

INTEGRASI SISTEM HIDUP (MIKROALGA) PADA FASAD BANGUNAN GEDUNG GRAHA PENA KOTA BATAM SEBAGAI STRATEGI MITIGASI POLUSI UDARA

¹Jaksen, ²Stivani Ayuning Suwarlan, ³Lathifa Nursyamsu

¹⁻³Program Studi Arsitektur, Universitas Internasional Batam, Batam, Indonesia

Email: stivani@uib.ac.id

Informasi Naskah

Diterima: 06/06/2025; Disetujui terbit: 09/12/2025; Diterbitkan: 15/12/2025;

<http://journal.uib.ac.id/index.php/jad>

ABSTRAK

Permasalahan kualitas udara di kawasan urban, termasuk Kota Batam, memicu dampak kesehatan yang signifikan, sehingga diperlukan strategi mitigasi yang bekerja pada skala arsitektural dan berkelanjutan. Selain itu, tekanan dari aktivitas lalu lintas, kegiatan industri, dan tingginya kepadatan permukiman turut mempercepat akumulasi polutan di lingkungan perkotaan. Dalam konteks ini, fasad mikroalga menawarkan pendekatan *nature-based* yang mampu menurunkan konsentrasi CO₂ dan partikulat, menyediakan *shading* pasif, serta menambah nilai edukatif dan estetika bagi ruang publik. Graha Pena Batam dipilih sebagai studi kasus karena lokasinya berada di kawasan aktivitas tinggi, sehingga potensi reduksi polutan dapat dievaluasi secara jelas, tipologi fasadnya memungkinkan penerapan sistem sebagai *secondary façade* pada bangunan eksisting, serta perannya sebagai pusat media memberi nilai strategis bagi penyebaran pengetahuan dan pengaruh sosial. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi potensi mikroalga sebagai sistem hidup yang diintegrasikan ke dalam fasad Gedung Graha Pena Batam guna mereduksi polusi udara. Metodologi yang diterapkan mencakup simulasi berbasis literatur, meliputi pengukuran kebutuhan media tanam, intensitas pencahayaan, dan sistem sirkulasi udara, serta kajian visual terhadap kondisi fasad eksisting. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem fasad mikroalga mampu menyerap polutan udara, khususnya karbon dioksida (CO₂), serta menghasilkan oksigen melalui proses fotosintesis. Integrasi mikroalga pada fasad tidak hanya berperan sebagai elemen estetis, melainkan juga sebagai solusi ekologis yang adaptif terhadap karakteristik iklim tropis Kota Batam. Dari perspektif kebijakan, implementasi sistem fasad mikroalga selaras dengan upaya pemerintah dalam mendorong pembangunan berkelanjutan dan pengurangan emisi karbon di kawasan perkotaan. Adopsi teknologi ini berpotensi menjadikan Gedung Graha Pena Batam sebagai studi kasus representatif bagi penerapan kebijakan zonasi bangunan ramah lingkungan serta pengembangan infrastruktur hijau di wilayah tropis.

Kata kunci: mikroalga, sistem hidup, fasad bangunan, polusi udara, arsitektur berkelanjutan

ABSTRACT

Air quality issues in urban areas, including Batam City, trigger significant health impacts, necessitating mitigation strategies that operate at an architectural and sustainable scale. Furthermore, pressures from traffic, industrial activity, and high residential density accelerate the accumulation of pollutants in urban environments. In this context, microalgae facades offer a nature-based approach that can reduce CO₂ and particulate concentrations, provide passive shading, and add educational and aesthetic value to public spaces. Graha Pena Batam was chosen as a case study because its location in a high-activity area allows for a clear evaluation of the pollutant reduction potential, its facade typology allows for the application of the system as a secondary facade to existing buildings, and its role as a media center provides strategic value for the dissemination of knowledge and social influence. This study aims to evaluate the potential of microalgae as a biological system integrated into the facade of the Graha Pena Batam Building to reduce air pollution. The applied methodology includes literature-based simulations, including measurements of planting media requirements, lighting intensity, and air circulation systems, as well as a visual assessment of the condition of the existing facade. The research results show that the microalgae facade system is capable of absorbing air pollutants, particularly carbon dioxide (CO₂), and producing oxygen through photosynthesis. The integration of microalgae into the facade not only serves as an aesthetic element but also as an ecological solution that is adaptive to the tropical climate characteristics of Batam City. From a policy perspective, the implementation of the microalgae facade system is in line with the government's efforts to encourage sustainable development and reduce carbon emissions in urban areas. The adoption

of this technology has the potential to make the Graha Pena Building in Batam a representative case study for the implementation of environmentally friendly building zoning policies and the development of green infrastructure in tropical regions.

Keywords: *microalgae, living system, building façade, air pollution, sustainable architecture*

1. Pendahuluan

Kota Batam, sebagai salah satu Kawasan Strategis Nasional (KSN), telah berkembang menjadi pusat pertumbuhan industri dan perdagangan utama di wilayah Kepulauan Riau (Anto Kurniawan, 2025). Namun, kemajuan ini tidak terlepas dari dampak lingkungan yang menyertainya. Salah satu dampak signifikan adalah penurunan kualitas udara akibat emisi dari aktivitas industri dan transportasi. Data terbaru dari Dinas Lingkungan Hidup (DLH) tahun 2024, Kota Batam menunjukkan bahwa sebanyak 30% dari 1.620 kendaraan berbahan bakar solar di Batam tidak lulus uji emisi, yang memperkuat bukti bahwa sektor transportasi menjadi kontributor utama terhadap peningkatan konsentrasi polutan seperti CO₂ dan partikulat halus di atmosfer.

Dalam konteks ini, arsitektur menjadi disiplin kunci yang tidak hanya berperan dalam mendukung efisiensi energi bangunan, tetapi juga dalam merancang elemen-elemen desain yang tanggap terhadap tantangan lingkungan. Konsep bioremediasi, yang melibatkan pemanfaatan organisme hidup untuk menetralkan polutan melalui proses biologis, menjadi dasar teoretis yang relevan bagi kajian ini (Melati, 2020). Salah satu pendekatan inovatif dalam bioremediasi arsitektural adalah integrasi mikroalga ke dalam sistem fasad bangunan (Widyakusuma, 2024).

Graha Pena Batam dipilih sebagai studi kasus karena posisinya yang strategis di pusat kawasan bisnis kota, menjadikannya lokasi representatif untuk menilai efektivitas teknologi fasad mikroalga dalam konteks urban dengan tingkat aktivitas dan polusi tinggi. Fasad kaca–beton konvensional yang luas pada bangunan ini memiliki potensi untuk diretrofit menjadi bioreaktor mikroalga berupa sistem lapisan ganda yang memanfaatkan aliran media cair dan kultur alga guna menangkap polutan atmosfer. Tipologi fasad yang relatif datar dan modular memungkinkan pemasangan *secondary façade* tanpa mengubah struktur primer, sehingga sesuai untuk evaluasi aplikasi pada bangunan eksisting. Fungsi Graha Pena sebagai pusat media memberi nilai strategis bagi diseminasi pengetahuan dan peningkatan kesadaran publik terhadap teknologi arsitektur hijau. Adaptasi teknologi ini pada bangunan di wilayah urban-industrial seperti Batam tidak hanya menawarkan solusi praktis terhadap isu lingkungan, tetapi juga menciptakan simbiosis antara infrastruktur buatan dan proses biologis alami.

Hingga saat ini, belum terdapat penelitian serupa di Indonesia yang secara integratif mengkaji penerapan fasad mikroalga pada bangunan eksisting di iklim tropis dengan mempertimbangkan tiga aspek utama sekaligus: visual arsitektural, efisiensi energi, dan dampak ekologis terhadap lingkungan perkotaan. Oleh karena itu, studi ini bertujuan untuk mengisi kekosongan tersebut dengan menganalisis potensi fasad mikroalga sebagai strategi mitigasi polusi udara yang tidak hanya fungsional secara ekologis, tetapi juga adaptif dan estetis dalam konteks iklim tropis.

Penelitian ini secara khusus bertujuan untuk mengevaluasi potensi penerapan sistem mikroalga pada fasad Gedung Graha Pena Batam sebagai strategi penanggulangan polusi udara melalui pendekatan arsitektur regeneratif. Fokus utama kajian ini adalah untuk menilai sejauh mana efektivitas sistem tersebut dalam menyerap polutan udara, serta kontribusinya terhadap peningkatan kinerja ekologis bangunan di lingkungan industri-perkotaan beriklim tropis.

2. Kajian Pustaka Lokasi Site



Gambar 1. Titik Lokasi Site

Dalam perancangan strategi arsitektur berkelanjutan, analisis lokasi atau *site analysis* merupakan aspek fundamental yang mempengaruhi performa dan efisiensi sistem bangunan, termasuk penerapan fasad mikroalga. Gedung Graha Pena Batam terletak di Jl. Ahmad Yani, Tlk. Tering, Kecamatan Batam Kota, Kota Batam. Lokasi Gedung Graha Pena Kota Batam yang dekat dengan Pelabuhan Internasional Batam Center, perkantoran pemerintahan, pusat logistik, dan fasilitas umum lainnya menjadikannya sangat terekspos pada emisi polutan, baik dari aktivitas industri maupun transportasi.

Karakteristik iklim tropis lembap di Batam, dengan suhu rata-rata 24–35°C, kelembapan relatif tinggi, dan intensitas cahaya matahari yang konsisten, menciptakan kondisi optimal untuk pertumbuhan mikroalga. Faktor ini selaras dengan teori fotosintesis alga yang memerlukan cahaya, suhu hangat, dan kelembapan untuk produktivitas biomassa maksimal (Chisti, 2007).

Pada kasus Gedung Graha Pena Batam, karakteristik lokasi yang strategis ini memiliki dua implikasi utama. Pertama, intensitas paparan polutan udara yang tinggi menuntut penerapan solusi inovatif seperti integrasi bioreaktor mikroalga pada fasad. Mikroalga, dengan kemampuan fotosintesis dan mekanisme bioremediasi, dapat berfungsi sebagai penyaring udara yang efektif sekaligus mengubah polutan seperti CO₂ menjadi biomassa yang berguna. Kedua, lokasi yang terbuka dan mendapatkan paparan sinar matahari optimal mendukung proses fotosintesis mikroalga, sehingga meningkatkan efisiensi penyerapan gas berpolutan.

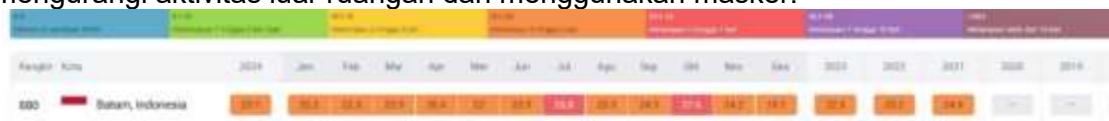
Kajian lokasi juga mencakup analisis terhadap aksesibilitas, visibilitas, dan hubungan dengan jaringan transportasi serta infrastruktur pendukung di sekitarnya. Di Batam, sebagai kota industri dengan tingkat aktivitas tinggi, faktor-faktor tersebut sangat relevan dalam menentukan potensi intervensi arsitektural. Penerapan sistem fasad mikroalga pada Graha Pena Batam diharapkan tidak hanya sebagai upaya mitigasi polusi udara, tetapi juga sebagai model adaptasi bangunan terhadap kondisi urban yang dinamis.

Kualitas Udara Di Batam

Polusi udara merupakan salah satu ancaman terbesar bagi kesehatan lingkungan dan menempati peringkat kelima sebagai faktor risiko utama kematian global, dengan kontribusi hampir 5 juta kematian setiap tahun (Anadolu, 2025). Penelitian epidemiologi menunjukkan bahwa paparan partikel halus PM2.5 menjadi penyebab utama. Polusi ini mencakup partikel dan gas, namun partikel berukuran $\leq 2,5$ mikrometer (PM2.5) dianggap paling berbahaya bagi kesehatan karena mampu menembus paru-paru dan masuk ke sistem kardiovaskular serta saraf pusat, memicu kerusakan oksidatif dan inflamasi sistemik (Rajagopalan et al., 2018). Akibatnya, polusi udara berperan dalam timbulnya penyakit seperti stroke, penyakit jantung, diabetes, kanker paru-paru, serta gangguan pernapasan akut dan kronis, termasuk asma.

Kota Batam telah mengalami fluktuasi kualitas udara yang mengkhawatirkan dalam beberapa tahun terakhir. Pada Oktober 2023, Indeks Standar Pencemaran Udara (ISPU) Batam meningkat dari kategori sedang (51-100) menjadi tidak sehat (101-200),

mendorong pemerintah setempat mengeluarkan imbauan kepada masyarakat untuk mengurangi aktivitas luar ruangan dan menggunakan masker.



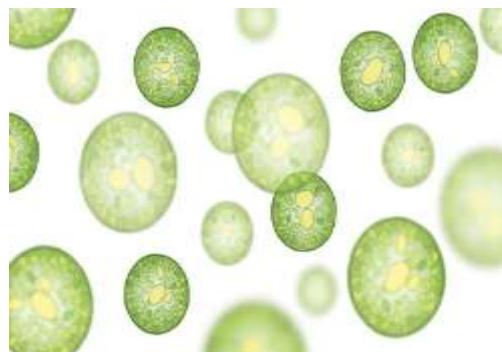
Gambar 2. Tingkat Polusi Partikel Kota Batam

Sumber : <https://www.iqair.com/>

Pada Desember 2024, Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) mencatat kualitas udara Batam masuk kategori berbahaya, dengan konsentrasi PM2.5 mencapai tingkat yang mengancam kesehatan. Konsentrasi PM2.5 yang tinggi ini dapat menembus saluran pernapasan dan meningkatkan risiko penyakit pernapasan.

Pada Maret 2025, data menunjukkan bahwa kualitas udara Batam berada dalam kategori sedang, dengan konsentrasi PM2.5 sebesar $11,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$, yang masih 2,4 kali lipat di atas panduan tahunan WHO. Meskipun terjadi perbaikan, fluktuasi kualitas udara ini menekankan perlunya solusi inovatif untuk mitigasi polusi udara di Batam.

Mikroalga



Gambar 3. Mikroalga

Sumber : <https://www.greener.co/>

Mikroalga merupakan bentuk organisme tanaman yang paling sederhana, tidak memiliki struktur akar, batang, daun, atau organ tanaman lainnya. Secara definisi, mikroalga adalah organisme fotosintesis bersel mikroskopis yang dapat ditemukan di berbagai perairan, baik air asin maupun air tawar. Organisme ini umumnya berupa sel tunggal namun dapat pula membentuk koloni. Mikroalga tersebar di berbagai ekosistem perairan, seperti laut, danau, sungai, dan perairan payau. Salah satu peran penting mikroalga adalah kemampuan mereka dalam menghasilkan 60 hingga 75 persen oksigen yang dibutuhkan manusia dan hewan (Widyakusuma, 2024). Proses ini terjadi melalui penyerapan karbon dioksida dari udara atau air selama fotosintesis. Kontribusi ini jauh lebih signifikan dibandingkan dengan semua hutan dan tanaman hijau di Bumi, menunjukkan peran vital mikroalga dalam mendukung kehidupan di planet ini.

Mikroalga menunjukkan kapasitas penyerapan CO_2 yang luar biasa melalui fotosintesis. Badan Riset dan Inovasi Nasional menyatakan bahwa mikroalga seperti *Spirulina platensis* mampu menyerap CO_2 dengan produktivitas 50 kali lebih tinggi dibandingkan tanaman darat (Dhanya, 2025). Selain itu, peneliti dari Universitas Gajah Mada mengembangkan teknologi Microforest 100, yang menggunakan mikroalga dalam fotobioreaktor untuk menyerap CO_2 setara dengan lima pohon dewasa berusia 15 tahun. Sistem ini menunjukkan potensi skala besar dalam mitigasi emisi karbon di ruang terbuka (Tasya, 2024).

Mikroalga sebagai Agen Bioremediasi

Bioremediasi merupakan proses pemanfaatan organisme hidup untuk mendegradasi atau menetralisasi kontaminan lingkungan (Kennedy et al., 2025). Dalam bidang arsitektur, mikroalga kini menjadi fokus penelitian potensial berkat kemampuannya dalam menyerap polutan udara secara efektif.

Mengintegrasikan mikroalga dengan fasad bangunan dalam pelat yang disebut bioreaktor dapat memberi peluang khusus mengubah fasad menjadi permukaan fotosintesis yang dapat memanfaatkan mulai dari cahaya matahari hingga udara kotor dari perkotaan.

Sistem bioreaktor mikroalga pada fasad bangunan bekerja dengan prinsip dasar fotosintesis. Desain fasad cerdas yang mengintegrasikan mikroalga terdiri dari panel-panel transparan yang berisi kultur mikroalga. Panel-panel ini dipasang pada fasad bangunan membentuk sistem dinamis yang menyerap karbon dioksida, polutan udara lainnya melalui proses fotosintesis yang dilakukan mikroalga, mengubah polutan tersebut menjadi biomassa yang dapat dimanfaatkan, dan melepaskan oksigen ke atmosfer sebagai hasil fotosintesis.

Mikroalga memiliki keunggulan signifikan dibandingkan metode bioremediasi lainnya, antara lain:

- Efisiensi fotosintesis tinggi

Mikroalga memiliki kemampuan menyerap gas CO₂ melalui proses fotosintesis yang berlangsung di dalam organel sel mikroalga yang disebut dengan kloroplas dan mengubahnya menjadi biomassa.

- Laju pertumbuhan cepat

Mikroalga dapat berkembang biak dengan cepat dalam kondisi optimal, menjadikannya efisien untuk aplikasi bioremediasi skala besar.

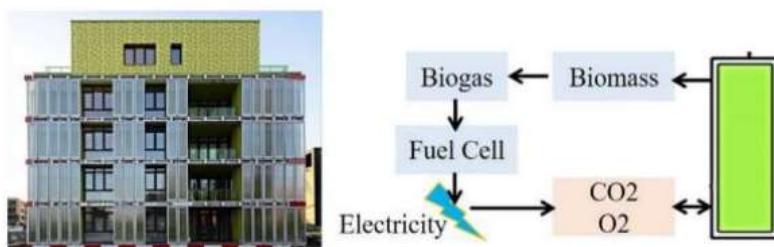
- Penangkapan multi-polutan

Selain karbon dioksida (CO₂), mikroalga juga dapat menyerap polutan lain seperti nitrogen oksida (NO_x) dan sulfur dioksida (SO₂).

- Implementasi yang fleksibel

Sistem bioreaktor mikroalga dapat diintegrasikan ke berbagai jenis fasad bangunan tanpa mengganggu fungsi utama bangunan.

Pemanfaatan Sistem Alga Bioreaktor



Gambar 4. Contoh Gedung BIQ Apartemen dengan Sistem Photobioreactor

Sumber: <http://www.arup.com/>

BIQ House di Hamburg merupakan contoh sukses penerapan fasad mikroalga dalam arsitektur modern. Bangunan ini dilengkapi BIQ dilengkapi dengan 129 panel kaca bio-reaktor berisi mikroalga, terletak di sisi tenggara dan barat daya gedung, memungkinkan alga mendapatkan sinar matahari yang cukup untuk fotosintesis. Mikroalga dalam panel kaca yang melakukan fotosintesis menghasilkan biomassa. Proses ini tidak hanya menciptakan energi tetapi juga berfungsi sebagai sistem peneduh dan isolasi termal. Biomassa yang dihasilkan kemudian dipanen untuk diolah menjadi biogas, yang dapat digunakan sebagai sumber energi terbarukan untuk pemanasan atau pembangkit listrik. Kelebihan panas dari proses ini disimpan dalam tangki khusus untuk digunakan di waktu mendatang.

BIQ House menunjukkan potensi besar dalam mengurangi karbon dioksida (CO₂). Bangunan ini mampu menyerap 2,5 ton CO₂ per tahun melalui penggunaan mikroalga sebagai "penyerap karbon" aktif (Zagi, 2017). Selain itu, sistem fasad bio-reaktif ini berfungsi sebagai elemen peneduh, pengatur suhu, dan penyaring suara eksternal.

Keunggulan Fasad Mikroalga Dibanding Solusi Lain

Dalam upaya mengoptimalkan fungsi mitigasi polutan udara dan efisiensi termal fasad bangunan, sistem mikroalga dipilih sebagai alternatif unggul dibandingkan solusi vegetasi vertikal konvensional seperti *Green wall* atau *Vertical garden*.

Berikut adalah keunggulan Fasad mikroalga dibanding solusi lain (*Green Wall* atau *Vertical Garden*.)

- a. Sistem mikroalga yang diaplikasikan pada fasad bangunan memiliki kemampuan penyerapan karbon dioksida (CO₂) per unit luas yang jauh melampaui vegetasi darat biasa. Hal ini disebabkan oleh kecepatan fotosintesis dan laju pembelahan sel mikroalga yang sangat tinggi, sehingga setiap panel dapat mengakumulasi CO₂ puluhan kali lebih banyak dibanding tanaman vertikal konvensional. Selain itu, mekanisme biologis berkelanjutan pada kultur mikroalga juga mampu menjerat polutan gas lain—seperti oksida nitrogen (NO_x), oksida sulfur (SO_x)—dan partikel halus (PM2.5), sementara *Green Wall* tradisional hanya menjalankan penyaringan pasif melalui daun dan media tanam.
- b. Fotobioreaktor mikroalga tidak hanya menghasilkan oksigen dalam volume yang hampir dua kali lipat dibanding tanaman vertikal standar, tetapi sekaligus memproduksi biomassa bernilai ekonomi tinggi. Setiap siklus panen biomassa dapat dimanfaatkan untuk pembuatan biofuel, pupuk organik, maupun bahan baku kosmetik, suatu nilai tambah yang tidak ditemukan pada *Green Wall* konvensional.
- c. Dari sisi pemasangan, modul *flat-panel photobioreactor* bersifat prefabrikasi dan dirancang modular dengan dimensi vertikal minimal (misalnya 2,5 m × 0,7 m), sehingga mudah dipasang sebagai lapisan sekunder pada fasad sempit atau gedung tinggi tanpa perlu memperkuat struktur utama. Sebaliknya, sistem *Green Wall* menuntut ketebalan media tanam lebih dari 10 cm dan instalasi irrigasi yang rumit, sehingga memerlukan ruang serta beban tambahan yang jauh lebih besar.
- d. Pada aspek operasional, fotobioreaktor mikroalga dilengkapi sensor cerdas (cahaya, pH, suhu, CO₂) yang terhubung ke unit kontrol terpusat untuk mengatur sirkulasi medium dan pencahaayaan secara otomatis. Dengan demikian, intervensi manual dapat diminimalkan dan kondisi kultur tetap terjaga optimal selama 3–4 minggu sebelum medium perlu diganti, sementara kebutuhan air bersih relatif rendah dan risiko kontaminasi dapat ditekan. *Green Wall* konvensional, di sisi lain, rawan serangan hama atau penyakit tanaman serta memerlukan pergantian substrat dan perawatan rutin berupa penyiraman dan pemangkasan setiap 6–12 bulan.
- e. Secara estetika, panel mikroalga hadir dengan rona hijau bercahaya yang berubah-ubah mengikuti intensitas sinar matahari, menciptakan tampilan fasad yang futuristik dan mudah dikenali sebagai simbol inovasi hijau. *Green wall* tradisional umumnya memiliki tampilan yang seragam dan telah banyak dijumpai di kota-kota besar, sehingga kurang dapat menonjolkan identitas arsitektural bangunan.

Berdasarkan kajian literatur, mikroalga memiliki kemampuan signifikan dalam menyerap gas rumah kaca melalui proses fotosintesis, menjadikannya elemen biologis yang potensial untuk diterapkan dalam strategi mitigasi lingkungan berbasis arsitektur. Integrasi mikroalga ke dalam elemen arsitektural aktif, seperti fasad bangunan, tidak hanya berkontribusi pada peningkatan kualitas udara, tetapi juga mencerminkan pendekatan arsitektur regeneratif yang menekankan hubungan timbal balik antara sistem buatan dan proses ekologis alami. Dalam konteks urban seperti Batam, yang menghadapi tantangan penurunan kualitas udara, pemanfaatan mikroalga dalam desain arsitektur menghadirkan solusi inovatif yang selaras dengan prinsip keberlanjutan dan restorasi lingkungan.

3. Metode Penelitian

Penelitian ini menerapkan pendekatan kualitatif-deskriptif dengan desain studi kasus yang berfokus pada Gedung Graha Pena Batam.

Pengumpulan Data

Teknik pengumpulan data dalam penelitian ini dilakukan melalui dua pendekatan utama, yakni pengumpulan data sekunder dan data spasial (Widyakusuma, 2024). Data sekunder diperoleh dari studi literatur yang relevan mengenai teknologi fasad mikroalga, performa bioreaktor alga, serta data empiris dari proyek referensi seperti BIQ House + SolarLeaf di Hamburg, Jerman, yang menyediakan acuan kuantitatif laju penyerapan CO₂ oleh panel mikroalga. Data tersebut digunakan sebagai dasar perhitungan estimasi penyerapan karbon dalam konteks studi ini. Sementara itu, data spasial diperoleh melalui proses pemodelan tiga dimensi menggunakan perangkat lunak SketchUp yang dikombinasikan dengan fitur CadMapper.

Analisis Data

Analisis dalam penelitian ini dilakukan secara triangulatif (Naufalya Nur Azizah & Dalhar Susanto, 2022) dengan menggabungkan pendekatan studi literatur terkait mikroalga dan teknologi fasad bioreaktif, serta estimasi kuantitatif terhadap performa sistem mikroalga dalam menyerap CO₂ berdasarkan dimensi fasad Gedung Graha Pena Batam. Data spasial bangunan diperoleh melalui pemodelan tiga dimensi menggunakan perangkat lunak SketchUp yang dikombinasikan dengan fitur CadMapper untuk melacak kontur dan geometri tapak bangunan secara akurat.

Estimasi laju penyerapan CO₂ dilakukan dengan merujuk pada data empiris dari studi yang telah terpublikasi, khususnya dari proyek BIQ House + SolarLeaf di Hamburg, Jerman (Zagi, 2017). Studi tersebut menunjukkan bahwa panel mikroalga seluas 200 m² mampu menyerap sekitar 2,5 ton CO₂ per tahun. Dengan demikian, dapat dihitung bahwa setiap 1 m² panel mikroalga memiliki potensi untuk menyerap sekitar 4,2 gram CO₂ per hari. Nilai ini digunakan sebagai acuan proyeksi dalam menghitung potensi total penyerapan karbon pada luas fasad efektif Gedung Graha Pena.

Pendekatan ini memiliki sejumlah batasan metodologis yang harus diakui. Pertama, tingkat fotosintesis mikroalga dalam studi ini belum diukur secara langsung di lokasi, melainkan menggunakan data referensi dari studi di wilayah subtropis, yang secara iklim dan intensitas cahaya berbeda dengan kondisi tropis di Batam. Kedua, estimasi ini belum memperhitungkan variabel lingkungan lokal seperti fluktuasi radiasi matahari, kelembapan udara, maupun performa sistem pemeliharaan air dan nutrisi mikroalga yang memengaruhi efisiensi fotosintesis. Ketiga, pemodelan spasial melalui SketchUp dan CadMapper meskipun cukup representatif, tetap memiliki keterbatasan akurasi geometri dibanding pengukuran langsung di lapangan. Hasil perhitungan ini bersifat estimatif awal dan perlu divalidasi melalui uji coba eksperimental pada fasad mikroalga sesungguhnya di lingkungan tropis.

4. Hasil dan Pembahasan

Karakteristik Gedung Graha Pena Batam



Gambar 5. Tapak dan Tampak Gedung Graha Pena Batam
Sumber: Google Earth

Gedung Graha Pena merupakan bangunan bertingkat yang difungsikan sebagai pusat kegiatan perkantoran dan media. Bangunan ini memiliki ketinggian mencapai 37 meter dan luas tapak sebesar 871 meter persegi. Arah hadap utama gedung ini

mengarah ke timur dan barat, sehingga kedua sisi fasad secara langsung menerima paparan sinar matahari pada pagi dan sore hari.

Secara arsitektural, fasad bangunan didominasi oleh elemen kaca dan panel logam, yang mencerminkan pendekatan desain modern serta memberikan karakter visual yang bersih dan kontemporer. Dominasi material tersebut juga menghadirkan potensi besar untuk integrasi sistem fasad berbasis mikroalga, tanpa mengganggu fungsi maupun estetika eksisting bangunan. Mengintegrasikan mikroalga dengan fasad bangunan dalam pelat yang disebut bioreaktor dapat memberi peluang khusus mengubah fasad menjadi permukaan fotosintesis. Fasad berbasis ganggang atau mikroalga lebih efektif dalam mengatasi masalah polusi udara. Kemampuan ini menjadi salah satu daya tarik mikroalga untuk digunakan sebagai penangkap karbon dalam skala sangat besar (Widyakusuma, 2024).

Analisis Iklim Kota Batam

Kota Batam memiliki iklim tropis basah dengan karakteristik unik yang memengaruhi desain sistem fasad berbasis mikroalga. Suhu harian berkisar antara 24–35°C sepanjang tahun. Posisi geografisnya di 1° Lintang Utara menyebabkan matahari berada hampir tegak lurus dengan variasi harian yang minim. Selain itu, angin muson timur laut (Desember–Februari) dan barat daya (Juni–Agustus) mendominasi pola tiupan angin, dengan kecepatan rata-rata 10–20 km/jam. Kombinasi faktor ini menciptakan tantangan sekaligus peluang dalam merancang panel mikroalga yang responsif terhadap dinamika iklim setempat.



Gambar 6. Muson Timur Laut (Desember-Februari)



Gambar 7. Muson Barat Daya (Juni-Agustus)

Analisis Orientasi Fasad untuk Sistem Mikroalga Gedung Graha Pena Batam

Gedung Graha Pena Batam yang menghadap ke arah timur dan barat, perlu mempertimbangkan ulang orientasi pemasangan panel mikroalga dengan memperhatikan karakteristik iklim tropis di Batam.

Orientasi fotobioreaktor berpengaruh signifikan terhadap produktivitas biomassa mikroalga. Pada garis lintang tinggi ($>35^\circ$), orientasi timur-barat menghasilkan peningkatan produktivitas hingga 50% dibandingkan orientasi utara-selatan, terutama karena distribusi cahaya yang lebih optimal selama siklus harian. Sebaliknya, di wilayah lintang rendah ($<35^\circ$), orientasi utara-selatan lebih efektif untuk memaksimalkan penyerapan cahaya (Slegers et al., 2011).

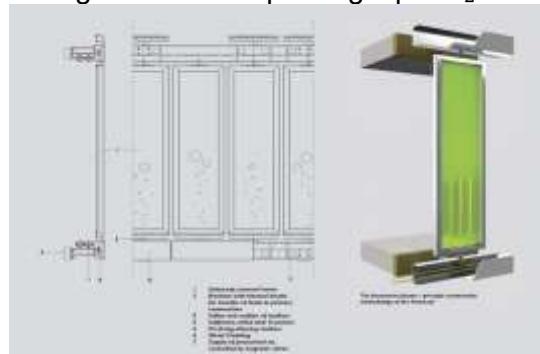
Penempatan panel mikroalga pada fasad utara dan selatan Gedung Graha Pena Batam didasarkan pada pertimbangan strategis yang mencakup aspek pencahayaan,

kendali suhu, dan efektivitas penyerapan polutan. Fasad timur dan barat memang menerima sinar matahari langsung pada pagi dan sore hari, namun intensitas radiasi ultraviolet yang tinggi pada arah tersebut berisiko menimbulkan *thermal stress* pada kultur mikroalga. Hal ini menjadi tantangan utama, mengingat sekitar 95% energi cahaya matahari yang diserap oleh mikroalga akan berubah menjadi panas, yang dalam jangka waktu tertentu dapat merusak sel mikroalga (Wang et al., 2012). Sebaliknya, fasad utara dan selatan di wilayah Batam cenderung menerima cahaya difus yang lebih stabil dan merata sepanjang hari. Kondisi pencahayaan ini mendukung aktivitas fotosintesis mikroalga secara optimal tanpa menimbulkan risiko *photoinhibition*, yaitu gangguan fotosintesis akibat kelebihan radiasi.

Dari aspek lingkungan mikroklimat, arah angin musiman di Batam turut menjadi pertimbangan penting. Pada musim angin timur laut (Desember - Februari), aliran udara membawa polutan dari kawasan industri dan pelabuhan yang terletak di timur laut menuju bagian selatan kota. Sementara itu, pada musim angin barat daya (Juni hingga Agustus), polutan dari aktivitas perkotaan terdorong ke arah utara. Oleh karena itu, pemasangan panel mikroalga pada fasad utara dan selatan memungkinkan sistem ini menangkap konsentrasi CO₂ secara lebih efektif, karena panel berada tepat pada jalur aliran polutan musiman. Dengan demikian, interaksi antara aliran udara tercemar dan panel mikroalga dapat dioptimalkan untuk mendukung proses penyerapan polutan dan meningkatkan performa lingkungan bangunan secara keseluruhan.

Integrasi Sistem Mikroalga Pada Fasad Graha Pena Batam

Desain integrasi mikroalga pada fasad bangunan Graha Pena Batam mengacu pada prinsip arsitektur bio-reaktif seperti yang diterapkan pada BIQ House di Hamburg, Jerman, yaitu pemanfaatan panel mikroalga sebagai elemen fasad dinamis. Dengan besar energi yang dihasilkan adalah sekitar 4.500 kWh listrik per tahun dan 6000 kWh energi panas per tahun, bangunan The BIQ House mampu mengoperasikan sistemnya sendiri melalui biomassa mikroalga dari fasad seluas 200 m² (Naufalya Nur Azizah & Dalhar Susanto, 2022). Sistem mikroalga fotobioreaktor flat-panel akan dipasang sebagai lapisan sekunder pada fasad utara dan selatan Graha Pena Batam, memanfaatkan intensitas cahaya tropis Batam untuk fotosintesis mikroalga sekaligus berfungsi sebagai shading dinamis dan penangkap CO₂ aktif.



Gambar 8. Detail Panel Mikroalga

Sumber: <https://www.morethangreen.es>

Modul modular ini terdiri dari panel kaca ganda berukuran 2,5 m × 0,7 m yang menampung kultur mikroalga dalam medium cair, terhubung dengan sistem sirkulasi nutrien tertutup dan diatur otomatis berdasarkan data sensor lingkungan, sehingga menghasilkan biomassa dan panas terbarukan serta meningkatkan estetika dan performa termal bangunan.

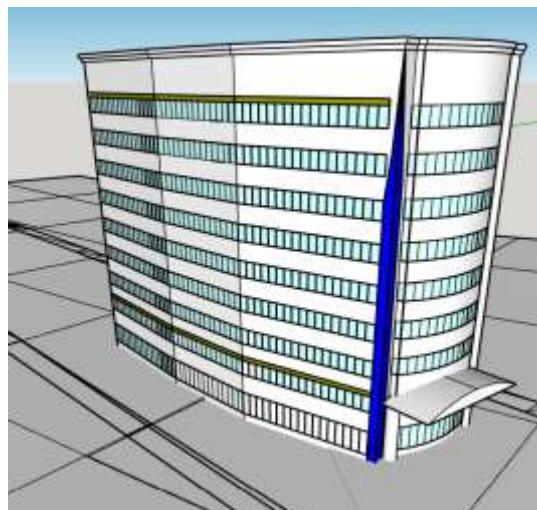
Berikut adalah beberapa komponen dalam sistem ini:

- a. Panel Transparan Ganda (*Double-Glazed Panel*).
- b. *Bracket* dengan ekstrusi aluminium *thermal-break* seri 6000 untuk memastikan isolasi termal dan kekakuan struktural.
- c. Sistem Pipa Sirkulasi untuk mengalirkan alga dan *nutrient*.
- d. Rangka sekunder *C-section/U-channel*.

- e. Sambungan mekanis yang menggunakan poros atau pen sebagai titik tumpu, sehingga elemen yang dipasang dapat berotasi di sekitar sumbu pin tersebut.
- f. *Clip-on covers* atau *face caps* aluminium menutup sambungan *bracket* demi estetika dan proteksi.
- g. Sistem penyediaan udara bertekanan.

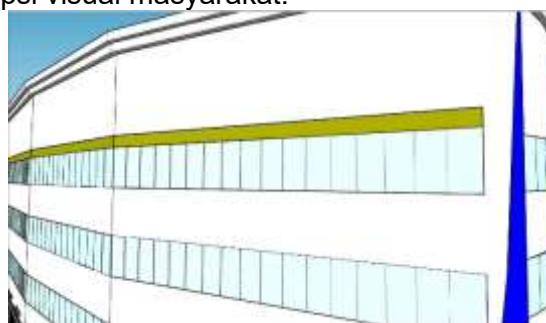


Gambar 9. Desain Sebelum

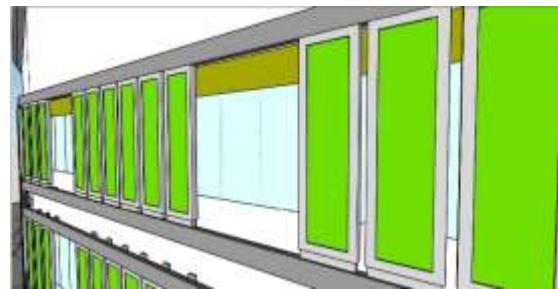


Gambar 10. Desain Sesudah

Dari sisi visual, integrasi sistem mikroalga pada fasad Graha Pena Batam menghasilkan tampilan yang unik dan futuristik. Modul panel yang dirancang menyatu dengan ritme vertikal bangunan, memberikan kesan modern sekaligus ekologis. Secara keseluruhan, sistem ini tidak hanya berfungsi sebagai elemen teknologi lingkungan, tetapi juga memperkuat identitas arsitektural bangunan sebagai simbol kemajuan dan kepedulian terhadap isu keberlanjutan. Namun demikian, terdapat tantangan tersendiri dalam aspek persepsi visual masyarakat.



Gambar 11. Desain Sebelum



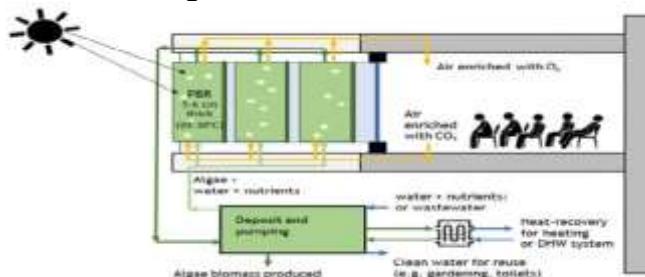
Gambar 12. Desain Sesudah



Gambar 13. Rendering Panel Mikroalga Pada Fasad Graha Pena Batam

Warna mikroalga yang berubah-ubah sesuai dengan fase pertumbuhan dan kondisi lingkungan, mulai dari hijau cerah, hijau tua, hingga kecoklatan, dapat menimbulkan kesan yang tidak selalu positif. Perubahan ini, meskipun merupakan indikasi biologis yang normal, bisa dipersepsikan sebagai ketidakteraturan atau bahkan sebagai penurunan estetika oleh sebagian kalangan. Di sisi lain, kurangnya pemahaman publik terhadap manfaat sistem mikroalga sebagai penyerap karbon dan elemen penyejuk alami juga berpotensi menghambat penerimaannya sebagai bagian dari citra visual bangunan. Oleh karena itu, dibutuhkan strategi komunikasi visual dan edukatif yang efektif untuk menjembatani persepsi masyarakat dan memaksimalkan nilai tambah estetika dari sistem ini.

Sistem Kerja Panel Mikroalga



Gambar 14. Sistem Kerja Mikroalga

Sumber: <https://www.mekanisasikp.web.id/2021/12/green-eco-air-purifier-dari-mikroalga.html>

a. Penangkapan Energi Matahari

Sistem ini dimulai dengan pemanfaatan sinar matahari sebagai sumber energi utama. Panel fotobioreaktor (PBR) yang terpasang di fasad bangunan dirancang dengan ketebalan sekitar 5 hingga 6 cm dan dioperasikan dalam rentang suhu optimal 20–30°C, yaitu suhu ideal untuk pertumbuhan mikroalga. Energi cahaya dari matahari sangat penting dalam mendukung proses fotosintesis yang dilakukan oleh mikroalga yang hidup di dalam panel ini.

b. Proses Fotosintesis oleh Mikroalga

Di dalam ruang PBR, terdapat campuran mikroalga, air, dan nutrien yang membentuk ekosistem mini untuk menunjang fotosintesis. Mikroalga memanfaatkan karbon dioksida (CO₂) yang berasal dari udara dalam ruangan, khususnya yang dihasilkan dari aktivitas manusia, serta cahaya matahari yang

diterima oleh panel. Melalui fotosintesis, mikroalga mengubah CO_2 menjadi oksigen (O_2) dan menghasilkan biomassa, yang merupakan akumulasi hasil pertumbuhan mikroalga itu sendiri.

c. Pertukaran Udara

Udara dari dalam atau luar bangunan yang mengandung CO_2 dialirkkan ke dalam sistem PBR sebagai bahan baku fotosintesis. Setelah proses berlangsung, udara yang telah diperkaya dengan oksigen dialirkkan kembali. Siklus ini menciptakan sistem pertukaran udara yang sehat dan efisien, serta memberikan kontribusi terhadap peningkatan kualitas udara secara alami.

d. Sirkulasi Air dan Nutrien

Campuran air, nutrien, dan mikroalga yang berada dalam sistem disirkulasikan menuju tangki penampungan yang berfungsi sebagai tempat pemisahan. Di dalam tangki ini, biomassa mikroalga yang telah tumbuh akan dipisahkan, sementara air yang telah digunakan – yang bisa berupa air limbah atau air kaya nutrisi – akan disaring dan dikendalikan untuk diproses kembali. Sistem ini dirancang agar tetap tertutup dan efisien dalam mendaur ulang komponen yang digunakan.

e. Pemanfaatan Hasil Mikroalga dan Air

Biomassa mikroalga yang terkumpul dari proses pemisahan dapat digunakan untuk berbagai kebutuhan, seperti bahan dasar bioenergi, pupuk organik, hingga bahan baku dalam industri kosmetik atau farmasi. Sementara itu, air bersih hasil penyaringan bisa dimanfaatkan kembali untuk keperluan non-konsumtif seperti menyiram tanaman, menyuplai air untuk toilet, atau dialirkkan ke sistem pemanas domestik melalui integrasi pemulihan panas.

f. Efisiensi Energi melalui Sistem Pemulihan Panas

Sebagai bagian dari efisiensi energi, sistem ini juga mengintegrasikan teknologi pemulihan panas. Panas yang terkandung dalam air limbah atau air hasil penyaringan dapat dimanfaatkan kembali untuk kebutuhan pemanas ruangan atau pemanas air. Dengan cara ini, sistem tidak hanya mendukung keberlanjutan dari sisi ekologis, tetapi juga dari sisi energi bangunan.

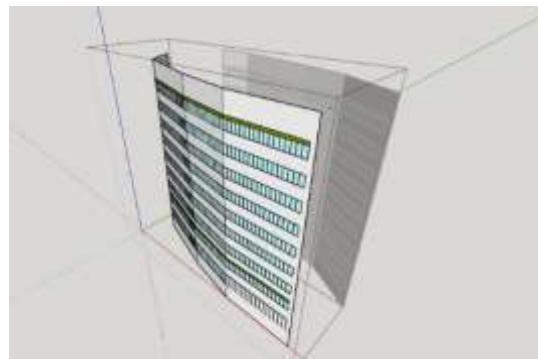
Potensi Penyerapan Karbon Dioksida

Tingkat fotosintesis berdasarkan kondisi penelitian ini belum dapat ditentukan, penelitian ini menggunakan data dari studi yang sudah ada sebagai acuan awal, sehingga pengukuran dapat dilakukan secara langsung pada fasad alga yang sesungguhnya. BIQ House + SolarLeaf - The use of microalgae Hamburg, Germany dalam penelitiannya menyatakan luas panel alga sebesar 200 m^2 dapat menyerap 2,5 ton CO_2 /tahun. Dari data tersebut 200 m^2 dapat menyerap 8,4 kg/hari, serta dalam sehari 1 m^2 dapat menyerap CO_2 sebanyak 0,0042 kg/hari atau 4,2 g/hari (Oktopa & Prihatmaji, 2020).

Tabel 1. Penyerapan CO_2 BIQ House

kg/hari (200m ²)	kg/hari (1 m ²)
8,4	0,042

Melalui aplikasi Sketchup dan menggunakan fitur CadMapper untuk melakukan trace pada Gedung Graha Pena Batam, lalu diberikan ketinggian sebesar 37 m. Total luas dinding yang ditunjukkan pada aplikasi tersebut sebesar $3.800,26 \text{ m}^2$. Jika diasumsikan penggunaan fasad bioreaktor pada luas dinding bangunan sebesar 50%, maka luas dinding yang ditutupi oleh bioreaktor alga adalah $1.900,13 \text{ m}^2$.



Gambar 15. Luas Fasad Utara dan Selatan

Jika luas fasad alga yang diterapkan pada Gedung Graha Pena Batam sebesar $1.900,13 \text{ m}^2$ dan panel alga dapat menyerap $0,0042 \text{ kg/hari}$, maka Gedung Graha Pena Batam dapat menyerap ($1.900,13 \text{ m}^2 \times 0,0042 \text{ kg/hari}$) $79,8 \text{ kg CO}_2/\text{harinya}$ atau $3,32 \text{ kg/jam}$.

Tabel 2. Estimasi Penyerapan CO₂ Panel Mikroalga pada Fasad Graha Pena Batam

Luas Fasad yang digunakan (m ²)	CO ₂ yang diserap (kg/hari/1 m ²)	Total (kg/hari/1 m ²)	Total (kg/jam/1 m ²)
1900,13	0,042	79,80546	3,3252275

Namun, laju fotosintesis pada mikroalga dipengaruhi oleh berbagai variabel, angka ini tidak dapat dianggap sebagai nilai pasti. Meskipun demikian, data tersebut memberikan gambaran awal mengenai potensi yang ditawarkan oleh fasad mikroalga.

Sebagai perbandingan, jika *green wall* diaplikasikan pada luas yang sama, berdasarkan data studi di Lampung yang menunjukkan penyerapan CO₂ sebesar $0,5\text{--}2 \text{ kg/m}^2/\text{tahun}$ (Aldy Rahmat Febriansyah et al., 2022), diperkirakan *green wall* akan menyerap antara ($1.900,13 \text{ m}^2 \times 0,5 \text{ kg/m}^2/\text{tahun}$) 950 kg hingga 3.800 kg ($1.900,13 \text{ m}^2 \times 2 \text{ kg/m}^2/\text{tahun}$) CO₂ per tahun. Dalam satu hari, rentang tersebut setara dengan sekitar $2,6\text{--}10,4 \text{ kg CO}_2$, atau rata-rata $0,11\text{--}0,43 \text{ kg}$ per jam. Sementara itu, panel mikroalga seluas $1.900,13 \text{ m}^2$ pada fasad Graha Pena Batam dapat menyerap sekitar $79,8 \text{ kg CO}_2$ setiap hari, setara $3,32 \text{ kg}$ per jam.

Tabel 3. Estimasi Penyerapan CO₂ Greenwall pada Fasad Graha Pena Batam

Luas Fasad yang digunakan (m ²)	CO ₂ yang diserap (kg/tahun/m ²)	Total (kg/jam/1 m ²)
1900,13	950,065	0,108454909
1900,13	3800,26	0,433819635

Dengan demikian, kemampuan serap CO₂ panel mikroalga jauh lebih tinggi sekitar $7\text{--}8$ kali lipat dibanding *green wall* pada kondisi optimal. Penggunaan panel mikroalga jelas menawarkan kapabilitas penyerapan karbon yang secara signifikan melebihi *green wall* pada luas fasad yang sama.

Kelayakan Ekonomi & Sosial

Secara keseluruhan, penerapan fasad mikroalga memerlukan investasi ekonomi dan dukungan sosial yang signifikan. Namun, manfaat jangka panjang, termasuk penghematan energi, insentif hijau, penyerapan karbon, dan peningkatan kualitas hidup masyarakat, menjadikan sistem ini layak dipertimbangkan untuk diterapkan secara massal di gedung pemerintah maupun swasta di Indonesia.

a. Kelayakan Ekonomi

1) Biaya Investasi Awal (CAPEX)

Penerapan sistem mikroalga pada fasad bangunan membutuhkan investasi awal yang signifikan, terutama untuk bahan, instalasi, dan sistem

pendukung seperti pompa, sensor, dan perangkat kontrol CO₂. Selain itu, diperlukan biaya desain dan jasa konsultasi dari arsitek, insinyur lingkungan, serta ahli bioteknologi untuk menyesuaikan fasad eksisting, melakukan uji kekuatan struktur, dan memodelkan instalasi secara akurat. Infrastruktur pendukung seperti jalur saluran air, pompa sirkulasi, sistem nutrisi mikroalga, serta sensor untuk memantau suhu, pH, dan kekeruhan air juga menambah beban biaya awal.

2) Biaya Operasional dan Pemeliharaan (OPEX)

Setelah instalasi, biaya operasional dan pemeliharaan menjadi perhatian berikutnya. Sistem mikroalga memerlukan pemeliharaan rutin untuk memastikan kinerjanya tetap optimal. Pemeliharaan ini mencakup pengawasan kualitas air, pengendalian pertumbuhan mikroorganisme, dan pembersihan panel secara berkala untuk mencegah penumpukan biofilm yang dapat mengurangi transparansi panel. Selain itu, sistem ini memerlukan keahlian khusus dalam bioteknologi mikroalga agar dapat dikelola dan dioperasikan secara optimal. Tanpa pengelolaan yang tepat, risiko gangguan seperti penyumbatan saluran atau kematian koloni mikroalga dapat terjadi.

3) Manfaat Finansial Jangka Panjang

Meski investasi awal dan biaya operasionalnya tidak sedikit, terdapat beberapa manfaat finansial jangka panjang yang dapat menyeimbangkan anggaran. Fasad mikroalga berfungsi sebagai lapisan isolasi termal, sehingga menurunkan beban pendingin udara dan mengurangi tagihan listrik. Jika sistem ini diintegrasikan ke dalam kebijakan bangunan hijau seperti sertifikasi *Greenship*, gedung dapat memperoleh poin sertifikasi tambahan dan berpeluang mendapatkan insentif pajak atau subsidi dari pemerintah. Lebih jauh, data laju penyerapan CO₂ dapat dikonversi menjadi kredit karbon, membuka peluang pendapatan jika pasar karbon regional atau nasional diakses oleh pemilik gedung.

4) Payback Period & Return on Investment (ROI)

Untuk mengukur kelayakan finansial secara menyeluruh, perlu dilakukan simulasi *payback period* dan perhitungan *Return on Investment* (ROI). Dengan membandingkan total biaya investasi awal dengan penghematan bulanan, baik dari pengurangan tagihan energi maupun potensi insentif fiskal, diperkirakan biayanya dapat dikompensasi dalam waktu sembilan hingga tiga belas tahun, tergantung pada jenis bioreaktor (Ricardo et al., 2024).

5) Skalabilitas dan Skema Pembiayaan

Demi memperluas adopsi secara massal, skema pembiayaan perlu dipertimbangkan. Lembaga keuangan hijau, melalui *green financing* atau penerbitan *green bonds*, dapat menawarkan kredit dengan suku bunga rendah untuk proyek yang memenuhi kriteria ramah lingkungan. Model *sewa/leasing* juga memungkinkan pengelola gedung menyewa modul mikroalga dari penyedia jasa, sehingga mengurangi beban investasi awal dan menyalurkan tanggung jawab pemeliharaan kepada pihak penyedia.

b. Kelayakan Sosial

1) Penerimaan Penghuni dan Pengguna Gedung

Dari perspektif sosial, penerimaan penghuni dan pengguna gedung menjadi faktor kunci. Fasad mikroalga menciptakan kesan "bangunan hidup" yang menghadirkan nuansa hijau dan sejuk, berpotensi meningkatkan kenyamanan psikologis penghuni. Namun, karakteristik warna mikroalga yang dapat berubah dari hijau cerah ke hijau tua atau kecoklatan perlu diantisipasi agar tidak dianggap sebagai fasad yang kotor. Oleh karena itu, edukasi visual melalui papan informasi atau tampilan digital dapat membantu masyarakat memahami siklus hidup mikroalga.

Manfaat kesehatan jangka panjang juga menjadi nilai jual sosial. Dengan kemampuannya menyerap CO₂ dan partikel debu (PM2.5), fasad mikroalga dapat menurunkan kadar polutan udara lokal, sehingga mengurangi risiko penyakit pernapasan dan meningkatkan citra gedung sebagai lingkungan kerja atau hunian yang sehat.

- 2) Pemberdayaan Komunitas & Edukasi
Keberadaan fasad mikroalga dapat dijadikan sarana edukasi bagi pelajar, mahasiswa, maupun warga setempat untuk mempelajari siklus fotosintesis mikroalga dan pentingnya mitigasi karbon. Gedung yang menerapkan sistem ini dapat menyelenggarakan lokakarya atau tur edukatif, melibatkan tenaga teknisi lokal seperti tukang kebun atau satpam dalam program pelatihan pemeliharaan sistem mikroalga. Selain meningkatkan keterampilan teknis masyarakat, pendekatan ini juga membangun rasa kepemilikan dan kepedulian terhadap lingkungan.
- 3) Dampak Sosial Ekonomi Lokal
Secara ekonomi lokal, adopsi fasad mikroalga membuka peluang lapangan kerja baru, mulai dari teknisi kultur mikroalga, petugas pemeliharaan, hingga peneliti lapangan. Industri turunan seperti produksi nutrisi kultur, rangka modul, dan *sensor monitoring* juga terdorong untuk berkembang, sehingga mendukung perekonomian UMKM di sektor hijau.
- 4) Regulasi & Kebijakan Lokal
Di Indonesia belum terdapat standar teknis atau regulasi yang mengatur secara spesifik tentang integrasi mikroalga dalam arsitektur bangunan, implementasi sistem ini pada bangunan yang sudah ada dapat menghadapi kendala administratif, terutama terkait dengan perizinan konstruksi tambahan atau modifikasi fasad. Koordinasi yang baik dengan pemilik bangunan dan pihak-pihak terkait lainnya sangat penting untuk mengatasi hal ini.
- 5) Tantangan Sosial
Tantangan muncul dari rendahnya pengetahuan publik tentang manfaat mikroalga, yang dapat menimbulkan keraguan. Kampanye edukasi yang tepat dan peningkatan kapasitas SDM melalui pelatihan intensif akan memastikan cukupnya tenaga ahli yang mampu merawat sistem secara mandiri.

5. Kesimpulan

Penelitian ini mengungkapkan bahwa integrasi mikroalga pada fasad Gedung Graha Pena Batam memiliki potensi besar sebagai solusi arsitektural yang inovatif dalam upaya mitigasi polusi udara di kawasan urban-industrial beriklim tropis. Temuan menunjukkan bahwa panel bioreaktor mikroalga mampu mereduksi konsentrasi CO₂ dan partikulat halus (PM2.5) sekaligus meningkatkan kualitas udara melalui produksi oksigen, serta memberikan nilai tambah berupa potensi estetika dan edukasi publik. Secara ilmiah, penelitian ini memberikan kontribusi penting sebagai studi komprehensi yang mengevaluasi penerapan *living façade* berbasis mikroalga pada bangunan eksisting di konteks tropis, sehingga memperluas literatur mengenai arsitektur regeneratif dan teknologi fasad berbasis organisme hidup. Namun, penelitian ini memiliki keterbatasan pada absennya pengujian lapangan dan prototipe skala nyata, sehingga performa yang dianalisis masih bersifat simulatif dan teoretis. Untuk itu, penelitian lanjutan direkomendasikan meliputi pengembangan prototipe skala kecil, uji performa empiris pada kondisi iklim tropis, serta eksplorasi integrasi sistem ini ke dalam standar bangunan hijau nasional, seperti *Greenship* by GBCI, guna memperkuat peluang adopsi dan kontribusinya terhadap agenda pembangunan rendah karbon di Indonesia.

Daftar Pustaka

- Agustianto, E., Gunawan, I. G. N. A., & Suwarlan, S. A. (2024). Analisis Efisiensi Bangunan pada Perpustakaan Universitas Internasional Batam dengan Pendekatan Arsitektur Hijau. *Journal of Architectural Design and Development (JAD)*, 5(1), 1–10.
- Aldy Rahmat Febriansyah, Rani Ismiarti Ergantara, & Panisean Nasoetion. (2022). DAYA SERAP CO2 TANAMAN PENGISI RUANG TERBUKA HIJAU PRIVAT RUMAH BESAR PERUMAHAN SPRINGHILL DAN CITRA MAS DI KELURAHAN KEMILING PERMAI . *Jurnal Rekayasa, Teknologi, dan Sains*, 06(1), 20–31.
- Anadolu. (2025, Maret 28). *Bank Dunia: Polusi udara sebabkan 5,7 juta kematian setiap tahun*. antaranews.com.
- Anto Kurniawan. (2025, Februari 21). *Dorong Pembangunan Batam Sebagai Pusat Pertumbuhan Ekonomi dan Muka Indonesia di Selat Malaka*. SindoNews.com.
- Chisti, Y. (2007). Biodiesel from microalgae. *Biotechnology advances*, 25(3), 294–306.
- Dhanya, D. (2025, Maret 11). *BRIN Kembangkan Teknologi Mikroalga untuk Kurangi Emisi Karbon, Begini Cara Kerjanya*. Tempo.co.
- Kennedy, P. S. J., Mangani, K. S., Hutabarat, F. A., Juliana, J., Licyano, N. V. A., Adrian, J., & Abednego, A. H. (2025). Peningkatan Pemahaman mengenai Bioremediasi: Solusi Efektif untuk Pengelolaan Limbah di Bantargebang. *IKRA-ITH ABDIMAS*, 9(2), 140–148.
- Melati, I. (2020). Teknik Bioremediasi: Keuntungan, Keterbatasan dan Prospek Riset. *Prosiding Seminar Nasional Biologi, Teknologi dan Kependidikan*, 8(1).
- Naufalya Nur Azizah, & Dalhar Susanto. (2022). *Fasad Bioreaktor Mikroalga sebagai Alternatif Arsitektur yang Berkelanjutan dan Ramah Lingkungan = Microalgae Bioreactor Facades as an Alternative Sustainable and Environmentally Friendly Architectural: The BIQ House*. Universitas Indonesia.
- Nursyamsu, L., Merzelish, M., & Pinassang, J. L. (2025). INTEGRATING SUSTAINABLE ARCHITECTURE CONCEPTS IN THE DESIGN OF NATURE-BASED ELEMENTARY SCHOOLS. *SIGMA TEKNIKA*, 8(1), 192-201.
- Oktopa, H. J., & Prihatmaji, Y. P. (2020). *RE-DESIGN SHOPHOUSE BUILDING DENGAN PENDEKATAN SISTEM ALGA UNTUK MENGURANGI URBAN CARBON PRINT DI GEYLANG SINGAPURA*.
- Pinassang, J. L., Nursyamsu, L., & Murtiono, H. (2024). KONSEP GREEN SCHOOL DENGAN PENDEKATAN ARSITEKTUR EKOLOGI. *Journal of Architectural Design and Development (JAD)*, 5(2), 136-149.
- Rajagopalan, S., Al-Kindi, S. G., & Brook, R. D. (2018). Air pollution and cardiovascular disease: JACC state-of-the-art review. *Journal of the American College of Cardiology*, 72(17), 2054–2070.
- Ricardo, D., Matondang, A. E., & Fajarwati, G. (2024). Analysis of the Role of the Algae Photosynthesis Facade System in the ITERA Building in Reducing Carbon Emissions. *Jurnal Arsitektur*, 14(1), 17. <https://doi.org/10.36448/ja.v14i1.3413>
- Slegers, P. M., Wijffels, R. H., van Straten, G., & Van Boxtel, A. J. B. (2011). Design scenarios for flat panel photobioreactors. *Applied energy*, 88(10), 3342–3353.
- Suwarlan, S. A., Aswanti, C., Pinassang, J. L., & Prakoso, Y. S. (2022). Analisis Bibliometrik Penerapan Konsep Green Building pada Pelabuhan Internasional Batam. *Journal of Architectural Design and Development (JAD)*, 3(1), 30–37.
- Tasya. (2024, Juni 27). *Peneliti UGM Kembangkan Teknologi Mikroalga untuk Atasi Perubahan Iklim*. ugm.ac.id.
- Wang, B., Lan, C. Q., & Horsman, M. (2012). Closed photobioreactors for production of microalgal biomasses. *Biotechnology advances*, 30(4), 904–912.
- Widyakusuma, A. (2024). Inovasi Arsitektur Dalam Bentuk Fasad Cerdas Bangunan Untuk Mengatasi Polusi Udara Jakarta. *TRAVE*, 28(1), 1–14.
- Zagi, N. Z. (2017). Studi penerapan solarleaf-The bioreactor facade sebagai solusi alternatif arsitektur tanggap iklim dan energi. *Jurnal Lingkungan Binaan Indonesia*, 6(1), 13–17.