

BAB 2

Tinjauan Pustaka

2.1. Teknologi Utama dalam Pembangkit Listrik Hibrida untuk Daerah Pedesaan

Solar Photovoltaic (PV): Sistem PV surya mengubah sinar matahari menjadi listrik dan sangat cocok untuk elektrifikasi pedesaan karena biaya yang terus menurun dan ketersediaan sinar matahari yang luas [1] [2]. Gambar 8 dalam [3] menunjukkan bahwa energi surya menyumbang 67,61% dari energi terbarukan di beberapa wilayah.

Tenaga Angin: Turbin angin memanfaatkan energi angin untuk menghasilkan listrik dan dapat diintegrasikan ke dalam sistem hibrida untuk melengkapi tenaga surya [4] [5]. Sumber daya angin bergantung pada lokasi geografis, tetapi sistem hibrida meningkatkan keandalan [6].

Gasifikasi Biomassa: Gasifier biomassa mengubah bahan organik menjadi gas yang dapat dibakar, yang kemudian dapat digunakan untuk menghasilkan listrik [7] [8]. Teknologi ini sangat berguna di daerah pertanian dengan sumber daya biomassa yang melimpah [1]

Tenaga Air: Sistem tenaga air skala kecil dapat menyediakan pasokan listrik yang stabil di daerah dengan sumber daya air yang sesuai [9] [10]. Menggabungkan tenaga air dengan sumber energi terbarukan lainnya dapat menciptakan sistem hibrida yang tangguh [11].

Sistem Penyimpanan Energi: Teknologi penyimpanan energi seperti baterai sangat penting untuk mengelola sifat intermiten sumber energi terbarukan [12] [13] . Baterai menyimpan kelebihan listrik yang dihasilkan selama periode produksi tinggi dan melepaskannya saat permintaan tinggi atau produksi energi terbarukan rendah [14].

Jaringan Mikro Hibrida: Jaringan lokal ini menggabungkan berbagai sumber pembangkit dan penyimpanan untuk memasok listrik ke komunitas [4] [15]. Jaringan mikro dapat beroperasi secara mandiri atau terhubung ke jaringan utama ([13] . Gambar 5 dari [15] menunjukkan bagaimana jaringan mikro dipengaruhi oleh berbagai bidang kebijakan.

Inverter dan Elektronik Daya: Komponen ini mengubah daya DC dari panel surya dan baterai menjadi daya AC yang cocok untuk peralatan rumah tangga dan jaringan listrik [13]. Elektronik daya yang efisien sangat penting untuk mengoptimalkan kinerja sistem [16].

Sistem Manajemen Energi (EMS): EMS mengoptimalkan operasi sistem hibrida dengan memantau produksi dan konsumsi energi, mengelola penyimpanan, dan mengoordinasikan sumber energi yang berbeda [13]. Strategi kontrol cerdas meningkatkan efisiensi sistem [17].

Pembangkit Listrik dan Panas Bersama (CHP): Sistem CHP menghasilkan listrik dan panas secara bersamaan, meningkatkan efisiensi energi secara keseluruhan. Sistem ini sangat berguna di daerah pedesaan yang membutuhkan pemanasan [18].

2.1.1 Manfaat Pembangkit Listrik Hibrida di Daerah Pedesaan

Peningkatan Keandalan: Menggabungkan sumber energi yang berbeda memastikan pasokan listrik yang lebih stabil dan andal dibandingkan mengandalkan satu sumber saja [18].

Pengurangan Emisi Karbon: Sistem hibrida yang memprioritaskan sumber energi terbarukan membantu mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil, mengurangi emisi karbon dan dampak lingkungan [19].

Efisiensi Biaya: Meskipun biaya investasi awal dapat tinggi, sistem hibrida dapat lebih efisien secara biaya dalam jangka panjang karena biaya bahan bakar yang lebih rendah dan ketergantungan pada jaringan listrik yang berkurang [20]

Kemandirian Energi: Dengan memanfaatkan sumber daya terbarukan lokal, komunitas pedesaan dapat mencapai kemandirian energi yang lebih besar dan mengurangi kerentanan terhadap fluktuasi harga bahan bakar [21]

2.1.2 Tantangan dan Pertimbangan

Pengelolaan Intermittensi: Sumber energi terbarukan seperti surya dan angin bersifat intermitten, sehingga memerlukan strategi penyimpanan dan pengelolaan energi yang efektif [22].

Analisis Tekno-Ekonomi: Analisis tekno-ekonomi yang cermat sangat penting untuk menentukan campuran optimal sumber energi dan penyimpanan untuk lokasi tertentu [23].

Kerangka Kebijakan dan Regulasi: Kebijakan dan regulasi yang mendukung diperlukan untuk mendorong adopsi sistem energi terbarukan hibrida di daerah pedesaan [23]. Gambar 5 dalam [15]

2.2 Sistem Pembangkit Listrik Hibrida

Sistem pembangkit listrik hibrida menggabungkan berbagai sumber energi, umumnya energi terbarukan dan non-terbarukan, untuk menyediakan pasokan energi yang andal dan berkelanjutan, terutama di daerah pedesaan [24] [25] [26]. Sistem ini sangat penting untuk mengoperasikan instalasi pengolahan air bersih, memastikan akses ke air minum di komunitas terpencil [27] [28].

2.2.1 Komponen Sistem Pembangkit Listrik Hibrida

Sistem hibrida sering mengintegrasikan berbagai sumber energi terbarukan seperti surya, angin, dan hidro [29] [30]. Sumber-sumber ini digabungkan dengan sumber energi non-terbarukan seperti generator diesel untuk memastikan pasokan listrik yang stabil [25] [26]. Sistem penyimpanan energi, seperti baterai, juga diintegrasikan untuk menyimpan energi berlebih dan menyediakan listrik selama periode ketika sumber energi terbarukan tidak tersedia [31] [32].

Tenaga Surya: Sistem fotovoltaik (PV) mengubah sinar matahari menjadi listrik, menyediakan pasokan energi bersih dan melimpah [33] [34].

Tenaga Angin: Turbin angin memanfaatkan energi kinetik angin untuk menghasilkan listrik [35]

Tenaga Air: Pembangkit listrik tenaga air memanfaatkan energi air yang mengalir atau jatuh untuk menghasilkan listrik, menawarkan sumber energi terbarukan yang andal [36] .

Biomassa: Gasifier biomassa mengubah bahan biomassa menjadi gas yang dapat dibakar, yang dapat menghasilkan listrik ([37].

Generator Diesel: Generator ini menyediakan sumber daya cadangan atau tambahan, terutama ketika sumber energi terbarukan tidak mencukupi [25] [32].

Sistem Penyimpanan Energi: Baterai lithium-ion menyimpan kelebihan listrik, memastikan pasokan daya yang stabil [38].

2.2.2 Teknologi Pengolahan Air Bersih

Sistem pembangkit listrik hibrida dapat menggerakkan berbagai instalasi pengolahan air bersih di daerah pedesaan [27].

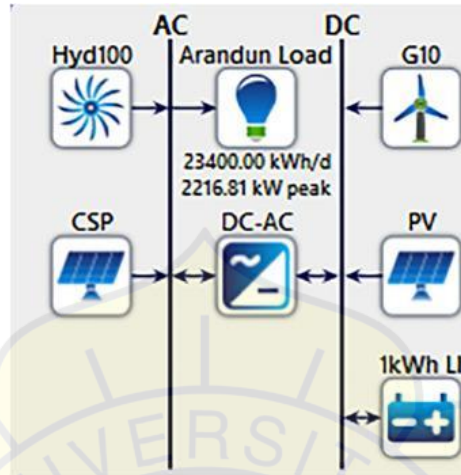
Desalinasi: Pabrik desalinasi yang didukung oleh energi terbarukan menyediakan cara berkelanjutan untuk memproduksi air bersih [27].

Penyaringan air: Sistem penyaringan air menghilangkan kontaminan dari air, memastikan kualitasnya untuk berbagai aplikasi [27].

Nanofiltrasi: Membran nanofiltrasi (NF) digunakan untuk menghilangkan logam dan sulfat dari limbah tambang asam, menyediakan teknologi potensial untuk industri metalurgi dan pertambangan [39].

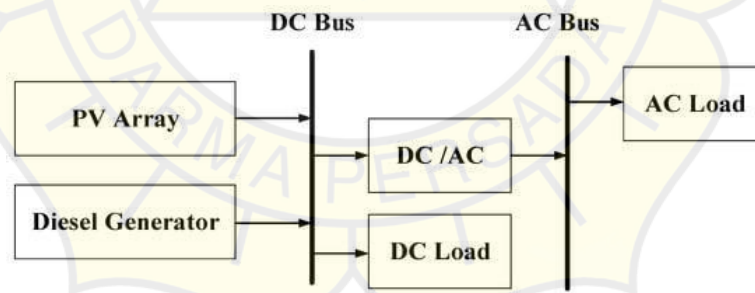
2.2.3 Gambar Sistem Pembangkit Listrik Hibrida dan Pengolahan Air Bersih

Sistem energi hibrida dapat menggabungkan sumber energi terbarukan, penyimpanan energi, dan konversi daya untuk memenuhi permintaan beban [40].



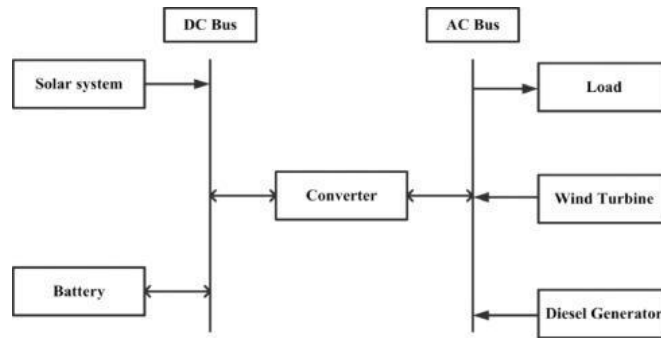
Gambar 2. 1 Sistem Energi Hibrida. Sumber: [40]

Sistem pembangkit dan distribusi listrik hibrida dapat menggabungkan panel surya PV dan generator diesel dengan konverter DC/AC untuk memasok beban DC dan AC [25].



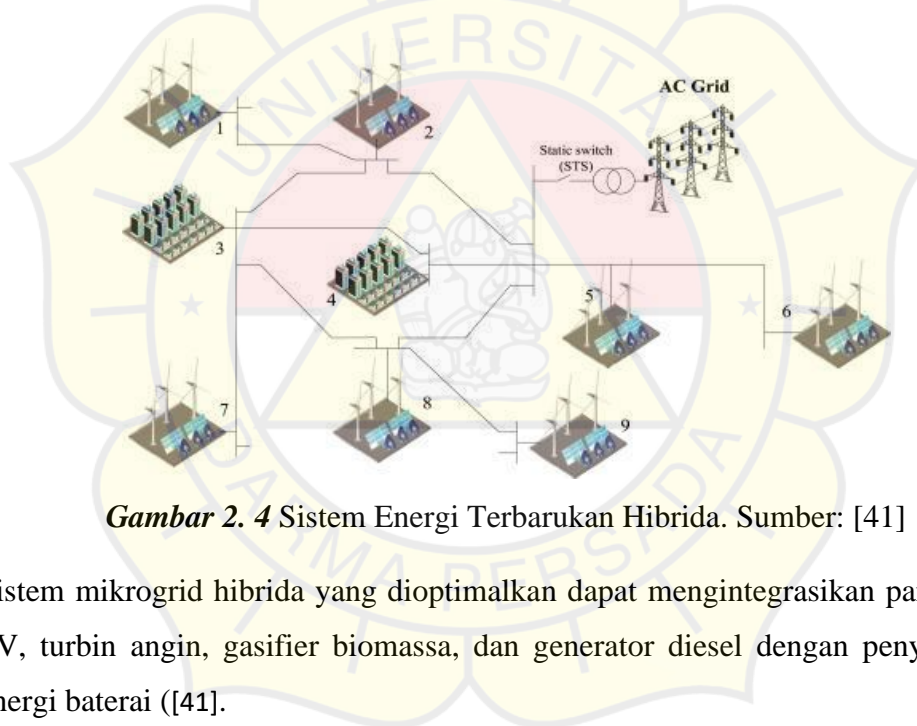
Gambar 2. 2 Sistem Listrik Hibrida. Sumber: [25]

Sistem energi hibrida dapat mengintegrasikan panel surya, turbin angin, dan generator diesel dengan penyimpanan baterai dan konverter daya [32]



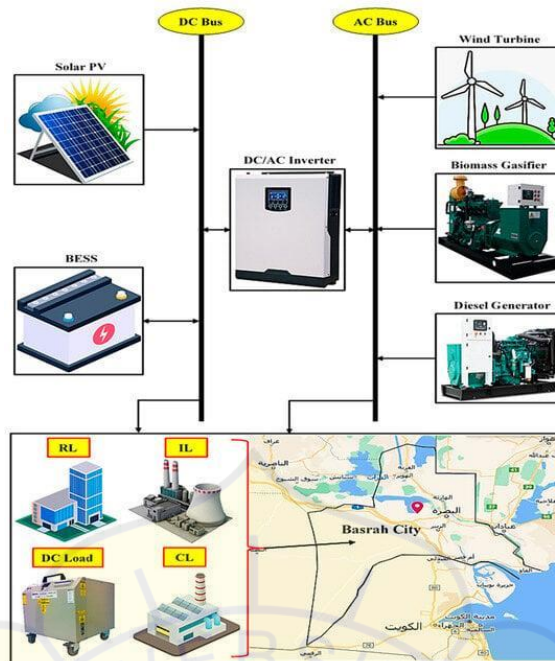
Gambar 2. 3 Sistem Energi Hibrida. Sumber: [32]

Sistem energi terbarukan hibrida sering mencakup turbin angin dan panel surya, bersama dengan sistem penyimpanan energi dan saklar statis untuk koneksi jaringan [41].



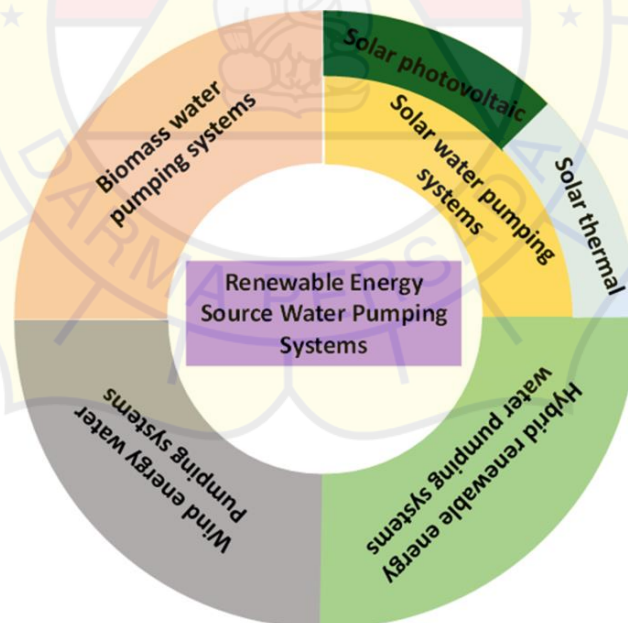
Gambar 2. 4 Sistem Energi Terbarukan Hibrida. Sumber: [41]

Sistem mikrogrid hibrida yang dioptimalkan dapat mengintegrasikan panel surya PV, turbin angin, gasifier biomassa, dan generator diesel dengan penyimpanan energi baterai ([41].



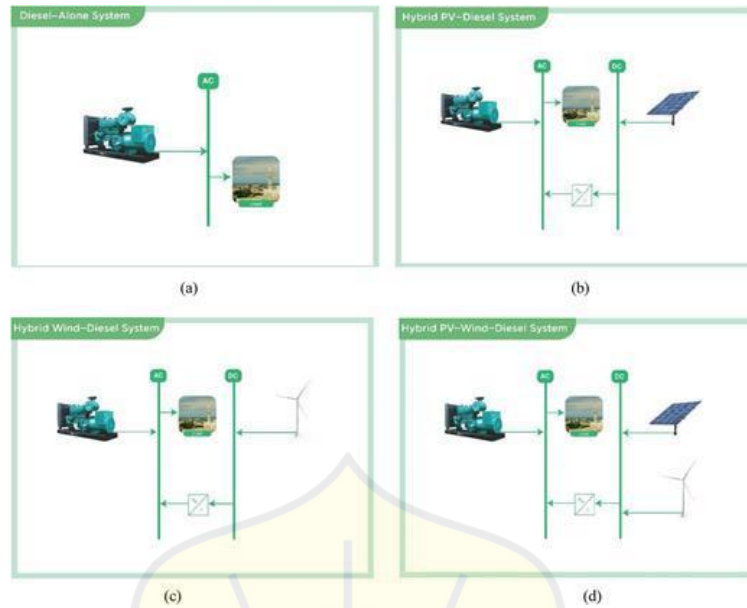
Gambar 2. 5 Sistem Tenaga Hibrida untuk Kota Basrah. Sumber: [41]

Sistem pompa air dapat didukung oleh berbagai sumber energi terbarukan seperti panel surya fotovoltaik, biomassa, angin, gelombang, dan energi hidro [42].



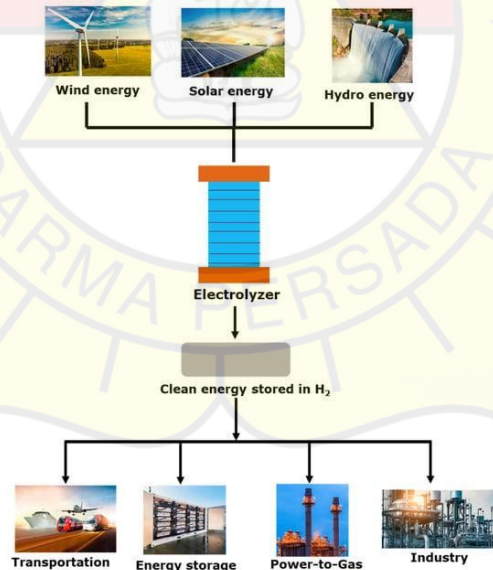
Gambar 2. 6 Sistem Pompa Air Energi Terbarukan. Sumber: [42]

Sistem hibrida yang menggabungkan generator diesel dengan panel surya dan turbin angin dapat meningkatkan efisiensi energi dan keberlanjutan [26]



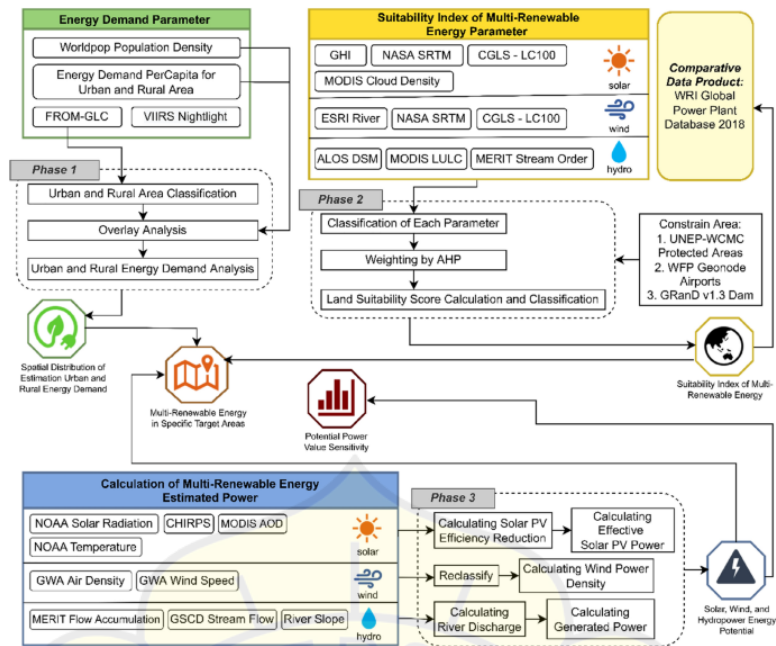
Gambar 2. 7 Sistem Pembangkitan Listrik. Sumber: [26]

Sumber energi terbarukan, seperti angin, matahari, dan air, dapat digunakan bersama elektroliser untuk memproduksi hidrogen, yang dapat diterapkan dalam transportasi, penyimpanan energi, power-to-gas, dan industri [36].



Gambar 2. 8 Konversi dan Pemanfaatan Energi Bersih. Sumber: [36]

Model spasial dapat mengintegrasikan data statistik, model spasial, data satelit pengamatan bumi, dan model iklim untuk mengevaluasi potensi energi terbarukan [43]



Gambar 2. 9 Model Spasial Potensi Energi Terbarukan. Sumber: [43]

2.3 Alasan Utama Penggunaan Sistem Pembangkit Listrik Hibrida

Alasan utama penggunaan sistem pembangkit listrik hibrida yang menggabungkan panel surya (PV) dan jaringan listrik untuk pengolahan air bersih di daerah pedesaan adalah keandalan, keberlanjutan, dan efisiensi biaya. Panel surya (PV) menyediakan sumber energi terbarukan, mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil, dan menurunkan emisi gas rumah kaca. Jaringan listrik memastikan pasokan listrik yang konsisten selama periode irradiansi surya yang tidak memadai [44]

2.3.1 Sistem Pembangkit Listrik Hibrida untuk Pengolahan Air Bersih

Sistem pembangkit listrik hibrida yang mengintegrasikan teknologi surya fotovoltaik (PV) dengan konektivitas jaringan listrik menawarkan solusi yang menjanjikan untuk pengolahan air bersih di daerah pedesaan. Sistem ini menggabungkan manfaat energi terbarukan dengan keandalan jaringan listrik tradisional, mengatasi tantangan kritis terkait akses energi, keberlanjutan lingkungan, dan efisiensi biaya [44].

2.3.2 Keandalan Melalui Hibridisasi

Salah satu tantangan utama dalam mengandalkan sistem PV surya secara eksklusif adalah sifat intermitennya, karena pembangkitan energi surya bergantung pada ketersediaan sinar matahari [44]. Selama malam hari atau hari berawan, sistem PV surya mungkin tidak menghasilkan listrik yang cukup untuk mengoperasikan proses pengolahan air [45]. Dengan mengintegrasikan dengan jaringan listrik, sistem hibrida memastikan pasokan listrik yang terus menerus dan stabil, terlepas dari tingkat irradiansi surya (Ismail et al., 2023)[2]. Jaringan listrik bertindak sebagai sumber daya cadangan, secara otomatis menyediakan listrik ketika pembangkitan tenaga surya tidak mencukupi untuk memenuhi kebutuhan pabrik pengolahan air [46]. Hibridisasi ini meningkatkan keandalan pasokan listrik secara keseluruhan, menjamin operasi tanpa gangguan dari sistem pengolahan air bersih [47].

2.3.3 Keberlanjutan Lingkungan

Sistem PV surya menyediakan sumber energi bersih dan terbarukan, mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan mengurangi emisi gas rumah kaca yang terkait dengan pembangkitan listrik konvensional [48]. Dengan menggunakan PV surya sebagai sumber energi utama, sistem hibrida meminimalkan jejak karbon proses pengolahan air, berkontribusi pada keberlanjutan lingkungan [48]. Hal ini terutama penting di daerah pedesaan, di mana akses ke sumber energi bersih mungkin terbatas, dan komunitas sering bergantung pada alternatif yang mencemari seperti generator diesel [49]. Integrasi panel surya PV dalam sistem hibrida mendorong transisi ke sumber energi yang lebih bersih, mendukung upaya global dalam memerangi perubahan iklim dan melindungi lingkungan [50] [51]

2.3.4 Efisiensi Biaya dan Manfaat Ekonomi

Meskipun biaya investasi awal untuk sistem PV surya dapat signifikan, sistem hibrida menawarkan penghematan biaya jangka panjang dibandingkan dengan mengandalkan sepenuhnya pada listrik jaringan atau generator berbahan bakar fosil [52]. Sistem PV surya memiliki biaya operasional minimal, karena tidak memerlukan bahan bakar dan memiliki persyaratan pemeliharaan yang relatif

rendah [53]. Dengan menggantikan konsumsi listrik jaringan dengan pembangkitan surya PV, sistem hibrida mengurangi tagihan listrik dan memberikan perlindungan terhadap fluktuasi harga energi [54]. Selain itu, beberapa wilayah menawarkan insentif dan subsidi untuk instalasi energi terbarukan, yang lebih lanjut mengurangi biaya awal sistem surya PV [55]. Kombinasi biaya operasional yang lebih rendah, insentif potensial, dan ketergantungan yang berkurang pada listrik jaringan yang mahal menjadikan sistem hybrid surya PV-jaringan sebagai solusi yang efisien secara biaya untuk pengolahan air bersih di daerah pedesaan [56].

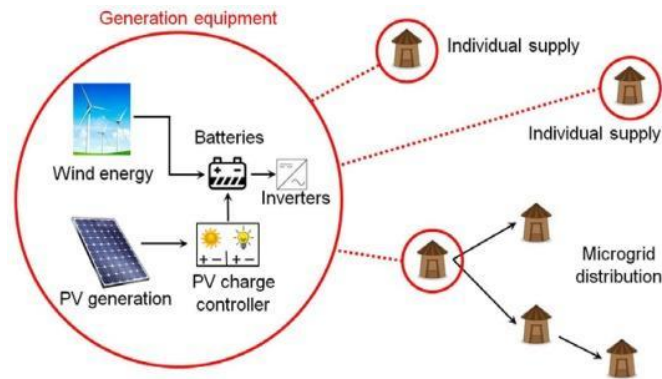
2.3.5 Konfigurasi Sistem

Sistem hybrid surya PV-jaringan dapat dikonfigurasi dengan berbagai cara, tergantung pada kebutuhan dan sumber daya komunitas pedesaan. Konfigurasi umum meliputi:

Sistem terhubung jaringan: Sistem ini terutama mengandalkan panel surya fotovoltaik (PV) untuk pembangkitan listrik, namun tetap terhubung ke jaringan listrik, sehingga dapat menarik listrik saat dibutuhkan dan berpotensi menjual kelebihan listrik kembali ke jaringan [57].

Sistem off-grid dengan penyimpanan baterai: Sistem ini menggabungkan panel surya PV dengan penyimpanan baterai untuk menyediakan pasokan listrik yang sepenuhnya mandiri [58]. Baterai menyimpan kelebihan energi surya yang dihasilkan pada siang hari dan melepaskannya pada malam hari atau saat cuaca mendung [59].

Sistem hibrida dengan generator diesel: Dalam beberapa kasus, generator diesel diintegrasikan ke dalam sistem hibrida sebagai sumber daya cadangan [60]. Generator diesel hanya beroperasi ketika panel surya PV dan penyimpanan baterai tidak cukup untuk memenuhi permintaan beban, sehingga meminimalkan konsumsi bahan bakar dan emisi [61].



Gambar 2. 10 Sistem tenaga energi terbarukan. Sumber: [61]

Integrasi sumber energi terbarukan seperti panel surya PV dengan jaringan listrik tradisional dan sistem penyimpanan energi menawarkan pendekatan yang andal, berkelanjutan, dan efisien biaya untuk mengoperasikan sistem pengolahan air bersih di daerah pedesaan [61]. Dengan memanfaatkan keunggulan panel surya PV dan jaringan listrik, sistem hibrida mengatasi tantangan unik akses energi, keberlanjutan lingkungan, dan kelayakan ekonomi di komunitas pedesaan [62]. Seiring kemajuan teknologi dan penurunan biaya, sistem pembangkit listrik hibrida diperkirakan akan memainkan peran yang semakin penting dalam memastikan akses ke air bersih dan pembangunan berkelanjutan di daerah pedesaan di seluruh dunia [63]. Integrasi tenaga surya dengan sumber energi terbarukan lainnya, seperti angin dan air, juga dapat berkontribusi pada penyimpanan dan pasokan energi [64][65]. Sistem hibrida juga dapat mencakup generator diesel dan sel bahan bakar sebagai sumber daya cadangan [66]. Alasan utama penggunaan sistem pembangkit listrik hibrida, yang menggabungkan panel surya PV dan jaringan listrik, untuk pengolahan air bersih di daerah pedesaan adalah keandalan, keberlanjutan, dan efisiensi biaya. Panel surya PV menyediakan sumber energi terbarukan, mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil, dan menurunkan emisi gas rumah kaca. Jaringan listrik memastikan pasokan daya yang konsisten selama periode irradiansi surya yang tidak memadai [67].

2.4 Sistem Pembangkit Listrik Hibrida Surya Fotovoltaik (PV) Dan Jaringan Listrik

Sistem pembangkit listrik hibrida surya fotovoltaik (PV) dan jaringan listrik mengintegrasikan panel surya dengan jaringan listrik tradisional untuk menghasilkan, menyimpan, dan mendistribusikan energi secara efisien. Sistem ini menggunakan panel PV untuk mengubah sinar matahari menjadi listrik arus searah (DC), yang kemudian diubah menjadi arus bolak-balik (AC) melalui inverter untuk digunakan dalam aplikasi yang kompatibel dengan jaringan listrik [68]. Baterai seringkali disertakan untuk penyimpanan energi, memungkinkan energi surya berlebih disimpan selama jam-jam puncak sinar matahari dan digunakan sebagai cadangan daya selama pemadaman listrik atau periode sinar matahari rendah [69] [70] [71].

2.4.1 Berikut ini adalah rincian komponen dan fungsinya:

Panel Surya: Panel ini mengubah sinar matahari menjadi listrik DC menggunakan efek fotovoltaik [72][73]. Jumlah daya yang dihasilkan bergantung pada intensitas sinar matahari [74].

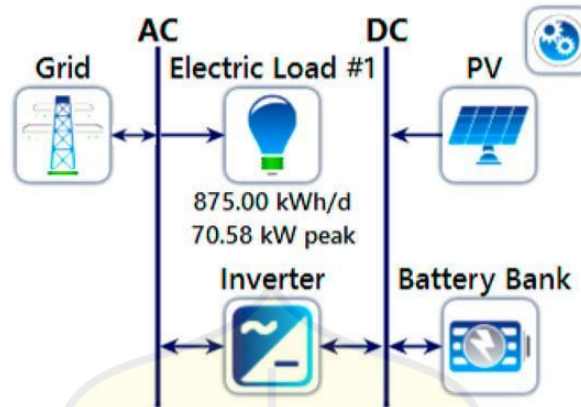
Inverter: Inverter mengubah daya DC dari panel surya atau bank baterai menjadi daya AC, yang kompatibel dengan jaringan listrik dan sebagian besar peralatan rumah tangga [75] [76].

Bank Baterai: Daya DC berlebih dapat disimpan dalam bank baterai selama periode produksi PV tinggi dan permintaan rendah. Energi yang disimpan ini kemudian dapat digunakan saat produksi PV rendah atau pada malam hari [77] [69].

Grid Connection: Sistem terhubung ke jaringan listrik, memungkinkan sistem menarik daya saat pembangkitan surya tidak mencukupi dan mengirimkan daya berlebih kembali ke jaringan saat pembangkitan melebihi permintaan [78].

Sistem Manajemen Energi (EMS): EMS memantau, mengontrol, dan mengoptimalkan aliran energi dalam sistem. Ia menentukan berapa banyak daya yang harus diambil dari setiap sumber (panel surya, baterai, jaringan) berdasarkan

faktor seperti tingkat pengisian baterai, ketersediaan sinar matahari, dan permintaan beban [79] [74].



Gambar 2. 11 Sistem Tenaga Hibrida. Sumber: [68]

Dalam sistem yang terhubung ke jaringan, jaringan listrik dapat memasok daya AC ke beban listrik, dan menerima daya berlebih saat pembangkitan PV tinggi dan permintaan beban rendah [68]. Inverter mengelola aliran daya antara sistem PV, bank baterai, dan jaringan listrik, memastikan pasokan daya yang stabil [68].

Sistem hibrida yang mengintegrasikan sumber energi surya, angin, dan geotermal dengan penyimpanan energi dapat menawarkan pengelolaan energi berkelanjutan untuk bangunan terpencil, terutama di daerah pegunungan tinggi dengan cuaca ekstrem [80]. Sistem ini sering kali dilengkapi dengan pengendali titik daya maksimum (MPPT) untuk mengoptimalkan kinerja panel surya PV [81]. Sistem kontrol canggih, seperti pengendali ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System), dapat digunakan untuk manajemen energi cerdas dalam aplikasi jaringan listrik pintar [81] [82]. Sistem pembangkit listrik hibrida surya fotovoltaik (PV) dan jaringan listrik mengintegrasikan panel surya dengan jaringan listrik tradisional untuk menghasilkan, menyimpan, dan mendistribusikan energi secara efisien. Sistem ini menggunakan panel PV untuk mengubah sinar matahari menjadi listrik arus searah (DC), yang kemudian diubah menjadi arus bolak-balik (AC) melalui inverter untuk digunakan dalam aplikasi yang kompatibel dengan jaringan [68]. Baterai seringkali disertakan untuk penyimpanan energi, memungkinkan energi surya berlebih disimpan selama jam-jam puncak sinar matahari dan digunakan

sebagai cadangan daya selama pemadaman listrik atau periode sinar matahari rendah [69] [70] [83].

2.5 Distribusi Daya Dalam Penggunaan Energi Untuk Sistem Pengolahan Air Bersih Di Pedesaan

Distribusi tenaga dalam sistem pengolahan air bersih di daerah pedesaan seringkali bergantung pada sumber energi yang berkelanjutan dan terdesentralisasi [84]. Teknologi energi terbarukan sering digunakan karena kesesuaiannya untuk infrastruktur yang tidak terhubung dengan jaringan listrik atau terhubung minimal [85]. Efisiensi sistem energi ini bergantung pada kemampuan penyimpanan energi, desain sistem, dan kondisi lingkungan lokal [85]. Listrik umumnya didistribusikan melalui sistem mandiri berskala kecil atau microgrid, dengan memprioritaskan operasi esensial seperti pompa air, filtrasi, dan desinfeksi UV [86]. Integrasi sistem energi dan air memerlukan perencanaan yang cermat untuk memastikan keandalan dan meminimalkan kerugian energi selama distribusi [87].

2.5.1 Sumber Energi Terbarukan untuk Pengolahan Air

Energi Surya: Sistem fotovoltaik surya (PV) merupakan pilihan populer untuk menggerakkan pengolahan air di daerah pedesaan [88]. Panel surya mengubah sinar matahari menjadi listrik, yang dapat digunakan untuk menggerakkan pompa, sistem filtrasi, dan unit desinfeksi [89].

Energi Angin: Turbin angin juga dapat digunakan untuk menghasilkan listrik untuk instalasi pengolahan air [90]. Seperti energi surya, energi angin merupakan sumber energi bersih dan terbarukan, menjadikannya pilihan ramah lingkungan [90].

Energi Air: Di daerah dengan sumber daya air yang sesuai, sistem mikro-hidro dapat menyediakan sumber daya listrik yang andal untuk pengolahan air [91]. Sistem ini memanfaatkan energi air yang mengalir untuk menghasilkan listrik [91].

Biomassa: Biomassa, termasuk bahan organik seperti kayu dan limbah pertanian, dapat dimanfaatkan untuk menggerakkan sistem pompa air [92]. Hal ini dapat dilakukan melalui pembakaran langsung atau konversi menjadi biofuel [93].

2.5.2 Desain Sistem dan Penyimpanan Energi

Desain sistem energi sangat penting untuk memastikan pasokan listrik yang konsisten dan andal untuk pengolahan air [94]. Pertimbangan utama meliputi:

Penyimpanan Energi: Sistem penyimpanan baterai sering digunakan untuk menyimpan energi berlebih yang dihasilkan oleh sumber energi terbarukan, memastikan pasokan listrik terus menerus bahkan saat sinar matahari atau angin tidak tersedia [95].

Sistem Hibrida: Menggabungkan sumber energi terbarukan yang berbeda, seperti surya dan angin, dapat meningkatkan keandalan pasokan listrik [92].

Microgrid: Microgrid dapat mengintegrasikan berbagai sumber pembangkit listrik terdistribusi dan sistem penyimpanan energi untuk menyediakan pasokan listrik yang stabil dan tangguh bagi komunitas pedesaan [96].

2.5.3 Teknologi Pengolahan Air

Desalinasi: Di wilayah yang menghadapi kelangkaan air, desalinasi yang didukung energi terbarukan dapat menyediakan sumber air bersih yang berkelanjutan [97]. Pabrik desalinasi bertenaga surya, misalnya, dapat digunakan untuk mengolah air payau atau air laut [98].

Metode elektrokimia: Metode elektrokimia menawarkan keunggulan dalam pengolahan air dengan sistem yang scalable, modular, terdistribusi, dan efisiensi energi, serta layak untuk lokasi tanpa jaringan listrik ketika diintegrasikan dengan teknologi energi terbarukan [75].

Filtrasi air: Energi terbarukan dapat menggerakkan proses filtrasi air untuk memastikan ketersediaan air bersih [98].

2.5.4 Tantangan dan Pertimbangan

Meskipun memiliki potensi manfaat, penggunaan energi terbarukan untuk pengolahan air di daerah pedesaan juga menghadapi tantangan [86]:

Biaya awal yang tinggi: Investasi awal dalam sistem energi terbarukan dapat signifikan, meskipun biaya telah menurun dalam beberapa tahun terakhir[85].

Intermitensi: Sifat intermiten beberapa sumber energi terbarukan, seperti surya dan angin, dapat menimbulkan tantangan dalam menjaga pasokan listrik yang konsisten [99].

Perawatan: Sistem energi terbarukan memerlukan perawatan rutin untuk memastikan kinerja optimal [99].

2.5.5 Integrasi dengan Pertanian Cerdas

Teknik pertanian cerdas dapat meningkatkan produktivitas air di daerah kering di bawah perubahan iklim [100]. Teknik irigasi cerdas memastikan penggunaan sumber daya air yang efisien [101]. Pertanian Cerdas dapat didukung oleh sumber energi terbarukan seperti surya dan angin [101].



Gambar 2. 12 Aplikasi Kota Cerdas. Sumber: [90]

Bahan visual memerlukan rujukan ke literatur penelitian asli mengenai integrasi energi terbarukan tambahan dalam pengolahan air minum [90]. Distribusi tenaga listrik dalam sistem pengolahan air bersih di daerah pedesaan seringkali bergantung pada sumber energi yang berkelanjutan dan terdesentralisasi [84]. Teknologi energi terbarukan sering digunakan karena kesesuaiannya untuk infrastruktur yang tidak terhubung atau minim koneksi [84]. Efisiensi sistem energi ini bergantung pada

kemampuan penyimpanan energi, desain sistem, dan kondisi lingkungan lokal [85]. Listrik umumnya didistribusikan melalui sistem mandiri berskala kecil atau microgrid, dengan memprioritaskan operasi esensial seperti pompa air, filtrasi, dan desinfeksi UV [86]. Integrasi sistem energi dan air memerlukan perencanaan yang cermat untuk memastikan keandalan dan meminimalkan kerugian energi selama distribusi [87].

2.6 Analisis Keunggulan Pada Sistem Pembangkit Listrik Hibrida Untuk Sistem Pengolahan Air Bersih Di Pedesaan

Untuk melakukan analisis perbandingan sistem pembangkit listrik hibrida untuk pengolahan air bersih di daerah pedesaan, beberapa faktor harus dipertimbangkan, termasuk desain sistem, analisis teknologis-ekonomis, dan alat perangkat lunak yang digunakan untuk optimasi [102] [103] [104] .

2.6.1 Desain dan Konfigurasi Sistem

Sistem Energi Terbarukan Hibrida (HRES) yang mengintegrasikan sumber energi terbarukan seperti panel surya fotovoltaik (PV), turbin angin (WT), dan generator biogas efektif untuk memasok listrik di daerah pedesaan terpencil [102]. Konfigurasi sistem ini sering mencakup generator diesel (DG), konverter, dan sistem penyimpanan energi baterai (BESS) untuk memastikan pasokan listrik yang andal [105]. Konfigurasi yang berbeda, seperti PV-generator diesel-baterai, PV-angin-baterai, dan PV-biogas-baterai, dapat dibandingkan berdasarkan kinerja dan keunggulan ekonominya [106]. Integrasi sel bahan bakar dengan sistem PV surya juga dapat menyediakan pembangkitan energi yang andal dan efisien [107].

2.6.2 Analisis Tekno-Ekonomi

Analisis tekno-ekonomi melibatkan penilaian kelayakan ekonomi, kompatibilitas teknis, dan implikasi lingkungan dari berbagai HRES [103]. Parameter kunci meliputi total biaya sekarang bersih (TNPC) dan biaya energi (COE) [103] [108] .

Perangkat lunak seperti HOMER Pro digunakan untuk melakukan perhitungan keseimbangan energi dan menentukan biaya bersih sekarang terendah untuk setiap konfigurasi sistem [109]. Analisis ekonomi juga harus mempertimbangkan biaya siklus hidup, termasuk investasi awal, operasi dan pemeliharaan, serta penggantian komponen [110].

2.6.3 Alat Perangkat Lunak

HOMER (*Hybrid Optimization Model for Electric Renewables*) adalah alat perangkat lunak yang banyak digunakan untuk merancang dan mengoptimalkan sistem energi hibrida [102] [103] [104] [111] [108][110] [109] [105]. Perangkat lunak ini mensimulasikan berbagai skenario berdasarkan data masukan dan batasan untuk menemukan konfigurasi sistem yang paling efisien dan andal secara biaya [110]. Perangkat lunak lain, seperti *TRNSYS*, *RETScreen*, dan *iHOGA*, juga tersedia untuk perancangan dan analisis sistem energi [112] [113]. Alat-alat ini membantu menentukan ukuran sistem optimal, dengan mempertimbangkan faktor-faktor seperti sumber energi terbarukan, profil beban, dan batasan sistem [112].

2.6.4 Indikator Kinerja Utama (IKU)

Beberapa IKU dapat digunakan untuk membandingkan kinerja sistem pembangkit listrik hibrida yang berbeda:

Biaya Energi (COE): Metrik ini mewakili biaya rata-rata per unit energi yang dihasilkan oleh sistem dan sangat penting untuk mengevaluasi kelayakan ekonomi konfigurasi yang berbeda [105].

Biaya Sekarang Bersih (NPC): NPC mewakili total biaya sistem selama masa pakainya, termasuk biaya modal, operasi, dan pemeliharaan, yang didiskontokan ke nilai sekarang [105].

Fraksi Energi Terbarukan (REF): Ini menunjukkan proporsi energi yang dihasilkan dari sumber terbarukan, mencerminkan keberlanjutan sistem [112].

Beban yang Tidak Terpenuhi: Metrik ini mengukur jumlah permintaan listrik yang tidak dapat dipenuhi oleh sistem, menunjukkan keandalan sistem [114].

Emisi CO₂: Pengukuran emisi karbon dioksida membantu mengevaluasi dampak lingkungan sistem [108].

2.6.5 Integrasi Pengolahan Air Bersih

Integrasi sistem pengolahan air bersih dengan pembangkit listrik hibrida dapat meningkatkan keberlanjutan komunitas pedesaan [115]. Kebutuhan energi untuk proses pengolahan air perlu dipertimbangkan dalam desain dan optimasi HRES [116]. Teknologi desalinasi yang didorong oleh energi terbarukan, seperti osmosis terbalik yang digerakkan oleh energi surya, dapat menyediakan air tawar di daerah dengan sumber daya air terbatas [117].

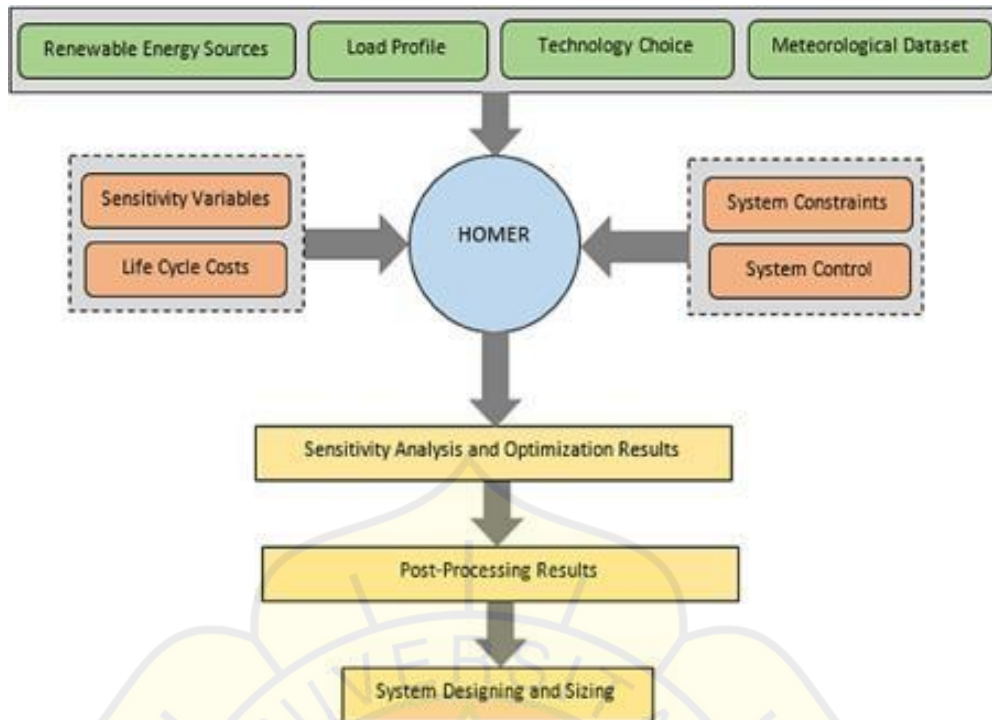
2.6.6 Metodologi Analisis Perbandingan

Tentukan Tujuan: Tentukan tujuan spesifik, seperti meminimalkan biaya, memaksimalkan keandalan, atau mengurangi dampak lingkungan [114].

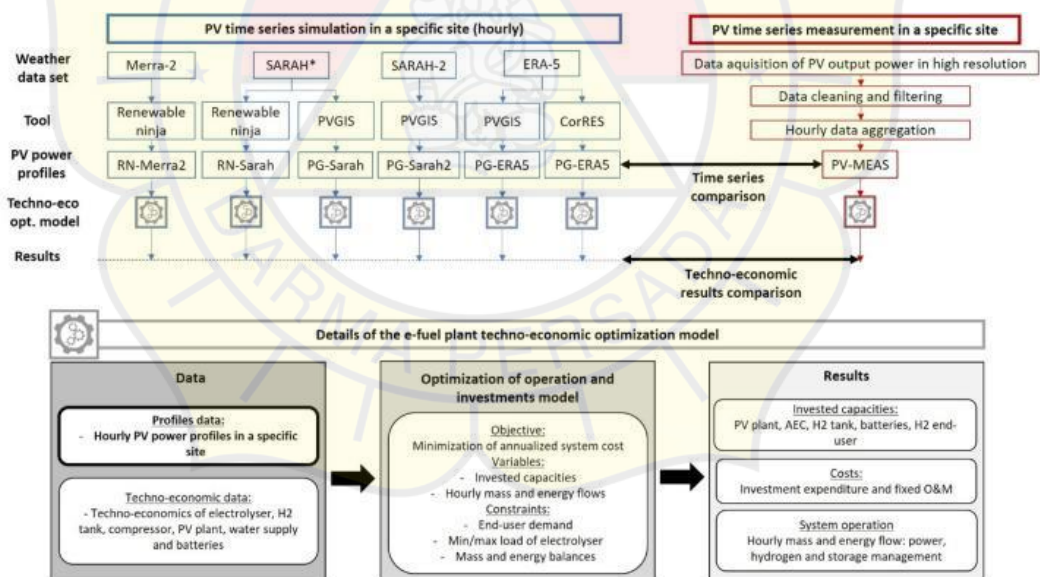
Pemilihan Sistem: Pilih beberapa konfigurasi sistem hibrida untuk dibandingkan, seperti surya-angin-baterai, surya-diesel-baterai, dan angin-diesel-baterai [102] [103] [111].

Pengumpulan Data: Kumpulkan data tentang sumber daya energi terbarukan (intensitas sinar matahari, kecepatan angin), persyaratan pengolahan air, dan kondisi geografis [110] [118].

Simulasi dan Pemodelan: Gunakan perangkat lunak seperti HOMER Pro untuk mensimulasikan kinerja sistem.



Gambar 2. 13 Alur Kerja HOMER. Sumber: [110]



Gambar 2. 14 Model Tekno-ekonomi. Sumber: [119]

2.7 Langkah Perhitungan Analisis Tekno Dan Ekonomi Untuk Sistem Pengolahan Air Bersih Di Pedesaan

Untuk melakukan analisis teknis dan ekonomi sistem pengolahan air bersih di daerah pedesaan, pertimbangkan langkah-langkah berikut:

Tentukan Tujuan dan Ruang Lingkup: Nyatakan dengan jelas tujuan sistem pengolahan air, seperti menyediakan air minum yang aman, dan tentukan ruang lingkup analisis, termasuk wilayah geografis dan populasi yang dilayani [120]. Pertimbangkan tantangan dan kebutuhan khusus komunitas pedesaan, seperti rumah tangga yang tersebar dan keterbatasan skala ekonomi [121].

Evaluasi Kualitas dan Kuantitas Air: Analisis sumber air mentah untuk mengidentifikasi kontaminan dan menentukan tingkat pengolahan yang diperlukan [122] [120]. Evaluasi kuantitas air yang tersedia untuk memastikan sistem pengolahan yang dipilih dapat memenuhi kebutuhan komunitas [123]

Identifikasi Teknologi Pengolahan Potensial: Teliti dan identifikasi teknologi pengolahan air yang sesuai untuk daerah pedesaan, dengan mempertimbangkan faktor seperti persyaratan pemeliharaan dan biaya [124]. Pilihan dapat mencakup sistem *point-of-use* (POU) seperti desinfeksi surya, perebusan, dan klorinasi [122] atau sistem terdesentralisasi [120]. Teknologi baru seperti BAC beroksigen tanpa gelembung juga dapat dipertimbangkan [125]

Evaluasi Teknis: Evaluasi kelayakan teknis setiap teknologi, mempertimbangkan efisiensi pengolahan, kompleksitas teknologi, dan sumber daya alam yang diperlukan [120]. Evaluasi kinerja dan keterlaksanaan sistem pengolahan air [126]. Pertimbangkan faktor-faktor seperti kemudahan penggunaan, keandalan, dan kemampuan menangani kualitas air yang bervariasi [122]

Perkiraan Biaya: Perkirakan biaya modal dan operasional yang terkait dengan setiap teknologi [127]. Hal ini harus mencakup biaya untuk peralatan, instalasi, energi, tenaga kerja, dan pemeliharaan [120]. Pertimbangkan untuk melakukan penilaian biaya siklus hidup (*life cycle cost assessment*) terhadap berbagai teknologi pengolahan air limbah [127].

Analisis Ekonomi: Lakukan analisis biaya-manfaat (cost-benefit analysis) atau analisis efektivitas biaya untuk membandingkan kelayakan ekonomi berbagai opsi pengolahan [128] [129]. Pertimbangkan manfaat langsung dan tidak langsung, termasuk peningkatan kesehatan masyarakat dan pengurangan kerusakan lingkungan [124]. Analisis harus mempertimbangkan faktor-faktor seperti biaya konstruksi, operasi, dan pemeliharaan, serta potensi pendapatan dari daur ulang air [124].

Analisis Keputusan Multi-Kriteria (MCDA): Gunakan MCDA untuk mengintegrasikan kriteria sosial, teknis, ekonomi, dan lingkungan dalam proses seleksi [121]. MCDA dapat membantu mengevaluasi trade-off antara tujuan yang bertentangan dan mengidentifikasi solusi yang paling berkelanjutan [130]

Pertimbangkan Penggunaan Kembali Air: Evaluasi potensi penggunaan kembali air sebagai bagian dari pengelolaan sumber daya air terpadu [124]. Evaluasi dampak teknis dan ekonomi penggunaan air yang telah diolah untuk tujuan non-minum, seperti irigasi [124].

Analisis Sensitivitas: Lakukan analisis sensitivitas untuk menilai bagaimana perubahan pada parameter kunci (misalnya, biaya energi, permintaan air) memengaruhi kelayakan ekonomi sistem pengolahan air ([129]. Hal ini dapat membantu mengidentifikasi solusi yang paling tangguh dan tahan lama.

Kemampuan Keuangan: Proyeksikan kemampuan keuangan komunitas untuk membangun dan mengoperasikan sistem pengolahan air [131]. Bandingkan biaya dengan pendapatan untuk menentukan populasi layanan minimum yang diperlukan untuk kelayakan finansial [131]

Keterlibatan Pemangku Kepentingan: Berinteraksi dengan komunitas lokal, lembaga pemerintah, dan pemangku kepentingan lainnya untuk memastikan sistem pengolahan yang dipilih sesuai dengan kebutuhan dan preferensi mereka [131] Hal ini dapat meningkatkan kemungkinan implementasi yang sukses dan keberlanjutan jangka panjang.

Menangani Masalah Lingkungan: Implementasikan langkah-langkah perlindungan lingkungan air di daerah pedesaan. Melindungi sumber air, cegah erosi tanah, dan kendalikan polusi dari sumber industri dan domestik [132]

Mengikuti langkah-langkah ini akan memberikan analisis teknis dan ekonomi yang komprehensif untuk sistem pengolahan air bersih di daerah pedesaan, yang mengarah pada pengambilan keputusan yang terinformasi dan solusi berkelanjutan [132]

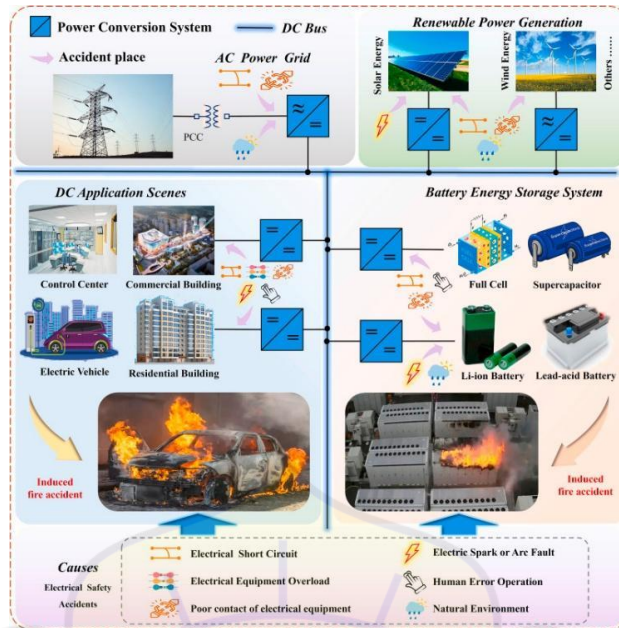
2.8 Tantangan Penerapan Sistem Dan Teknologi Pembangkit Listrik Pengolahan Air Bersih Di Pedesaan

Penerapan sistem pembangkit listrik untuk pengolahan air bersih di daerah pedesaan menghadirkan serangkaian tantangan unik. Tantangan-tantangan ini mencakup aspek teknologi, ekonomi, sosial, dan lingkungan, sehingga memerlukan pendekatan holistik untuk implementasi yang sukses.

2.8.1 Tantangan Teknologi:

Integrasi Jaringan dan Stabilitas: Mengintegrasikan sumber energi terbarukan ke dalam jaringan listrik yang ada dapat menjadi sulit karena sifatnya yang tidak stabil. Hal ini dapat menyebabkan ketidakstabilan jaringan jika tidak dikelola dengan baik [133]. Teknologi jaringan canggih dan solusi penyimpanan energi diperlukan untuk menyeimbangkan pasokan dan permintaan [133].

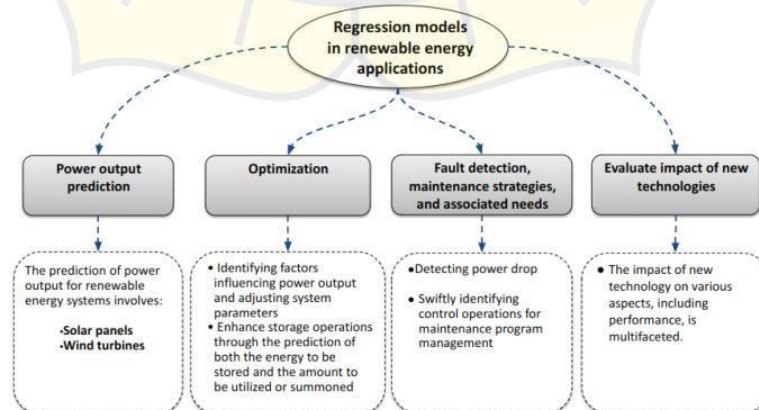
Gangguan Busur DC: Sistem baterai, yang krusial untuk penyimpanan energi, menghadapi masalah keamanan seperti gangguan busur DC yang disebabkan oleh tabrakan mekanis atau kerusakan isolasi [134]



Gambar 2. 15 Sistem Listrik DC. Sumber: [134]

Keahlian Teknis dan Pemeliharaan: Daerah pedesaan seringkali kekurangan keahlian teknis yang diperlukan untuk pengoperasian dan pemeliharaan sistem pembangkit listrik dan pengolahan air yang canggih. Program pelatihan dan pendidikan sangat penting untuk memastikan keberlanjutan jangka panjang proyek-proyek ini.

Desain dan Optimasi Sistem: Mendesain sistem terintegrasi yang efisien menggabungkan pembangkit listrik dan pengolahan air memerlukan pertimbangan cermat terhadap kondisi lokal dan ketersediaan sumber daya. Model optimasi dan pembelajaran mesin dapat membantu dalam proses ini [135].



Gambar 2. 16 Model regresi dalam aplikasi energi terbarukan. Sumber: [135]

2.8.2 Tantangan Ekonomi:

Biaya Awal yang Tinggi: Implementasi sistem energi terbarukan dan teknologi pengolahan air canggih seringkali melibatkan investasi awal yang signifikan [135]. Hal ini dapat menjadi hambatan utama di daerah pedesaan dengan sumber daya keuangan terbatas.

Biaya Penyimpanan Energi: Solusi penyimpanan energi, seperti baterai, sangat penting untuk pasokan listrik yang andal tetapi dapat mahal [135]. Menemukan opsi penyimpanan yang efisien secara biaya sangat penting untuk kelayakan ekonomi sistem-sistem ini.

Kelayakan Ekonomi Sistem Hibrida: Sistem energi hibrida mandiri yang mengintegrasikan sumber energi terbarukan dan penyimpanan energi harus secara ekonomi layak untuk memenuhi kebutuhan energi daerah pedesaan terpencil [136]

Insentif dan Struktur Pasar: Ketidakhadiran insentif khusus dan struktur pasar yang jelas yang disesuaikan dengan kebutuhan unik sistem tenaga listrik dapat menghambat investasi dan partisipasi di sektor energi terkait [137]

2.8.3 Tantangan Sosial:

Penerimaan Sosial dan Partisipasi Masyarakat: Mendapatkan dukungan masyarakat untuk proyek energi terbarukan dapat menjadi tantangan. Menangani kekhawatiran terkait dampak visual, kebisingan, dan penggunaan lahan sangat penting untuk implementasi yang sukses [138].

Integrasi dengan Pertanian: Di lingkungan pertanian, sistem energi harus diintegrasikan dengan hati-hati untuk mendukung aktivitas pertanian dan meningkatkan kesejahteraan petani [139].

Kemiskinan dan Kekurangan Energi: Kekurangan energi berdampak serius pada kehidupan jutaan orang di daerah pedesaan, menghambat peningkatan standar hidup dan pendidikan [140].

2.8.4 Tantangan Lingkungan:

Intermitensi Sumber Energi Terbarukan: Energi surya dan angin bersifat intermitten, sehingga memerlukan sistem cadangan atau penyimpanan energi untuk memastikan pasokan listrik yang terus menerus [140]

Dampak Perubahan Iklim: Perubahan iklim dapat mempengaruhi ketersediaan sumber daya terbarukan, seperti air untuk tenaga air atau sinar matahari untuk tenaga surya. Sistem perlu dirancang untuk menahan dampak-dampak ini [133] [141]

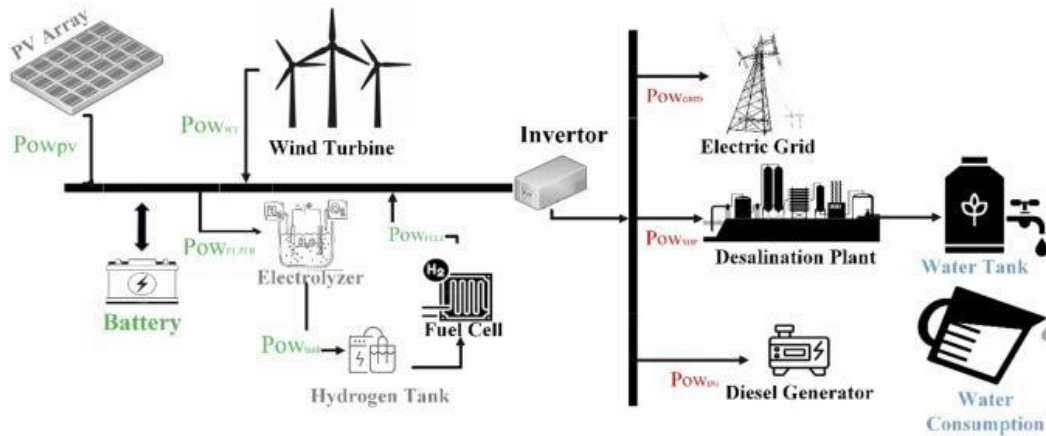
Polusi Udara dari Manufaktur: Manufaktur panel surya dan teknologi energi terbarukan lainnya dapat berkontribusi pada polusi udara jika tidak dikelola dengan baik [141]

Keberlanjutan Panel Surya: Memastikan ketersediaan jangka panjang bahan baku untuk produksi panel surya dan menangani dampak lingkungan dari pembuangan panel lama merupakan hal kritis untuk keberlanjutan panel surya [141]

2,8,5 Tantangan Khusus Pengolahan Air:

Hubungan Energi-Air: Pasokan air, pengolahan air limbah, dan pembangkitan listrik saling terhubung, sehingga sulit untuk menangani masalah secara terpisah [141]. Pendekatan terintegrasi diperlukan untuk mengoptimalkan penggunaan energi dan air.

Biaya Desalinasi: Meskipun desalinasi dapat menyediakan air bersih, proses ini memerlukan energi yang besar dan mahal [142]Mengoptimalkan pabrik desalinasi dengan energi terbarukan dapat membantu mengurangi biaya dan emisi.



Gambar 2. 17 Sistem produksi energi dan air terintegrasi berbasis energi terbarukan. Sumber: [142]

Pengolahan Limbah Cair dan Pemulihan Sumber Daya: Implementasi sistem pengolahan limbah cair yang efektif dapat meningkatkan kesehatan masyarakat dan memulihkan sumber daya berharga, seperti energi dan nutrisi [142]

Mengatasi tantangan ini memerlukan pendekatan multifaset yang mencakup inovasi teknologi, dukungan kebijakan, keterlibatan komunitas, dan investasi keuangan. Dengan mempertimbangkan faktor-faktor ini secara cermat, dimungkinkan untuk berhasil menerapkan sistem pembangkit listrik untuk pengolahan air bersih di daerah pedesaan, meningkatkan kualitas hidup, dan mempromosikan pembangunan berkelanjutan. Ketidakhadiran infrastruktur, hambatan logistik, dan kendala geografis serta lingkungan yang mempengaruhi aksesibilitas dapat membuat hal ini semakin sulit. Implementasi sistem pembangkit listrik untuk pengolahan air bersih di daerah pedesaan menghadirkan serangkaian tantangan unik. Tantangan ini mencakup aspek teknologi, ekonomi, sosial, dan lingkungan, sehingga memerlukan pendekatan holistik untuk implementasi yang sukses.

2.9 Saran dan Rekomendasi untuk Penyediaan Listrik dalam Pengolahan Air Bersih di Daerah Pedesaan

Untuk mengimplementasikan sistem dan teknologi pembangkit listrik untuk pengolahan air bersih di daerah pedesaan, beberapa pendekatan dapat dipertimbangkan, dengan fokus pada sumber energi terbarukan dan praktik berkelanjutan.

2.9.1 Sumber Energi Terbarukan untuk Pembangkit Listrik

Tenaga Surya: Sistem fotovoltaik surya (PV) merupakan opsi yang layak untuk penyediaan listrik dalam pengolahan air di daerah pedesaan [143] [16]. Sistem ini mengubah sinar matahari langsung menjadi listrik dan dapat digunakan untuk berbagai sistem pompa air [16]. Sistem ini sangat berguna di daerah yang tidak memiliki jaringan listrik konvensional [144]. Fiksasi nitrogen plasma dalam pertanian dapat meningkatkan penyerapan PV di daerah pedesaan dengan memanfaatkan energi surya untuk kebutuhan pertanian dan mengurangi energi surya yang terbuang [144]. Menggabungkan panel surya konvensional dengan sistem jendela surya canggih dan sistem fotovoltaik terintegrasi bangunan (BIPV) dapat meningkatkan efisiensi energi [143].

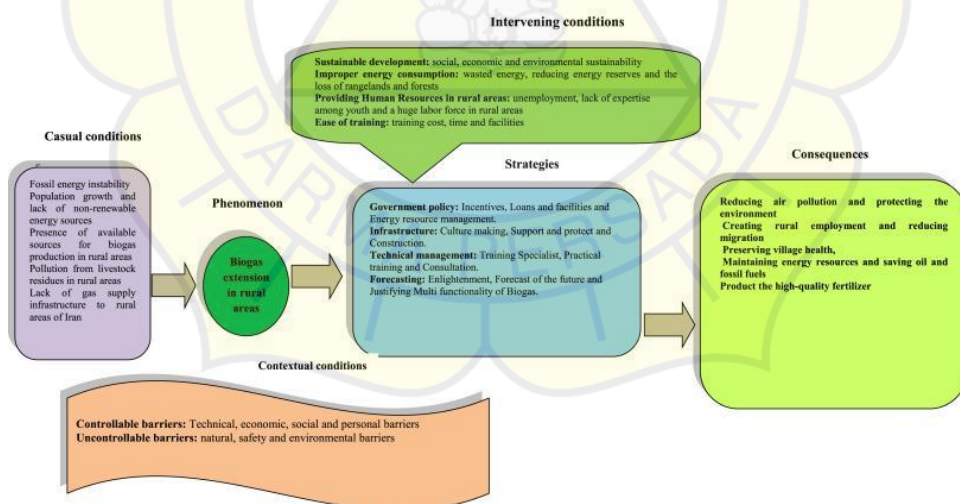


Gambar 2. 18 Listrik. Sumber: [145]

Tenaga Angin: Turbin angin dapat menghasilkan listrik untuk pompa air dan pengolahan air [146]. Mereka cocok untuk daerah dengan sumber angin yang konsisten [146]. Mengintegrasikan tenaga angin dengan sumber energi terbarukan lainnya dapat memastikan pasokan listrik yang andal [147]. Kebijakan tenaga angin China terus berkembang untuk mendukung pertumbuhan ini, mengatasi masalah seperti keterlambatan kebijakan [14].

Tenaga air: Sistem mikrohidro dapat digunakan di daerah pedesaan dengan sumber daya air yang sesuai untuk menghasilkan listrik [148]. Sistem ini memanfaatkan energi air yang mengalir dan cocok untuk sungai atau aliran kecil [16]. Model spasial yang mengintegrasikan tenaga surya, angin, dan tenaga air dapat menganalisis secara strategis potensi dan efisiensi pengembangan energi terbarukan di Asia Tenggara [11].

Biogas: Sistem tenaga biogas dapat dimanfaatkan di daerah pedesaan untuk menghasilkan tenaga untuk memasak dan listrik [149]. Sistem biogas menawarkan dua fungsi sekaligus dengan memenuhi kebutuhan memasak dan listrik, serta dapat mengubah limbah ternak menjadi energi [150].



Gambar 2. 19 Sistem Energi Terpadu Pedesaan. Sumber: [150]

Sistem Hibrida: Menggabungkan sumber energi terbarukan seperti surya dan angin dapat menyediakan pasokan listrik yang lebih andal dan konsisten untuk

pengolahan air [151]. Sistem hibrida juga dapat mengintegrasikan generator diesel sebagai sumber daya cadangan [146].

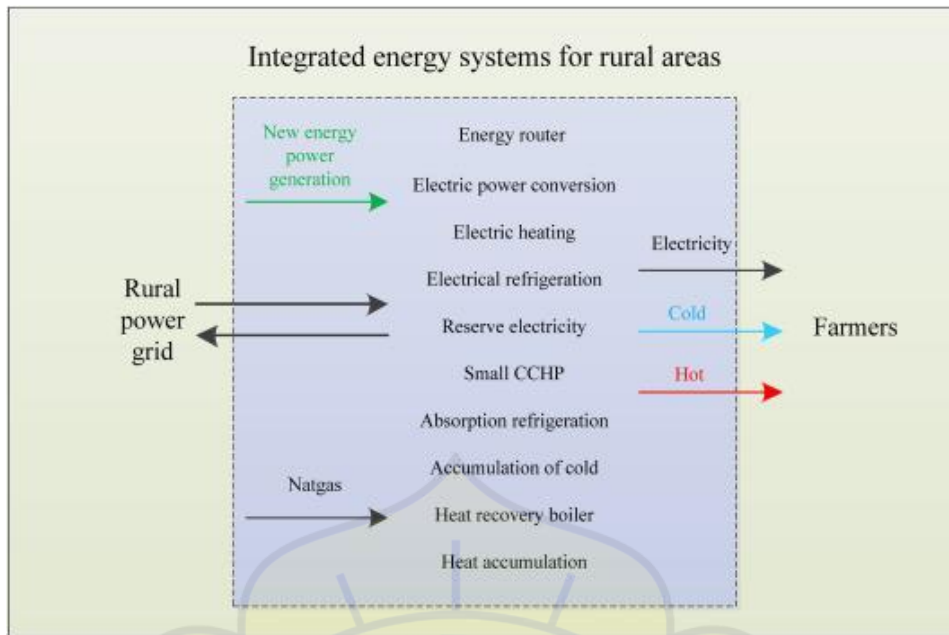
2.9.2 Teknologi Pengolahan Air Bersih

Desalinasi: Energi surya dapat digunakan untuk desalinasi air laut, mengatasi kelangkaan air di daerah kering [151]. Desalinasi surya melalui penguapan-pengeringan merupakan alternatif menarik untuk memurnikan air asin atau payau [152]. Pabrik desalinasi yang terhubung dengan jaringan listrik dan didukung oleh sumber daya terbarukan dapat dioptimalkan untuk mengurangi biaya produksi air tawar dan emisi gas rumah kaca [153].

Sistem Pompa Air: Sumber energi terbarukan seperti surya, angin, dan hidro dapat digunakan untuk menggerakkan sistem pompa air untuk irigasi dan pasokan air [16]. Evaluasi keuangan teknologi energi terbarukan untuk pompa air di daerah pedesaan menunjukkan efisiensi biaya opsi seperti sistem pompa fotovoltaik surya, pompa bertenaga biogas, dan pompa kincir angin [154].

2.9.3 Desain dan Optimasi Sistem

Sistem Energi Terpadu: Sistem energi bersih terpadu di daerah pedesaan harus dievaluasi secara ilmiah, mempertimbangkan kepentingan berbagai pihak [155]. Model sistem energi terpadu dirancang untuk daerah pedesaan, menggabungkan masukan energi dari jaringan listrik pedesaan, pembangkit energi baru, dan gas alam [155].

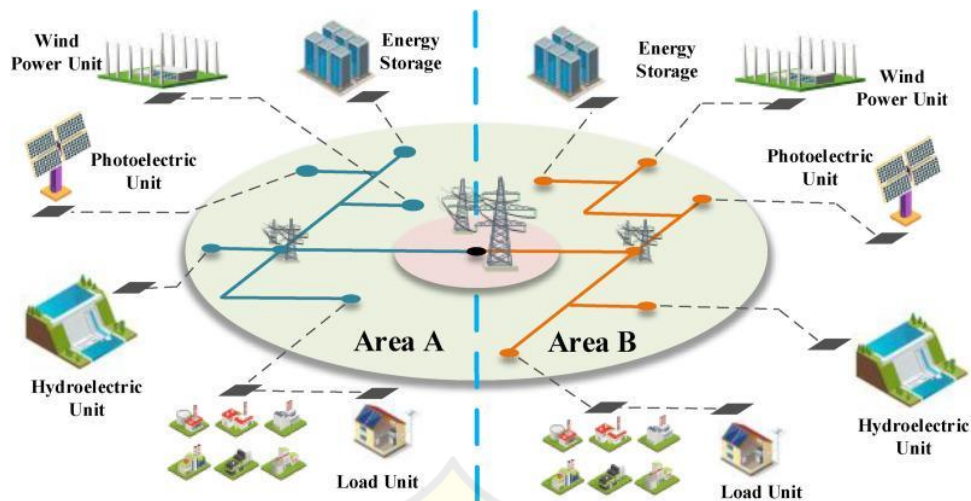


Gambar 2. 20 Sistem Energi Terpadu Pedesaan. Sumber: [155]

Penyimpanan Energi: Fasilitas penyimpanan energi sangat penting untuk menyimpan kelebihan energi listrik yang dihasilkan selama periode permintaan rendah atau produksi tinggi [147]. Sistem pompa-sebagai-turbin dapat menyimpan energi dengan memompa air ke tangki penyimpanan dan melepaskannya untuk menghasilkan listrik saat dibutuhkan [146].

Jaringan Listrik Cerdas: Penerapan teknologi jaringan listrik cerdas dapat meningkatkan efisiensi dan keandalan distribusi listrik di daerah pedesaan [19]. Teknologi ini dapat mengoptimalkan penggunaan energi dan mengurangi kerugian, berkontribusi pada sistem energi yang lebih berkelanjutan [147].

AI dan Machine Learning: Penerapan kecerdasan buatan (AI) dan machine learning dapat meningkatkan efisiensi dan kontrol sistem tenaga listrik dengan energi terbarukan [147]. Pembelajaran optimasi nilai kebijakan terdistribusi yang terinspirasi kuantum dengan peramalan lingkungan canggih dapat memfasilitasi kontrol pembangkitan real-time dalam sistem tenaga listrik baru [147]. Pembelajaran mesin juga dapat mengoptimalkan sistem campuran fotovoltaik sepenuhnya untuk bangunan hemat energi [143].



Gambar 2. 21 Sistem Listrik Energi Terbarukan Sumber: [147]

Koordinasi Integrasi: Analisis koordinasi integrasi antara energi terbarukan pedesaan dan lingkungan ekologi sangat penting untuk pembangunan berkelanjutan [156]. Sistem pengambilan keputusan multi-kriteria (MCDM) dapat mempertimbangkan pengembangan energi terbarukan dan faktor ekologi [156].

2.9.4 Kebijakan dan Implementasi

Dukungan Kebijakan: Kebijakan pemerintah memainkan peran krusial dalam memperluas energi terbarukan, termasuk biogas [150]. Dukungan kebijakan harus mencakup insentif, pinjaman, dan fasilitas untuk mendorong penduduk pedesaan berpartisipasi dalam proyek energi terbarukan [150]. Kebijakan perlu seimbang untuk mendorong pengembangan tenaga angin, misalnya [14].

Kebijakan Keuangan: Kebijakan keuangan sangat penting untuk pembiayaan proyek dan mekanisme pemulihan biaya dalam proyek minigrid [15]. Kebijakan investasi dan insentif pajak dapat membuat proyek energi terbarukan secara finansial layak [15].

Keterlibatan Masyarakat: Melibatkan komunitas lokal dalam perencanaan dan implementasi proyek energi terbarukan sangat penting untuk kesuksesan proyek tersebut [157]. Memahami kesediaan perilaku komunitas pedesaan untuk menggunakan energi bersih dapat menjadi dasar strategi efektif untuk adopsi [158][155].

Tujuan Pembangunan Berkelanjutan: Upaya untuk mencapai tujuan energi bersih PBB berkontribusi pada tujuan pembangunan berkelanjutan lainnya [159]. Mengatasi kekurangan listrik sangat penting untuk kesuksesan rencana energi bersih pedesaan [159].

2.9.5 Pertimbangan Tambahan

Hubungan Energi-Air: Memahami hubungan energi-air sangat penting untuk pembangunan berkelanjutan, karena pasokan air, pengolahan limbah air, dan pembangkitan listrik saling terkait [160]. Pendekatan terintegrasi diperlukan untuk mengatasi masalah yang terkait dengan sistem-sistem ini [160].

Distribusi Global Aktivitas Air: Memahami distribusi global aktivitas terkait air, seperti irigasi, tenaga air, dan pasokan air, dapat memberikan informasi untuk penempatan strategis sistem energi terbarukan [160].



Gambar 2. 22 Distribusi Global Aktivitas Sumber: [160]

Plat Bipolar Baja Tahan Karat: Kinerja dan umur pakai elektroliser air membran elektrolit polimer (PEMWE) dapat dipengaruhi oleh pemilihan bahan yang sesuai untuk plat bipolar [64]. Bahan yang hemat biaya dan tahan korosi seperti baja tahan karat sangat penting [64].

Dengan menerapkan saran dan rekomendasi ini, sistem dan teknologi pembangkit listrik untuk pengolahan air bersih dapat diterapkan secara efektif di daerah pedesaan, mendorong pembangunan berkelanjutan dan meningkatkan kualitas hidup komunitas pedesaan.

2.10 Kontribusi Sistem Dan Teknologi Pembangkit Listrik Untuk Sistem Pengolahan Air Bersih Di Pedesaan Terhadap SDGs

Sistem pembangkit listrik dan teknologi pengolahan air bersih di daerah pedesaan memberikan kontribusi yang signifikan terhadap Tujuan Pembangunan Berkelanjutan PBB (SDGs) [161] [162]. Sistem-sistem ini menargetkan beberapa SDGs, menciptakan manfaat tambahan yang meningkatkan keberlanjutan dan ketahanan komunitas pedesaan secara keseluruhan [163]

2.10.1 Kontribusi terhadap SDGs Tertentu

SDG 6: Air Bersih dan Sanitasi: Sistem pengolahan air bersih secara langsung mendukung SDG 6 dengan memastikan ketersediaan dan pengelolaan berkelanjutan air dan sanitasi untuk semua [164] [163]. Sistem pengolahan air di titik penggunaan (PoU) sangat relevan di daerah pedesaan, di mana fasilitas pengolahan air terpusat seringkali tidak tersedia karena biaya infrastruktur yang tinggi dan kendala geografis [164] [163]. Teknologi seperti membran komposit Cu@MNM dapat meningkatkan penghilangan arsenik dari air, memastikan keamanan air minum [165].

SDG 7: Energi Terjangkau dan Bersih: Sistem pembangkit listrik di daerah pedesaan, terutama yang memanfaatkan sumber energi terbarukan, secara langsung berkontribusi pada SDG 7 dengan menyediakan akses ke energi yang terjangkau, andal, berkelanjutan, dan modern [166] [163]. Sumber energi terbarukan seperti sistem fotovoltaik surya (PV), turbin angin, dan biomassa dapat menggerakkan sistem ini, mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan mengurangi emisi karbon [167] [168] [169]. Misalnya, sistem PV surya digunakan untuk pompa air di daerah pedesaan, menyediakan air minum bagi komunitas dan ternak [169].

SDG 3: Kesehatan yang Baik dan Kesejahteraan: Akses ke air bersih dan energi yang andal meningkatkan hasil kesehatan di daerah pedesaan [163]. Air bersih mengurangi risiko penyakit yang ditularkan melalui air, sementara akses ke listrik memfasilitasi layanan dan fasilitas kesehatan yang lebih baik [170] [171]. Menggabungkan elektrifikasi klinik kesehatan dengan penerapan teknologi

nol karbon memastikan pasokan energi yang andal dan bersih untuk fasilitas kesehatan, sehingga meningkatkan kualitas layanan kesehatan [163]

SDG 9: Industri, Inovasi, dan Infrastruktur: Penerapan sistem pembangkit listrik dan pengolahan air bersih mendorong inovasi dan membangun infrastruktur yang tangguh di daerah pedesaan [163] [172]. Mendukung penelitian dan pengembangan industri energi, serta memberikan subsidi untuk penggunaan teknologi nol karbon di pabrik dan fasilitas pertambangan, dapat mengurangi emisi CO₂ dan mempromosikan pengembangan industri yang berkelanjutan [163].

SDG 13: Aksi Iklim: Dengan mempromosikan energi terbarukan dan mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil, sistem-sistem ini berkontribusi pada aksi iklim [172] [173]. Misalnya, mengintegrasikan sistem pembangkit listrik oxy-combustion yang menangkap CO₂ dengan pemanfaatan energi dingin dari gas alam cair dapat mengurangi emisi [174]. Selain itu, mendorong investasi dalam teknologi nol karbon untuk cadangan listrik, seperti solar-plus-storage, meningkatkan ketahanan terhadap bencana [163]

2.10.2 Interkoneksi dan Manfaat Bersama

Implementasi sistem-sistem ini juga mendukung Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs) lainnya melalui manfaat yang saling terkait:

SDG 1: Tanpa Kemiskinan dan SDG 8: Pekerjaan Layak dan Pertumbuhan Ekonomi: Mendorong penciptaan pekerjaan energi dengan keterampilan rendah dan menengah dapat mengangkat orang di atas garis kemiskinan dan mempromosikan pertumbuhan ekonomi [163]

SDG 2: Nol Kelaparan: Mendorong penggunaan teknologi nol karbon dalam pertanian, seperti agri voltaik dan turbin angin kecil, meningkatkan produktivitas pertanian sambil mengurangi emisi karbon [163]

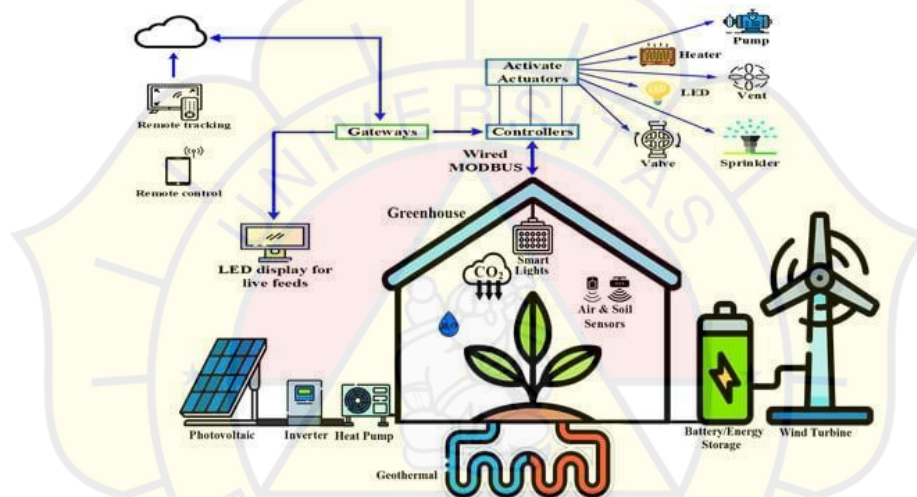
SDG 5: Kesetaraan Gender: Elektrifikasi sektor pertanian dan sektor lain dengan representasi perempuan yang tinggi, serta meningkatkan jumlah perempuan dalam posisi manajerial di industri energi, mempromosikan kesetaraan gender [163]

SDG 11: Kota dan Komunitas Berkelanjutan: Mendukung perencanaan energi partisipatif dan struktur kepemilikan membuat komunitas lebih berkelanjutan [163]

SDG 12: Konsumsi dan Produksi Bertanggung Jawab: Mendorong pelaporan keberlanjutan oleh perusahaan energi dan utilitas mempromosikan pola konsumsi dan produksi yang lebih bertanggung jawab di sektor energi [163]

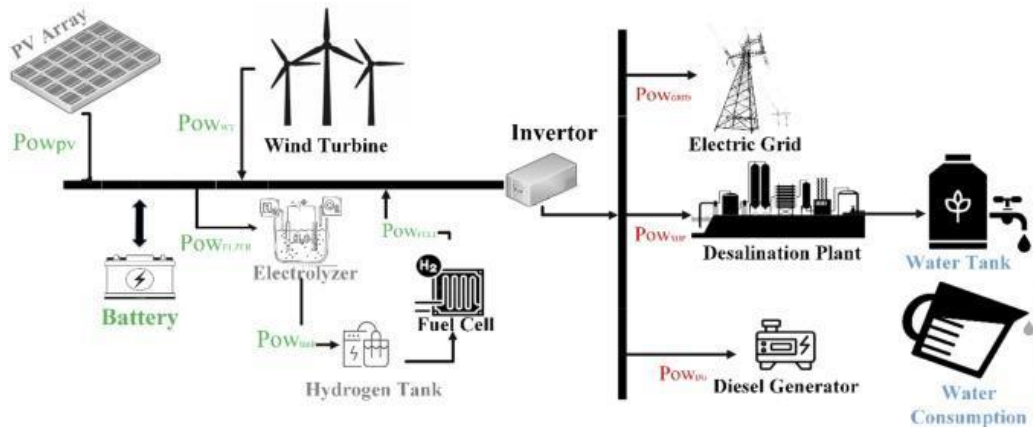
2.10.3 Contoh Teknologi dan Sistem

Kebun Sayur Fotovoltaik: Sistem ini menggabungkan pertanian dengan produksi energi, mencapai modernisasi pertanian dan tujuan pengurangan karbon ganda [167]



Gambar 2. 23 Kebun Sayur Fotovoltaik. Sumber: [166]

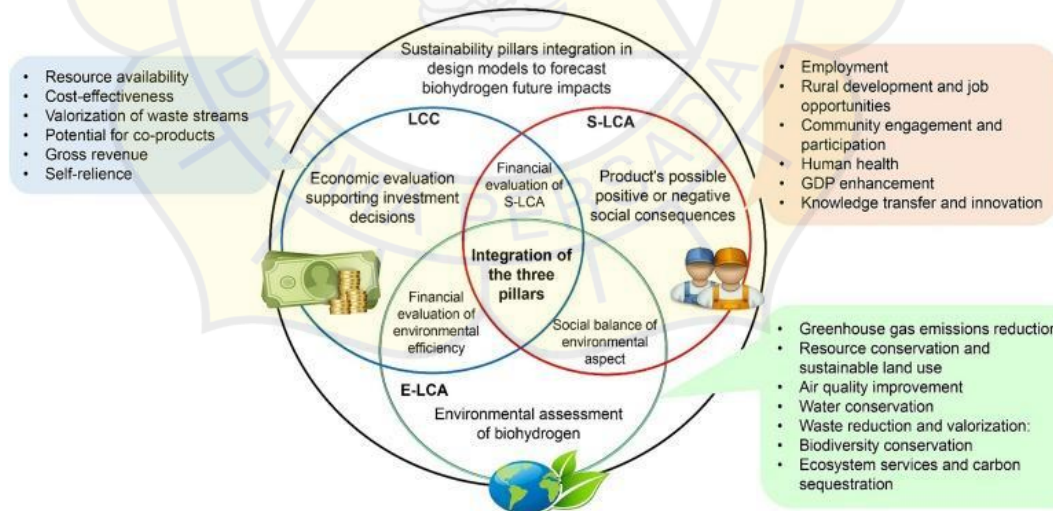
Sistem Terintegrasi Berbasis Energi Terbarukan: Sistem ini menggabungkan pembangkitan energi terbarukan (panel surya, turbin angin), penyimpanan energi (baterai, tangki hidrogen), dan pengkondisian daya (inverter) untuk mendestilasi air dan menyediakan energi bersih [175].



Gambar 2. 24 Sistem Terintegrasi Berbasis Energi Terbarukan. Sumber: [175]

Rumah Kaca Cerdas: Mengintegrasikan sistem geothermal, turbin angin, dan panel surya, bersama dengan sensor udara dan tanah serta kontrol otomatis, dapat menciptakan lingkungan yang efisien dan berkelanjutan untuk budidaya tanaman [166]

Produksi Biohidrogen: Penggunaan biomassa lignoselulosa untuk produksi biohidrogen menawarkan sumber energi yang berkelanjutan dan ramah lingkungan [176]. Integrasi penilaian siklus hidup ekonomi, sosial, dan lingkungan ke dalam model desain biohidrogen memastikan keberlanjutan yang komprehensif [176]



Gambar 2. 25 Produksi Biohidrogen. Sumber: [176]

2.10.4 Tantangan dan Pertimbangan

Pilihan Teknologi: Pemilihan teknologi yang tepat harus mempertimbangkan dampaknya terhadap hubungan SDG [163]. Sangat penting untuk mengevaluasi bagaimana industri dan layanan yang diperlukan untuk memproduksi suatu teknologi mempengaruhi berbagai SDG [163]

Pengelolaan Sumber Daya: Pengelolaan yang efisien dari nexus air-energi-makanan (WEF) sangat penting untuk menyeimbangkan perkembangan manusia dan batasan sumber daya alam [162].

Penyimpanan Energi: Mengatasi sifat variabel energi terbarukan memerlukan solusi penyimpanan energi yang efektif, seperti baterai dan sistem penyimpanan energi hibrid hidrogen [177].

Pengelolaan Limbah: Daur ulang limbah cair dan padat kaya nutrisi dari perkotaan sebagai pupuk dalam pertanian menguntungkan kedua sektor dengan mengatasi pengelolaan limbah dan mempromosikan pertanian berkelanjutan [170]

Dengan mengintegrasikan sistem pembangkit listrik dan teknologi pengolahan air bersih di daerah pedesaan, komunitas dapat mencapai kemajuan signifikan dalam mewujudkan beberapa Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs), mendorong pembangunan berkelanjutan, dan meningkatkan kualitas hidup penduduk [163], immunities [163]