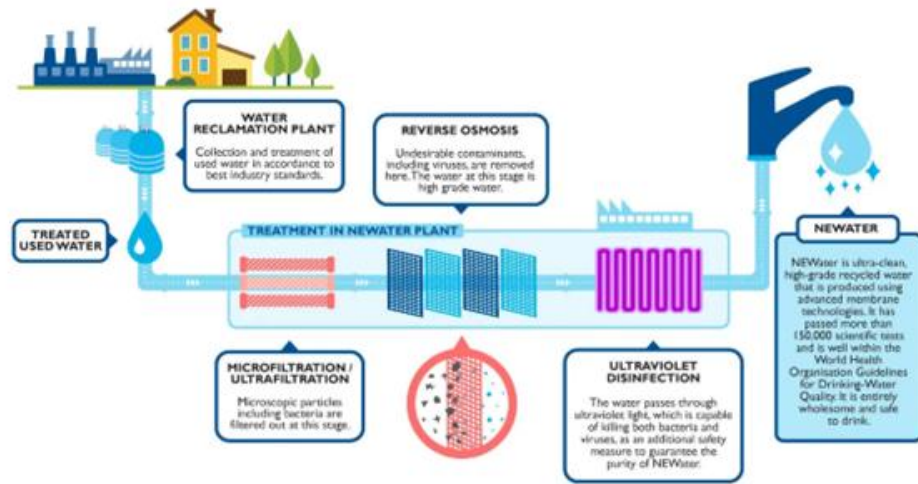
#### **d.) Desain dan Kebutuhan Ruang**

Desain sistem ketahanan air Singapura bersifat terintegrasi lintas skala—dari infrastruktur utilitas skala kota hingga bangunan pengolahan air skala tapak. Setiap komponen dirancang untuk mendukung fungsi ganda (*multi-use*): Marina Barrage berfungsi sekaligus sebagai reservoir, pengendali banjir, dan destinasi rekreasi publik. Instalasi pengolahan NEWater dirancang dengan standar kemurnian ultratinggi untuk memenuhi persyaratan industri semikonduktor yang bahkan lebih ketat dari standar air minum.

Dari aspek zonasi dan pemanfaatan ruang, Singapura menerapkan konsep ABC Waters (*Active, Beautiful, Clean Waters*)—sebuah pendekatan desain yang mengintegrasikan infrastruktur air ke dalam lanskap perkotaan secara estetik dan fungsional. Kanal-kanal air yang dulunya berupa saluran beton tertutup direvitalisasi menjadi koridor hijau-biru yang aktif digunakan masyarakat. Daerah tangkapan air mencakup kawasan perkotaan padat penduduk, sehingga tata kelola kualitas air di catchment area menjadi bagian integral dari perencanaan kota.

Fasilitas utama yang menjadi elemen ruang dalam sistem ini meliputi: (a) Instalasi Pengolahan Air (IPA/*Waterworks*) konvensional untuk mengolah air baku reservoir; (b) Water Reclamation Plants (WRP/IPAL) yang sekaligus menghasilkan air hasil daur ulang untuk input NEWater; (c) Pabrik NEWater dengan teknologi membran canggih; (d) Desalination Plants; (e) Sistem perpipaan transmisi dan distribusi terintegrasi; (f) Sistem Deep Tunnel Sewerage System (DTSS) sepanjang puluhan kilometer di bawah tanah untuk mengangkut

seluruh air limbah kota secara gravitasi menuju WRP di pesisir; serta (g) infrastruktur SCADA untuk pemantauan dan pengendalian real-time.



Gambar 19. NEWater Production Process

Sumber: Singapore National Water Agency

#### e.) Sistem yang Digunakan

Singapura menerapkan sistem water loop tertutup (*closed water loop*) yang memungkinkan setiap tetes air digunakan, diolah, dan digunakan kembali secara siklis. Teknologi kunci dalam sistem ini mencakup Membrane Bioreactor (MBR)—yang menggabungkan bioreaktor konvensional, tangki sedimentasi sekunder, dan ultrafiltrasi dalam satu langkah—sehingga meningkatkan efisiensi dan menurunkan jejak lahan pengolahan air. Sistem SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) digunakan secara ekstensif untuk pemantauan kualitas air secara real-time di seluruh rantai siklus air.

Instrumen ekonomi juga berperan sebagai sistem manajemen permintaan: tarif air ditetapkan berdasarkan biaya produksi air berikutnya (*marginal cost pricing*)—yaitu biaya produksi NEWater dan desalinasi sebagai referensi harga dasar—sehingga mendorong konservasi air secara organis. Mandatory Water Efficiency Labelling Scheme dan standar efisiensi minimum untuk peralatan berair juga diberlakukan. *Large water users* (pengguna air skala besar) di sektor

non-domestik diwajibkan menyerahkan rencana efisiensi air tahunan kepada PUB.

#### **f.) Konteks Sosial dan Kelembagaan**

Keberhasilan transformasi air Singapura tidak hanya bersandar pada teknologi, tetapi secara signifikan ditopang oleh kepercayaan publik dan penerimaan sosial. Ketika NEWater diperkenalkan pada tahun 2003, kampanye komunikasi publik yang intensif dilakukan—termasuk penjualan NEWater dalam botol plastik, pembukaan Visitor Centre edukatif, dan Perdana Menteri Goh Chok Tong meminum langsung sebotol NEWater di depan kamera. Pendekatan transparansi dan keterbukaan ilmiah ini berhasil mengatasi resistensi psikologis masyarakat terhadap air olahan dari limbah.

Dari aspek kelembagaan, penggabungan tanggung jawab pasokan air dan sanitasi di bawah satu atap PUB pada tahun 2001 merupakan langkah revolusioner yang memungkinkan pengelolaan siklus air secara holistik dan sinergis. PUB beroperasi dengan horizon perencanaan 50 hingga 100 tahun ke depan—sebuah keteguhan pandangan jangka panjang yang memungkinkan alokasi investasi publik yang efisien dan pencegahan kebutuhan retrofit infrastruktur yang disruptif.

#### **2.4.2. Obyek Studi Banding 2 : SPAM Wosusokas, Jawa Tengah**



Gambar 20. SPAM Regional Wosusokas

Sumber: BPBPK Jawa Tengah

#### **a.) Profil dan Latar Belakang**

Sistem Penyediaan Air Minum (SPAM) Regional Wosusokas merupakan proyek infrastruktur air minum skala regional yang diinisiasi oleh Pemerintah Provinsi Jawa Tengah, Indonesia. Akronim "Wosusokas" merujuk pada wilayah layanan yang mencakup Kabupaten Wonogiri, Kabupaten Sukoharjo, Kota Surakarta, dan Kabupaten Karanganyar—empat daerah di Jawa Tengah bagian selatan yang secara geografis membentuk satu kawasan metropolitan fungsional di sekitar Kota Surakarta (Solo). Proyek ini ditetapkan sebagai salah satu Proyek Strategis Nasional (PSN) yang pembiayaannya bersumber dari Anggaran Pendapatan dan Belanja Negara (APBN), dengan total nilai investasi sebesar Rp 1,29 triliun.

Pembangunan SPAM Wosusokas mulai dilaksanakan secara bertahap sejak tahun 2023 oleh Direktorat Jenderal Cipta Karya, Kementerian Pekerjaan Umum (PU), dan dioperasikan oleh PT Tirta Utama Jawa Tengah (Perseroda). Proyek ini berada dalam tahap akhir konstruksi dengan progres mencapai 93,77% pada akhir 2024 dan direncanakan diresmikan pada awal tahun 2025.

#### **b.) Permasalahan yang Dihadapi**

Kawasan Wosusokas menghadapi defisit akses air minum perpipaan yang signifikan. Berdasarkan data SUSENAS 2020, akses air minum aman di Provinsi Jawa Tengah baru mencapai 10,53% dan akses air minum perpipaan hanya 23,83%—jauh di bawah target nasional. Di wilayah kabupaten/kota yang tercakup dalam Wosusokas, sebagian besar penduduk masih mengandalkan air sumur dangkal, air permukaan, atau terminal air yang tidak terjamin keamanannya secara berkelanjutan.

Kondisi ini diperburuk oleh permasalahan sedimentasi tinggi pada Bendungan Wonogiri (Gajah Mungkur) yang menjadi andalan sumber air baku. Tingginya laju sedimentasi dari Sungai Keduang mengancam kapasitas tampung dan umur layanan bendungan. Selain itu, cakupan layanan PDAM yang ada dinilai tidak mencukupi kebutuhan pertumbuhan penduduk dan ekspansi kawasan permukiman di wilayah metropolitan Surakarta. Ketimpangan akses air minum yang aman juga berimplikasi pada tingginya prevalensi stunting dan masalah kesehatan berbasis sanitasi di wilayah tersebut.

#### **c.) Respons dan Pendekatan Solusi**

Pemerintah merespons permasalahan ini dengan membangun infrastruktur SPAM Regional yang mengintegrasikan unit produksi dan unit distribusi dalam satu sistem terpadu berskala lintas wilayah administratif. Pendekatan regional dipilih untuk mengoptimalkan pemanfaatan sumber air baku dari Waduk Gajahmungkur yang memiliki debit memadai namun selama ini belum dimaksimalkan untuk layanan perpipaan. Pembangunan diutamakan untuk pemenuhan kebutuhan domestik agar masyarakat dapat menikmati air minum berkualitas serta mendukung perbaikan kesehatan masyarakat, termasuk percepatan penurunan angka stunting.

Secara bersamaan, permasalahan sedimentasi bendungan ditangani melalui pembangunan closure dike—tanggul pemisah antara waduk utama dan waduk penampung sedimen—agar air dari Sungai Keduang yang kaya sedimen dapat difilter terlebih dahulu sebelum masuk ke waduk utama. Langkah ini bertujuan mengembalikan umur layanan Bendungan Wonogiri sesuai perencanaan awal.



Gambar 21. Jaringan Distribusi SPAM Wosusokas  
Sumber: BPBPK Jawa Tengah

#### **d.) Desain Fasilitas dan Kebutuhan Ruang**

Unit produksi SPAM Wosusokas berpusat di Instalasi Pengolahan Air (IPA) Gajah Mungkur yang berlokasi di Kabupaten Wonogiri, dikerjakan oleh PT Adhi Karya dengan biaya Rp 244,8 miliar. IPA ini terdiri dari 3 (tiga) unit pengolahan air dengan kapasitas masing-masing 250 liter/detik, menghasilkan total kapasitas produksi 750 liter/detik (Tahap I). Kapasitas ini direncanakan ditingkatkan pada Tahap II sebesar 700 liter/detik, sehingga kapasitas total SPAM Wosusokas mencapai 1.450 liter/detik.

Kebutuhan ruang pada kompleks IPA Gajah Mungkur mencakup: (a) tiga unit bangunan IPA berkapasitas masing-masing 250 l/dt; (b) satu unit reservoir produksi berkapasitas 3.500 m<sup>3</sup>; (c) kantor operasional dan administrasi; (d) ruang kontrol SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition); (e) bangunan rumah kimia untuk penyimpanan dan dosis bahan kimia pengolahan; (f) rumah genset sebagai sumber daya cadangan; (g) rumah pompa distribusi; (h) workshop pemeliharaan; (i) bangunan pengolahan limbah B3; (j) empat unit Sludge Drying Bed (SDB) untuk pengolahan lumpur hasil pengolahan air; serta (k) fasilitas penunjang berupa rumah jaga, pos keamanan, dan musala.

Unit distribusi dibangun melalui Jaringan Distribusi Umum (JDU) utama sepanjang 83 km yang terbagi dalam 4 (empat) segmen berdasarkan wilayah layanan: Segmen 1 melayani 8.000 SR di 2 kecamatan Kabupaten Wonogiri (dikerjakan PT Brantas Abipraya, Rp 235,6 miliar); Segmen 2 melayani 4.000 SR di 2 kecamatan Wonogiri; Segmen 3 melayani 20.000 SR di 3 kecamatan Kabupaten Sukoharjo; dan Segmen 4 melayani 28.000 SR yang mencakup 1 kecamatan di Sukoharjo, 2 kecamatan di Kota Surakarta, dan 2 kecamatan di Karanganyar (dikerjakan PT Wika-Gemilang KSO, Rp 263,4 miliar). Pada setiap segmen dibangun pula reservoir distribusi sebagai titik offtake bagi PDAM setempat.

#### **e.) Sistem yang Digunakan**

Sumber air baku SPAM Wosusokas berasal dari Waduk Gajahmungkur, disalurkan melalui Intake Silo yang dibangun oleh Ditjen Sumber Daya Air pada 2016–2018. Proses pengolahan di IPA menggunakan metode konvensional meliputi koagulasi, flokulasi, sedimentasi, filtrasi, dan klorinasi untuk menghasilkan air minum yang memenuhi standar baku mutu Peraturan Menteri Kesehatan. Sistem SCADA diimplementasikan untuk pemantauan dan pengendalian proses pengolahan secara terpusat dari ruang kontrol.

Sistem distribusi menggunakan perpipaan bertekanan dengan reservoir distribusi di setiap titik offtake sebagai buffer penyeimbang tekanan dan volume. Jaringan pipa JDU sepanjang 83 km menggunakan material pipa HDPE dan pipa baja bertekanan sesuai standar teknis yang berlaku. Sistem ini diintegrasikan dengan jaringan distribusi PDAM kabupaten/kota eksisting yang berfungsi sebagai last-mile delivery menuju sambungan rumah tangga.

#### **f.) Zonasi dan Konteks Sosial**

Dari aspek zonasi, SPAM Wosusokas membagi wilayah layanan berdasarkan segmen distribusi yang mengikuti batas-batas administratif kecamatan. Zona produksi terpusat di Wonogiri (dekat sumber air baku), sementara zona distribusi membentang ke arah utara dan barat menuju Sukoharjo, Surakarta, dan Karanganyar—sesuai pola topografi dan gradient tekanan distribusi. Pengelolaan institusional mengikuti hierarki: PT Tirta Utama Jawa Tengah sebagai pengelola sistem regional (bulk supply), PDAM kabupaten/kota sebagai penerima air curah (off-taker) dan pengelola distribusi lokal.

Secara sosial, proyek ini menysasar 60.000 SR atau setara dengan sekitar 240.000 jiwa penerima manfaat langsung di empat daerah. Prioritas layanan diarahkan pada kawasan padat penduduk dengan akses air minum aman rendah, kawasan dengan prevalensi stunting tinggi, serta kawasan yang selama ini mengandalkan air tanah dangkal yang rentan kontaminasi. Pembangunan infrastruktur ini dinilai sebagai katalis peningkatan kualitas kesehatan masyarakat dan perbaikan layanan dasar yang berimplikasi luas pada produktivitas dan kualitas hidup penduduk.

#### **2.4.3. Obyek Studi Banding 3 : SPAM Regional Umbulan, Jawa Timur**



Gambar 22. SPAM Regional Umbulan Jawa Timur

#### **a.) Profil dan Latar Belakang**

SPAM Regional Umbulan merupakan proyek penyediaan air minum regional terbesar dan paling strategis di Indonesia yang saat ini telah beroperasi penuh. Proyek ini berlokasi di Kabupaten Pasuruan, Provinsi Jawa Timur, dengan sumber air baku berasal dari mata air Umbulan di Kecamatan Winongan, Kabupaten Pasuruan—sebuah mata air alami terlindungi yang pertama kali ditemukan pada tahun 1916 dan potensi debitnya mencapai 5.000 liter/detik. SPAM Umbulan memiliki kapasitas terbangun sebesar 3.920 liter/detik dan ditargetkan melayani 1,3 juta sambungan rumah tangga di lima kabupaten/kota.

Proyek ini diresmikan oleh Presiden Joko Widodo pada 22 Maret 2021—bertepatan dengan Hari Air Dunia—setelah melalui proses perencanaan yang panjang sejak inisiasi awal pada tahun 1970-an. Total nilai investasi proyek mencapai Rp 2,58 triliun, dan dikelola oleh PT Meta Adhya Tirta Umbulan sebagai Badan Usaha Pelaksana (BUP) di bawah skema Kerja Sama Pemerintah dengan Badan Usaha (KPBU) dengan skema Build-Operate-Transfer (BOT) masa konsesi 25 tahun 9 bulan. Proyek ini mendapatkan Dukungan Kelayakan (Viability Gap Fund/VGF) dari Pemerintah Pusat sebesar Rp 818 miliar, dan mendapat pengakuan internasional termasuk penghargaan dari Perserikatan Bangsa-Bangsa.

#### **b.) Permasalahan yang Dihadapi**

Permasalahan mendasar yang mendorong lahirnya SPAM Umbulan adalah ketidakseimbangan antara potensi sumber air baku yang melimpah dengan keterbatasan akses air minum aman di wilayah hilir. Mata air Umbulan dengan potensi 5.000 l/dt hanya dimanfaatkan secara minimal oleh PDAM setempat, sementara jutaan warga di Surabaya, Sidoarjo, Gresik, dan daerah sekitarnya bergantung pada air tanah yang semakin terancam deplesi dan kontaminasi akibat ekstraksi berlebihan dan industrialisasi.

Permasalahan kelembagaan juga menjadi hambatan utama: ego sektoral antarwilayah administratif menghalangi pengelolaan bersama sumber air lintas batas. Masing-masing PDAM kabupaten/kota beroperasi secara terpisah dengan kapasitas terbatas, sementara potensi sumber air lintas kabupaten tidak dapat dioptimalkan karena absennya kerangka kerja sama lintas yurisdiksi yang memadai. Keterbatasan anggaran pemerintah daerah untuk investasi infrastruktur skala besar juga menjadi bottleneck yang membuat proyek ini tertunda selama puluhan tahun.

### **c.) Respons dan Inovasi Skema KPBU**

Terobosan utama SPAM Umbulan terletak pada inovasinya di aspek skema pembiayaan. Sebagai proyek KPBU air minum regional pertama di Indonesia, proyek ini membuktikan bahwa infrastruktur dasar air minum dapat berhasil dibiayai melalui kemitraan publik-swasta tanpa membebani anggaran pemerintah secara penuh. Skema BOT memungkinkan pihak swasta (BUP) membangun dan mengoperasikan infrastruktur selama masa konsesi, dengan tarif yang ditentukan berdasarkan Perjanjian Kerja Sama dan dikalibrasi agar terjangkau masyarakat—Gubernur Jatim kala itu menolak tarif Rp 7.000/m<sup>3</sup> dan mendorong tarif Rp 2.400/m<sup>3</sup> sebagai bentuk keberpihakan kepada masyarakat kecil.

Sinergi lintas kementerian dan pemerintah daerah menjadi kunci keberhasilan: Kementerian Koordinator Bidang Perekonomian, Kementerian Keuangan, Kementerian PUPR, Pemerintah Provinsi Jawa Timur, lima pemerintah kabupaten/kota, PT Sarana Multi Infrastruktur, dan PT Penjaminan Infrastruktur Indonesia bekerja secara terkoordinasi dalam satu platform tata kelola proyek. Pengalaman SPAM Umbulan kemudian menjadi rujukan bagi proyek-proyek SPAM regional lain di Indonesia, termasuk SPAM Wosusokas.

### **d.) Desain Fasilitas dan Kebutuhan Ruang**

Lingkup fisik SPAM Umbulan mencakup: (a) sistem intake dari mata air Umbulan—yang karena kualitas airnya yang sangat baik sebagai mata air terlindungi tidak memerlukan pengolahan rumit; (b) jaringan pipa transmisi sepanjang 93 km dari Umbulan-Pasuruan hingga Gresik; (c) sistem offtake berupa 18 titik reservoir di 5 kabupaten/kota; (d) unit rumah pompa dan meter induk; serta (e) sistem pemantauan terintegrasi.

Keistimewaan desain SPAM Umbulan dibanding SPAM berbasis waduk seperti Wosusokas terletak pada simplifikasi proses pengolahan: karena bersumber dari mata air terlindungi dengan kualitas yang sudah sangat baik, proses pengolahan di SPAM Umbulan dapat lebih sederhana dibanding pengolahan air waduk yang memerlukan koagulasi, flokulasi, dan sedimentasi. Hal ini berdampak pada kebutuhan lahan yang lebih efisien, biaya operasional yang lebih rendah, dan jejak lingkungan yang lebih kecil. Total kapasitas sistem mencapai 4.000 l/dt dengan 18 titik offtake yang tersebar di

seluruh wilayah layanan, menciptakan jaringan distribusi curah (bulk supply) yang komprehensif.

#### **e.) Sistem yang Digunakan**

Sistem SPAM Umbulan mengandalkan keunggulan gravitasi alami mata air: air mengalir dari sumbernya (Umbulan, elevasi lebih tinggi) menuju wilayah layanan tanpa memerlukan pemompaan dalam volume besar di sisi hulu, sehingga konsumsi energi untuk transmisi dapat diminimalkan. Sistem DBFOMT (Design-Build-Finance-Operate-Maintain-Transfer) yang diterapkan memastikan tanggung jawab desain, konstruksi, pembiayaan, operasi, dan pemeliharaan berada dalam satu entitas, meminimalkan fragmentasi tanggung jawab dan risiko koordinasi antarpihak.

Jaringan pipa transmisi 93 km menggunakan teknologi perpipaan bertekanan tinggi dengan sistem monitoring jarak jauh. Integrasi dengan jaringan distribusi PDAM lokal di 5 kabupaten/kota dilakukan melalui 18 titik offtake, di mana PDAM setempat mengambil alih fungsi distribusi last-mile menuju sambungan rumah tangga. Perjanjian Jual Beli Air Curah (PJBA) antara BUP dengan PDAM lokal menjadi instrumen komersial yang mengatur volume pembelian, kualitas air, dan mekanisme harga.

#### **f.) Konteks Sosial dan Dampak**

SPAM Umbulan memberikan manfaat langsung bagi lebih dari 1,6 juta jiwa di lima kabupaten/kota Jawa Timur. Dampak sosial yang dirasakan mencakup peningkatan kualitas air minum yang signifikan dibanding air sumur yang sebelumnya digunakan, penurunan biaya konsumsi air bagi rumah tangga yang sebelumnya membeli air dari tangki, serta peningkatan kapasitas industri dan kawasan ekonomi yang membutuhkan pasokan air bersih andal. Proyek ini juga membuka lapangan kerja konstruksi dan operasional, sekaligus menjadi katalis pertumbuhan ekonomi regional di Jawa Timur.

Setelah beroperasi, tantangan sosial-kelembagaan yang muncul adalah memastikan utilisasi kapasitas yang optimal: Presiden Jokowi dalam pidato peresmian secara khusus mengingatkan bahwa proyek besar ini tidak boleh berakhir sebagai infrastruktur mangkrak akibat ketidakjelasan tanggung jawab distribusi last-mile dari sistem regional ke jaringan PDAM kabupaten/kota. Tantangan koordinasi lintas yurisdiksi ini menjadi pelajaran penting bagi pengelolaan SPAM regional di Indonesia secara umum..

#### 2.4.4. Analisis Komparatif

Ketiga preseden yang dikaji memiliki karakteristik yang berbeda namun saling melengkapi dalam memberikan pelajaran bagi perencanaan infrastruktur air minum. Analisis komparatif berikut menyoroti persamaan dan perbedaan dari berbagai dimensi kajian, meliputi: skala dan konteks, permasalahan, respons, desain dan kebutuhan ruang, sistem teknis, zonasi, serta konteks sosial-kelembagaan.

| Aspek Kajian              | Singapore Four National Taps                                                                             | SPAM Regional Wosusokas (Jateng)                                                           | SPAM Regional Umbulan (Jatim)                                                                                              |
|---------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Lokasi &amp; Skala</b> | Kota-Negara (City-State); 728 km <sup>2</sup> ; Nasional                                                 | 4 Kab/Kota: Wonogiri, Sukoharjo, Surakarta, Karanganyar; Regional Jateng                   | 5 Kab/Kota: Pasuruan, Sidoarjo, Surabaya, Gresik, Kota Pasuruan; Regional Jatim                                            |
| <b>Sumber Air Baku</b>    | Reservoir (hujan), Impor, Air Limbah Daur Ulang (NEWater), Air Laut (Desalinasi)                         | Waduk Gajahmungkur (Bengawan Solo), intake gravitasi                                       | Mata Air Umbulan (5.000 l/dt), Kec. Winongan, Kab. Pasuruan                                                                |
| <b>Permasalahan Utama</b> | Ketergantungan impor air; lahan tangkapan terbatas; absensi akuifer; ancaman geopolitik; perubahan iklim | Defisit akses air perpipaan; sedimentasi waduk; ketimpangan layanan PDAM; masalah stunting | Sumber air baku berlimpah tidak termanfaatkan; ego sektoral antar-wilayah; keterbatasan APBD daerah; akses air aman rendah |
| <b>Respons/Pendekatan</b> | Diversifikasi sumber (Four Taps); inovasi teknologi tinggi; closed water loop;                           | Pembangunan SPAM Regional terpadu berbasis APBN; integrasi                                 | Skema KPBU (BOT) pertama di sektor air minum Indonesia;                                                                    |

|                                            |                                                                                                                                       |                                                                                                                                    |                                                                                                                                           |
|--------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                            | long-range planning<br>50-100 tahun                                                                                                   | unit produksi &<br>distribusi lintas<br>kabupaten                                                                                  | sinergi multi-pihak<br>pusat-provinsi-daerah                                                                                              |
| <b>Skema Pembiayaan</b>                    | Pemerintah Nasional<br>(PUB) + pricing<br>volumetric untuk cost<br>recovery                                                           | APBN (Ditjen<br>Cipta Karya,<br>Kemenpupr)—<br>sepenuhnya<br>pemerintah                                                            | KPBU/PPP: BOT 25<br>tahun 9 bulan; VGF<br>Rp 818 miliar dari<br>APBN; ekuitas +<br>pinjaman bank<br>sindikasi swasta                      |
| <b>Kapasitas Produksi</b>                  | Total >430 MGD<br>(~1.900 l/dt)—<br>terdistribusi di banyak<br>fasilitas                                                              | Tahap I: 750 l/dt;<br>Tahap II (+700<br>l/dt); Total<br>rencana: 1.450 l/dt                                                        | Kapasitas operasi:<br>3.920 l/dt; target<br>rencana: 4.000 l/dt                                                                           |
| <b>Nilai Investasi</b>                     | Miliaran USD<br>(akumulasi puluhan<br>tahun)                                                                                          | Rp 1,29 Triliun<br>(APBN)                                                                                                          | Rp 2,58 Triliun<br>(KPBU)                                                                                                                 |
| <b>Sistem Pengolahan</b>                   | Konvensional<br>(reservoir), MBR +<br>MF + RO + UV<br>(NEWater), RO<br>(Desalinasi); sistem<br>berlapis sangat<br>canggih             | Konvensional:<br>koagulasi,<br>flokulasi,<br>sedimentasi,<br>filtrasi pasir,<br>klorinasi—sesuai<br>standar SNI air<br>minum       | Pengolahan minimal<br>karena mata air<br>terlindungi berkualitas<br>tinggi; tidak<br>memerlukan<br>koagulasi/flokulasi                    |
| <b>Fasilitas Utama<br/>(Unit Produksi)</b> | IPA/Waterworks,<br>Water Reclamation<br>Plants, NEWater<br>Plants, Desalination<br>Plants, DTSS (tunnel<br>sewerage), 17<br>reservoir | 3 unit IPA @ 250<br>l/dt; reservoir<br>3.500 m <sup>3</sup> ;<br>SCADA; rumah<br>kimia; rumah<br>genset; rumah<br>pompa; workshop; | Sistem intake mata air;<br>IPA sederhana;<br>reservoir produksi;<br>rumah pompa; meter<br>induk; 18 titik offtake<br>reservoir distribusi |

|                             |                                                                                                                                               |                                                                                                                                    |                                                                                                                          |
|-----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                             |                                                                                                                                               | 4 SDB; fasilitas limbah B3                                                                                                         |                                                                                                                          |
| <b>Jaringan Distribusi</b>  | Perpipaan nasional terintegrasi; dedicated NEWater pipeline untuk industri; distribusi air minum umum tersendiri                              | JDU 83 km terbagi 4 segmen; reservoir distribusi di tiap segmen; sistem bulk supply ke PDAM lokal                                  | Pipa transmisi 93 km (Umbulan–Gresik); 18 titik offtake; sistem bulk supply ke 5 PDAM                                    |
| <b>Teknologi Monitoring</b> | SCADA terintegrasi skala nasional; sensor kualitas air real-time di seluruh jaringan; sistem GIS                                              | SCADA di ruang kontrol IPA; monitoring jaringan distribusi utama                                                                   | Sistem monitoring jarak jauh untuk pipa transmisi 93 km; meter induk di tiap offtake                                     |
| <b>Zonasi Layanan</b>       | Seluruh wilayah nasional; zona industri mendapat NEWater; zona domestik mendapat air minum standar; ABC Waters mengintegrasikan ke ruang kota | Zona produksi: Wonogiri (dekat waduk); zona distribusi: 4 segmen berbasis kecamatan di Wonogiri, Sukoharjo, Surakarta, Karanganyar | Zona produksi: Kec. Winongan, Kab. Pasuruan; zona transmisi: sepanjang 93 km; zona distribusi: 5 kab/kota via PDAM lokal |
| <b>Cakupan Layanan</b>      | ±430 MGD total; 40% dari NEWater; lebih dari 5 juta penduduk                                                                                  | 60.000 SR; ±240.000 jiwa                                                                                                           | 1,3 juta SR; ±1,6 juta jiwa langsung                                                                                     |
| <b>Model Pengelolaan</b>    | PUB (National Water Agency)—single authority mengelola seluruh siklus air                                                                     | PT Tirta Utama Jawa Tengah (Perseroda) — bulk supply;                                                                              | PT Meta Adhya Tirta Umbulan (BUP/Swasta) — bulk supply; 5 PDAM                                                           |

|                                         |                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                              |                                                                                                                                                      |
|-----------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                         | (produksi hingga sanitasi)                                                                                                                                       | PDAM kab/kota — distribusi last-mile                                                                                                         | kab/kota — distribusi last-mile                                                                                                                      |
| <b>Konteks Sosial</b>                   | Penerimaan publik terhadap NEWater dibangun melalui kampanye transparansi sains; water pricing sebagai instrumen konservasi; budaya water-consciousness nasional | Target penurunan stunting; peningkatan akses dasar kawasan miskin akses air; mendorong pertumbuhan metropolitan Surakarta                    | Mengatasi ego daerah; 1,6 juta jiwa penerima manfaat; katalis ekonomi regional; pilot model PPP air minum Indonesia; penghargaan PBB                 |
| <b>Inovasi Kunci</b>                    | NEWater (water reuse); Four Taps diversification; closed water loop; 100-year planning horizon; ABC Waters design approach                                       | Closure dike untuk pengendalian sedimentasi waduk; sistem SPAM regional lintas kabupaten berbasis APBN                                       | Pertama KPBU air minum Indonesia; gravity-fed system efisiensi energi tinggi; BOT 25 tahun; VGF sebagai katalis investasi swasta                     |
| <b>Pelajaran Utama (Lesson Learned)</b> | Diversifikasi sumber + kelembagaan tunggal + visi jangka panjang = ketahanan air berkelanjutan; teknologi + sosial = kunci keberhasilan                          | Pengelolaan sumber air baku (waduk) harus integral dengan pengendalian sedimentasi; SPAM regional memerlukan hierarki pengelolaan yang jelas | Skema KPBU efektif untuk proyek air minum berskala besar; koordinasi lintas yurisdiksi adalah kunci; distribusi last-mile harus dirancang sejak awal |

Tabel 1. Matriks Analisis Komparatif Preseden

Kajian komparatif terhadap ketiga preseden mengungkapkan beberapa benang merah dan perbedaan fundamental yang penting untuk dipahami dalam konteks perancangan sistem penyediaan air minum.

Pertama, dari sisi permasalahan, ketiga kasus menunjukkan bahwa krisis air tidak selalu disebabkan oleh kekurangan air secara fisik, melainkan seringkali merupakan akibat dari kegagalan pengelolaan, fragmentasi kelembagaan, dan keterbatasan investasi infrastruktur. Singapura menghadapi ketiadaan sumber air alami yang memadai dan ketergantungan geopolitik; Wosusokas menghadapi defisit distribusi di tengah ketersediaan sumber air baku yang ada; sedangkan Umbulan menghadapi kondisi paradoks di mana sumber air berlimpah tidak dimanfaatkan karena hambatan koordinasi dan pembiayaan.

Kedua, dari sisi respons dan desain sistem, terdapat perbedaan mendasar antara sistem berbasis diversifikasi sumber (Singapura) dengan sistem berbasis optimalisasi sumber tunggal (Wosusokas dan Umbulan). Sistem Singapura membangun redundansi