

BAB 2

Tinjauan Pustaka

2.1 Air untuk Kehidupan

Jumlah air bersih yang dibutuhkan setiap orang per hari dapat bervariasi berdasarkan pedoman dan keadaan masing-masing individu. Sementara UNICEF dan WHO memberikan persyaratan minimum tertentu, rekomendasi umum untuk asupan air harian adalah sekitar 2,5 hingga 3,7 liter, tergantung pada jenis kelamin dan faktor lainnya. Penting untuk mempertimbangkan kebutuhan individu dan kondisi lingkungan saat menentukan kebutuhan air harian.

Kebutuhan air dapat bervariasi secara signifikan berdasarkan beberapa faktor:

- Perbedaan Individu: Faktor-faktor seperti jenis kelamin, usia, status kesehatan, gaya hidup, dan pola makan dapat mempengaruhi kebutuhan air individu [2].
- Kondisi Lingkungan: Kelembaban dan suhu udara juga memainkan peran penting dalam menentukan kebutuhan air harian [2].
- Aktivitas Fisik dan Tekanan Panas: Latihan fisik yang berat dan paparan panas dapat meningkatkan kebutuhan air harian secara signifikan [1].

Tabel 2 Ringkasan Kebutuhan Air Harian

Sumber/Organisasi	Kebutuhan Air Harian (Liter)	Catatan	Referensi
UNICEF	25	Termasuk 2 liter untuk minum	[3]
WHO	7,5	Untuk minum, makanan, dan kebersihan	[4]
WHO	50	Untuk memenuhi semua kebutuhan	[4]
Populasi Umum	3,7 (pria), 2,7 (wanita)	Mencakup semua sumber air	[1]
Standar Gizi	2,5	Termasuk produk cair	[2]

2.2 Air Bersih untuk Perkotaan

Kepadatan penduduk di daerah perkotaan secara signifikan berdampak pada ketersediaan dan kualitas air bersih melalui peningkatan permintaan, polusi, tantangan infrastruktur, dan faktor sosial ekonomi. Empat faktor utama dampak kepadatan tersebut adalah: (1) Peningkatan Permintaan: Kepadatan penduduk yang lebih tinggi meningkatkan konsumsi air, sehingga membebani sistem pasokan [35] [36]; (2) Polusi: Urbanisasi menyebabkan polusi air dari limbah rumah tangga dan limbah yang tidak diolah [37, 38]; (3) Infrastruktur: Kurangnya sanitasi yang memadai dan pembangunan infrastruktur memperburuk kualitas air [12, 39, 40]; (4) Faktor Ekonomi: Pergeseran sosial ekonomi berdampak pada permintaan air dan efisiensi pasokan [41, 42]. Rincian mekanisme keempat faktor tersebut dijelaskan sebagai berikut:

Peningkatan Kebutuhan Air: Kepadatan penduduk yang lebih tinggi menyebabkan peningkatan konsumsi air, yang dapat membebani sistem pasokan air yang ada. Hal ini terlihat jelas di kota-kota seperti Mexico City, di mana kepadatan penduduk yang tinggi telah mengakibatkan penurunan rata-rata konsumsi air per kapita sebesar 40% dan meningkatkan ketidaksetaraan dalam akses air minum [35]. Demikian pula di Indonesia, kondisi kehidupan perkotaan yang padat telah menyebabkan eksploitasi sumber daya air tanah yang berlebihan, sehingga mengurangi ketersediaan air bersih [36].

Polusi Air: Urbanisasi dan kepadatan penduduk yang tinggi berkontribusi terhadap polusi air melalui peningkatan limbah rumah tangga, limbah yang tidak diolah, dan limpasan perkotaan yang terkontaminasi. Polusi ini menurunkan kualitas air sehingga tidak layak untuk dikonsumsi. Sebagai contoh, di Vijayawada, India, polusi industri dan rumah tangga telah berdampak secara signifikan terhadap kualitas air tanah [37]. Selain itu, urbanisasi yang cepat di Amerika Utara telah menunjukkan bahwa kepadatan penduduk yang lebih tinggi dapat menyebabkan peningkatan energi pemompaan dan energi yang terkandung dalam sistem distribusi air, yang semakin memperumit ketersediaan air bersih [38].

Tantangan Infrastruktur: Pertumbuhan hunian yang tidak teratur dan kurangnya sistem sanitasi yang memadai di daerah perkotaan yang padat penduduknya memperparah penurunan kualitas air. Situasi ini diperparah dengan ketidakmampuan untuk mengimbangi laju pertumbuhan perkotaan dengan perencanaan dan pembangunan infrastruktur yang tepat, yang menyebabkan sebagian besar penduduk perkotaan hidup tanpa sanitasi yang layak [12, 39]. Di kota-kota di Afrika, kurang dari separuh penduduk perkotaan memiliki akses terhadap sumber air bersih, menyoroti kesenjangan infrastruktur [40].

Faktor Ekonomi dan Sosial: Pergeseran sosial ekonomi, seperti gentrifikasi, dapat mengubah distribusi temporal dari kebutuhan puncak air harian, yang berdampak pada efisiensi sistem air. Di kota-kota seperti Washington D.C. dan Atlanta, pergeseran ini tidak dapat diabaikan karena secara signifikan mempengaruhi operasi pasokan air [41]. Selain itu, insentif politik di negara-negara berkembang sering memprioritaskan daerah perkotaan untuk pembangunan infrastruktur air karena tekanan industrialisasi, yang selanjutnya berdampak pada akses air di daerah pedesaan [42].

Untuk mengatasi masalah ini, diperlukan perencanaan kota yang komprehensif, sistem sanitasi yang lebih baik, dan kebijakan air yang adil untuk memastikan akses air bersih yang berkelanjutan bagi semua penduduk perkotaan.

2.3 Masalah dan Alternatif Solusi Air Bersih Perkotaan

Untuk memahami faktor-faktor utama yang berkontribusi terhadap pencemaran air di wilayah perkotaan, beberapa sumber dan mekanisme dapat diidentifikasi berdasarkan kajian pustaka:

2.1.1 Penyebab Utama Kontaminasi Air di Daerah Perkotaan

Kegiatan Industri:

Logam Berat dan Senyawa Beracun : Industri merupakan penyumbang utama pencemaran air tanah melalui pelepasan senyawa beracun, termasuk hidrokarbon terklorinasi, logam berat (misalnya timbal, kadmium, kromium, merkuri), dan polutan persisten lainnya. [43–45].

Air Limbah Industri : Air limbah industri yang seringkali tidak diolah merupakan sumber utama polutan seperti COD, TSS, dan berbagai logam berat, yang menimbulkan ancaman serius terhadap ekosistem perairan dan kesehatan manusia. [45].

Limpasan Perkotaan:

Limpasan Air Badai : Limpasan perkotaan, terutama selama musim hujan, membawa berbagai macam polutan termasuk sedimen, nutrisi, logam berat, hidrokarbon, dan kontaminan mikroba dari permukaan kedap air ke badan air. [46–49].

Endapan yang Terendap di Jalan : Polutan dari endapan yang terendap di jalan, dipengaruhi oleh penggunaan lahan dan lalu lintas, berdampak signifikan terhadap kualitas air hujan. [50].

2.1.2 Sistem Air Limbah dan Pembuangan Limbah

Kebocoran Saluran Pembuangan Limbah dan Tangki Septik : Kebocoran dari sistem pembuangan limbah dan tangki septik membawa patogen, nitrat, fosfat, dan kontaminan lainnya ke dalam air tanah dan air permukaan. [43, 51–53].

Luapan Limbah Gabungan : Saat hujan deras, luapan limbah gabungan dapat membuang limbah yang belum diolah ke perairan permukaan, sehingga menyebabkan pencemaran [52].

Limpasan Pertanian

Pencucian Nutrisi dan Pestisida : Kegiatan pertanian di dekat wilayah perkotaan berkontribusi terhadap pencemaran air melalui pencucian nutrisi (misalnya nitrat, fosfat) dan pestisida ke dalam badan air. [43, 54].

2.1.3 Sampah Kota dan Tempat Pembuangan Akhir (TPA)

Lindi : Tempat pembuangan sampah kota menghasilkan lindi yang mengandung berbagai polutan, termasuk logam berat dan kontaminan organik, yang dapat meresap ke dalam air tanah. [43, 51].

Perubahan Iklim dan Perubahan Hidrologi

Peningkatan Limpasan dan Banjir : Perubahan iklim dan urbanisasi menyebabkan peningkatan limpasan dan banjir, yang memperburuk transportasi polutan ke badan air. [55].

Perubahan Hidrodinamik : Pemompaan air tanah yang berlebihan dan perubahan pola hidrologi dapat menyebabkan kontaminasi melalui aliran yang saling berhubungan [51].

Kontaminasi Mikroba

Mikroorganisme Patogen : Sistem air perkotaan sering terkontaminasi dengan mikroorganisme patogen akibat pengolahan air limbah dan limpasan air hujan yang tidak memadai. [47, 53, 56].

Kontaminan yang Muncul

Produk Farmasi dan Perawatan Pribadi : Kontaminan baru ini semakin banyak ditemukan di sistem air perkotaan, yang sering kali berasal dari limbah dan limpasan air hujan. [52].

Tabel 3. Ringkasan Penyebab Pencemaran air di perkotaan

Sumber	Kontaminan	Mekanisme
Kegiatan Industri	Logam berat, hidrokarbon terklorinasi, COD, TSS	Pembuangan air limbah industri, tangki/pipa bocor
Limpasan Perkotaan	Sedimen, nutrisi, logam berat, hidrokarbon, kontaminan mikroba	Limpasan air hujan dari permukaan kedap air
Air Limbah dan Limbah	Patogen, nitrat, fosfat, logam berat	Saluran pembuangan bocor, tangki septik, luapan saluran pembuangan gabungan
Limpasan Pertanian	Nutrisi, pestisida	Pencucian, limpasan permukaan
Sampah Kota dan Tempat Pembuangan Akhir (TPA)	Logam berat, kontaminan organik	Lindi dari tempat pembuangan sampah
Perubahan Iklim	Peningkatan limpasan, banjir	Peningkatan transportasi polutan
Kontaminasi Mikroba	Mikroorganisme patogen	Pengolahan air limbah yang tidak memadai, limpasan air hujan
Kontaminan yang Muncul	Farmasi, produk perawatan pribadi	Limbah, limpasan air hujan

Faktor-faktor ini secara kolektif berkontribusi terhadap permasalahan kompleks pencemaran air di wilayah perkotaan, sehingga memerlukan pendekatan manajemen terpadu untuk mengurangi dampaknya. [49, 57, 58].

2.4 Tantangan Infrastruktur Air di Wilayah Perkotaan yang Berkembang Pesat

Memelihara infrastruktur air di wilayah perkotaan yang berkembang pesat memiliki beberapa tantangan yang signifikan. Tantangan-tantangan ini dapat dikategorikan secara luas ke dalam isu-isu keuangan, teknis, lingkungan, dan tata kelola.

2.2.1 Tantangan Finansial

- **Biaya Tinggi:** Memperluas dan memperbaiki infrastruktur yang ada untuk mengimbangi pertumbuhan perkotaan membutuhkan biaya yang besar. Perbaikan infrastruktur yang ada sangat mahal tetapi penting untuk mempertahankan akses terhadap air dan sanitasi [59].
- **Sumber Daya Keuangan Terbatas:** Banyak negara berkembang berjuang dengan sumber daya keuangan yang terbatas, sehingga sulit untuk mengimbangi urbanisasi yang cepat dan kebutuhan infrastruktur air yang terkait [60].

2.2.2 Tantangan Teknis

- **Infrastruktur yang Menua:** Sebagian besar infrastruktur air yang ada saat ini sudah tua dan tidak dirancang untuk menangani permintaan saat ini dan di masa depan dari populasi perkotaan yang berkembang pesat [61, 62].
- **Kendala Kapasitas:** Sistem yang ada seringkali mencapai batas kapasitas, sehingga membutuhkan investasi yang signifikan dalam infrastruktur baru atau peningkatan sistem yang sudah ada [63].
- **Diperlukan Solusi Inovatif:** Diperlukan pendekatan inovatif, seperti sistem desentralisasi dan pengelolaan air perkotaan yang terintegrasi, untuk mengatasi tantangan teknis ini secara efektif [64].

2.2.3 Tantangan Lingkungan

- **Kelangkaan Air:** Urbanisasi yang cepat memperburuk masalah kelangkaan air, dengan banyak kota yang berjuang untuk mendapatkan pasokan air yang cukup untuk populasi mereka yang terus bertambah [65, 66].
- **Perubahan Iklim:** Dampak perubahan iklim, seperti meningkatnya frekuensi kejadian cuaca ekstrem, semakin membebani infrastruktur air perkotaan, yang mengarah pada masalah seperti banjir dan kekurangan air [67, 68].
- **Polusi:** Daerah perkotaan berkontribusi secara signifikan terhadap polusi air, mempersulit pengelolaan kualitas air dan meningkatkan kebutuhan akan teknologi pengolahan yang canggih [69, 70].

2.2.4 Tantangan Tata Kelola dan Perencanaan

- **Pertumbuhan Perkotaan yang Tidak Dapat Diprediksi:** Pertumbuhan kota yang tidak dapat diprediksi membuat perencanaan dan perancangan infrastruktur air menjadi sangat menantang [71].

- Sistem Kelembagaan yang Kompleks: Pengelolaan infrastruktur air perkotaan seringkali melibatkan sistem kelembagaan yang kompleks dengan kewenangan dan tanggung jawab yang tidak jelas, sehingga menyebabkan inefisiensi [62].
- Integrasi dengan Perencanaan Kota: Perencanaan layanan air minum yang efektif harus diintegrasikan dengan upaya perencanaan kota yang lebih luas untuk memastikan pembangunan yang berkelanjutan [23].

Strategi Utama untuk Mengatasi Tantangan

- Perencanaan dan Regulasi yang Efektif: Kebijakan yang jelas mengenai tujuan, prioritas, dan standar layanan sangat penting untuk keberhasilan pengelolaan infrastruktur air [59].
- Pengembangan Kapasitas dan Pelatihan: Membangun kapasitas lembaga lokal dan melatih personel sangat penting untuk memelihara dan mengoperasikan infrastruktur air secara efektif [59].
- Pengadopsian Sistem Desentralisasi: Bergerak menuju infrastruktur air yang terdesentralisasi dapat meningkatkan ketahanan dan keberlanjutan, terutama di daerah perkotaan yang berkembang pesat [64].
- Pemeliharaan infrastruktur air di daerah perkotaan yang berkembang pesat membutuhkan penanganan berbagai tantangan keuangan, teknis, lingkungan, dan tata kelola yang kompleks. Solusi inovatif, perencanaan yang efektif, dan pendekatan terpadu sangat penting untuk memastikan sistem infrastruktur air yang berkelanjutan dan tangguh.

2.5 Solusi Solusi Inovatif untuk Air Bersih di Daerah Perkotaan

Solusi inovatif ini secara kolektif menjawab tantangan penyediaan air bersih di daerah perkotaan yang padat penduduk dengan meningkatkan efisiensi, keberlanjutan, dan ketahanan dalam sistem pengelolaan air.

2.3.1 Sistem Pengolahan Air Terdesentralisasi

Teknologi Pengolahan Canggih yang Fleksibel: Sistem terdesentralisasi yang menggunakan teknologi pengolahan dan kontrol canggih dapat tersebar secara strategis di seluruh jaringan air perkotaan. Pendekatan ini mengintegrasikan beberapa sistem satelit dengan infrastruktur yang ada, meningkatkan kualitas air dan pemulihan energi [72].

Lahan Basah Terbangun: Sistem ini menggabungkan teknik, ekologi, dan desain lanskap untuk mengolah air limbah dan menyediakan fasilitas bagi masyarakat. Sistem ini beradaptasi dengan perubahan kondisi iklim dan kebutuhan pengolahan, menawarkan solusi yang berkelanjutan dan menarik [73].

2.3.2 Elektrolisis Air Limbah Perkotaan

Penghapusan Amonia dan Produksi Hidrogen: Elektrolisis menggunakan elektroda yang stabil secara dimensi dapat secara efisien menghilangkan amonia dari air limbah sambil menghasilkan gas hidrogen. Metode ini mengatasi pencemaran lingkungan dan kelangkaan air tawar, menghadirkan solusi yang dapat diskalakan untuk daerah perkotaan [74].

2.3.3 Penggunaan Kembali Air Abu-abu

Sistem Pengolahan Air Abu-Abu Portabel: Sistem terdesentralisasi yang dirancang untuk mengolah air limbah melalui beberapa tahap penyaringan, termasuk penyaringan membran dan radiasi UV, dapat secara signifikan meningkatkan kualitas air. Sistem ini dapat beradaptasi dengan berbagai parameter kualitas air dan dapat diimplementasikan di lingkungan perkotaan [75].

2.3.4 Pemanenan Air Hujan dan Pengelolaan Air Limbah Berkelanjutan

Pemulihan Sumber Daya: Strategi seperti pemanenan air hujan mengurangi kebutuhan air impor dan meminimalkan limpasan perkotaan. Pengelolaan air limbah yang berkelanjutan mendorong pencegahan polusi dan pemulihan sumber daya, termasuk air, energi, dan nutrisi yang direklamasi [76].

2.3.5 Kota Air Cerdas (Smart Water Cities/SWCs)

Teknologi Canggih dan KPI: SWC memanfaatkan teknologi canggih untuk pengelolaan air yang efisien, ketahanan terhadap bencana, dan pelestarian ekosistem. Indikator kinerja utama (KPI) membantu mengevaluasi dan meningkatkan sistem air perkotaan, memastikan pasokan air yang berkelanjutan [77].

2.3.6 Infrastruktur Hijau (GI)

Atap Hijau dan Lahan Basah Pengolahan yang dibangun: Proyek GI, seperti atap hijau, dapat memurnikan air limbah dan menggunakannya kembali untuk keperluan yang tidak dapat diminum. Proyek-proyek ini juga menyediakan layanan ekosistem, mengurangi pulau panas perkotaan, dan meningkatkan kualitas hidup di kota [78].

2.3.7 Filtrasi Membran dan Proses Oksidasi Lanjutan (AOP)

Bioreaktor Membran (Membrane Bioreactors-MBRs): MBR menggabungkan pengolahan biologis dengan pemisahan membran, menawarkan efisiensi tinggi dan kualitas limbah yang unggul. AOP, termasuk ozonisasi dan iradiasi UV, secara efektif memecah kontaminan, meningkatkan proses pengolahan air [79].

Tabel 4. Ringkasan Solusi Inovatif untuk air bersih di perkotaan.

Solusi	Penjelasan	Manfaat	Pustaka
Sistem Terdesentralisasi	Teknologi pengolahan canggih yang tersebar di jaringan perkotaan	Peningkatan kualitas air, pemulihan energi	[72]
Lahan Basah Terbangun	Mengintegrasikan teknik dan ekologi untuk pengolahan air limbah	Fasilitas komunitas yang berkelanjutan	[73]
Elektrolisis	Menghilangkan amonia, menghasilkan hidrogen	Mengatasi polusi, kelangkaan air tawar	[74]
Penggunaan Kembali Air Abu-abu	Sistem pengolahan portabel untuk air abu-abu	Peningkatan kualitas air, mudah beradaptasi	[74]
Pemanenan Air Hujan	Mengumpulkan dan menggunakan air hujan	Mengurangi impor air, limpasan perkotaan	[76]
Kota Air Cerdas	Teknologi canggih dan KPI untuk pengelolaan	air Pasokan berkelanjutan, ketahanan bencana	[77]
Infrastruktur Hijau	Atap hijau untuk pemurnian dan penggunaan kembali air	Jasa ekosistem, pendinginan perkotaan	[78]
Filtrasi Membran & AOPs	MBR dan proses oksidasi untuk pengolahan	Efisiensi tinggi, kualitas unggul	[79]

2.6 Energi Surya untuk Instalasi Pengolahan Air (IPA)

Materi ini akan membahas tahapan pekerjaan yang terkait dengan pemasangan sistem panel surya sebagai bagian dari energi terbarukan, dampak lingkungan dari pemasangan sistem panel surya, pertimbangan ekonomi yang terlibat dalam pemasangan sistem panel surya, tantangan teknis dalam pemasangan sistem panel surya, dan langkah-langkah keamanan yang diperlukan selama pemasangan sistem panel surya.

2.4.1 Strategi Pemasangan Energi Surya untuk IPA

Tahapan Pekerjaan yang Terkait dengan Pemasangan Sistem Panel Surya:

- Tahapan instalasi sistem panel surya dapat dibagi menjadi analisis, instalasi, operasi, dan pembuangan [80].
- Proses instalasi dimulai dengan periode konsultasi untuk mengembangkan desain yang sesuai, diikuti dengan pengujian, komisioning, dan sertifikasi sebelum operasi resmi sistem dimulai [81].

- Selama masa operasi sistem, pemeliharaan, pembersihan, pengamatan, dan pemantauan sangat penting untuk memastikan kinerja yang optimal [81].

2.4.2 Dampak Lingkungan dari Pemasangan Sistem Panel Surya:

- Sistem energi surya menawarkan manfaat lingkungan yang signifikan dibandingkan dengan sumber daya konvensional, tetapi mereka juga memiliki beberapa dampak negatif kecil selama produksi dan operasinya [82, 83].
- Penilaian dampak lingkungan telah mengidentifikasi potensi beban terhadap lingkungan selama tahap konstruksi, instalasi, dan pembongkaran, termasuk kebisingan dan gangguan visual, emisi gas rumah kaca, polusi air dan tanah, konsumsi energi, dan dampak terhadap ekosistem yang sensitif [84].
- Produksi, operasi, dan pembuangan panel surya berkontribusi terhadap polusi, konsumsi air, dan akumulasi limbah berbahaya, yang menyoroti pertukaran antara keuntungan lingkungan dari energi surya dan biaya ekologi tidak langsungnya [85].

2.4.3 Pertimbangan Ekonomi yang Terlibat dalam Pemasangan Sistem Panel Surya:

- Kelayakan finansial proyek untuk instalasi pembangkit energi fotovoltaik dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti biaya investasi, pembangkit listrik, biaya operasi dan pemeliharaan, radiasi matahari, tarif energi, efisiensi, dan konsumsi listrik [86].
- Kelayakan ekonomi dari investasi energi surya dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti iradiasi tahunan rata-rata, konsumsi konsumen, sistem insentif tarif feed-in, portofolio energi, dan emisi yang dihasilkan oleh sistem fotovoltaik [87].
- Sebuah analisis tekno-ekonomi telah menunjukkan bahwa sistem pelacak matahari satu sumbu otomatis dapat menjadi pilihan yang layak secara ekonomi untuk memasang taman PV skala besar, menghasilkan sekitar 20% - 30% lebih banyak energi dibandingkan dengan struktur tetap [88].

2.4.4 Tantangan Teknis dalam Pemasangan Sistem Panel Surya:

- Hambatan teknis untuk teknologi surya termasuk efisiensi sel surya yang rendah, keseimbangan sistem yang berkinerja rendah, biaya di muka yang tinggi, dan kekurangan tenaga kerja terampil [89].
- Berbagai kesalahan, seperti bayangan parsial, variasi suhu, dan korsleting, dapat mengurangi efisiensi dan kinerja sistem energi surya, menyoroti perlunya mengoptimalkan sistem energi surya dalam kondisi yang menantang [90].

2.4.5 Tindakan Keselamatan yang Diperlukan Selama Pemasangan Sistem Panel Surya:

- Masalah keselamatan selama instalasi, pemeliharaan, dan situasi darurat sistem tenaga fotovoltaik telah diidentifikasi, menekankan pentingnya memahami dan mengatasi potensi risiko keselamatan [91].

Pemasangan sistem panel surya melibatkan berbagai tahap, termasuk analisis, instalasi, operasi, dan pembuangan, dengan fokus pada dampak lingkungan, pertimbangan ekonomi, tantangan teknis, dan langkah-langkah keselamatan. Meskipun sistem energi surya menawarkan manfaat lingkungan yang signifikan, sistem ini juga memiliki beberapa dampak negatif selama produksi dan pengoperasiannya. Kelayakan ekonomi dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti biaya investasi, radiasi matahari, dan insentif yang tersedia. Tantangan teknis meliputi efisiensi yang rendah dan berbagai kesalahan yang dapat berdampak pada kinerja sistem, sementara langkah-langkah keamanan sangat penting selama instalasi, pemeliharaan, dan situasi darurat.

2.7 Tahapan Pekerjaan Terkait dengan Pemasangan Sistem Panel Surya

Pemasangan sistem panel surya melibatkan beberapa tahapan utama, masing-masing penting untuk memastikan efisiensi dan umur panjang sistem. Di bawah ini adalah penjelasan rinci tentang tahapan-tahapan tersebut:

- 1. Konsultasi dan Desain.** Konsultasi: Prosesnya dimulai dengan periode konsultasi di mana kebutuhan dan batasan spesifik (finansial dan praktis) proyek dinilai [81]. Desain: Berdasarkan konsultasi, desain khusus untuk sistem panel surya dikembangkan. Desain ini mempertimbangkan faktor-faktor seperti konfigurasi atap, orientasi panel, dan peneduh [81, 92].
- 2. Perizinan dan Persetujuan.** Perizinan: Memperoleh izin yang diperlukan dari pemerintah setempat sangatlah penting. Langkah ini dapat menjadi sumber penundaan yang signifikan dan dapat mempengaruhi jadwal proyek [93]. Persetujuan: Hal ini termasuk mendapatkan persetujuan dari perusahaan utilitas dan badan-badan terkait lainnya untuk memastikan kepatuhan terhadap peraturan setempat [93, 94].
- 3. Instalasi.** Persiapan Lokasi: Lokasi pemasangan disiapkan, yang mungkin melibatkan penandaan area pemasangan, yang sering kali dilakukan pada pagi hari atau sore hari untuk menghindari panas [95]. Pemasangan: Panel surya dipasang di atap atau tanah. Hal ini melibatkan pemasangan braket dan memastikan panel terpasang dengan aman [96][6]. Pekerjaan Listrik: Menghubungkan panel ke inverter dan jaringan listrik. Ini termasuk menyiapkan mekanisme pelacakan titik daya maksimum (MPPT) untuk mengoptimalkan output energi [97].
- 4. Pengujian dan Komisioning.** Pengujian: Setelah pemasangan, sistem menjalani pengujian yang ketat untuk memastikan semua komponen berfungsi dengan benar. Ini termasuk memeriksa sambungan listrik dan kinerja sistem [81]. Pengoperasian: Setelah pengujian selesai, sistem secara resmi dioperasikan. Ini melibatkan inspeksi akhir dan mendapatkan sertifikasi dari otoritas terkait [81].
- 5. Pengoperasian dan Pemeliharaan.** Pengoperasian: Sistem memulai fase operasionalnya, di mana sistem mulai menghasilkan listrik. Pemantauan berkelanjutan sangat penting untuk memastikan kinerja yang optimal [81, 98]. Pemeliharaan: Pemeliharaan rutin, termasuk pembersihan dan inspeksi, sangat penting untuk menjaga efisiensi. Hal ini dapat melibatkan teknik pemantauan jarak jauh untuk mendeteksi dan mengatasi masalah dengan segera [98].

- 6. Pembuangan dan Daur Ulang.** Pembuangan: Pada akhir siklus hidup sistem, pembuangan dan daur ulang panel surya yang tepat diperlukan untuk meminimalkan dampak lingkungan. Ini termasuk membongkar sistem dan mendaur ulang komponen sesuai peraturan [80, 99].

Tabel 5. Tahapan Kegiatan dalam Pemasangan Panel Surya - PV

Tahap	Kegiatan Utama
Konsultasi dan Desain	Penilaian kebutuhan, desain sistem yang disesuaikan
Perizinan dan Persetujuan	Memperoleh izin, persetujuan utilitas
Pemasangan	Persiapan lokasi, pemasangan panel, sambungan listrik
Pengujian dan Komisioning	Pengujian sistem, inspeksi akhir, sertifikasi
Operasi dan Pemeliharaan	Pemantauan berkelanjutan, pemeliharaan rutin
Pembuangan dan Daur Ulang	Pembongkaran, daur ulang komponen

Setiap tahap merupakan bagian integral dari keberhasilan pemasangan dan pengoperasian sistem panel surya, memastikan sistem tersebut memenuhi standar kinerja dan peraturan [81, 93, 94].

2.8 Tantangan Teknis Integrasi Energi Surya Fotovoltaik (PV) ke dalam Sistem Pengolahan Air

Mengintegrasikan energi surya fotovoltaik (PV) ke dalam sistem pengolahan air menghadirkan beberapa tantangan teknis yang perlu diatasi untuk memastikan operasi yang efisien dan andal. Tantangan-tantangan ini dapat dikategorikan secara luas ke dalam manajemen energi, desain sistem, dan masalah operasional. Penjelasannya juga menyajikan ringkasan tantangan tersebut pada Tabel 6.

2.8.1 Tantangan Manajemen Energi

- **Penyimpanan Energi:** Salah satu tantangan utama adalah kebutuhan akan penyimpanan energi untuk memastikan operasi yang berkelanjutan selama periode penyinaran matahari yang rendah, seperti malam hari atau hari berawan. Beberapa sistem berusaha menghindari penyimpanan energi dengan menyimpan air yang telah diolah, tetapi pendekatan ini membutuhkan pengujian ekstensif untuk menentukan kelayakannya [100, 101].
- **Variabilitas Energi:** Energi surya pada dasarnya bersifat variabel, yang dapat menyebabkan fluktuasi dalam catu daya. Variabilitas ini membutuhkan sistem manajemen energi yang kuat untuk menyeimbangkan pasokan dan permintaan secara efektif [101].

2.12.1 Tantangan Desain Sistem

- **Kompleksitas Sistem:** Mengintegrasikan sistem PV dengan proses pengolahan air dapat meningkatkan kompleksitas sistem. Misalnya, kebutuhan akan komponen tambahan seperti pengontrol, pompa, dan alat

sterilisasi UV dapat memperumit desain dan meningkatkan potensi masalah teknis [102].

- **Skalabilitas:** Meningkatkan sistem pengolahan air bertenaga surya untuk memenuhi permintaan yang lebih besar bisa menjadi tantangan. Daya saing ekonomi dari sistem ini sering kali terbatas, dengan biaya di muka yang lebih tinggi dibandingkan dengan sumber energi konvensional [103, 104].

2.12.2 Tantangan Operasional

- **Kerak Garam dan Pengotoran:** Dalam proses desalinasi, penskalaan garam dapat secara signifikan mengurangi efisiensi sistem dan meningkatkan persyaratan pemeliharaan. Kemajuan terbaru dalam desain evaporator bertujuan untuk mengurangi masalah ini, tetapi tetap menjadi tantangan yang signifikan [105, 106].
- **Pemeliharaan dan Keandalan:** Memastikan keandalan sistem pengolahan air bertenaga surya di lokasi terpencil atau di luar jaringan bisa jadi sulit. Pemeliharaan rutin diperlukan untuk menjaga sistem tetap beroperasi, dan kurangnya infrastruktur dapat memperburuk tantangan ini [107, 108].

2.9 Tantangan Ekonomi dan Regulasi

- **Biaya Awal yang Tinggi:** Biaya modal awal sistem pengolahan air bertenaga surya umumnya lebih tinggi daripada sistem yang ditenagai oleh sumber energi konvensional. Biaya ini dapat menjadi penghalang untuk adopsi yang luas, terutama di daerah berkembang [103, 104].
- **Hambatan Peraturan:** Kerangka kerja legislatif dan kebijakan juga dapat menimbulkan tantangan. Misalnya, mekanisme pasar dan kode jaringan tertentu perlu diadaptasi untuk mengakomodasi integrasi sumber energi terbarukan seperti PV ke dalam infrastruktur pengolahan air yang ada [109].

Tabel 6. Ringkasan tantangan untuk integrasi surya PV dengan IPA

Tantangan	Penjelasan	Pustaka
Penyimpanan Energi	Kebutuhan akan baterai atau metode penyimpanan alternatif untuk memastikan operasi yang berkelanjutan	[100, 101]
Variabilitas Energi	Fluktuasi pasokan tenaga surya membutuhkan sistem manajemen energi yang kuat	[101]
Kompleksitas Sistem	Integrasi berbagai komponen meningkatkan kompleksitas desain	[102]
Skalabilitas	Daya saing ekonomi dan masalah skalabilitas	[103, 104]

Tantangan	Penjelasan	Pustaka
Kerak dan Pengotoran Garam	Mengurangi efisiensi dan meningkatkan pemeliharaan dalam proses desalinasi	[105, 106]
Pemeliharaan dan Keandalan	Memastikan operasi yang andal di lokasi terpencil	[107, 108]
Biaya Awal yang Tinggi	Biaya awal yang lebih tinggi dibandingkan dengan sumber energi konvensional	[103, 104]
Hambatan Regulasi	Kebutuhan akan kerangka kerja legislatif dan kebijakan yang mendukung	[109]

Mengatasi tantangan ini membutuhkan penelitian dan pengembangan yang berkelanjutan untuk meningkatkan efisiensi, keandalan, dan kelayakan ekonomi dalam mengintegrasikan energi surya PV ke dalam sistem pengolahan air.

2.10 Manfaat Penggunaan Energi Surya untuk IPA

Penggunaan energi surya fotovoltaik (PV) untuk proses pengolahan air menawarkan beberapa keuntungan, termasuk potensi untuk mengurangi ketergantungan pada jaringan listrik tradisional, mengimbangi konsumsi energi, dan mengurangi emisi karbon. Namun, tantangan seperti kebutuhan untuk pengujian ekstensif, catu daya yang tidak stabil, dan masalah operasional tetap ada. Terlepas dari tantangan-tantangan ini, implikasi ekonomi dan potensi keberlanjutan membuat integrasi energi surya PV ke dalam sistem pengolahan air menjadi jalan yang menjanjikan untuk pengembangan di masa depan.

2.12.3 Keuntungan Menggunakan Energi Surya Fotovoltaik (PV) untuk Proses Pengolahan Air:

Teknologi surya sangat menjanjikan untuk menyalakan skema pengolahan air, mengingat sinergi antara sumber daya dan pencocokan beban yang ada di musim panas [110]. Sistem membran bertenaga PV telah terbukti dapat mentolerir fluktuasi besar dalam ketersediaan radiasi matahari, yang menunjukkan potensi operasi yang andal [111]. Integrasi teknologi surya untuk pembangkit listrik dan memanfaatkan energi panas dari sinar matahari dapat mengurangi penggunaan listrik yang dihasilkan bahan bakar fosil dalam pengolahan air limbah [110]. Ringkasan ini memberikan gambaran menyeluruh tentang bagaimana energi surya PV berdampak pada efektivitas biaya fasilitas pengolahan air, menyoroti manfaat dan tantangan yang terkait dengan implementasinya.

Tabel 7. Ringkasan Manfaat Penggunaan Surya PV pada IPA.

Aspek	Penjelasan	Pustaka
--------------	-------------------	----------------

Biaya Awal	USD 32,486.86 hingga USD 40,716.86 tanpa penyimpanan baterai	[112]
Pengurangan Biaya Operasional	48,3% pengurangan biaya energi untuk pembangkit SWRO	[113]
Biaya Produksi Air	USD 0,2-22/m ³ untuk pembangkit skala kecil hingga menengah, USD 0,9-2,2/m ³ untuk pembangkit skala besar	[114]
Pengurangan Emisi Karbon	142,4 ton CO ₂ dapat dihindari selama 20 tahun	[112]
Keberlanjutan	Peningkatan efisiensi energi dan pengurangan kebutuhan energi pemanas	[115]
Kelayakan Ekonomi	Memerlukan harga pasar listrik sebesar 0,14-0,18 EUR/kWh untuk kelayakan ekonominya	[116]
Kebutuhan Lahan	Lahan yang luas dibutuhkan untuk sistem kogenerasi surya	[117]
Penyimpanan Energi	Baterai meningkatkan biaya namun meningkatkan efisiensi dan keandalan	[118, 119]

2.12.4 Manfaat Pemasangan Solar PV pada Lingkungan IPA

Integrasi energi surya fotovoltaik (PV) ke dalam proses pengolahan air menawarkan beberapa manfaat lingkungan yang signifikan:

1. Pengurangan Emisi Karbon: Memanfaatkan sistem PV surya di pabrik pengolahan air (WTP) dapat secara signifikan mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil, sehingga mengurangi emisi karbon. Sebagai contoh, sebuah studi tentang pabrik pengolahan air minum (DWTP) di barat daya AS menunjukkan bahwa menggabungkan PV surya dapat mengimbangi konsumsi energi pabrik, yang mengarah pada pengurangan emisi karbon [120, 121].

2. Efisiensi dan Keberlanjutan Energi: Sistem PV surya menyediakan sumber energi terbarukan dan berkelanjutan untuk proses pengolahan air. Hal ini mengurangi jejak lingkungan secara keseluruhan dari operasi ini. Sebagai contoh, sistem Open SolWat, yang menggunakan energi matahari untuk pengolahan tersier di instalasi pengolahan air limbah (tertiary treatment in wastewater treatment plants – WWTPs), meningkatkan efisiensi energi sebesar 15-21% dibandingkan dengan metode tradisional [122].

3. Pengurangan Penggunaan Bahan Bakar Fosil: Sistem pengolahan air yang digerakkan oleh tenaga surya, seperti solar stills dan desalinasi matahari, menghilangkan kebutuhan bahan bakar fosil, sehingga mengurangi polutan udara dan mengurangi bahaya lingkungan dan kesehatan yang terkait dengan penggunaan bahan bakar fosil [123, 124].

4. Manfaat Ekonomi dan Lingkungan: Penggunaan sistem PV surya juga dapat memberikan manfaat ekonomi dengan mengurangi biaya operasional dan menghasilkan pendapatan melalui penjualan kredit energi terbarukan. Sebagai contoh, pemasangan pembangkit listrik tenaga surya 500 kW di fasilitas pengolahan di New Jersey menghasilkan penghematan biaya yang signifikan dan manfaat lingkungan [125].

5. Peningkatan Efisiensi Pengolahan Air: Energi surya dapat meningkatkan efisiensi proses pengolahan air. Misalnya, sistem penguapan antarmuka yang digerakkan oleh tenaga surya (SDIE) telah menunjukkan efisiensi penguapan yang tinggi dan kinerja yang sangat baik dalam memurnikan berbagai air limbah yang terkontaminasi, yang menunjukkan potensinya sebagai solusi pengolahan air yang berkelanjutan [126].

6. Pengurangan Jejak Lingkungan: Studi Life Cycle Assessment (LCA) telah menunjukkan bahwa mengintegrasikan energi matahari ke dalam proses pengolahan air dapat secara signifikan mengurangi jejak lingkungan. Misalnya, menggunakan energi matahari untuk desalinasi dan pengolahan air dapat menurunkan dampak lingkungan dibandingkan dengan metode konvensional [127][8].

Tabel 8. Rangkuman Manfaat Lingkungan

Manfaat	Penjelasan	Pustaka
Pengurangan Emisi Karbon	Berkurangnya ketergantungan pada bahan bakar fosil, menurunkan emisi karbon	[120, 121] [1] [2]
Efisiensi dan Keberlanjutan Energi	Peningkatan efisiensi energi dan keberlanjutan proses pengolahan air	[122] [3]
Pengurangan Penggunaan Bahan Bakar Fosil	Penghapusan penggunaan bahan bakar fosil, mengurangi polusi udara dan bahaya kesehatan	[123, 124] [4] [5]
Manfaat Ekonomi dan Lingkungan	Penghematan biaya dan peningkatan pendapatan melalui kredit energi terbarukan	[125] [6]
Peningkatan Efisiensi Pengolahan Air	Efisiensi tinggi dalam pemurnian dan desalinasi air	[126] [7]
Pengurangan Jejak Lingkungan	Dampak lingkungan yang lebih rendah melalui Penilaian Siklus Hidup (LCA)	[8][127]

Jadi penggunaan energi surya fotovoltaik dalam proses pengolahan air menawarkan manfaat lingkungan yang besar, termasuk pengurangan emisi karbon, peningkatan efisiensi energi, dan jejak lingkungan yang lebih rendah secara keseluruhan. Keuntungan-keuntungan ini membuat PV surya menjadi pilihan yang menjanjikan dan berkelanjutan untuk sistem pengolahan air modern.

2.11 Contoh penggunaan energi surya – PV untuk IPA

Beragam aplikasi teknologi PV surya dalam pengolahan air, menyoroti potensinya untuk memberikan solusi yang berkelanjutan dan efisien untuk akses air bersih. Berikut ini adalah contoh penggunaan energi surya, khususnya sistem fotovoltaik (PV) untuk pasokan energi dalam pengolahan air bersih (Tabel 9).

Tabel 9. Contoh penggunaan sistem fotovoltaik (PV) untuk pengolahan air.

Contoh	Penjelasan	Pustaka
Desalinasi Bertenaga PV Surya	Sistem PV surya digunakan untuk menyalakan sistem membran reverse osmosis (RO) untuk desalinasi. Sistem ini dapat beroperasi di luar jaringan listrik, sehingga cocok untuk daerah terpencil. Modul PV juga dapat digunakan untuk pemanasan air, yang meningkatkan efisiensi proses RO dengan meningkatkan fluks permeal.	[128]
Solar PV untuk Pengolahan Air Elektrokimia	Sistem PV menyediakan energi listrik yang diperlukan untuk berbagai metode pengolahan air elektrokimia seperti elektrokoagulasi, deionisasi kapasitif, elektrodialisis, dan elektrodionisasi. Metode-metode ini dapat diskalakan dan hemat energi, sehingga cocok untuk diintegrasikan dengan sumber energi terbarukan.	[129]
Distilasi Membran Bertenaga PV Surya	Teknologi distilasi membran (MD) menggunakan energi panas dari pengumpul panas matahari dan energi listrik dari sistem PV untuk mengoperasikan pompa umpan. Kombinasi ini efektif untuk pengolahan air di daerah pedesaan dan gersang karena kebutuhan energinya yang rendah dan desainnya yang ringkas.	[130]
PV Surya untuk Pemompaan Air	Pompa bertenaga PV digunakan untuk memasok air minum di daerah terpencil di mana listrik jaringan tidak tersedia. Sistem ini hemat biaya, membutuhkan perawatan yang rendah, dan mudah dipasang, sehingga ideal untuk masyarakat pedesaan.	[131]
PV Surya untuk Pengolahan Air Limbah	Sistem PV surya digunakan untuk menyalakan instalasi pengolahan air limbah, mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil. Integrasi ini membantu mencapai kelestarian lingkungan dan dapat menguntungkan secara finansial dalam jangka panjang.	[117]
Solar PV untuk Sistem Pengolahan Air Hibrida	Sistem hibrida yang menggabungkan PV surya dengan sumber energi terbarukan lainnya, seperti angin, digunakan untuk pengolahan air. Sistem ini dapat beroperasi secara independen dari jaringan listrik dan sangat berguna di lokasi yang terisolasi.	[132]

2.12 HomerPro untuk Perencanaan Solar PV

HomerPro adalah alat perangkat lunak yang digunakan untuk mengoptimalkan sistem PV surya, dan memiliki beberapa fitur utama, keunggulan, dan batasan ketika diterapkan pada instalasi pengolahan air.

2.13 Fitur Utama HomerPro untuk PV Surya dalam Instalasi Pengolahan Air:

HomerPro digunakan untuk menentukan kelayakan penggunaan fotovoltaik (PV) sebagai sumber pembangkit energi untuk instalasi pengolahan air [133]. Hal ini dapat digunakan untuk menilai potensi penggunaan instalasi PV di stasiun pengambil air dan stasiun pemompaan, menganalisis produksi dan permintaan energi berdasarkan berbagai data [134]. HomerPro juga dapat mengoptimalkan sistem PV surya untuk pengolahan air dengan mensimulasikan kemungkinan penyediaan energi melalui kapasitas instalasi PV yang berbeda dan menganalisis produksi dan permintaan energi baik untuk hari yang cerah maupun mendung [134].

2.14 Optimalisasi Sistem PV Surya untuk Instalasi Pengolahan Air:

HomerPro mengoptimalkan sistem PV surya untuk instalasi pengolahan air dengan menilai kelayakan penggunaan modul PV untuk memungkinkan sistem yang terputus dari jaringan listrik dan meningkatkan sistem transportasi air [128]. Hal ini dapat digunakan untuk memprediksi produktivitas sistem fotovoltaik-termal (PVT), yang menggabungkan modul PV surya dengan sistem membran reverse osmosis (RO), dalam kondisi yang berbeda, termasuk pembangkitan listrik dan fluks permeal sistem hibrida [128][3].

2.15 Keuntungan Menggunakan HomerPro untuk PV Surya dalam Instalasi Pengolahan Air

Penggunaan HomerPro untuk PV surya dalam instalasi pengolahan air menawarkan keuntungan untuk mengurangi ketergantungan pada jaringan listrik tradisional, yang berpotensi mengarah pada pengurangan emisi karbon yang signifikan [133]. HomerPro dapat membantu mencapai kecukupan energi untuk instalasi pengolahan air dengan menilai kelayakan tekno-ekonomi penggunaan PV surya dan energi angin untuk mengimbangi konsumsi energi dari instalasi, dengan nilai bersih sekarang yang positif dan potensi kecukupan energi [135].

2.16 Keterbatasan Penggunaan HomerPro untuk PV Surya dalam Instalasi Pengolahan Air:

Meskipun HomerPro dapat mengoptimalkan sistem PV surya untuk pengolahan air, penting untuk dicatat bahwa penurunan efisiensi modul PV pada suhu yang lebih tinggi adalah masalah yang terkenal, terutama dalam kondisi distribusi suhu yang tidak seragam pada modul PV berpendingin air [128]. Daya saing ekonomi dari proses pengolahan air tenaga surya, termasuk pabrik desalinasi tenaga surya, merupakan keterbatasan, karena biaya air dari pabrik desalinasi tenaga surya skala kecil hingga menengah lebih tinggi dibandingkan dengan pabrik berbasis bahan bakar fosil konvensional [135]. HomerPro adalah alat yang berharga untuk mengoptimalkan sistem PV surya untuk instalasi pengolahan air, menawarkan keuntungan dalam mengurangi ketergantungan pada jaringan listrik tradisional dan berpotensi mencapai kecukupan energi. Namun, penting untuk mempertimbangkan keterbatasan, seperti penurunan efisiensi modul PV pada suhu yang lebih tinggi dan daya saing ekonomi dari proses pengolahan air tenaga surya.

2.17 Fitur-fitur utama HomerPro untuk Solar PV

Empat fitur utama HOMER Pro untuk Solar PV dalam instalasi pengolahan air dapat diringkas sebagai berikut:

1. Analisis Optimalisasi dan Ekonomi: HOMER Pro banyak digunakan untuk mengoptimalkan sistem energi terbarukan hibrida, termasuk yang menggabungkan PV surya untuk aplikasi pengolahan air. Perangkat lunak ini melakukan analisis teknoekonomi untuk mengidentifikasi desain sistem yang paling hemat biaya [136]. Perangkat lunak ini membantu dalam menentukan kombinasi optimal dari sumber energi terbarukan (misalnya PV surya, turbin angin, generator diesel) untuk meminimalkan biaya dan memaksimalkan efisiensi [136].

2. Desain dan Validasi Sistem: HOMER Pro membantu dalam mendesain sistem pengolahan air bertenaga surya, seperti unit reverse osmosis (RO), dengan mengevaluasi kebutuhan energi dan konfigurasi sistem [2] [3].

- Hal ini dapat digunakan bersama alat simulasi lain seperti MATLAB Simulink untuk pemodelan dinamis dan validasi desain yang diusulkan [2].

3. Kinerja TeknoEkonomi:

- Perangkat lunak ini mengevaluasi berbagai parameter kinerja, termasuk produksi energi, pencegahan emisi karbon, biaya awal dan pemeliharaan, dan efisiensi sistem secara keseluruhan [5].
- Ini memberikan wawasan tentang biaya per unit air yang diproduksi dan konsumsi energi dari proses desalinasi, membantu mengoptimalkan sistem untuk lokasi dan kondisi tertentu [136][1] [4].

4. Integrasi Sistem Hibrida:

- HOMER Pro mendukung integrasi beberapa sumber energi terbarukan, seperti PV surya yang dikombinasikan dengan energi pasang surut atau turbin angin, untuk meningkatkan keandalan dan efisiensi sistem [6].
- Hal ini membantu dalam menilai komplementaritas sumber energi yang berbeda dan dampaknya terhadap pola produksi air, terutama di daerah offgrid dan terpencil [6].

5. Manfaat Lingkungan dan Operasional:

HomerPro membantu dalam merancang sistem yang mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil, sehingga meminimalkan jejak karbon dan mempromosikan solusi pengolahan air yang berkelanjutan [136–139]. Hal ini memastikan operasi yang stabil dan keandalan sistem pengolahan air dengan menggabungkan instrumentasi dan skema kontrol yang komprehensif [137].

Tabel 10. Tipe analisis fungsi fitur utama Homer Pro

Tipe Analisis	Deskripsi	Pustaka
Optimalisasi dan Analisis Ekonomi	Mengidentifikasi desain sistem yang hemat biaya dan kombinasi optimal sumber energi terbarukan	[136, 138–140]
Desain dan Validasi Sistem	Membantu dalam mendesain dan memvalidasi sistem pengolahan air bertenaga surya.	[138, 139]

Kinerja Tekno-Ekonomi	Mengevaluasi produksi energi, biaya, dan efisiensi sistem.	[141]
Integrasi Sistem Hibrida	Mendukung integrasi berbagai sumber energi terbarukan untuk meningkatkan keandalan dan efisiensi.	[137]
Manfaat Lingkungan dan Operasional	Mempromosikan solusi berkelanjutan dan memastikan operasi yang stabil dengan skema kontrol.	[138, 140, 141]

Fitur-fitur ini menyoroti keserbagunaan dan keefektifan HOMER Pro dalam mengoptimalkan sistem PV surya untuk instalasi pengolahan air, memastikan efisiensi biaya, keandalan, dan keberlanjutan lingkungan.

2.18 Persyaratan Utama Integrasi HomerPro dengan Surya PV

Untuk mengintegrasikan HomerPro dengan PV surya dalam instalasi pengolahan air, beberapa persyaratan teknis utama harus dipertimbangkan:

2.12.5 Desain dan Konfigurasi Sistem (System Design and Configuration)

- Sistem Energi Terbarukan Hibrida (HRES: Integrasi ini biasanya melibatkan kombinasi panel PV surya, baterai, dan terkadang sumber energi terbarukan tambahan seperti turbin angin atau turbin hidrokinetik. Sebagai contoh, konfigurasi optimal dapat mencakup panel PV 20 kW, turbin angin 10 kW, dan generator diesel 4,90 kW [136, 140].
- Penyimpanan Energi: Baterai sangat penting untuk menyimpan energi yang dihasilkan oleh panel PV untuk memastikan pasokan listrik yang berkelanjutan, terutama selama periode yang tidak cerah. Baterai lithium-ion biasanya digunakan karena efisiensi dan kapasitasnya [142].

2.12.6 Alat Pengoptimalan dan Simulasi (Optimization and Simulation Tools)

- Perangkat Lunak HomerPro: Perangkat lunak ini sangat penting untuk melakukan analisis tekno-ekonomi dan mengoptimalkan konfigurasi sistem energi hibrida terbarukan. Perangkat lunak ini membantu dalam menentukan pengaturan sistem yang paling hemat biaya dan efisien [136, 140, 142].
- Model Simulasi: Alat-alat seperti MATLAB/Simulink dan TRNSYS dapat digunakan bersama HomerPro untuk simulasi dinamis yang terperinci dan prediksi kinerja sistem terintegrasi [143, 144].

2.12.7 Spesifikasi Komponen (Component Specifications)

- Panel PV: Kapasitas panel PV harus dipilih berdasarkan kebutuhan energi sistem pengolahan air. Sebagai contoh, sebuah sistem dapat menggunakan panel surya 3.000 Wp untuk menghasilkan energi yang cukup untuk penyaringan air dan sterilisasi UV [145].
- Pengontrol dan Inverter: Komponen-komponen ini diperlukan untuk mengatur aliran energi dari panel PV ke baterai penyimpanan dan sistem

pengolahan air. Inverter MPPT hibrida dapat mengoptimalkan efisiensi konversi energi [146].

- Unit Pengolahan Air: Integrasi ini sering kali mencakup komponen-komponen seperti sistem reverse osmosis (RO), alat sterilisasi UV, dan pompa air. Kebutuhan energi dari unit-unit ini harus disesuaikan dengan output dari sistem PV [128, 145].

2.12.8 Pertimbangan Ekonomi dan Lingkungan (Economic and Environmental Considerations)

- Analisis Biaya: Biaya energi yang diratakan (LCOE) dan biaya produksi air adalah metrik yang penting. Sebagai contoh, sistem yang optimal dapat mencapai LCOE sebesar 0,02 USD/kWh dan biaya produksi air sebesar 0,56 USD/m³ [147].
- Keberlanjutan: Mengintegrasikan PV surya dengan sistem pengolahan air mendukung tujuan keberlanjutan dengan mengurangi emisi karbon dan ketergantungan pada bahan bakar fosil. Sistem dapat mencegah emisi CO₂ yang signifikan setiap tahunnya [143, 148].

2.12.9 Aspek Operasional dan Pemeliharaan (Operational and Maintenance Aspects)

- Efisiensi Sistem: Pemeliharaan rutin panel PV dan baterai diperlukan untuk memastikan efisiensi tinggi dan umur panjang. Efisiensi modul PV dapat dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti suhu dan akumulasi debu [128, 149].
- Otomatisasi dan Kontrol: Sistem otomatis dapat meningkatkan keandalan dan mengurangi intervensi manual. Ini termasuk kontrol otomatis distribusi energi dan proses pengolahan air [150].

Tabel 11. Ringkasan Komponen Sistem Surya PV

Komponen	Spesifikasi	Tujuan
PV Panels	3,000 Wp, 20 kW	Energy generation
Batteries	Lithium-ion, 100 kWh	Energy storage
Xontrollers/Inverters	Hybrid MPPT inverter	Energy management
Water Treatment Units	RO systems, UV sterilizers, water pumps	Water purification
Software Tools	HomerPro, MATLAB/Simulink, TRNSYS	System optimization and simulation
Cost Metrics	LCOE: 0.02 USD/kWh, Water cost: 0.56 USD/m ³	Economic feasibility
Environmental Impact	CO ₂ emission reduction	Sustainability

Pertimbangan integrasi HomerPro dengan PV surya dalam instalasi pengolahan air dapat dioptimalkan untuk efisiensi, efektivitas biaya, dan keberlanjutan.

2.19 Manfaat Penggunaan HomerPro

Perangkat lunak HomerPro menawarkan beberapa keuntungan untuk mengoptimalkan sistem fotovoltaik surya (PV) dalam aplikasi pengolahan air, terutama di lokasi off-grid dan terpencil. Berikut adalah manfaat utamanya:

2.12.10 Pengoptimalan dan Analisis Ekonomi (Optimization and Economic Analysis)

- **Desain Sistem yang Hemat Biaya:** Fitur optimasi HomerPro membantu dalam merancang sistem PV surya yang paling hemat biaya untuk pengolahan air. Fitur ini melakukan analisis ekonomi yang komprehensif untuk menentukan konfigurasi yang optimal, meminimalkan biaya sekaligus memastikan keandalan sistem [138, 139, 151].
- **Kelayakan Tekno-Ekonomi:** Perangkat lunak ini mengevaluasi berbagai sistem energi terbarukan hibrida, termasuk kombinasi panel PV, turbin angin, dan generator diesel, untuk menemukan solusi yang paling ekonomis dan efisien untuk pengolahan air [136, 151].

2.12.11 Keandalan dan Stabilitas Sistem (System Reliability and Stability)

- **Stabilitas Sistem:** HomerPro memastikan stabilitas dan keandalan sistem dengan mengintegrasikan desain instrumentasi yang komprehensif dan skema kontrol perlindungan. Hal ini sangat penting untuk mempertahankan operasi yang konsisten dalam proses pengolahan air [139].
- **Kinerja Dinamis:** Perangkat lunak ini mendukung pemodelan dan analisis dinamis, yang divalidasi melalui alat seperti MATLAB Simulink, memastikan bahwa desain yang diusulkan berkinerja baik dalam kondisi dunia nyata [139, 152].

2.12.12 Manfaat Lingkungan dan Keberlanjutan (Environmental and Sustainability Benefits)

- **Pengurangan Emisi Karbon:** Dengan mengoptimalkan penggunaan sumber energi terbarukan, HomerPro membantu mengurangi emisi karbon dioksida secara signifikan dibandingkan dengan sistem berbasis bahan bakar fosil tradisional. Hal ini berkontribusi pada solusi pengolahan air yang lebih berkelanjutan [151].
- **Integrasi Energi Terbarukan :** Perangkat lunak ini memfasilitasi integrasi PV surya dengan sumber energi terbarukan lainnya, meningkatkan faktor terbarukan secara keseluruhan dari sistem dan mengurangi ketergantungan pada energi tak terbarukan [151, 153].

Fleksibilitas dan Kemampuan Beradaptasi (Flexibility and Adaptability)

- **Kemampuan Beradaptasi dengan Berbagai Kondisi:** HomerPro dapat mensimulasikan dan menganalisis kinerja sistem pengolahan air di bawah kondisi iklim dan operasional yang berbeda, memastikan bahwa sistem tersebut dapat beradaptasi dan efisien di berbagai lingkungan [136, 152].
- **Skalabilitas :** Perangkat lunak ini mendukung desain sistem yang dapat diskalakan, dari unit pengolahan air berbasis komunitas kecil hingga pabrik desalinasi skala besar, membuatnya serbaguna untuk berbagai aplikasi [138, 153].

Wawasan Teknis dan Peningkatan Performa (Technical Insights and Performance Enhancement)

- **Prediksi Kinerja:** HomerPro memberikan prediksi kinerja yang terperinci untuk sistem hibrida, termasuk produktivitas kopling PV-RO (reverse osmosis), yang membantu dalam mengoptimalkan pembangkitan listrik dan efisiensi pengolahan air [128].
- **Sistem Kontrol Tingkat Lanjut:** Integrasi sistem kontrol canggih, seperti algoritma Maximum Power Point Tracking (MPPT), memastikan bahwa sistem PV surya beroperasi pada efisiensi maksimum, bahkan dalam kondisi lingkungan yang berbeda-beda [152, 154].

Tabel 12. Manfaat Penggunaan Homer Pro untuk Kajian Surya-PV di IPA

Manfaat	Deskripsi	Pustaka
Desain Sistem Hemat Biaya	Mengoptimalkan konfigurasi untuk meminimalkan biaya.	[138, 139]
Stabilitas Sistem	Memastikan operasi yang andal dengan skema kontrol yang komprehensif	[139]
Pengurangan Emisi Karbon	Mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil, mengurangi emisi CO ₂	[151]
Integrasi Energi Terbarukan	Menggabungkan PV surya dengan sumber energi terbarukan lainnya untuk meningkatkan keberlanjutan	[151, 153]
Kemampuan Beradaptasi dengan Berbagai Kondisi	Mensimulasikan kinerja dalam berbagai kondisi untuk desain sistem yang fleksibel	[136, 152]
Skalabilitas	Mendukung desain dari unit kecil hingga pabrik skala besar	[138, 153]
Prediksi Kinerja	Memberikan prediksi terperinci untuk produktivitas dan efisiensi sistem	[128]
Sistem Kontrol Tingkat Lanjut	Menggunakan algoritma MPPT untuk kinerja PV surya yang optimal	[152, 154]

Kesimpulannya, HomerPro adalah alat yang ampuh untuk mengoptimalkan sistem PV surya dalam aplikasi pengolahan air, menawarkan manfaat ekonomi, lingkungan, dan teknis yang meningkatkan kinerja dan keberlanjutan sistem.