

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Bioenergi

Bioenergi, sebagai bagian integral dari portofolio energi berkelanjutan, telah mendapat perhatian luas sebagai alternatif yang ramah lingkungan dan dapat diperbarui. Pemanfaatan sumber daya biologis, seperti tanaman dan mikroorganisme, untuk menghasilkan energi merupakan prinsip dasar dalam konsep bioenergi. Studi oleh Demirbas dan Demirbas menyoroti potensi bioenergi dalam menyediakan sumber energi yang berkelanjutan dan dapat mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil (87). Bioenergi dapat dihasilkan melalui beberapa jalur, termasuk bioetanol dari tanaman biomassa (88), biogas dari limbah organik (89), dan biodiesel dari minyak nabati (90).

Keberlanjutan bioenergi menjadi fokus penting dalam mengatasi tantangan perubahan iklim. Studi oleh Cherubini dkk., menunjukkan bahwa penggunaan bioenergi dengan sebaik-baiknya dapat mengurangi emisi gas rumah kaca dan memberikan dampak positif terhadap mitigasi perubahan iklim (91). Namun, aspek keberlanjutan bioenergi juga memerlukan pertimbangan yang cermat terkait dengan dampak lingkungan, ekonomi, dan sosial (92). Keseluruhan dampak siklus hidup bioenergi, yang melibatkan produksi, pengangkutan, dan penggunaan, harus dinilai secara holistik (93).

Pentingnya diversifikasi sumber energi mendorong pengembangan bioenergi sebagai kontributor penting dalam bauran energi global. Penelitian oleh Sims

menyoroti bahwa diversifikasi ini dapat membantu mengurangi risiko ketergantungan pada sumber energi tunggal dan meningkatkan ketahanan energi (94). Selain itu, bioenergi juga memainkan peran signifikan dalam mengurangi tekanan pada pasokan energi fosil yang terbatas (95).

Sumber daya biomassa untuk bioenergi dapat berasal dari berbagai sumber, termasuk tanaman energi khusus, limbah pertanian, dan limbah organik. Biomassa merupakan bahan baku utama untuk bioenergi dan dapat dihasilkan melalui pertanian biomassa (96) dan konversi limbah organik menjadi energi melalui proses anaerobik (97). Studi oleh De Almeida dkk., mengidentifikasi potensi besar dari limbah pertanian sebagai sumber bioenergi yang dapat dimanfaatkan secara efisien (98).

Meskipun demikian, ada juga tantangan dan kendala dalam pengembangan bioenergi yang perlu diatasi. Faktor-faktor seperti perubahan penggunaan lahan, persaingan dengan produksi pangan, dan masalah ekonomi dapat mempengaruhi keberlanjutan dan efektivitas bioenergi (45). Oleh karena itu, perlu adanya pendekatan holistik dan kebijakan yang bijaksana dalam mempromosikan pengembangan bioenergi (99).

Bioenergi juga memainkan peran penting dalam menyediakan akses energi yang lebih baik, terutama di daerah-daerah yang belum terjangkau oleh pasokan energi konvensional. Inisiatif bioenergi dapat membantu mengatasi masalah ketidaksetaraan energi dan meningkatkan aksesibilitas energi di tingkat lokal (100). Studi oleh Sovacool menunjukkan potensi bioenergi sebagai alat untuk mendukung pembangunan berkelanjutan di komunitas-komunitas terpencil (101).

Dalam menghadapi kompleksitas isu energi global, kolaborasi internasional menjadi kunci untuk memajukan pengembangan bioenergi secara efektif. Kerjasama antarnegara dapat memfasilitasi pertukaran teknologi dan pengetahuan, mempercepat inovasi, dan menciptakan solusi bersama untuk tantangan global (70). Kolaborasi ini dapat membentuk landasan yang kuat untuk menghadirkan bioenergi sebagai kontributor yang signifikan dalam mengatasi isu energi global.

Bioenergi muncul sebagai elemen vital dalam transformasi menuju sistem energi yang lebih berkelanjutan dan bersih. Pemanfaatan biomassa sebagai sumber energi dapat memberikan alternatif yang berkesinambungan, mengurangi jejak karbon, dan meningkatkan ketahanan energi secara keseluruhan. Dengan terus menggali potensi dan menanggulangi kendala yang ada, bioenergi dapat memainkan peran yang semakin besar dalam mencapai tujuan energi berkelanjutan di masa depan.

2.1.1 Definisi dan Konsep Dasar Bioenergi

Bioenergi, sebagai konsep dasar dalam bidang energi terbarukan, melibatkan pemanfaatan sumber daya biologis untuk menghasilkan energi. Definisi dan konsep dasar bioenergi telah berkembang seiring waktu, mencerminkan kompleksitas tantangan energi global. Bioenergi dapat didefinisikan sebagai energi yang dihasilkan dari biomassa, bahan organik yang berasal dari tanaman, hewan, atau mikroba. Menurut Badger, bioenergi dapat diperoleh melalui beberapa proses, termasuk pembakaran biomassa, produksi bioetanol, biogas, dan biodiesel (102).

Konsep dasar bioenergi terletak pada sifatnya yang dapat diperbarui dan berkelanjutan. Bioenergi berasal dari siklus karbon alami, di mana tanaman

menyerap karbon dioksida selama pertumbuhan mereka, dan energi yang dilepaskan saat biomassa diolah dapat dianggap sebagai karbon yang telah disimpan. Kontribusi bioenergi dalam mengurangi emisi gas rumah kaca menjadi aspek penting dalam konteks perubahan iklim global (103).

Aspek keberlanjutan bioenergi menjadi fokus kajian dalam literatur terkait. Menurut Cherubini dkk., keberlanjutan bioenergi melibatkan penilaian dampak lingkungan, ekonomi, dan sosial selama seluruh siklus hidup produksi dan penggunaannya (91). Dalam konteks ini, penting untuk mempertimbangkan berbagai faktor seperti perubahan penggunaan lahan, konversi habitat, dan dampak pada keanekaragaman hayati (99).

Bioenergi juga dapat dipahami sebagai instrumen untuk mencapai tujuan keberlanjutan dan diversifikasi energi. Melalui produksi bioenergi, dapat dicapai tujuan diversifikasi bauran energi, mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil, dan meningkatkan ketahanan energi (70). Namun, Smeets dkk., menyoroti bahwa implementasi bioenergi harus mempertimbangkan aspek-aspek seperti persaingan dengan produksi pangan dan keadilan sosial (96).

Dalam melihat peran bioenergi dalam menyediakan energi, penting untuk mengenali potensi sumber daya biomassa yang dapat dimanfaatkan. Limbah pertanian dan hutan, serta tanaman energi khusus, menjadi sumber biomassa yang umumnya digunakan dalam produksi bioenergi (104). Studi ini menunjukkan bahwa identifikasi dan pengelolaan sumber biomassa yang efisien merupakan langkah krusial dalam pengembangan bioenergi.

Tantangan dan hambatan dalam pengembangan bioenergi juga patut diperhatikan. Menurut Searchinger dkk., aspek-aspek seperti perubahan

penggunaan lahan yang dapat menyebabkan deforestasi, persaingan dengan produksi pangan, dan masalah ekonomi harus ditangani dengan hati-hati (45). Pendekatan holistik dan kebijakan yang bijaksana diperlukan untuk meminimalkan dampak negatif dan memaksimalkan manfaat bioenergi (99).

Bioenergi tidak hanya menjadi solusi potensial dalam mengatasi isu energi global, tetapi juga berperan penting dalam mendukung pembangunan berkelanjutan di tingkat lokal. Sovacool menyoroti bahwa bioenergi dapat membantu mengatasi ketidaksetaraan akses energi di komunitas terpencil, memberikan solusi yang dapat diandalkan dan berkelanjutan (105).

Dalam melihat perkembangan bioenergi, kolaborasi internasional menjadi kunci. Dornburg dkk., menekankan pentingnya pertukaran teknologi dan pengetahuan antarnegara untuk mempercepat inovasi dan menciptakan solusi bersama bagi tantangan global (70). Studi ini menggarisbawahi perlunya kerjasama lintas batas untuk mengoptimalkan pemanfaatan potensi bioenergi secara global.

Bioenergi merupakan bidang yang berkembang pesat dengan potensi besar dalam memberikan solusi energi yang berkelanjutan dan ramah lingkungan. Pengertian dan konsep dasar bioenergi mencakup pemanfaatan biomassa sebagai sumber energi terbarukan, dengan fokus pada keberlanjutan dan dampak lingkungan. Dengan terus menggali potensi dan merespons tantangan, bioenergi dapat memainkan peran sentral dalam menuju masa depan energi yang lebih berkelanjutan.

2.1.2 Jenis-jenis Bioenergi

Bioenergi, sebagai bagian integral dari transisi global menuju energi berkelanjutan, melibatkan pemanfaatan sumber daya biologis untuk menghasilkan energi. Jenis-jenis bioenergi beragam, mencakup berbagai teknologi dan sumber bahan bakar yang dapat dimanfaatkan. Dalam konteks ini, penjelasan tentang jenis-jenis bioenergi akan memberikan gambaran komprehensif tentang kontribusi potensialnya terhadap keberlanjutan energi global.

1. Bioetanol

Bioetanol diperoleh melalui fermentasi bahan biomassa, seperti tebu, jagung, atau sorgum, oleh mikroorganisme yang menghasilkan etanol sebagai produk sampingan (106). Proses ini memanfaatkan gula atau pati dalam tanaman untuk menghasilkan bahan bakar cair yang dapat digunakan sebagai pengganti bensin.

Bioetanol memiliki potensi sebagai sumber energi yang berkelanjutan dan ramah lingkungan. Bioetanol dapat dihasilkan dari berbagai sumber yang tersedia secara luas, sehingga tidak bersaing dengan lahan pertanian untuk produksi pangan. Selain itu, bioetanol juga dapat mengurangi emisi gas rumah kaca, sehingga dapat berkontribusi terhadap mitigasi perubahan iklim.

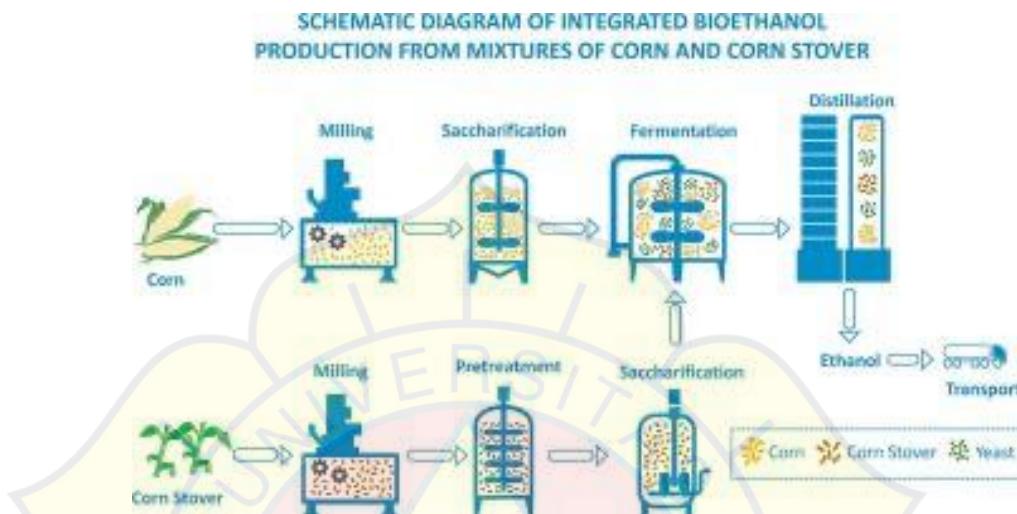
Terdapat dua metode utama untuk memproduksi bioetanol, yaitu:

a. Metode Fermentasi

Metode fermentasi adalah metode yang paling umum digunakan untuk memproduksi bioetanol. Pada metode ini, biomassa difermentasi oleh mikroorganisme untuk menghasilkan etanol.

b. Metode Gasifikasi

Metode gasifikasi adalah metode yang menghasilkan gas *syngas* dari biomassa. Gas syngas kemudian dikonversi menjadi etanol menggunakan katalis.



Gambar 2.1 Skema Proses Produksi Bioetanol (107)

Bioetanol memiliki potensi untuk menjadi sumber energi yang berkelanjutan dan ramah lingkungan. Namun, pengembangan bioetanol juga menghadapi beberapa tantangan, seperti ketersediaan biomassa, biaya produksi, dan ketersediaan teknologi. Untuk mengatasi tantangan tersebut, diperlukan penelitian dan pengembangan yang lebih lanjut.

2. Biodiesel

Biodiesel merupakan jenis bioenergi yang dihasilkan dari transesterifikasi minyak nabati, seperti minyak sawit, kedelai, atau rapeseed (90). Biodiesel dapat digunakan sebagai pengganti diesel konvensional dalam mesin diesel tanpa memerlukan modifikasi signifikan.

Biodiesel merupakan alternatif yang berkelanjutan dan ramah lingkungan terhadap solar berbasis minyak bumi, yang berasal dari bahan bakar fosil. Itu

terbuat dari minyak nabati atau lemak hewani yang terlebih dahulu diubah menjadi metil ester asam lemak (FAME), yang kemudian dicampur dengan bahan bakar diesel. Biodiesel dapat digunakan pada mesin diesel yang tidak dimodifikasi dan menawarkan beberapa keunggulan dibandingkan solar berbahan dasar minyak bumi, termasuk:

a. Pengurangan Emisi

Biodiesel mengeluarkan zat partikulat (PM) hingga 80% lebih sedikit, nitrogen oksida (NOx) 40% lebih sedikit, dan karbon monoksida (CO) 21% lebih sedikit dibandingkan solar berbasis minyak bumi (108,109)

b. Peningkatan Kinerja Mesin

Biodiesel dapat meningkatkan kinerja mesin dengan mengurangi ketukan mesin dan meningkatkan pelumasan (110)

c. Keberlanjutan

Biodiesel adalah sumber daya terbarukan, sedangkan solar berbasis minyak bumi adalah sumber daya yang terbatas (108)

d. Penciptaan Lapangan Kerja

Produksi biodiesel dapat menciptakan lapangan kerja dan meningkatkan perekonomian lokal (111)

Akan tetapi, ada juga beberapa tantangan yang terkait dengan produksi biodiesel, termasuk:

→ Penggunaan lahan

Produksi biodiesel dapat menyebabkan peningkatan harga pangan dan penggundulan hutan jika tidak dilakukan secara berkelanjutan (112)

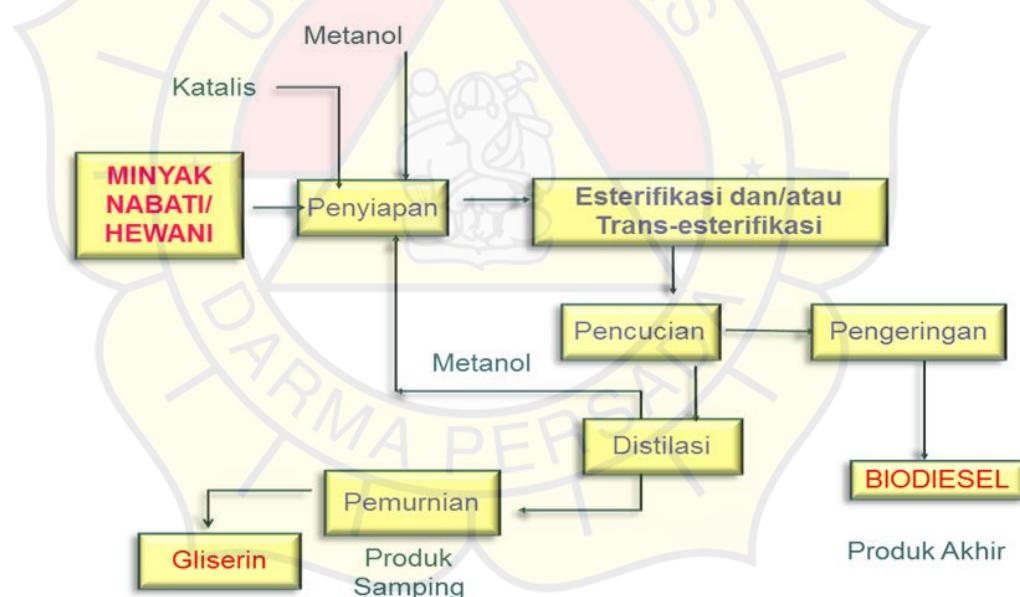
→ Penggunaan air

Produksi biodiesel dapat menjadi proses yang memerlukan banyak air (113)

→ Biaya

Biaya biodiesel bisa lebih tinggi dibandingkan solar yang berbahan dasar minyak bumi (114).

Terlepas dari tantangan-tantangan ini, biodiesel menawarkan solusi yang menjanjikan untuk mengurangi ketergantungan kita pada bahan bakar fosil dan mengatasi perubahan iklim. Seiring dengan kemajuan penelitian dan teknologi, produksi biodiesel diharapkan menjadi lebih berkelanjutan dan hemat biaya.



Gambar 2.2 Skema Proses Produksi Biodiesel (61)

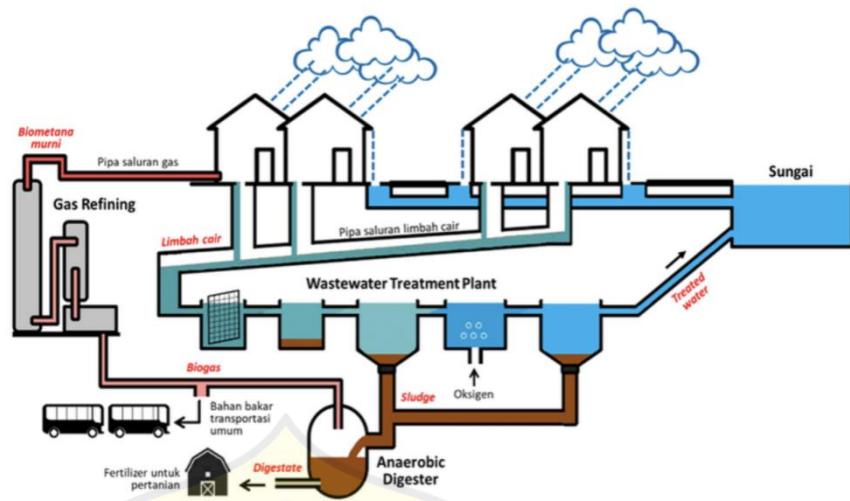
3. Biogas

Biogas, sebagai bentuk bioenergi, merupakan sumber energi yang dihasilkan melalui proses anaerobik penguraian bahan organik oleh mikroorganisme. Proses ini menghasilkan campuran gas, terutama metana

(CH₄) dan karbon dioksida (CO₂), yang dapat digunakan sebagai sumber energi alternatif (89). Biogas dapat dihasilkan dari berbagai bahan baku organik, termasuk kotoran hewan, limbah pertanian, limbah makanan, dan limbah organik lainnya (89).

Salah satu keunggulan biogas adalah bahwa proses produksinya membantu mengatasi masalah limbah organik sambil menghasilkan sumber energi yang bersih (115). Proses anaerobik ini dapat dilakukan dalam digester biogas yang dirancang untuk mendukung pertumbuhan mikroorganisme pengurai (89).

Biogas dapat digunakan dalam berbagai aplikasi energi, mulai dari memasak dan pemanasan hingga menghasilkan listrik. Penerapan biogas dalam memasak dapat mengurangi ketergantungan pada bahan bakar kayu tradisional dan memberikan alternatif yang lebih ramah lingkungan (89). Selain itu, biogas dapat dimanfaatkan dalam pembangkit listrik untuk menyediakan sumber daya listrik yang bersih dan terbarukan (116).



Gambar 2.3 Skema Produksi Biogas dari Proses Pengolahan Limbah Cair Domestik (Sumber: Adaptasi dari www.city.kobe.lg.jp)

Keberlanjutan biogas juga terkait dengan potensi pengurangan emisi gas rumah kaca. Proses anaerobik tidak hanya menghasilkan biogas tetapi juga mengurangi emisi metana, yang merupakan gas rumah kaca lebih poten, dibandingkan dengan penguraian bahan organik secara alami (115). Oleh karena itu, penerapan biogas dapat membantu mitigasi perubahan iklim (89).

Akan tetapi, untuk memaksimalkan potensi biogas, perlu diperhatikan faktor-faktor seperti suhu, keasaman, dan komposisi bahan baku dalam proses digester biogas (115). Pemahaman yang mendalam terhadap kondisi optimal produksi biogas sangat penting untuk efisiensi dan keberlanjutan proses.

Biogas bukan hanya menyediakan sumber energi yang terbarukan, tetapi juga memberikan solusi untuk mengelola limbah organik. Dengan memanfaatkan teknologi digester biogas dan memahami faktor-faktor yang memengaruhi produksi, implementasi biogas dapat berkontribusi pada pencapaian tujuan keberlanjutan dan pengurangan emisi gas rumah kaca.

4. Biomassa Padat

Biomassa padat merujuk pada penggunaan biomassa dalam bentuk padat, seperti serbuk kayu, pelet biomassa, atau briket, untuk menghasilkan energi termal. Proses pembakaran biomassa padat menghasilkan panas yang dapat dimanfaatkan untuk pemanasan ruangan, produksi listrik, atau proses industri (117).

Keberlanjutan biomassa padat terkait erat dengan sumber bahan bakunya. Pemanfaatan limbah kayu, serasah pertanian, atau tanaman energi khusus untuk produksi biomassa padat dapat membantu mengurangi tekanan terhadap hutan dan ekosistem alam (118). Pengelolaan sumber daya biomassa dengan bijak penting untuk menjaga keberlanjutan dan keberagaman hayati. Pelet biomassa menjadi salah satu bentuk biomassa padat yang populer. Proses pembuatan pelet melibatkan kompresi dan pengeringan bahan baku biomassa, menghasilkan bahan bakar padat yang memiliki nilai kalor tinggi dan mudah diangkut (69). Keuntungan ini membuat pelet biomassa menjadi alternatif yang menarik untuk pemanas rumah dan industry

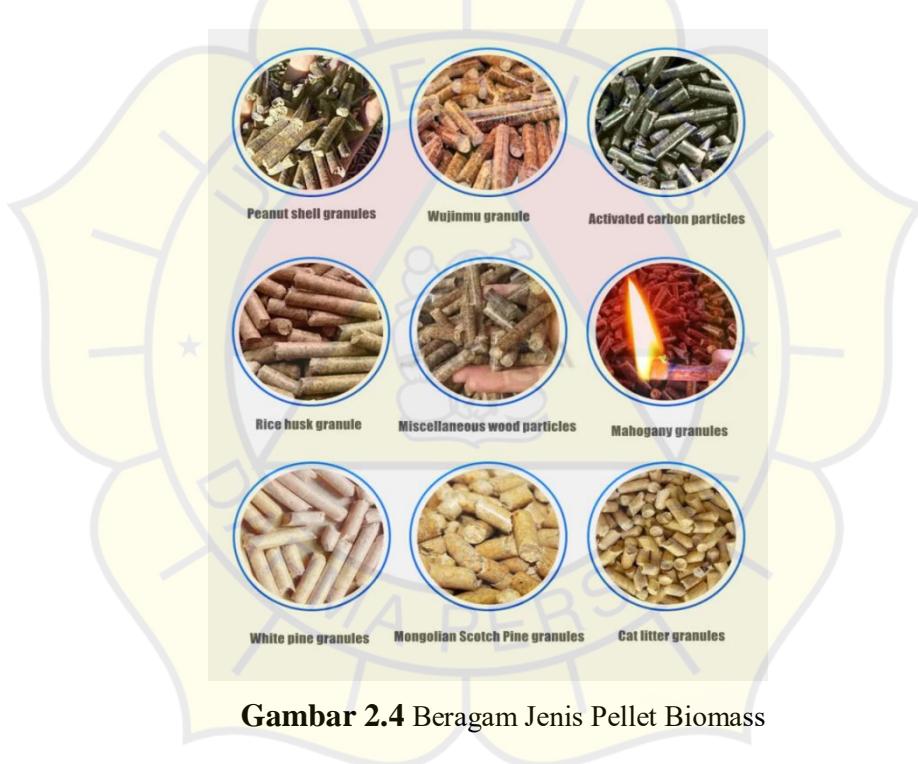
Penerapan biomassa padat dalam produksi listrik semakin mendapat perhatian. Pembangkit listrik biomassa padat dapat menggunakan teknologi gasifikasi atau pembakaran langsung untuk menghasilkan listrik (119). Proses ini tidak hanya memanfaatkan sumber daya lokal, tetapi juga mengurangi emisi gas rumah kaca jika dibandingkan dengan bahan bakar fosil (60).

Keberlanjutan dan efisiensi penggunaan biomassa padat juga tergantung pada teknologi pembakaran yang digunakan. Sistem pembakaran yang efisien dan bersih dapat meminimalkan emisi polutan udara dan memaksimalkan

kontribusi biomassa padat sebagai sumber energi terbarukan (120).

Pengembangan teknologi yang lebih canggih dapat meningkatkan kinerja dan keberlanjutan biomassa padat.

Biomassa padat berperan penting dalam diversifikasi bauran energi dan mendukung transisi ke energi yang lebih berkelanjutan. Dengan memanfaatkan sumber daya biomassa secara efisien dan berkelanjutan, biomassa padat dapat menjadi kontributor signifikan dalam mencapai tujuan energi terbarukan dan mengurangi emisi karbon.



Gambar 2.4 Beragam Jenis Pellet Biomass

5. Biohidrogen

Biohidrogen adalah bentuk bioenergi yang menarik perhatian sebagai alternatif bersih dan berkelanjutan untuk memenuhi kebutuhan energi. Proses produksi biohidrogen melibatkan mikroorganisme, terutama bakteri

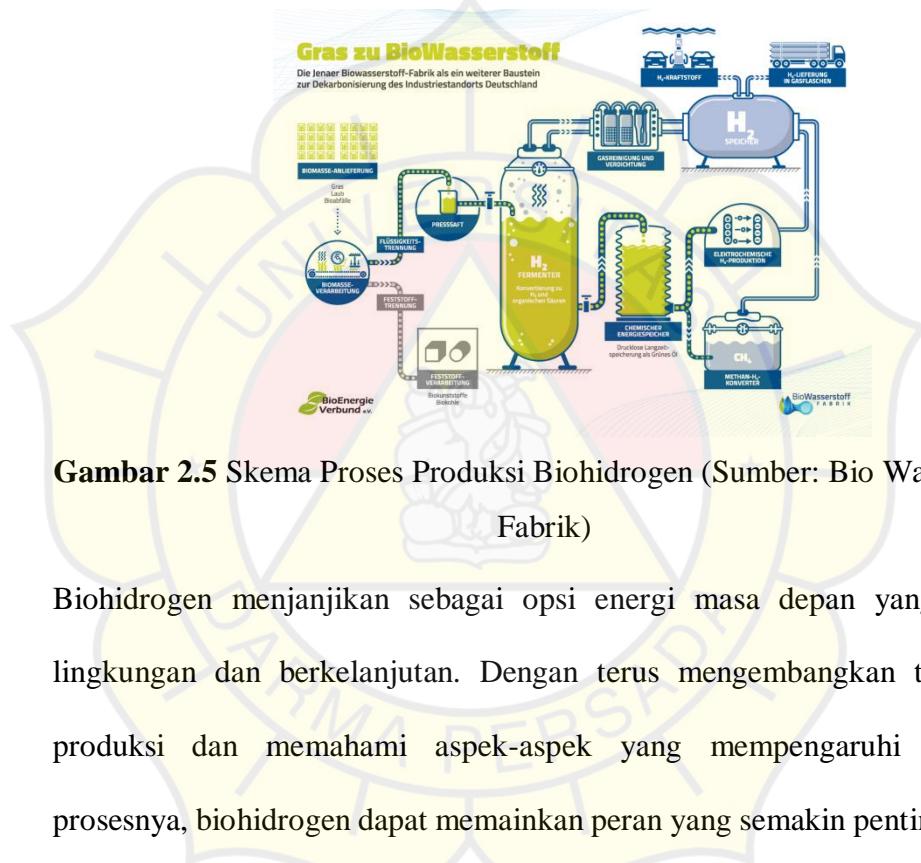
fotosintetik atau mikroba yang mampu menghasilkan hidrogen sebagai produk sampingan (121).

Keunggulan biohidrogen terletak pada potensinya sebagai sumber energi yang ramah lingkungan dan tidak menghasilkan emisi gas rumah kaca saat digunakan atau dibakar (122). Proses produksi biohidrogen juga dapat membantu mengurangi tekanan terhadap lingkungan karena menggunakan substrat yang dapat diperbarui, seperti limbah organik atau algae (123).

Salah satu metode umum dalam produksi biohidrogen adalah fermentasi bakteri, di mana mikroorganisme seperti *Clostridium* spp. atau *Enterobacter* spp. mengurai bahan organik menjadi hidrogen dan senyawa pendampingnya (124). Teknologi ini menunjukkan potensi untuk digunakan dalam skala industri untuk memproduksi biohidrogen secara efisien.

Perkembangan terbaru dalam penelitian biohidrogen menyoroti upaya untuk meningkatkan efisiensi produksi dan memahami lebih baik faktor-faktor yang memengaruhi proses tersebut (125). Pemanfaatan teknologi terkini, seperti rekayasa genetika mikroorganisme untuk meningkatkan yield hidrogen, menjadi fokus penelitian untuk mengoptimalkan proses produksi biohidrogen (126).

Penerapan biohidrogen dalam berbagai sektor, termasuk industri, transportasi, dan pembangkit listrik, menawarkan potensi sebagai sumber energi bersih yang dapat mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil (121). Akan tetapi, tantangan utama yang masih dihadapi adalah meningkatkan efisiensi produksi biohidrogen dan mengurangi biaya prosesnya agar lebih kompetitif secara ekonomi .



Gambar 2.5 Skema Proses Produksi Biohidrogen (Sumber: Bio Wasserstoff Fabrik)

Biohidrogen menjanjikan sebagai opsi energi masa depan yang ramah lingkungan dan berkelanjutan. Dengan terus mengembangkan teknologi produksi dan memahami aspek-aspek yang mempengaruhi efisiensi prosesnya, biohidrogen dapat memainkan peran yang semakin penting dalam mendukung transisi global menuju sumber energi yang lebih bersih.

6. Bioelektrisitas

Bioelektrisitas merupakan bentuk bioenergi yang menarik perhatian dalam upaya menghasilkan energi listrik menggunakan mikroorganisme atau enzim. Proses ini melibatkan penggunaan organisme hidup, seperti bakteri atau

arkea, yang dapat menghasilkan arus listrik melalui oksidasi bahan organik dalam kondisi anaerobik (127).

Pentingnya bioelektrisitas terletak pada potensinya sebagai sumber energi bersih yang dapat dimanfaatkan dalam berbagai konteks, termasuk pembangkit listrik mikroba (*Microbial Fuel Cell/MFC*) dan teknologi sensor biologis (128). Penerapan bioelektrisitas dalam sel bahan bakar mikrobial atau sel elektrokimia telah menjadi subjek penelitian intensif dalam beberapa tahun terakhir (129).

Salah satu aspek utama dari penelitian bioelektrisitas adalah pengembangan elektroda dan material konduktif yang dapat meningkatkan efisiensi transfer elektron antara mikroorganisme dan elektroda (128). Desain elektroda yang inovatif dapat meningkatkan kinerja sistem bioelektrisitas dan mempercepat adopsi teknologi ini sebagai sumber energi yang dapat diperbarui (130).

Penerapan praktis bioelektrisitas mencakup berbagai bidang, termasuk pengolahan limbah, pembersihan air, dan pembangkit listrik mikroba. Penelitian terbaru menunjukkan kemajuan dalam memahami mekanisme elektrokimia di dalam sel, serta pengoptimalan kondisi operasional untuk meningkatkan produksi listrik (131).

Keberlanjutan dan efisiensi bioelektrisitas tergantung pada pemahaman mendalam terhadap mikroorganisme yang terlibat, jenis substrat yang digunakan, dan kondisi lingkungan di dalam sistem (132). Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengoptimalkan parameter operasional dan

mendukung pengembangan teknologi bioelektrisitas sebagai alternatif energi yang ramah lingkungan.

Bioelektrisitas terus menunjukkan potensi sebagai sumber energi yang inovatif dan berkelanjutan. Dengan terus memperdalam pemahaman terhadap prinsip-prinsip operasionalnya dan melibatkan disiplin ilmu yang beragam, bioelektrisitas dapat menjadi komponen kunci dalam portofolio energi terbarukan di masa depan.

2.2 Algae sebagai Sumber Bioenergi

Di tengah berkurangnya cadangan bahan bakar fosil dan meningkatnya krisis iklim, upaya mencari sumber energi terbarukan dan berkelanjutan telah mencapai momentum yang belum pernah terjadi sebelumnya. Di tengah transisi energi global ini, alga telah muncul sebagai kandidat menarik untuk memanfaatkan potensi energi bersih, yang menawarkan banyak keunggulan dibandingkan sumber konvensional.

Alga, organisme mikroskopis yang tumbuh subur di beragam lingkungan perairan, memiliki sifat luar biasa yang menjadikannya bahan baku ideal untuk produksi bioenergi. Tidak seperti tanaman darat, alga dapat tumbuh di lahan non-tanah dan memanfaatkan sumber air marginal, sehingga meminimalkan persaingan untuk mendapatkan lahan pertanian dan sumber daya air. Efisiensi fotosintesisnya sangat menakjubkan, mampu mengubah sinar matahari menjadi energi dengan kecepatan melebihi tanaman di darat (133). Selain itu, alga dapat mengakumulasi lipid, karbohidrat, dan protein dalam konsentrasi tinggi, menyediakan sumber biomassa yang kaya untuk diubah menjadi biofuel, biopolimer, dan produk berharga lainnya (87).

Alga sangat cocok untuk memproduksi biofuel, seperti bioetanol dan biodiesel, yang dapat berfungsi sebagai pengganti bahan bakar fosil dalam berbagai aplikasi. Melalui budidaya yang efisien dan proses konversi yang optimal, alga dapat menghasilkan biofuel dengan dampak lingkungan yang minimal. Bioetanol, yang berasal dari fermentasi gula alga, menawarkan manfaat lingkungan dibandingkan bensin, karena mengeluarkan gas rumah kaca dan polutan udara dengan tingkat yang lebih rendah (134). Biodiesel, yang dihasilkan dari minyak alga, dapat menggantikan solar konvensional dengan karakteristik kinerja serupa, sehingga berkontribusi terhadap bahan bakar transportasi yang lebih bersih (135).

Meskipun potensi algae untuk produksi bioenergi sangat besar, ada beberapa tantangan yang harus diatasi untuk sepenuhnya mewujudkan kekuatan transformatifnya. Salah satu tantangan utama terletak pada peningkatan teknik budidaya alga untuk meningkatkan produktivitas biomassa dan mengurangi biaya produksi (136). Selain itu, mengoptimalkan proses konversi untuk produksi biofuel sangat penting untuk meningkatkan efisiensi dan mengurangi kebutuhan energi (137).

Algae mempunyai potensi besar sebagai sumber bioenergi yang berkelanjutan dan terbarukan, serta menawarkan jalan menuju masa depan yang lebih bersih dan berkelanjutan. Kemampuannya untuk tumbuh di lingkungan yang beragam, mengakumulasi hasil biomassa yang tinggi, dan menghasilkan biofuel dengan dampak lingkungan yang minimal menjadikannya alternatif yang menarik dibandingkan bahan bakar fosil. Dengan mengatasi tantangan yang masih ada dalam teknologi budidaya dan konversi, alga dapat merevolusi lanskap energi

global, berkontribusi terhadap masa depan energi yang lebih berkelanjutan dan aman.

2.2.1 Karakteristik Algae

Algae, sekelompok mikroorganisme fotosintetik yang beragam, telah menarik minat ilmiah selama berabad-abad karena karakteristiknya yang luar biasa dan potensi penerapannya. Organisme mikroskopis ini, mulai dari *flagelata* bersel tunggal hingga bentuk multiseluler yang kompleks, menghuni beragam lingkungan perairan, termasuk danau air tawar dan lautan, serta habitat darat seperti tanah lembab dan bebatuan.

Algae menunjukkan keragaman yang luar biasa dalam organisasi strukturalnya, mencakup bentuk uniseluler, kolonial, dan multiseluler (138). Algae uniseluler, seperti *Chlamydomonas* dan *Chlorella*, terdiri dari sel tunggal yang dikelilingi oleh dinding sel dan mampu melakukan motilitas independen. Algae kolonial, seperti *Volvox* dan *Hydrodictyon*, membentuk kumpulan sel yang saling terhubung oleh matriks agar-agar. Algae multiseluler, seperti algae, menunjukkan organisasi jaringan yang kompleks dan dapat mencapai ukuran yang mengesankan, dengan beberapa spesies menyaingi ketinggian pohon.

Algae menunjukkan fleksibilitas metabolisme yang luar biasa, memanfaatkan berbagai jalur fotosintesis dan non-fotosintesis untuk memperoleh energi dan mensintesis senyawa organik (138). Alga *autotrofik* memanfaatkan sinar matahari untuk mengubah karbon dioksida dan air menjadi karbohidrat melalui proses fotosintesis. Algae *heterotrofik*, sebaliknya, bergantung pada sumber karbon organik dari lingkungannya untuk mendapatkan energi. *Mixotrof*, bagian dari alga,

memiliki kemampuan untuk beralih antara mode nutrisi *autotrofik* dan *heterotrofik*, bergantung pada kondisi lingkungan.

Algae terkenal karena kemampuannya yang luar biasa dalam mengakumulasi biomassa, menjadikannya bahan baku yang menjanjikan untuk berbagai aplikasi (82,139). Efisiensi fotosintesinya, melebihi tanaman terestrial, memungkinkan mereka mengubah sinar matahari menjadi biomassa dengan kecepatan yang mengesankan. Selain itu, algae dapat tumbuh subur di berbagai lingkungan, termasuk aliran air asin dan air limbah, sehingga cocok untuk pemulihan sumber daya dan pengolahan limbah.

Kemampuan algae untuk mengakumulasi *lipid*, karbohidrat, dan protein dalam konsentrasi tinggi menjadikannya bahan baku yang menarik untuk produksi biofuel (140–142). Bioetanol, yang berasal dari fermentasi gula alga, dapat berfungsi sebagai pengganti bensin terbarukan. Biodiesel, yang dihasilkan dari minyak alga, dapat menggantikan solar konvensional, menawarkan manfaat lingkungan dan mengurangi emisi gas rumah kaca.

Algae memiliki potensi untuk menghasilkan berbagai biopolimer, seperti *Polihidroksialkanoat* (PHA), kitin, dan selulosa, yang dapat menggantikan polimer tradisional berbahan dasar minyak bumi (82,139). PHA, bersifat *biodegradable* dan biokompatibel, dapat digunakan dalam aplikasi mulai dari pengemasan hingga implan medis. Kitin, suatu biopolimer dengan kekuatan dan fleksibilitas luar biasa, dapat digunakan dalam produksi bioplastik, tekstil, dan obat-obatan.

Algae mengandung banyak senyawa bioaktif yang menjanjikan untuk berbagai aplikasi farmasi (143–145). Senyawa ini menunjukkan berbagai manfaat potensial, termasuk sifat antioksidan, antiinflamasi, antikanker, dan antimikroba.

Obat-obatan yang berasal dari alga mempunyai potensi untuk mengobati berbagai penyakit dan meningkatkan kesehatan manusia.

Algae memiliki kemampuan bioremediasi yang luar biasa, mampu menghilangkan polutan dari air limbah dan lingkungan yang terkontaminasi (138,146). Kemampuannya dalam menyerap dan mendegradasi berbagai kontaminan, termasuk logam berat, polutan organik, dan nutrisi, menjadikannya alat yang berharga untuk pembersihan lingkungan.

Algae memainkan peran penting dalam siklus nutrisi dan pengolahan limbah, serta berkontribusi terhadap kelestarian lingkungan (146,147). Mereka secara efisien menyerap nutrisi dari air limbah dan aliran limbah lainnya, mengubahnya menjadi biomassa yang dapat dimanfaatkan untuk berbagai tujuan. Proses ini tidak hanya memulihkan lingkungan yang tercemar tetapi juga mengurangi kelebihan nutrisi, mencegah pertumbuhan alga yang berbahaya dan eutrofikasi.

Algae dapat digunakan untuk menghasilkan berbagai bahan tambahan makanan dan pakan, seperti pigmen, antioksidan, dan asam lemak omega-3 (146,147). Bahan tambahan ini meningkatkan nilai gizi makanan dan pakan, berkontribusi terhadap kesehatan manusia dan kesejahteraan hewan.

Sifat bioaktif algae membuatnya cocok untuk berbagai aplikasi kosmetik dan nutraceutical (146,147). Sifat antioksidan dan anti-inflamasinya dimanfaatkan dalam produk perawatan kulit, sementara kandungan nutrisinya dapat diterapkan dalam suplemen makanan dan makanan fungsional.

Alga dapat digunakan untuk memproduksi pupuk hayati, meningkatkan kandungan nutrisi tanah dan meningkatkan hasil panen (147). Kemampuannya

untuk mengikat nitrogen dan melepaskan nutrisi menjadikannya alternatif pupuk kimia yang berkelanjutan dan ramah lingkungan.

Algae dapat berfungsi sebagai bioindikator kesehatan lingkungan, memberikan informasi tentang kualitas air dan tingkat polusi (148). Sensitivitasnya terhadap berbagai polutan memungkinkan deteksi dini bahaya lingkungan dan penilaian upaya remediasi.

Algae dapat diintegrasikan ke dalam praktik pertanian regeneratif dan akuakultur, sehingga mendorong keseimbangan ekologi dan produksi pangan berkelanjutan (147). Mereka dapat digunakan sebagai sumber pakan ternak dan ikan, sedangkan limbahnya dapat dimanfaatkan sebagai bahan pemberah tanah atau pupuk hidup.

Algae, dengan karakteristiknya yang luar biasa dan potensi penerapannya yang beragam, muncul sebagai harta karun berupa inovasi dan keberlanjutan. Kemampuan mereka untuk mengatasi tantangan global di bidang energi, pangan, bioremediasi, dan perlindungan lingkungan menjadikannya komponen penting dalam masa depan berkelanjutan. Ketika penelitian dan pengembangan terus dilakukan untuk mengungkap seluruh potensi alga, kita dapat membayangkan sebuah dunia di mana organisme serbaguna ini memainkan peran penting dalam membentuk planet yang lebih sehat, lebih aman sumber dayanya, dan seimbang secara ekologis.



Gambar 2.6 Klasifikasi Algae

2.2.2 Potensi Algae dalam Bioenergi

Dalam upaya mencari sumber energi terbarukan dan berkelanjutan, alga telah muncul sebagai kandidat yang menjanjikan karena menawarkan banyak keunggulan dibandingkan sumber energi konvensional seperti bahan bakar fosil. Algae, organisme akuatik mikroskopis, memiliki karakteristik luar biasa yang menjadikannya bahan baku ideal untuk produksi bioenergi. Kemampuannya untuk tumbuh di berbagai lingkungan, termasuk air tawar, air asin, dan bahkan air limbah, meminimalkan persaingan untuk mendapatkan lahan pertanian dan sumber daya air (146,149). Selain itu, algae menunjukkan efisiensi fotosintesis yang menakjubkan, mampu mengubah sinar matahari menjadi energi dengan kecepatan melebihi tumbuhan darat (140–142). Efisiensi ini menghasilkan hasil biomassa yang tinggi, menjadikan algae sebagai sumber biofuel dan bioproduk lainnya yang berharga (146,147).

Algae mempunyai potensi besar untuk menghasilkan bahan bakar hayati, seperti bioetanol dan biodiesel, yang dapat berfungsi sebagai pengganti bahan bakar fosil yang berkelanjutan (150). Bioetanol, yang berasal dari fermentasi gula algae, menawarkan manfaat lingkungan dibandingkan bensin, karena mengeluarkan gas

rumah kaca dan polutan udara dengan tingkat yang lebih rendah (141). Biodiesel, yang dihasilkan dari minyak algae, dapat menggantikan solar konvensional dengan karakteristik kinerja serupa, sehingga berkontribusi terhadap bahan bakar transportasi yang lebih bersih (142).

Algae tidak hanya menghasilkan biofuel tetapi juga berperan penting dalam penyerapan karbon, membantu mitigasi perubahan iklim (140,146). Saat alga berfotosintesis, mereka menyerap karbon dioksida dari atmosfer dan menyimpannya dalam biomassanya (151). Kemampuannya dalam menyerap karbon menjadikan alga sebagai alat yang berharga dalam memerangi perubahan iklim dan mendukung lingkungan yang lebih berkelanjutan.

Meskipun potensi algae untuk produksi bioenergi sangat besar, ada beberapa tantangan yang harus diatasi untuk sepenuhnya mewujudkan kekuatan transformatifnya (147,150). Salah satu tantangan utama terletak pada peningkatan teknik budidaya alga untuk meningkatkan produktivitas biomassa dan mengurangi biaya produksi

Tantangan lainnya terletak pada optimalisasi proses konversi untuk produksi biofuel. Hal ini memerlukan pengembangan metode yang efisien dan hemat biaya untuk mengubah biomassa alga menjadi bioetanol dan biodiesel (147). Selain itu, penelitian harus fokus pada peningkatan hasil dan komposisi biomassa alga untuk memaksimalkan produksi biofuel (146).

Pengembangan kerangka peraturan yang mendukung dan penerimaan masyarakat sangat penting bagi adopsi biofuel berbasis alga secara luas (150). Pemerintah dapat memainkan peran penting dalam memberikan insentif dan mendukung inisiatif penelitian dan pengembangan untuk mempercepat

komersialisasi biofuel berbasis alga. Kampanye pendidikan publik juga dapat meningkatkan kesadaran tentang manfaat biofuel alga bagi lingkungan dan keberlanjutan, meningkatkan penerimaan masyarakat dan mendorong permintaan konsumen.

Algae memiliki potensi besar untuk merevolusi lanskap energi global, menawarkan alternatif bahan bakar fosil yang berkelanjutan dan terbarukan. Kemampuannya dalam memproduksi biofuel, menyerap karbon, dan tumbuh di lingkungan yang beragam menjadikannya kandidat yang menjanjikan untuk masa depan energi berkelanjutan. Dengan mengatasi tantangan yang tersisa dan berinvestasi dalam penelitian dan pengembangan, kita dapat memanfaatkan potensi penuh alga untuk produksi bioenergi, membuka jalan menuju dunia yang lebih bersih, ramah lingkungan, dan aman energi.

2.3 Kajian Terkait

2.3.1 Penelitian Terdahulu tentang Algae sebagai Bioenergi

Algae adalah organisme fotosintetik yang memiliki potensi untuk menjadi sumber energi terbarukan yang berkelanjutan. Algae dapat menghasilkan biomassa yang dapat dikonversi menjadi bioetanol, biogas, dan biodiesel.

Algae merupakan salah satu kandidat potensial untuk menghasilkan bioenergi, seperti bioetanol, biodiesel, dan biogas. Algae memiliki beberapa keunggulan dibandingkan dengan bahan baku bioenergi lainnya, seperti dapat tumbuh di berbagai kondisi lingkungan, termasuk di lahan marginal yang tidak dapat digunakan untuk pertanian (152), memiliki kandungan *lipid* yang tinggi, yang dapat dikonversi menjadi biodiesel atau bioetanol (153), dapat menyerap karbon

dioksida dari atmosfer, sehingga dapat membantu mengurangi emisi gas rumah kaca (154).

Penelitian tentang algae sebagai bioenergi telah dilakukan sejak lama. Pada tahun 1970-an, penelitian tersebut difokuskan pada pengembangan teknologi untuk membudidayakan algae secara massal (152). Pada tahun 1980-an, penelitian tersebut difokuskan pada pengembangan teknologi untuk mengkonversi algae menjadi bioenergi (153).

Pada tahun 2000-an, penelitian tentang algae sebagai bioenergi semakin berkembang pesat. Hal ini disebabkan oleh meningkatnya kesadaran akan pentingnya energi terbarukan dan meningkatnya kebutuhan akan energi. (154). Penelitian terbaru tentang algae sebagai bioenergi menunjukkan beberapa perkembangan penting, antara lain:

1. Teknologi budidaya algae semakin efisien.

Teknologi budidaya algae yang terbaru menggunakan metode fotobioreaktor, yang memungkinkan algae dibudidayakan dalam kondisi terkontrol.

2. Teknologi konversi algae menjadi bioenergi semakin efektif

Teknologi konversi algae menjadi bioenergi yang terbaru menggunakan metode enzimatik, yang dapat meningkatkan efisiensi konversi.

3. Algae yang dimodifikasi secara genetik dapat menghasilkan lebih banyak *lipid*.

Modifikasi genetik dapat meningkatkan kandungan *lipid* pada algae, sehingga dapat meningkatkan produksi biodiesel atau bioetanol.

2.3.2 Implementasi Algae dalam Sistem Energi Nasional di Negara Lain

Implementasi algae dalam sistem energi nasional di berbagai negara telah menjadi fokus strategis dalam mencapai tujuan energi bersih dan berkelanjutan. Berikut adalah beberapa contoh implementasi algae dalam sistem energi nasional di beberapa negara:

1. Amerika Serikat

Amerika Serikat memiliki program penelitian dan pengembangan yang kuat dalam mengintegrasikan algae dalam bauran energi nasional. Proyek-proyek seperti *Algae Biomass Organization* (ABO) dan *National Alliance for Advanced Biofuels and Bio-products* (NAABB) telah mendorong penelitian untuk mengoptimalkan produksi bioenergi dari algae. Pusat penelitian dan fasilitas demonstrasi telah dibangun untuk memvalidasi teknologi dan mempercepat adopsi komersial.

Pada tahun 2015, pemerintah Amerika Serikat mengeluarkan inisiatif *National Algae Initiative* (NAI) yang bertujuan untuk mengembangkan teknologi budidaya dan konversi alga. NAI telah memberikan pendanaan sebesar \$1,3 miliar untuk mendukung penelitian dan pengembangan alga sebagai sumber energi. Salah satu perusahaan yang memanfaatkan inisiatif NAI adalah Sapphire Energy. Perusahaan ini telah mengembangkan teknologi budidaya alga secara komersial di Nevada, Amerika Serikat. Teknologi ini menggunakan air limbah sebagai media budidaya algae, sehingga dapat mengurangi pencemaran air.

2. China

China mengarahkan perhatiannya pada pengembangan bioenergi dari algae sebagai respons terhadap tantangan keberlanjutan dan meningkatnya permintaan energi. Pusat riset dan perusahaan energi terkemuka di China telah berinvestasi dalam teknologi produksi algae yang efisien dan berkelanjutan. Langkah-langkah ini sejalan dengan komitmen China untuk mengurangi emisi karbon dan meningkatkan andil energi terbarukan dalam bauran energi nasionalnya.

Pemerintah China telah menargetkan agar 20% kebutuhan energi China berasal dari sumber energi terbarukan pada tahun 2030. Salah satu sumber energi terbarukan yang diprioritaskan oleh China adalah algae.

Pada tahun 2018, pemerintah China mengeluarkan kebijakan yang bertujuan untuk mempromosikan pengembangan industri algae. Kebijakan ini memberikan insentif pajak dan subsidi bagi perusahaan yang mengembangkan teknologi budidaya dan konversi algae.

Salah satu perusahaan yang memanfaatkan kebijakan ini adalah *Green Biofuel*. Perusahaan ini telah mengembangkan teknologi budidaya algae untuk menghasilkan biogas. Biogas ini dapat digunakan sebagai bahan bakar kendaraan dan pembangkit listrik.

3. Australia

Australia memandang algae sebagai sumber bioenergi yang dapat mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil. Program penelitian di universitas dan lembaga penelitian telah meneliti kemungkinan pengembangan sumber energi terbarukan dari flora mikroalgae lokal, sebagai contoh adalah proyek yang dilakukan oleh University of Melbourne di tahun

2009 – 2013 dalam memproduksi biofuel dari mikroalga yang merupakan program dari pemerintah Australia melalui ARENA (*Australian Renewable Energy Agency*). Faktor iklim yang mendukung, seperti sinar matahari yang cukup dan luasnya wilayah pesisir, membuat Australia memiliki potensi besar dalam mengimplementasikan algae dalam bauran energinya.

4. India

India menggabungkan bioenergi dari algae sebagai salah satu komponen dalam strategi energi nasionalnya. Penelitian yang dilakukan oleh para peneliti di institusi pendidikan tinggi dan pusat penelitian fokus pada produksi biodiesel, biohidrogen, dan bioetanol dari algae dalam program INSPIRE (*Innovation in Science Pursuit for Inspired Research*) di bawah Kementerian Ilmu Pengetahuan dan Teknologi telah mengembangkan biodiesel berbiaya murah. Langkah-langkah ini sejalan dengan upaya India untuk meningkatkan akses energi dan mengurangi emisi gas rumah kaca.

5. Uni Eropa

Uni Eropa mengadopsi pendekatan seragam untuk mendukung implementasi algae dalam bauran energi negara-negara anggotanya. Program riset dan inovasi seperti *European Algae Biomass Association* (EABA) bertujuan untuk mendukung pengembangan teknologi bioenergi berbasis algae yang inovatif dan berkelanjutan di seluruh wilayah Uni Eropa.

6. Jerman

Pada tahun 2016, pemerintah Jerman mengeluarkan kebijakan yang bertujuan untuk meningkatkan penggunaan energi terbarukan, termasuk alga.

Kebijakan ini menargetkan agar 45% kebutuhan energi Jerman berasal dari sumber energi terbarukan pada tahun 2030 (155).

Salah satu perusahaan yang memanfaatkan kebijakan ini adalah Arup, *Strategic Science Consult of Germany* (SSC), dan Colt International bekerja sama dalam pengembangan proyek SolarLeaf, yaitu sistem fasad pertama di dunia yang membudidayakan mikroalga untuk menghasilkan energi terbarukan.



Gambar 2.7 Gedung Pertama di Dunia dengan Memanfaatkan Energi Terbarukan dari Algae sebagai Sumber Pasokan Energi