

ANALISIS DAMPAK PENGGUNAAN BETON SEBAGAI BAHAN BANGUNAN UTAMA UNTUK MEMITIGASI PEMANASAN GLOBAL MELALUI STRATEGI ARSITEKTUR

Antonius Aaron Inkiriwang¹⁾, Stivani Ayuning Suwarlan²⁾, Lathifa Nursyamsu³⁾

^{1,2,3)} Program Studi Arsitektur, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Internasional
Batam, Jl. Gajah Mada Baloi Sei Ladi, Batam, Indonesia

Corresponding Author: stivani@uib.ac.id

ABSTRAK

Beton merupakan material utama dalam konstruksi modern karena kekuatan struktural, daya tahan tinggi, dan kemudahan produksi. Namun, produksi semen sebagai bahan dasar beton menghasilkan emisi karbon dioksida (CO₂) yang cukup besar, berkontribusi terhadap pemanasan global. Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif melalui studi literatur mendalam dan wawancara dengan pakar arsitektur berkelanjutan untuk mengeksplorasi hubungan antara penggunaan beton dan dampaknya terhadap lingkungan. Fokus utama adalah mengidentifikasi alternatif material dan strategi desain yang lebih ramah lingkungan tanpa mengorbankan kualitas bangunan. Salah satu solusi yang dikaji adalah penggunaan beton geopolimer yang mampu menurunkan emisi karbon secara signifikan. Selain itu, penerapan desain bioklimatik seperti orientasi bangunan, ventilasi alami, pencahayaan pasif, dan integrasi lanskap dapat mengurangi konsumsi energi operasional. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi kedua pendekatan tersebut efektif dalam menekan dampak lingkungan dan mendukung prinsip arsitektur berkelanjutan yang adaptif terhadap kondisi iklim lokal.

Kata kunci : Beton, Urbanisasi, Pemanasan Global, Arsitektur Berkelanjutan, Emisi Karbon.

ABSTRACT

Concrete is a key material in modern construction due to its structural strength, high durability, and ease of production. However, the production of cement, the basic ingredient in concrete, generates significant carbon dioxide (CO₂) emissions, contributing to global warming. This study uses a qualitative approach through in-depth literature review and interviews with sustainable architecture experts to explore the relationship between concrete use and its environmental impacts. The primary focus is to identify alternative materials and design strategies that are more environmentally friendly without compromising building quality. One solution studied is the use of geopolymer concrete, which can significantly reduce carbon emissions. Furthermore, the application of bioclimatic design, such as building orientation, natural ventilation, passive lighting, and landscape integration, can reduce operational energy consumption. The results show that the combination of these two approaches is effective in reducing environmental impacts and supporting the principles of sustainable architecture that adapts to local climate conditions.

Keyword : Concrete, Urbanization, Global Warming, Sustainable Architecture, Carbon Emissions.

1. PENDAHULUAN

Model urbanisasi telah mengalami transformasi mendalam selama beberapa abad terakhir, yang ditandai dengan pergerakan yang nyata menuju daerah perkotaan dengan kepadatan tinggi. Transisi ini telah menyebabkan ketergantungan yang lebih besar pada beton sebagai bahan konstruksi utama. Penggunaan beton di lingkungan perkotaan, yang beralih dari durasinya, keserbagunaannya, dan efektivitas yang dirasakan dalam hal biaya memiliki implikasi yang signifikan terhadap pemanasan global, khususnya melalui kontribusinya terhadap efek *urban heat island* [1]. Urbanisasi yang pesat telah mendorong perkembangan sektor konstruksi di Indonesia saat ini mengalami kemajuan yang signifikan, dimana industri konstruksi meyumbang sebesar 23.2% emisi gas di dunia [2]. Hal ini dapat dilihat dari meningkatnya jumlah proyek pembangunan infrastruktur dan gedung di berbagai wilayah.

Beton muncul sebagai material konstruksi fundamental dalam arsitektur kontemporer dan pembangunan perkotaan, karena keserbagunaannya, daya tahannya, dan efektivitas biayanya. Dikenal karena kemampuannya untuk mendukung berbagai kondisi iklim dan kemampuan adaptasi arsitektur, beton memfasilitasi struktur yang kompleks dan lingkungan perkotaan yang luas. Prevalensinya khususnya terlihat dalam pembangunan gedung pencakar langit, proyek infrastruktur, dan inisiatif urbanisasi yang cepat, menjadikannya material yang sangat diperlukan dalam transformasi lanskap perkotaan yang berkelanjutan. Namun, penggunaan beton secara ekstensif memiliki implikasi yang mendalam terhadap pemanasan global, terutama melalui emisi siklus hidupnya yang timbul dari produksi, transportasi, dan pembongkaran akhirnya.

Dalam proses konstruksi, beton menjadi salah satu material utama yang paling sering digunakan, mengingat karakteristiknya yang unggul. Beton mudah dibentuk dan dicetak sesuai kebutuhan struktur bangunan, memiliki kemampuan menahan beban tekan yang sangat baik, daya tahan yang panjang, mampu bertahan pada suhu tinggi, serta memerlukan biaya perawatan yang rendah. Karena keunggulan tersebut, beton semakin banyak digunakan dalam berbagai proyek konstruksi. Seiring dengan

meningkatnya penggunaan beton, kebutuhan akan semen sebagai bahan dasar pembuatannya pun terus meningkat.

Penggunaan beton sebagai material utama dalam pembangunan kota karena keandalan dan aksesibilitas strukturalnya sejalan dengan produksi semen yang merupakan komponen utama beton yang menghasilkan emisi karbon (CO_2) tinggi, berkontribusi pada pemanasan global. Konsekuensi pemanasan global berdampak pada degradasi lingkungan, perubahan iklim, badai, banjir, kenaikan permukaan laut, perubahan pola hujan, hingga berdampak pada berkurangnya hasil pertanian yang dapat menyebabkan kurangnya produksi pangan [3].

Pembuatan semen, komponen utama beton, sangat intensif dalam sumber daya dan berkontribusi secara signifikan terhadap jejak karbon global. Menurut Badan Energi Internasional (IEA), produksi semen mewakili sekitar 8% dari emisi karbon dioksida global, terutama karena dekomposisi termal batu kapur dan pembakaran bahan bakar fosil selama pembuatan. Selain itu, industri semen sebagai bahan pengikat menghasilkan 1,6 miliar metrik ton karbon dioksida (CO_2) pada tahun 2022 dan menyebabkan penipisan lapisan ozon [4]. Emisi tinggi yang terkait dengan produksi beton diperburuk oleh efek perkotaan dari pulau panas, yang memperburuk suhu lokal di daerah padat penduduk. Efek ini dipicu secara luas oleh penggunaan beton dan permukaan buatan lainnya yang menyerap dan mengolah kembali panas, yang membuat suhu atmosfer lebih tinggi.

Indonesia sendiri telah menegaskan pentingnya dalam pelaksanaan AMDAL dan pekerjaan proyek wajib meminimalkan dampak buruk terhadap lingkungan hidup, seperti yang tertuang pada UU No. 32 tahun 2009 tentang Lingkungan Hidup [5]. Meskipun regulasi lingkungan di Indonesia sudah menekankan pentingnya Analisis Mengenai Dampak Lingkungan (AMDAL), hingga saat ini belum tersedia standar nasional yang secara khusus mengatur batasan emisi karbon pada sektor konstruksi, dimana industri konstruksi merupakan industri utama yang menunjang kemakmuran manusia dan pertumbuhan ekonomi kota sehingga keberadaannya tidak dapat dihentikan dan harus dilanjutkan. Hal ini menciptakan kesenjangan kebijakan dalam upaya mitigasi perubahan iklim.

Selain itu, meskipun penelitian akademis mengenai material alternatif seperti beton geopolimer telah berkembang, penerapannya di proyek nyata masih sangat terbatas. Kesenjangan antara inovasi material dan implementasi praktis ini memperlihatkan perlunya kajian lebih lanjut mengenai strategi arsitektur berkelanjutan yang mampu menjembatani praktik konstruksi konvensional dengan kebutuhan pengurangan emisi karbon.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pemanasan Global dan Kontribusi Beton

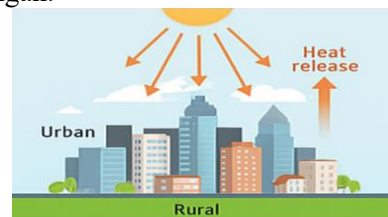
Industri konstruksi global merupakan kontributor utama perubahan iklim, dengan produksi dan penggunaan beton menjadi sumber emisi gas rumah kaca yang signifikan [6]. Seiring dengan terus berlanjutnya urbanisasi dunia, permintaan beton sebagai bahan bangunan diperkirakan akan meningkat, sehingga menimbulkan tantangan signifikan dalam mengurangi dampak lingkungan dari sektor konstruksi.

Beton, salah satu bahan buatan manusia yang paling banyak digunakan, sangat penting bagi urbanisasi populasi global yang sedang berlangsung. Beton merupakan material komposit yang terbuat dari semen, agregat, dan air. Produksi hidrasi semen melibatkan pembakaran batu kapur, yang melepaskan sejumlah besar karbon dioksida (CO_2). Semen memegang peranan krusial dalam campuran beton, berfungsi sebagai perekat yang menyatukan agregat kasar (kerikil/split) dan agregat halus (pasir). Namun, proses produksinya menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan, seperti emisi gas dan partikel debu yang mencemari udara. Selain itu, sebagian besar produksi semen masih mengandalkan bahan bakar fosil yang berkontribusi terhadap pelepasan gas rumah kaca, salah satu pemicu utama pemanasan global.

Secara kuantitatif, beton Portland menghasilkan emisi CO_2 sekitar 0,9 ton per ton semen yang digunakan, sedangkan beton geopolimer mampu menurunkan emisi hingga 40–80% dibandingkan beton konvensional karena memanfaatkan material limbah seperti *fly ash*. Pada skala global, beton menyumbang sekitar 8% dari total emisi CO_2 dunia, sementara di Indonesia

kontribusi industri semen dan beton diperkirakan mencapai 7–8% dari total emisi nasional [7], menjadikan hal ini faktor penting dalam diskusi perubahan iklim. Selain itu, data ini menunjukkan potensi signifikan penggunaan beton geopolimer sebagai solusi untuk mengurangi jejak karbon pada pembangunan infrastruktur dan gedung di Indonesia.

Komposisi utama dalam semen meliputi senyawa yang mengandung kapur, silika, dan oksida besi, yang menjadi elemen penting dalam menjaga karakteristiknya. Secara umum, kandungan kimia semen terdiri atas CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , dan Fe_2O_3 sebagai oksida dominan. Selain itu, produksi semen melibatkan konsumsi bahan bakar, kalsinasi, dan proses lain yang berkontribusi terhadap pelepasan limbah berbahaya bagi lingkungan [8]. Ketergantungan pada bahan bakar fosil, pemanas fosil, dikombinasikan dengan emisi transformasi kimia batu kapur, memiliki tantangan ganda bagi lingkungan.



Gambar 1. Ilustrasi pemanasan global di perkotaan

2.2 Prinsip Arsitektur Berkelanjutan

Arsitektur berkelanjutan merupakan pendekatan penting dalam konstruksi modern, yang bertujuan untuk meminimalkan dampak lingkungan dari bangunan melalui strategi yang beragam. Inti dari pendekatan ini adalah prinsip desain pasif, yang berfokus pada pemanfaatan sumber daya alam untuk mengurangi kebutuhan energi suatu bangunan [9]. Selain itu, penggunaan alternatif beton yang ramah lingkungan telah muncul sebagai solusi yang menjanjikan untuk mengatasi masalah emisi gas rumah kaca yang terkait dengan produksi beton tradisional [10-12].

Pendekatan desain pasif dalam arsitektur berkelanjutan memprioritaskan penempatan dan orientasi bangunan yang strategis untuk memanfaatkan pemanasan, pendinginan, dan pencahayaan alami. Pendekatan ini bertujuan untuk meminimalkan ketergantungan pada sistem mekanis, sehingga mengurangi konsumsi energi dan jejak karbon keseluruhan dari bangunan.

Teknik desain pasif dapat mencakup penempatan jendela yang strategis, penggabungan material massa termal, dan pemanfaatan ventilasi alami dan cahaya alami [9].

Pada saat yang sama, penggunaan alternatif beton yang ramah lingkungan telah memperoleh perhatian yang signifikan sebagai cara untuk mengatasi tantangan lingkungan yang ditimbulkan oleh produksi beton tradisional. Pembuatan beton konvensional merupakan penyumbang emisi gas rumah kaca yang signifikan, terutama karena proses yang membutuhkan banyak energi dan penggunaan bahan baku yang membutuhkan banyak karbon. Dengan mengganti beberapa bahan baku konvensional dengan alternatif yang lebih ramah lingkungan, seperti produk sampingan industri atau bahan daur ulang, jejak karbon beton dapat dikurangi secara signifikan. Bahan-bahan alternatif ini juga dapat meningkatkan kinerja beton, sehingga menghasilkan struktur yang lebih tahan lama dan awet [10-11]. Beton ramah lingkungan hadir sebagai solusi atas permasalahan emisi gas. Dengan mengganti sebagian bahan baku konvensional dengan material alternatif yang lebih ramah lingkungan, dapat mengurangi jejak karbon dan meminimalkan dampak negatif terhadap lingkungan. Penggunaan bahan baku alternatif dan teknologi produksi yang lebih efisien membantu mengurangi emisi karbon secara signifikan. Selain itu, beton ramah lingkungan dapat menyerap polutan udara, sehingga membantu meningkatkan kualitas udara di perkotaan.

2.3 Arsitektur Bioklimatik

Arsitektur bioklimatik bertujuan untuk menyelaraskan lingkungan yang dibangun dengan kondisi iklim alami, secara signifikan mengurangi jejak ekologis yang terkait dengan metode konstruksi tradisional, khususnya yang sangat bergantung pada beton. Tantangan luar biasa dalam urbanisasi adalah kontribusi substansial produksi dan penggunaan beton terhadap emisi CO₂ global. Arsitektur bioklimatik adalah konsep desain yang menekankan keselarasan antara bentuk bangunan dengan kondisi iklim di sekitarnya [13]. Prinsip utama dalam arsitektur bioklimatik meliputi efisiensi energi, respons terhadap kondisi iklim, dan kepedulian terhadap kelestarian lingkungan. Dalam penerapannya,

desain bioklimatik memperhatikan lima aspek penting, yaitu orientasi bangunan yang optimal, penciptaan ruang transisi, desain dinding yang responsif, integrasi dengan lanskap, serta penggunaan elemen peneduh pasif [14].

Konsep ini berperan penting dalam mengatasi penurunan kualitas lingkungan dan perubahan iklim global dengan mengedepankan prinsip bangunan berkelanjutan. Prinsip arsitektur bioklimatik bertujuan mengurangi konsumsi energi, menjaga kualitas lingkungan, dan menghindari eksploitasi sumber daya alam yang berlebihan [15]. Fokus utama penerapan konsep ini adalah memanfaatkan potensi iklim setempat secara maksimal, seperti pencahayaan alami dan kenyamanan termal, sehingga dapat mengurangi ketergantungan pada energi listrik. Hal ini dicapai melalui pendekatan desain yang memperhatikan bentuk bangunan serta pemilihan material yang mampu merespons kondisi iklim dengan baik, sehingga tercipta lingkungan yang sehat, nyaman, dan hemat energi [16].

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif dengan metode deskriptif-analitis yang bertujuan untuk menganalisis dampak penggunaan beton dalam urbanisasi terhadap pemanasan global dan mengeksplorasi solusi arsitektural yang dapat diterapkan untuk mengurangi dampak tersebut. Pendekatan yang digunakan adalah kualitatif dengan metode deskriptif yang berfokus pada analisis mendalam terhadap fenomena penggunaan beton secara masif dalam urbanisasi dan kontribusinya terhadap emisi karbon dioksida (CO₂). Penelitian ini berusaha memahami hubungan antara material bangunan, desain arsitektur, dan dampak lingkungan secara holistik [17].

Data yang dikumpulkan dalam penelitian ini terdiri dari: 1) Studi literatur, diperoleh melalui kajian pustaka dari jurnal ilmiah, buku referensi, artikel penelitian, dan laporan industri terkait beton, emisi karbon, dan konsep arsitektur berkelanjutan. Literatur yang dipilih berfokus pada penggunaan beton geopolimer, desain bioklimatik, dan arsitektur berkelanjutan, 2) Wawancara ahli, dilakukan wawancara semi-terstruktur dengan dua pakar arsitektur berkelanjutan yaitu praktisi arsitek urban tropis dan akademisi dengan spesialisasi teknologi beton

ramah lingkungan untuk memperoleh pandangan mendalam mengenai implementasi material alternatif seperti beton geopolimer dan strategi desain ramah lingkungan dalam konteks pembangunan perkotaan.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Peningkatan kesadaran akan perlunya strategi arsitektur yang mengurangi konsekuensi lingkungan yang merugikan yang terkait dengan penggunaan beton sangat penting. Prinsip desain berkelanjutan perlu untuk semakin terintegrasi dengan praktik perencanaan dan arsitektur perkotaan, yang menganjurkan penggunaan material alternatif, formulasi beton inovatif, dan teknik konstruksi yang lebih baik. Misalnya, penggabungan bahan semen tambahan (SCMS), seperti abu terbang atau terak, dapat secara signifikan mengurangi intensitas karbon beton. Selain itu, pengembangan beton geopolimer menawarkan alternatif yang lebih ekonomis, dengan menggunakan produk sampingan industri untuk menggantikan semen tradisional Portland, sehingga mengurangi emisi karbon secara umum.

Selain modifikasi material, strategi desain arsitektur yang difokuskan pada peningkatan kinerja termal struktur beton dapat meminimalkan kebutuhan energi. Penerapan arsitektur bioklimatik melalui teknik desain pasif, seperti memaksimalkan ventilasi alami dan penggunaan atap atau dinding hijau, berkontribusi untuk mengurangi ketergantungan pada sistem pemanas dan pendinginan mekanis. Selain itu, peningkatan perhatian terhadap ruang hijau perkotaan dapat meningkatkan efek urban heat island, menyediakan keanekaragaman hayati yang penting, dan mendorong ketahanan iklim di lingkungan perkotaan.

Singkatnya, meskipun beton tetap menjadi komponen utama dari perusahaan perkotaan dan arsitektur, karakteristik inherennya merupakan tantangan signifikan terhadap keberlanjutan lingkungan dan pemanasan global. Mengkaji bahan-bahan inovatif dan strategi desain untuk mengatasi dampak-dampak ini sangat penting bagi pembangunan perkotaan di masa depan, yang memungkinkan kota-kota untuk mengisi kesenjangan antara ambisi arsitektur dan tanggung jawab ekologis.

Mitigasi dampak lingkungan dari ketergantungan beton tidak hanya pada pengembangan metode baru produksi berkelanjutan, tetapi juga pada perubahan strategi arsitektur yang memprioritaskan sumber daya tambahan, seperti pengurangan penggunaan material dan daur ulang. Material alternatif, seperti agregat daur ulang, sedang dieksplorasi untuk meminimalkan ketergantungan semen tradisional dan mengurangi emisi karbon yang dihasilkan [18]. Selain itu, penggabungan prinsip desain yang memaksimalkan sifat termal alami beton dapat menghasilkan pengurangan konsumsi energi untuk pemanasan dan pendinginan bangunan, sehingga mengurangi emisi gas rumah kaca yang dikaitkan dengan pembangunan perkotaan.

Pendekatan penting lainnya adalah penggantian bahan pelengkap semen (SCMS) dengan sebagian semen portland. Bahan-bahan seperti abu terbang (*fly ash*), sampah, dan asap silika dapat meningkatkan sifat beton sekaligus mengurangi jejak karbonnya. Penggunaan abu terbang, produk sampingan dari pembakaran batu bara di pembangkit listrik, sangat penting karena dapat menggantikan hingga 30-40% semen beton, secara efektif mengurangi emisi gas rumah kaca selama produksi dan meningkatkan daya tahan jangka panjang struktur [19]. Reaktivitas SCMS memungkinkan pembentukan senyawa pozolik, yang berkontribusi pada pengembangan gaya beton dan dapat meningkatkan kemampuan kerja dan ketahanan terhadap efek lingkungan yang berbahaya [20].

4.1 Strategi Material: Beton Geopolimer

Beton geopolimer diperkenalkan sebagai alternatif beton yang lebih ramah lingkungan dengan tujuan mengurangi emisi CO₂. Beton ini termasuk dalam kategori beton geosintetik yang menggunakan mekanisme pengikatan melalui reaksi polimerisasi, berbeda dengan beton konvensional yang mengandalkan reaksi hidrasi. Pasta geopolimer terbentuk dari material pozolan, baik alami maupun buatan, yang dikombinasikan dengan sebagian semen Portland (PC). Pozolan kaya akan kandungan silika dan alumina yang berfungsi sebagai pengikat (*binder*). Beberapa contoh material pozolan meliputi *fly ash*, metakaolin, dan abu sekam yang merupakan material vulkanik.

Proses pembentukan beton geopolimer melibatkan reaksi polimerisasi bahan dengan kadar pozolan tinggi yang dikombinasikan dengan alkali aktivator (*polysilicate*) sehingga menghasilkan ikatan polimer Si-O-Al. Ikatan ini membentuk struktur padat yang bersifat amorf hingga semi-kristal. Penambahan pozolan alami dalam campuran semen Portland atau beton terbukti dapat meningkatkan performa material tersebut. Beton geopolimer muncul sebagai solusi alternatif pengganti beton konvensional karena penggunaan semen yang minimal sebagai bahan pengikat serta kemampuannya dalam menyerap air lebih cepat, menjadikannya lebih ramah lingkungan.



Gambar 2. Beton geopolimer

Formulasi beton baru telah dikembangkan yang menggabungkan bahan limbah, seperti plastik atau kaca daur ulang, yang berfungsi sebagai agregat unik dan peningkat kinerja. Bahan-bahan alternatif ini mengurangi dampak lingkungan dengan mengalihkan limbah dari tempat pembuangan sampah, sehingga meminimalkan jejak ekologis dari siklus hidup bahan umum. Selain itu, melalui rekayasa yang cermat, integrasi pengikat karbon rendah, seperti beton geopolimer yang terbuat dari bahan aluminosilikat, menghadirkan alternatif yang layak untuk semen konvensional, menghasilkan emisi langsung yang minimal dan menunjukkan jejak karbon yang jauh lebih rendah [21].

4.2 Strategi Arsitektur: Bioklimatik

Strategi arsitektur melampaui pemilihan material untuk mencakup pendekatan desain yang memaksimalkan efisiensi termal struktur beton, termasuk mengoptimalkan orientasi bangunan dan penggunaan prinsip desain surya pasif untuk mengurangi permintaan sistem pemanas dan pendingin yang boros energi [22]. Penggabungan langit-langit hijau dan taman vertikal dapat lebih mengurangi efek urban heat island sekaligus

berkontribusi pada kinerja termal yang lebih baik, sehingga meminimalkan konsumsi energi di lingkungan perkotaan. Strategi arsitektur yang memprioritaskan prinsip-prinsip bioklimatik berfungsi sebagai jalan yang layak sehingga pembangunan perkotaan mengurangi ketergantungannya pada beton, berkontribusi langsung pada mitigasi perubahan iklim [23].

Arsitektur bioklimatik menggabungkan beberapa strategi desain utama yang memanfaatkan sumber daya alam yang tersedia untuk meminimalkan konsumsi energi dan dampak lingkungan. Strategi-strategi ini meliputi: 1) Pengoptimalan orientasi lokasi, 2) Memaksimalkan cahaya alami, 3) Penggunaan teknik pasif pemanasan dan pendinginan surya, dan 4) Penggabungan vegetasi ke dalam selubung bangunan. Misalnya, orientasi bangunan dapat secara signifikan memengaruhi kinerja energinya. Bangunan dengan orientasi yang tepat memanfaatkan pencahayaan di siang hari, sehingga mengurangi ketergantungan pada pencahayaan buatan, sekaligus mengoptimalkan perolehan sinar matahari. Strategi desain ini secara langsung mengurangi kebutuhan akan sistem kontrol iklim yang boros energi, yang berkontribusi secara tidak proporsional terhadap emisi gas rumah kaca [24] yang terkait dengan kehidupan perkotaan.

Integrasi atap hijau [25], taman vertikal, dan bentuk vegetasi lain dalam arsitektur perkotaan memainkan peran penting dalam mengurangi dampak urban heat island. Saat menggunakan strategi bioklimatik ini, bangunan tidak hanya menyediakan insulasi tetapi juga berkontribusi untuk meningkatkan kualitas udara, meningkatkan keanekaragaman hayati, dan meningkatkan kemampuan pengelolaan air hujan [23]. Masing-masing manfaat ini sangat penting di daerah perkotaan yang padat penduduk, di mana desain tradisional yang berfokus pada beton sering kali memperburuk degradasi lingkungan.



Gambar 3. Atap Hijau karya Guz Architects

Selain itu, penggunaan material alternatif, seperti blok tanah padat, kayu, bambu, dan material daur ulang, dapat dieksplorasi dalam kerangka bioklimatik untuk lebih mengurangi dampak lingkungan yang melekat pada produksi beton. Dengan kemajuan teknologi dan ilmu material, transisi ke material yang lebih berkelanjutan ini menjadi layak. Sumber daya ini tidak hanya mengurangi jejak karbon struktural, tetapi juga meningkatkan ketahanan ekosistem perkotaan [26].

Strategi arsitektur juga harus memprioritaskan penggabungan teknologi konstruksi hijau. Integrasi struktur hidup, seperti atap dan dinding hijau, menggunakan sifat-sifat yang melekat pada beton untuk meningkatkan efisiensi energi bangunan, serta meningkatkan keanekaragaman hayati perkotaan. Dengan menerapkan strategi ini, kemungkinan dampak urban heat island dari beton perkotaan dapat dikurangi, yang selanjutnya mendukung langkah-langkah adaptasi iklim dan memberikan kontribusi positif bagi ekosistem perkotaan.

Penelitian ini menemukan bahwa penggunaan beton konvensional dalam urbanisasi berdampak signifikan terhadap peningkatan emisi karbon. Alternatif yang diusulkan meliputi penggunaan beton geopolimer, beton daur ulang, serta penerapan arsitektur bioklimatik dan desain pasif untuk mengurangi ketergantungan pada beton konvensional.

4.3 Konsep Desain Arsitektur: *Three Layer Sustainable Concrete Design*

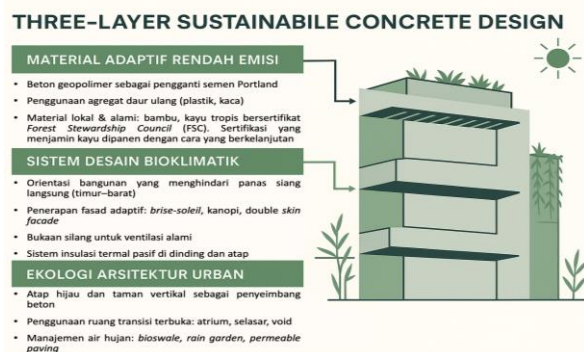
Hasil konsep desain ini didapatkan dari analisis studi literatur dan masukan dari hasil wawancara pakar arsitektur. Studi literatur menggarisbawahi prinsip teknis dan ilmiah dan wawancara pakar memperkuat dimensi implementasi dan konteks lokal. Berikut adalah tabel komparatif hasil studi literatur dan hasil wawancara yang mendasari konsep *three layer sustainable concrete design*.

Tabel 4.1. Komparasi hasil studi literatur dan hasil wawancara pakar

No	Aspek	Hasil Studi Literatur	Hasil Wawancara Pakar
1	Material Adaptif	Beton geopolimer menghasilkan emisi	Geopolimer menjanjikan dari segi

Rendah Emisi	CO ₂ jauh lebih rendah dari semen Portland [21][26] <i>Fly ash</i> , kaca daur ulang efektif sebagai material substitusi [18-19]	kekuatan dan efisiensi karbon, namun perlu uji teknis dan regulasi yang jelas untuk penerapannya luas
2 Sistem Desain Bioklimatik	Orientasi bangunan, ventilasi silang, insulasi termal, dan pencahayaan alami meningkatkan efisiensi energi hingga 30% [9][24]	Desain tropis perlu disesuaikan dengan budaya lokal: selasar, ruang terbuka, dan void juga berfungsi sebagai ruang sosial selain termal buffer
3 Ekologi Arsitektur Urban	Atap hijau, taman vertikal, dan permeable paving mengurangi efek urban heat island dan meningkatkan infiltrasi air [25]	Elemen hijau tidak cukup sebagai “hiasan”, harus menjadi bagian sistemik bangunan: pengelolaan air hujan, kelembapan udara, dan ekosistem mikro
4 Strategi Implementasi	Modularitas dan prefabrikasi mempercepat waktu bangun dan mengurangi limbah serta karbon embodied [10]	Diperlukan insentif kebijakan, edukasi teknis ke kontraktor, dan perubahan mindset untuk adopsi teknologi dan strategi hijau.
5 Validasi Kinerja Desain	Disarankan menggunakan simulasi energi (<i>Energy Plus</i> , <i>Design Builder</i>) dan LCA (<i>Life Cycle Assessment</i>) untuk validasi desain [22]	Simulasi digital penting untuk membuktikan manfaat termal, tapi perlu dikombinasikan dengan evaluasi pengalaman pengguna langsung

Dari studi literatur dan wawancara pakar, ditemukan bahwa konsep *three layer sustainable concrete design* lahir dari keterpaduan pendekatan teknis-material, strategi spasial iklim tropis, serta kesadaran ekologi urban yang tinggi. Ketiganya membentuk sistem desain yang tidak hanya efisien secara energi, tetapi juga adaptif secara lingkungan dan sosial.



Gambar 4. Konsep *three layer sustainable concrete design*

Konsep *Three Layer Sustainable Concrete Design* merupakan pendekatan komprehensif dalam mendesain bangunan perkotaan yang tangguh terhadap perubahan iklim dengan menyeimbangkan kebutuhan struktural, efisiensi energi, dan kontribusi ekologis. Tiga lapisan dalam pendekatan ini terdiri dari material, sistem desain bioklimatik, dan strategi ekologi arsitektur urban.

1. Material Adaptif Rendah Emisi

Lapisan pertama menekankan pentingnya pemilihan material konstruksi yang berkontribusi langsung terhadap pengurangan emisi karbon. Beton geopolimer menjadi substitusi strategis terhadap semen Portland konvensional karena sifatnya yang menghasilkan emisi karbon jauh lebih rendah melalui mekanisme polimerisasi daripada hidrasi. Selain itu, penggunaan agregat daur ulang seperti plastik dan kaca, serta adopsi modularitas dan sistem pracetak, memungkinkan efisiensi material, pengurangan limbah konstruksi, serta penurunan energi embodied dalam bangunan.

2. Sistem Desain Bioklimatik

Lapisan kedua mengarahkan strategi desain pada pemanfaatan kondisi iklim lokal untuk meningkatkan kenyamanan termal dan efisiensi energi bangunan. Orientasi bangunan yang tepat, penggunaan pelindung matahari (kanopi, kisi-kisi), ventilasi silang, serta insulasi termal pasif menjadi elemen inti dalam mengurangi kebutuhan energi aktif seperti pendingin udara. Konsep desain pasif ini telah terbukti menurunkan konsumsi energi hingga 30% pada bangunan tropis, sekaligus meningkatkan performa lingkungan mikro di kawasan padat perkotaan.

3. Ekologi Arsitektur Urban

Lapisan terakhir menyatukan elemen arsitektur dengan strategi ekologi perkotaan melalui pengintegrasian vegetasi dan manajemen air. Atap hijau dan taman vertikal tidak hanya berfungsi sebagai penyerap panas dan filter udara, tetapi juga meningkatkan keanekaragaman hayati di wilayah terurbanisasi. Penerapan ruang transisi terbuka seperti atrium, selasar, dan void memperkuat sirkulasi udara dan pencahayaan alami. Di sisi lain, sistem drainase berkelanjutan seperti *bioswale* dan *permeable paving* memfasilitasi kontrol limpasan air hujan, mencegah banjir, dan mendukung infiltrasi alami.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Pengurangan penggunaan beton konvensional dengan bahan ramah lingkungan dan penerapan desain arsitektural berkelanjutan terbukti dapat mengurangi emisi karbon dalam proses urbanisasi. Rekomendasi meliputi:

1. Menggunakan beton ramah lingkungan seperti beton geopolimer,
2. Mengurangi ketergantungan pada beton dengan material alternatif dan formulasi beton yang menggabungkan bahan limbah, seperti plastik atau kaca daur ulang sebagai agregat,
3. Mengimplementasikan desain arsitektur bioklimatik yang memaksimalkan ventilasi alami, vegetasi, dan penggunaan material lokal.

Pendekatan ini dapat membantu menyeimbangkan pembangunan perkotaan dengan keberlanjutan lingkungan dan berkontribusi pada upaya global untuk memerangi perubahan iklim. Penelitian ini diharapkan dapat berkontribusi pada pengembangan praktik arsitektur yang lebih ramah lingkungan dalam mendukung pembangunan berkelanjutan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada seluruh pihak yang terlibat dan mendukung dalam penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Mustafa, "Peran Desain Permukiman Dalam Membangun Ketahanan Terhadap Perubahan Iklim," *J. Cahaya Mandalika*, vol. 5, no. 2, pp. 587–600, 2024.
- [2] International Energy Agency, *Evaluation of Embodied Energy and CO₂eq for Building Construction (Annex 57): Overview of Annex 57 Results*. Tokyo: Institute for Building Environment and Energy Conservation, 2016.
- [3] Intergovernmental Panel on Climate Change, *Climate Change 2018: Global Warming of 1.5°C*. Cambridge: Cambridge University Press, 2018.
- [4] K. N. Shivaprasad, H.-M. Yang, and J. K. Singh, "A path to carbon neutrality in construction: An overview of recent progress in recycled cement usage," *J. CO₂ Util.*, vol. 83, 2024. doi: 10.1016/j.jcou.2024.102816.
- [5] Pemerintah Indonesia, *Undang-Undang No. 32 Tahun 2009 Tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup*. Jakarta: Pemerintah Indonesia, 2009.
- [6] G. Habert, S. A. Miller, V. M. John *et al.*, "Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries," *Nat. Rev. Earth Environ.*, vol. 1, pp. 559–573, 2020. doi: 10.1038/s43017-020-0093-3.
- [7] O. E. Ige, D. V. Von Kallon, and D. Desai, "Carbon emissions mitigation methods for cement industry using a systems dynamics model," *Clean Techn. Environ. Policy*, vol. 26, pp. 579–597, 2024. doi: 10.1007/s10098-023-02683-0.
- [8] H. Lee, A. Hanif, M. Usman, J. Sim, and H. Oh, "Performance evaluation of concrete incorporating glass powder and glass sludge wastes as supplementary cementing material," *J. Cleaner Prod.*, vol. 170, pp. 683–693, 2018. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.09.133.
- [9] Ramdhani and Sugini, "Sustainable Architectural Investigations on Bugis Vernacular House: Case Study of Tenun Tourism Village, Samarinda Seberang, East Kalimantan, Indonesia," *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, vol. 933, 2021. doi: 10.1088/1755-1315/933/1/012020.
- [10] T. Naik, "Sustainability of Concrete Construction," *Practice Period. Struct. Des. Constr.*, vol. 13, no. 2, 2008. doi: 10.1061/(ASCE)1084-0680(2008)13:2(98).
- [11] H. S. Müller, R. Breiner, J. S. Moffatt, and M. Haist, "Design and Properties of Sustainable Concrete," *Procedia Eng.*, vol. 95, pp. 290–304, 2014. doi: 10.1016/j.proeng.2014.12.189.
- [12] V. S. Reddy, "Sustainable Construction: Analysis of Its Costs and Financial Benefits," *Int. J. Innov. Res. Eng. Manage. (IJIREM)*, vol. 3, no. 6, 2016. doi: 10.21276/ijirem.2016.3.6.12.
- [13] N. Tan, S. A. Suwarlan, and C. D. Aguspriyanti, "Peningkatan Kenyamanan Termal Sekolah di Iklim Tropis Pesisir Melalui Konsep Bioclimatic Architecture," *J. Archit. Des. Dev.*, vol. 4, no. 2, pp. 146–156, 2023.
- [14] Fahri and Satwikasari, "Kajian Konsep Arsitektur Bioklimatik pada Bangunan Punggol Waterway Terrace, Singapura," *Agora J. Penelit. dan Karya Ilm. Arsit. Usakti*, vol. 20, no. 2, pp. 258–272, 2022. doi: 10.25105/agora.v20i2.13681.
- [15] I. A. G. Tumimomor and H. Poli, "Arsitektur Bioklimatik," *Media Matrasain*, vol. 8, no. 1, 2011.
- [16] S. S. Mulyadi, *Resort di Pantai Srandakan, Bantul Penerapan Konsep Desain Arsitektur Bioklimatik*, 2017.
- [17] Mukhtar, *Metode Penelitian Deskriptif Kualitatif*. Jakarta: GP Press Group, 2013.
- [18] S. Althoey *et al.*, "Advancements in low-carbon concrete as a construction material for the sustainable built environment," *Develop. Built Environ.*, vol. 16, 2023. doi: 10.1016/j.dibe.2023.100284.
- [19] D. K. Nayak, P. P. Abhilash, R. Singh, R. Kumar, and V. Kumar, "Fly ash for sustainable construction: A review of fly ash concrete and its beneficial use case studies," *Cleaner Mater.*, vol. 6, 2022. doi: 10.1016/j.clema.2022.100143.
- [20] Z. F. Akbulut, D. Yavuz, T. A. Tawfik, P. Smarzewski, and S. Guler, "Enhancing Concrete Performance through Sustainable Utilization of Class-C and Class-F Fly Ash: A Comprehensive Review," *Sustainability*, vol. 16, no. 12, 2024. doi:

- 10.3390/su16124905.
- [21] D. Davidovits, “Geopolymer Cement: A Review,” *Geopolymer Sci. Technics*, Tech. Paper #21, 2013. [Online]. Available: www.geopolymer.org
 - [22] Y. Chen *et al.*, “Co-optimization of passive building and active solar heating system based on the objective of minimum carbon emissions,” *Energy*, vol. 275, 2023. doi: 10.1016/j.energy.2023.127401.
 - [23] Z. A. Ali, “Evaluasi Penerapan 8 Atribut Kota Hijau Pada Ruang Umum Studi Kasus Islamic Center Kabupaten Tulang Bawang Barat,” *J. Profesi Insinyur Univ. Lampung*, vol. 3, no. 2, pp. 55–62, 2022.
 - [24] S. Franciska, I. G. N. A. Gunawan, and S. A. Suwarlan, “Analisis Efisiensi Energi Gedung Gereja House Of Glory Berdasarkan Penerapan Arsitektur Hijau,” *J. Archit. Des. Dev.*, vol. 5, no. 2, pp. 219–230, 2024.
 - [25] Y. S. Kawuwung, S. Savitrinishintianatali, and Purwanto, “Struktur Atap Green Dengan Teknologi Ramah Lingkungan,” *KOLABORASI J. Arsit.*, vol. 3, no. 1, 2023. doi: 10.54325/kolaborasi.v3i1.35.
 - [26] C. Popescu, M. Dissanayake, and Stancu, “Eco Breakthroughs: Sustainable Materials Transforming the Future of Our Planet,” *Sustainability*, vol. 16, no. 10790, 2024. doi: 10.3390/su162310790.
 - [27] D. Hardjito, *Beton Geopolimer Berbahan Dasar Abu Terbang*. Surabaya: Petra Press, 2017.