

STUDI LITERATUR POTENSI PENERAPAN INTELLIGENT BUILDING - CLIMATE ADAPTIVE BUILDING SHELL (CABS) PADA IKLIM TROPIS INDONESIA

The Potential Application of Intelligent Building – Climate Adaptive Building Shell (CABS) in Indonesia's Tropical Climate

Aldhi Nugraha Anantama¹

¹ Universitas Mataram, Jl. Majapahit No.62, Kota Mataram, Nusa Tenggara Barat, Indonesia

anantama@unram.ac.id

Abstract

The increasing energy consumption of buildings in tropical regions highlights the need for adaptive and climate-responsive building envelope strategies. Climate Adaptive Building Shells (CABS) have emerged as a promising approach to improving energy efficiency and indoor comfort in tropical contexts such as Indonesia. This study aims to review and synthesize existing research on CABS in Indonesia based on previous studies. The research employed a literature review of ten selected articles through a systematic process of identification, screening, and content analysis. The selected articles were subsequently coded based on the study location, building typology, physical domain, adaptation scale, research method, key findings, and research limitations before being synthesized to map the development of Climate Adaptive Building Shell (CABS) research in Indonesia. The results indicate that CABS research in Indonesia is predominantly simulation-based, with a strong emphasis on thermal and optical performance, while field validation and multi-domain integration remain limited. Despite these constraints, the reviewed studies consistently demonstrate the potential of adaptive façades to reduce cooling loads and enhance indoor environmental quality. This study highlights the need for more integrated, multi-domain, and experimentally validated research to support the practical implementation of CABS in tropical buildings.

Keywords: *climate adaptive building shells, adaptive façade, smart building, energy efficiency*

Abstrak

Peningkatan konsumsi energi bangunan di wilayah tropis mendorong perlunya strategi selubung bangunan yang adaptif dan responsif terhadap iklim. Climate Adaptive Building Shells (CABS) dipandang sebagai pendekatan potensial untuk meningkatkan efisiensi energi dan kenyamanan bangunan di Indonesia. Penelitian ini bertujuan mengkaji dan mensintesis perkembangan riset CABS di Indonesia berdasarkan studi-studi terdahulu. Metode penelitian menggunakan studi literatur terhadap sepuluh artikel yang dipilih melalui proses identifikasi, seleksi, dan analisis konten. Artikel terpilih dikodekan berdasarkan lokasi penelitian, tipologi bangunan, domain fisik, skala adaptasi, metode penelitian, serta temuan dan keterbatasan utama sebelum disintesis untuk memetakan perkembangan penelitian *Climate Adaptive Building Shell* (CABS) di Indonesia. Hasil kajian menunjukkan bahwa penelitian CABS di Indonesia didominasi oleh simulasi komputasional dengan fokus pada domain termal dan optikal, serta masih terbatas pada pendekatan single-domain dan minim verifikasi lapangan. Meskipun demikian, seluruh studi menunjukkan potensi signifikan fasad adaptif dalam menurunkan beban energi dan meningkatkan kenyamanan. Studi ini menegaskan perlunya penelitian CABS yang lebih integratif, multi-domain, dan berbasis uji lapangan untuk mendukung implementasi nyata pada bangunan tropis Indonesia.

Kata kunci: *Climate adaptive building shell, selubung adaptif, smart building, efisiensi energi*

Pendahuluan

Pertumbuhan konsumsi energi bangunan yang terus meningkat mendorong penerapan konsep fasad adaptif (Climate Adaptive Building Shell/CABS) sebagai solusi efisiensi energi (Loonen et al., 2013). Kajian terkini menegaskan bahwa fasad adaptif yang dioptimalkan dapat meningkatkan kinerja pencahayaan alami, kenyamanan termal, dan pemanfaatan energi surya, sehingga secara keseluruhan mengurangi konsumsi energi bangunan (Ricci et al., 2021). Sebagai contoh, Anantama dan Hariyadi (2021) menunjukkan melalui simulasi parametrik bahwa fasad adaptif mekanisme Helicone 30° lebih efektif dibanding fasad statis, dengan pengurangan 21% pada OTTV, 33% pada kebutuhan illuminance, dan 14% pada silau. Ini menggarisbawahi pentingnya penggunaan metode pemodelan canggih untuk menganalisis performa CABS di iklim tropis. Kajian selubung bangunan tropis terbaru (Gupta & Deb 2023) menekankan kombinasi variabel fasad seperti insulasi, properti kaca, rasio jendela-dinding (WWR), dan sistem shading optimal yang dapat menghemat energi hingga ≈35%. Selaras dengan temuan tersebut, penelitian Chen dan Tang (2024) memperkenalkan kerangka kerja desain fasad adaptif berbasis klasterisasi K-means dan optimasi multi-objektif untuk memaksimalkan performa bangunan. Pendekatan tersebut membuktikan peningkatan kinerja pencahayaan (daylight), kualitas pemandangan dalam ruangan, dan pemanfaatan energi surya dibanding fasad konvensional. Dengan memperkuat literatur metode mutakhir ini, Pendahuluan menegaskan relevansi studi saat ini yang memanfaatkan simulasi parametrik dan algoritma optimasi untuk menilai desain fasad adaptif di Indonesia.

Konsumsi Energi Dunia

Total konsumsi energi dunia telah naik lebih dari dua kali lipat hanya dalam kurun waktu kurang dari empat setengah dekade (1973 – 2017) dan akan terus bertambah sekitar 1.3% setiap tahunnya hingga pada tahun 2040 (International Energy Agency, 2019b, 2019a). Peningkatan konsumsi energi yang signifikan tersebut juga berbanding lurus dengan emisi yang dihasilkan. Sebagai contoh pada negara-negara di Timur Tengah dan Afrika Utara dalam dua dekade (1990 – 2014) terjadi kenaikan emisi CO₂ sebesar 172% walaupun pada periode yang sama kenaikan emisi global hanya sekitar 20% (Touitou, 2021).

Peningkatan energi konsumsi dan emisi yang mulai tidak terkendali tersebut jika terus dibiarkan tentunya dapat menyebabkan masalah, gangguan, dan dampak pada lingkungan termasuk juga manusia di dalamnya. Tidak hanya masalah langkanya persediaan sumber daya karena menipisnya sumber energi tidak terbarukan seperti fosil, tetapi secara signifikan mempengaruhi lingkungan hidup manusia, memicu pemerosotan lingkungan global, seperti penipisan lapisan ozon, pemanasan global, dan perubahan iklim (Budiman et al., 2024; Han et al., 2015). Ricci et al. (2020) memperkirakan pertumbuhan konsumsi energi dan polusi yang signifikan dapat mengakibatkan pemanasan global dan pertambahan suhu global hingga 1.5°C pada tahun 2030 – 2052. Konsumsi energi ini tidak dapat langsung dihentikan, namun setidaknya dapat diminimalisir persentase pertumbuhannya.

Pertumbuhan energi ini sejatinya tidak dapat dipisahkan dengan pertumbuhan penduduk yang terus bertambah. Pada konteks di mana kepadatan kota diekspektasikan bertumbuh sejalan dengan populasi urban yang di mana saat ini berkisar pada angka 54.4% dan diperkirakan dapat bertumbuh hingga 60% pada tahun

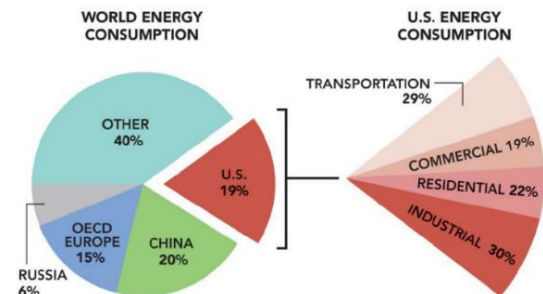
2050 (Ricci et al., 2020). Pertumbuhan penduduk yang diikuti pertumbuhan aktivitas akan berkontribusi pada isu perubahan iklim dan berhubungan juga dengan dampak dari lingkungan terbangun yang diperlukan untuk mewadahi pertumbuhan populasi manusia secara global. Buruknya lagi, dari dampak yang ditimbulkan tersebut malah memacu manusia untuk menggunakan energi secara berlebih. Contoh sederhananya di mana saat udara luar yang berpolusi dan tidak sejuk mau tidak mau memaksa manusia di kawasan urban yang padat untuk mengandalkan pengkondisian udara (AC) untuk kondisi ruangan yang optimal dan juga nyaman. Pernyataan tersebut sesuai dengan tulisan Gaspari et al. (2019a), dalam berlindung atau bernaung dari kondisi termal luar ruangan yang tidak nyaman, manusia menghabiskan waktu sekitar 90% di dalam bangunan.

Konsumsi Energi pada Bangunan

Dari naiknya jumlah populasi ditambah dengan tingginya waktu yang dihabiskan manusia di dalam bangunan tentu berakhir dengan tingginya konsumsi energi yang disebabkan oleh bangunan. Sebagai contoh Gambar 1, pada tahun 2010, dari total energi yang dikonsumsi Amerika, 41% berasal dari konsumsi energi pada sektor bangunan (terdiri dari sektor bangunan komersial (19%) dan bangunan permukiman (22%), disusul sektor lain seperti industri (30%) dan transportasi (29%) (U.S. Department of Energy, 2011).

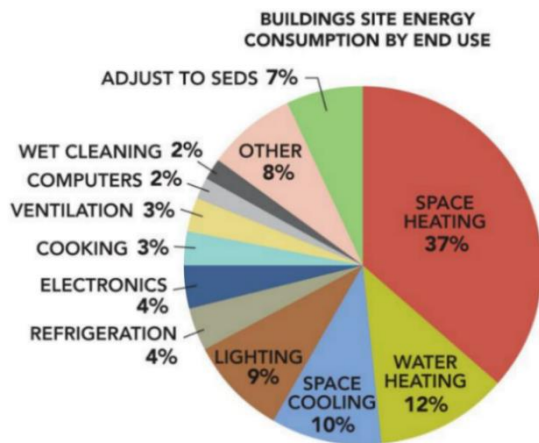
Dari 41% persentase energi yang digunakan bangunan, sekitar setengahnya (50%) digunakan untuk keperluan HVAC (Heating, Ventilation, dan Air-conditioning) seperti: penghangat ruangan (37%), pendingin ruangan (10%), dan ventilasi (3%). Sisanya untuk beragam kebutuhan lain seperti pemanas air, kulkas, elektronik, dan lainnya seperti pada Gambar 3 (U.S. Department of Energy, 2011). Berdasarkan data tersebut dapat dikatakan jika ingin

melakukan penghematan energi pada bangunan dapat berfokus pada pengurangan energi yang digunakan untuk aspek HVAC sebagai sektor yang mencakup setengah dari total konsumsi energi bangunan.



Gambar 1: Persentase Konsumsi Energi oleh Bangunan
(Sumber: U.S. Department of Energy, 2012)

Jika ditarik kembali, penggunaan HVAC yang tinggi dapat disebabkan oleh kondisi dalam ruangan yang tidak memberikan kenyamanan yang cukup terhadap manusia di dalamnya. Berdasarkan Physical Institute Maldegan dalam Barozzi et al. (2016), selubung bangunan bertanggung jawab untuk 40% lebih dari *heat loss* saat musim dingin dan *over heating* saat musim panas, yang mana menyebabkan penggunaan sistem pengkondisian udara harus diperlukan untuk menciptakan kenyamanan dalam ruangan yang baik. Komponen selubung bangunan seperti jendela yang besar juga *curtain wall* yang lebar serta tidak sesuai dengan peruntukannya juga memiliki pengaruh yang besar dalam kenyamanan ruang, bukaan yang besar juga dapat dipengaruhi secara signifikan oleh radiasi sinar matahari langsung jika dikonfigurasi dan diposisikan dengan WWR dan orientasi bukaan yang tidak sesuai (Yan et al., 2019).



Gambar 2: Alokasi Konsumsi Energi pada Bangunan
(Sumber: U.S. Department of Energy, 2012)

Pendekatan Selubung Adaptif

Berbagai penelitian internasional maupun lokal telah mengeksplorasi manfaat fasad adaptif dalam penghematan energi. Sebagai contoh, Anantama & Hariyadi (2021) di Indonesia melaporkan bahwa fasad adaptif dapat menurunkan nilai OTTV sebesar 21% serta kebutuhan pencahayaan hingga 33% dibanding fasad statis, dengan pengurangan silau 14%. Hasil ini konsisten dengan studi di Jakarta yang menemukan bahwa implementasi fasad adaptif dapat mengurangi beban pendingin udara (AC) hingga 32% (Ignatius Nahor et al., 2023). Secara umum, tinjauan selubung tropis menekankan bahwa kombinasi shading optimal, rasio jendela yang tinggi, dan insulasi dapat memangkas konsumsi energi secara drastis (Gupta & Deb, 2023). Temuan-temuan ini mengindikasikan bahwa strategi fasad adaptif sangat efektif meningkatkan efisiensi energi dan kenyamanan di iklim tropis.

Meskipun penelitian mengenai *Climate Adaptive Building Shell* (CABS) telah berkembang cukup pesat di tingkat internasional (Gupta & Deb, 2023; Loonen et al., 2013; Tabadkani et al., 2021), implementasi dan evaluasi CABS pada bangunan di Indonesia masih relatif terbatas. Penelitian di Indonesia umumnya

masih berfokus pada simulasi elemen fasad tertentu, seperti adaptive shading (Mangkuto et al., 2021), adaptive façade dengan mekanisme Helicone (Anantama & Hariyadi, 2021), dynamic façade berbasis sensor suhu (Kwa & Sari, 2022), serta studi adaptive façade di Jakarta (Wael et al., 2020). Sebagian besar penelitian masih berfokus pada evaluasi performa komponen fasad tertentu melalui simulasi atau studi kasus, sehingga belum memberikan gambaran yang komprehensif mengenai perkembangan konsep, karakteristik, klasifikasi, maupun arah implementasi CABS pada bangunan di Indonesia.

Perkembangan penelitian tersebut menunjukkan bahwa CABS tidak lagi dipandang sebagai sekadar elemen peneduh atau fasad dinamis, tetapi telah berkembang menjadi sistem bangunan adaptif yang mengintegrasikan respons terhadap kondisi lingkungan melalui kombinasi elemen fasad, teknologi sensor, aktuator, algoritma kontrol, serta metode optimasi berbasis simulasi. Evaluasi performanya juga semakin komprehensif dengan mempertimbangkan berbagai domain fisik, seperti efisiensi energi, kenyamanan termal, pencahayaan alami, kualitas visual, hingga integrasi energi terbarukan. Dengan demikian, state of the art penelitian CABS saat ini tidak hanya berorientasi pada peningkatan performa satu komponen fasad, tetapi juga pada pengembangan sistem adaptif yang mampu mengoptimalkan kinerja bangunan secara menyeluruh sesuai karakteristik iklim dan kebutuhan pengguna.

Berdasarkan telaah literatur tersebut, penelitian ini mengidentifikasi tiga *research gap* utama. Pertama, kajian mengenai CABS di Indonesia masih didominasi oleh penelitian berbasis studi kasus dan simulasi sehingga belum tersedia sintesis yang menggambarkan perkembangan penelitian CABS secara menyeluruh. Kedua,

penelitian terdahulu lebih banyak mengevaluasi aspek performa tertentu, seperti efisiensi energi, pencahayaan alami, atau kenyamanan termal, sementara hubungan antara konsep CABS, mekanisme adaptasi, teknologi pendukung, dan strategi implementasinya pada bangunan di Indonesia masih belum dibahas secara terintegrasi. Ketiga, belum terdapat kajian yang secara khusus memetakan peluang dan tantangan penerapan CABS dalam mendukung pengembangan bangunan cerdas dan rendah energi pada konteks iklim tropis Indonesia. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan menyusun kajian komprehensif mengenai perkembangan konsep CABS, mengidentifikasi karakteristik dan teknologi yang digunakan, serta mengevaluasi peluang implementasinya pada bangunan di Indonesia sebagai dasar pengembangan penelitian dan penerapan CABS di masa mendatang.

Berdasarkan research gap tersebut, penelitian ini bertujuan untuk memetakan perkembangan penelitian *Climate Adaptive Building Shell* (CABS) di Indonesia berdasarkan lokasi penelitian, tipologi bangunan, domain fisik yang dikaji, skala adaptasi, metode penelitian, temuan performa, serta keterbatasan setiap studi. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan mengidentifikasi tren perkembangan teknologi CABS serta merumuskan peluang implementasi dan arah penelitian CABS pada bangunan tropis Indonesia sebagai dasar pengembangan bangunan yang lebih adaptif, hemat energi, dan berkelanjutan.

Metode

Penelitian ini menggunakan pendekatan studi kepustakaan (literature review) sistematis untuk membangun kerangka konseptual CABS di Indonesia. Penelusuran dilakukan pada beberapa basis data ilmiah yaitu: Scopus dan Google Scholar menggunakan kata kunci seperti

“adaptive façade”, “Climate Adaptive Building Shell”, “efisiensi energi bangunan”, dan “iklim tropis”. Pencarian dilakukan terhadap artikel yang dipublikasikan pada rentang tahun 2013–2024 (tahun mulai penulisan artikel), dengan mempertimbangkan perkembangan konsep CABS sejak publikasi klasifikasi CABS oleh Loonen et al. (2013) hingga penelitian terbaru yang relevan dengan konteks bangunan tropis dan Indonesia.

Proses seleksi artikel dilakukan melalui tiga tahapan. Tahap pertama adalah identifikasi artikel berdasarkan kesesuaian kata kunci pada judul, abstrak, dan kata kunci penulis. Tahap kedua adalah penyaringan (screening) dengan menghilangkan artikel duplikat, artikel yang tidak membahas fasad adaptif/CABS, serta publikasi yang tidak melalui proses peer review. Tahap ketiga adalah penilaian kelayakan (eligibility) dengan membaca isi artikel secara menyeluruh untuk memastikan kesesuaiannya dengan tujuan penelitian. Artikel yang dipilih merupakan artikel yang membahas konsep, teknologi, metode, maupun performa CABS pada bangunan, baik dalam konteks Indonesia.

Proses seleksi artikel dilakukan melalui tiga tahapan. Tahap pertama adalah identifikasi artikel berdasarkan kesesuaian kata kunci pada judul, abstrak, dan kata kunci penulis. Tahap kedua adalah penyaringan (screening) dengan menghilangkan artikel duplikat, artikel yang tidak membahas fasad adaptif/CABS, serta publikasi yang tidak melalui proses peer review. Tahap ketiga adalah penilaian kelayakan (eligibility) dengan membaca isi artikel secara menyeluruh untuk memastikan kesesuaiannya dengan tujuan penelitian. Artikel yang dipilih merupakan artikel yang membahas konsep, teknologi, metode, maupun performa CABS pada bangunan, baik dalam konteks Indonesia.

Setelah proses seleksi, artikel dianalisis menggunakan pendekatan *content analysis* melalui proses pengkodean (*coding*) berdasarkan kategori yang telah ditetapkan. Setiap artikel dikodekan menurut lokasi penelitian, tipologi bangunan, domain fisik yang dikaji, skala adaptasi, metode penelitian, temuan utama, dan keterbatasan penelitian. Hasil kemudian disintesis secara deskriptif untuk mengidentifikasi pola perkembangan penelitian CABS di Indonesia serta merumuskan peluang implementasi dan arah penelitian selanjutnya. Pengkodean yang digunakan diskemakan pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1: Pengkodean Kategori

Kategori	Dasar Pengkodean
Lokasi penelitian	Kota, wilayah studi kasus, atau simulasi
Tipologi bangunan	Fungsi bangunan (hunian, perkantoran, pendidikan, komersial, dll.)
Domain fisik	Aspek performa yang dikaji yang mencakup termal, optikal, aliran udara, dan elektrik (Loonen et al., 2013)
Skala adaptasi	Tingkat adaptasi selubung bangunan mulai dari makro yang mencakup seluruh selubung bangunan, atau mikro pada komponen yang lebih kecil (Loonen et al., 2013)
Metode penelitian	Simulasi, eksperimen, studi kasus, pemodelan numerik, atau kajian literatur
Temuan	Hasil utama dan indikator performa yang dilaporkan
Keterbatasan	Batasan penelitian yang dinyatakan penulis

(Sumber: Penulis, 2026)

Pembahasan

Intelligent Building

Setiap era, bangunan terus berkembang seiring perkembangan teknologi dan manusia sebagai penggunaanya. Beberapa dekade yang lalu pendekatan perancangan bangunan rendah energi terbagi menjadi dua alternatif, *passive design strategies* (pasif) dan *active technologies* (aktif).

Seiring masa berlalu bersama dengan tingkat kepuasan manusia yang tiada habisnya, lahir pendekatan *Intelligent Building* (atau *smart building*) yang tengah populer saat ini. Istilah ini pertama kali digagas dari artikel yang dimuat pada New York Times 1984 yang mendeskripsikan pengembang perumahan yang menciptakan ‘bangunan generasi baru yang hampir dapat berpikir dengan sendirinya . . . disebut *Inteleigent Building*.’ (Sinopoli, 2010). Lebih detail dijelaskan oleh Cerda Institute dalam Fântână & Oae (2021), sistem yang mendukung aliran informasi pada bangunan, menawarkan layanan otomatisasi dan komunikasi jarak jauh, memberikan kontrol otomatis tambahan, pengelolaan pemantauan dan perawatan berbagai sub-sistem atau layanan pada bangunan secara optimal dan terintegrasi, lokal dan atau jarak jauh, dan dirancang dengan fleksibilitas yang memungkinkan dalam pengimplementasian sistem masa depan secara ringkas dan ekonomis. Menurut Gadakari & Mushatat (2020), *intelligent building* didefinisikan sebagai infrastruktur dinamis dan responsif yang mengintegrasikan berbagai sistem dalam bangunan (seperti HVAC, pencahayaan, keamanan, dsb.) dengan tujuan pengelolaan sumber daya yang efektif, serta kinerja bangunan dan pengelolaan yang optimal. Jika disimpulkan, *intelligent building* adalah sebuah sistem bangunan terpadu yang memungkinkan pengguna untuk mengelola bangunan secara langsung maupun tidak langsung secara optimal berdasarkan kondisi bangunan dengan tujuan menciptakan efisiensi dalam pengelolaan bangunan dan penggunaan sumber daya.

Pada kondisi di lapangan, sebenarnya *intelligent building* telah mulai banyak diterapkan bahkan sebelum istilah tersebut dicetuskan. Walaupun *Intelligent Building* pada awalnya tidak langsung pada tahap

yang mutakhir seperti sekarang, bahkan pada mulanya sistem ini diterapkan dimulai dari pengimplementasian alarm kebakaran terhadap bangunan pada tahun 1950, kemudian terus berkembang hingga menggunakan sistem terkomputerisasi bahkan terkoneksi dengan internet seperti sekarang ini (Tabel 2) (Fântână & Oae, 2021).

Tabel 2: Perkembangan Intelligent Building

Periode	Tahapan Perkembangan <i>Intelligent Building</i>
1950-an	Implementasi Alarm Kebakaran
1960-an	Implementasi sistem "penghemat waktu kerja"
1970-an	Sistem penghematan energi dan pencegahan kejahatan
1980-an	Sistem tunggal khusus (<i>dedicated</i>)
1990-an	Sistem terintegrasi multifungsi dan pada tingkat bangunan
2000-an	Sistem terintegrasi berbasis komputer
Saat ini	Sistem terintegrasi dengan jaringan perusahaan

(Sumber: Fântână & Oae, 2021)

Climate Adaptive Building Shell (CABS)

Intelligent Building yang kian waktu terus berinovasi mengikuti kebutuhan manusia terhadap perkembangan zaman yang makin mengandalkan teknologi. *Intelligent Building* juga mulai diaplikasikan ke dalam beberapa elemen bangunan secara spesifik, salah satunya adalah selubung bangunan.

Selubung bangunan adalah elemen yang terletak di antara bagian dalam dan luar bangunan sehingga menjadi subjek dalam beragam kondisi lingkungan yang beragam (Gaspari et al., 2019b). Namun selubung bangunan konvensional dirancang secara statis dan tidak sensitif terhadap kondisi lingkungan luar dan dalam yang berubah secara dinamis. Perubahan iklim dan cuaca pada ruang luar, perubahan kebutuhan kenyamanan untuk jumlah dan preferensi pengguna tidak dapat direspons oleh selubung konvensional yang memiliki parameter insulasi, *thermal mass*, dan properti lain yang terkunci, sehingga pada akhirnya penggunaan energi menjadi tidak

efisien dalam memenuhi pemenuhan kenyamanan pengguna (Mols et al., 2017). Padahal kondisi terus berubah setiap tahun bahkan juga setiap menitnya, dan tentu juga berpengaruh terhadap kebutuhan kenyamanan manusia di dalamnya (Loonen et al., 2013).

Bangunan terus ditantang untuk menyediakan ruang yang sehat, produktif dan nyaman mungkin. Sedangkan pendekatan perancangan pasif dan aktif tidak lagi dianggap cukup untuk memenuhi kebutuhan tersebut, pendekatan perancangan *Intelligent Building* pada aspek *Climate Adaptive Building Shell (CABS)* yang digagas oleh Loonen dianggap dapat menjawab beberapa permasalahan dengan menggabungkan antara pendekatan perancangan pasif dan aktif menjadi satu sistem (Anantama & Hariyadi, 2021; Mols & Blumberga, 2020).

Definisi dan Prinsip Dasar CABS

Pada *state of the art*-nya, Loonen et al. (2013) mendeskripsikan CABS sebagai:

A climate adaptive building shell has the ability to repeatedly and reversibly change some of its functions, features or behavior over time in response to changing performance requirements and variable boundary conditions, and does this with the aim of improving overall building performance.

Jika diterjemahkan dalam Bahasa Indonesia menjadi: selubung bangunan yang memiliki kemampuan secara berulang dan secara reversibel mengubah beberapa fungsi, fitur atau perilaku dari waktu ke waktu sebagai bentuk respons dalam perubahan kebutuhan performa dan kondisi beragam variabel, dan dilakukan dengan tujuan untuk meningkatkan keseluruhan kinerja bangunan.

Selubung bangunan yang dimaksud Loonen et al. (2013) adalah seluruh elemen konstruksi yang membentuk batasan antara

udara luar dan dalam, termasuk elemen transparan seperti jendela juga elemen atap. Perilaku adaptif seperti partisi, dinding, dan pondasi tidak termasuk dalam konteks CABS. Sesuai dengan definisi di atas, elemen-elemen pada selubung bangunan pada CABS memberikan penekanan khusus dalam mendukung kualitas ruang dalam yang baik.

Pada dasarnya CABS menggabungkan pendekatan perancangan pasif dengan perancangan aktif. Pendekatan perancangan aktif lebih diandalkan di masa kini karena kemudahan pengoperasian dan kecepatan untuk memenuhi kebutuhan pengguna dibanding pendekatan pasif. Namun yang menjadi kelemahan pendekatan aktif adalah biaya operasional yang tinggi dan dianggap tidak berkelanjutan bagi lingkungan. CABS menempatkan dirinya di tengah pendekatan tersebut, mengandalkan prinsip dasar fisika bangunan seperti pendekatan perancangan pasif, namun dengan selubung yang adaptif menggunakan energi seperti pendekatan perancangan aktif untuk mengikuti kondisi ruang luar, yang pada akhirnya diharapkan kebutuhan energi yang digunakan dapat berkurang baik dari sisi CABS maupun HVAC di dalam ruangan (Karakoç & Çağdaş, 2021).

CABS dirancang untuk meningkatkan efisiensi energi bangunan sekaligus meningkatkan kepuasan dan kenyamanan pengguna. Umumnya, CABS bertujuan untuk mengurangi beban radiasi dan cahaya matahari langsung yang masuk ke bangunan sekaligus menciptakan lingkungan yang nyaman dan dapat dikontrol bagi penggunaanya (Hafizi & Vural, 2022).

Secara prinsip CABS berbeda dengan tren fasad pada umumnya, yang salah satunya berprinsip *'innovation by addition'* (inovasi dengan penambahan) (Lichtenberg et al. dalam Loonen et al. (2013)). Biasanya

fasad yang dipakai didekomposisi menjadi beberapa sub-permasalahan seperti struktural, transfer panas, cahaya, suara, udara, dan kelembaban. Begitu juga dengan hasilnya yang berupa pendekatan sekuensial yang hanya menyelesaikan permasalahan spesifik dengan cara berlapis-lapis. Berbeda dengan konsep CABS yang berada selangkah lebih depan dengan merekonsiliasi berbagai macam aspek dengan cara yang lebih holistik.

Dalam kinerjanya, CABS perlu untuk merekonsiliasi kekuatan dan fleksibilitas dalam menghadapi perubahan situasi lingkungan luar dan keperluan pengguna di dalamnya. Hal tersebut dapat dicapai dengan tiga macam properti, yaitu: *adaptability*, kemampuan dalam beradaptasi dalam berbagai kondisi; *multi-ability*, kemampuan dapat menyelesaikan beberapa variabel; dan *evolvability*, dapat menangani keadaan yang bahkan belum pernah terjadi (Loonen et al., 2013).

Karakteristik CABS

Pada state of the art-nya, CABS dipaparkan memiliki beberapa karakteristik untuk memudahkan untuk pemahamannya. Secara umum dikelompokkan menjadi enam kelompok variabel (Loonen et al., 2013, 2015): (1) Domain fisik, (2) Waktu respons, (3) Skala adaptasi/spasial, (4) Tipe kontrol, (5) Visibilitas, dan (6) Tingkat adaptabilitas. Kombinasi variabel-variabel ini menjelaskan fungsi teknis, perilaku operasional, konsekuensi estetis, serta tantangan evaluasi dan implementasi CABS.

Karakteristik tersebut bekerja dengan saling terkait dalam dan secara langsung menentukan desain, evaluasi, dan kebutuhan kenyamanan yang dicapai, detail singkat masing-masing karakteristik sebagai berikut: (1) *domain fisik*, yang mencakup termal, optikal, aliran udara, dan elektrikal, di mana mekanisme adaptif umumnya bekerja secara multi-domain sehingga perubahan

pada satu aspek, seperti kontrol pencahayaan alami yang selalu berdampak pada aspek lain seperti kenyamanan termal; (2) *waktu respons*, yang menentukan kemampuan CABS dalam merespons perubahan lingkungan pada skala detik, menit, jam, harian, hingga musiman, sehingga menentukan relevansi sistem terhadap fenomena dinamis seperti angin, pergerakan matahari, pola aktivitas penghuni, dan perubahan iklim periodik; (3) *skala adaptasi atau spasial*, yang membedakan antara adaptasi makro pada tingkat selubung bangunan atau façade secara keseluruhan (kinetic envelopes) dan adaptasi mikro pada komponen yang lebih kecil dan ringan, seperti elemen shading atau bukaan, dengan implikasi langsung terhadap kompleksitas struktural, biaya konstruksi, dan fleksibilitas penerapan; (4) *tipe kontrol*, yang terdiri dari kontrol intrinsik berbasis sensor dan kondisi lingkungan serta kontrol ekstrinsik yang melibatkan interaksi atau preferensi pengguna, di mana pemilihan tipe kontrol mempengaruhi integrasi sistem bangunan, keandalan operasional, dan kebutuhan pemeliharaan; (5) *visibilitas*, yang menunjukkan sejauh mana mekanisme adaptif mengubah tampilan selubung dan persepsi ruang dalam, baik secara tersembunyi tanpa konsekuensi estetis maupun secara eksplisit sebagai ekspresi arsitektural yang dinamis dan membentuk pengalaman pengguna; serta (6) *tingkat adaptabilitas*, yang menggambarkan kapasitas selubung dalam merespons kondisi lingkungan mulai dari non-adaptif, sistem on-off biner, hingga sistem bertahap dengan variasi respons yang lebih halus dan berkelanjutan. Keenam karakteristik ini menegaskan bahwa CABS bukan sekadar elemen teknis tunggal, melainkan sistem kompleks yang memerlukan pendekatan desain dan evaluasi multi-domain, multi-skala, dan berbasis kinerja agar manfaat energi dan

kenyamanan yang diusulkan dapat tercapai secara nyata dalam konteks operasional bangunan.

Contoh Penerapan CABS

Penerapan CABS sejatinya telah diterapkan pada beberapa bangunan sebelum teori ini dikemukakan lebih jauh. Contohnya seperti Milwaukee Art Museum oleh Santiago Calatrava pada tahun 2001 (Gambar), yang menggunakan sistem fasad yang bergerak mengikuti waktu peredaran matahari dalam suatu hari, sehingga meminimalisir solar heat gain yang diterima oleh bangunannya (Oh, 2019). Contoh lainnya adalah Media-ICT Building oleh Cloud 9 pada tahun 2011 yang mengimplementasikan mekanisme pneumatik yang secara otomatis dipicu oleh sensor cahaya yang terkena sinar matahari (Juaristi & Monge-Barrio, 2016). Seperti kedua contoh tersebut, penerapan CABS umumnya digunakan pada bangunan yang besar dan megah atau malah hanya sampai di tahap prototipe saja, CABS diharapkan dapat diproduksi secara masal dan dapat digunakan bahkan pada bangunan yang sederhana.



Gambar 3: Milwaukee Art Museum
(Sumber: Oh, 2019)

Penerapan CABS di Indonesia

Indonesia merupakan salah satu negara yang berada di wilayah khatulistiwa dan menjadikannya negara dengan iklim tropis, tepatnya tropis basah. Negara pada iklim ini terpapar cahaya matahari sepanjang tahun sehingga menyebabkan suhu udara dan

kelembaban tinggi sepanjang tahunnya. Hal tersebut juga mengakibatkan bagaimana temperatur udara pada waktu siang dan malam tidak banyak berbeda, yang juga berdampak kepada rendahnya kecepatan angin (Ignatius Nahor et al., 2023). Pada kota-kota besar seperti Jakarta dan Surabaya kondisinya diperparah dengan efek *Urban Heat Island* (UHI), yang mana temperatur udara di kawasan perkotaan / urban jauh lebih tinggi dibanding daerah sub-urban akibat tingginya penggunaan energi, pembuangan emisi, dan kegiatan oleh padatnya penduduk dan bangunannya. Bangunan yang terpapar UHI memiliki konsumsi energi yang jauh lebih tinggi dibandingkan kawasan sub-urban di sekitarnya, karena UHI meningkatkan temperatur siang hari dan malam hari, sehingga penggunaan penghawaan buatan seperti HVAC akan bekerja lebih berat dan lebih lama (Sari, 2021).

Pada bagian ini, Tabel sintesis yang disajikan memuat ringkasan penelitian-penelitian terdahulu yang secara eksplisit membahas Climate Adaptive Building Shells (CABS) maupun pendekatan fasad adaptif pada konteks iklim tropis Indonesia. Tabel ini menghimpun studi dengan ragam pendekatan, mulai dari simulasi komputasional, optimasi parametrik, hingga eksperimen prototipe dan kajian lapangan, sehingga memberikan gambaran menyeluruh mengenai spektrum penelitian yang telah dilakukan. Penyajian dalam bentuk tabel memungkinkan pembacaan komparatif lintas studi untuk menilai konsistensi temuan, variasi metode, serta kedalaman bukti yang tersedia.

Setiap entri dalam tabel diklasifikasikan berdasarkan lokasi kajian (bangunan nyata atau simulasi), tipologi atau objek bangunan, domain fisik yang dianalisis mengacu pada kerangka Loonen (termal, optikal, aliran udara, dan elektrik), serta skala adaptasi yang diterapkan. Selain itu, tabel juga

mencantumkan metode utama yang digunakan dan merangkum temuan positif serta keterbatasan masing-masing studi. Struktur ini dirancang untuk menyoroti pola umum dalam literatur, seperti dominasi studi berbasis simulasi, kecenderungan fokus pada domain optikal dan termal secara terpisah, serta masih terbatasnya penelitian multi-domain dan validasi lapangan.

Tabel sintesis berfungsi sebagai landasan analitis untuk menilai sejauh mana penelitian CABS di Indonesia telah berkembang, apa saja bukti kinerja yang sudah tersedia, dan di mana letak kesenjangan pengetahuan. Pembacaan terintegrasi terhadap tabel ini menjadi dasar untuk merumuskan potensi riset lanjutan dan arah penerapan CABS yang lebih kontekstual, terukur, dan siap diimplementasikan pada praktik perancangan bangunan tropis.

Tabel 3: Penelitian CABS di Indonesia

Studi	Domain Fisik & Skala Adaptasi	Metode & Temuan Utama
Eksplorasi Fasad yang Dinamis dengan Material Aluminium Composite Panel pada Bangunan MOG di Malang (Viovea et al., 2017)	Domain Fisik: Optik (daylighting) dan aspek arsitektural material. Skala Adaptasi: Komponen/ele men fasad (panel ACP dan konfigurasi).	Metode: Studi desain dan simulasi pencahayaan. Temuan: Konfigurasi ACP mampu mengubah distribusi cahaya sekaligus meningkatkan kualitas estetika dan pengendalian pencahayaan ruang komersial.
Lokasi: Mall Olympic Garden, Malang. Tipologi: Mall/fasad komersial.		

Studi	Domain Fisik & Skala Adaptasi	Metode & Temuan Utama
Simulasi Desain Fasad Optimal Terhadap Pencapaian Alami Pada Gedung Prodi Arsitektur Universitas Malikussaleh (Atthailah et al., 2018)	Domain Fisik: Daylighting (DA, UDI). Skala Adaptasi: Elemen fasad/bukaan melalui shading internal dan eksternal.	Metode: Pemodelan parametrik (Rhino/Grasshopper, Honeybee/Ladybug) dan CBDM. Temuan: Shading horizontal internal memenuhi target sDA/ASE, terutama pada orientasi timur dan barat.
Lokasi: Universitas Malikussaleh, Lhokseumawe Tipologi: Ruang perkuliahan/gedung akademik.		
House's Solar Chimney: A Numerical Analysis on the Thermal Performance in Jakarta (Bachrun et al., 2020)	Domain Fisik: Termal dan aliran udara (ventilasi alami). Skala Adaptasi: Sistem bangunan melalui integrasi solar chimney dan double-skin façade.	Metode: Simulasi numerik (CFD). Temuan: Meningkatkan ventilasi alami, menurunkan temperatur ruang, dan berpotensi mengurangi beban pendinginan.
Lokasi: Jakarta. Tipologi: Sistem ventilasi terintegrasi (DSF + solar chimney).		
A Study of an Adaptive Building Façade in West Jakarta (Wael et al., 2020)	Domain Fisik: Radiasi matahari (irradiance). Skala Adaptasi: Tingkat fasad/bangunan melalui perubahan bentuk dan adaptive façade.	Metode: Simulasi massa bangunan dan perbandingan alternatif bentuk serta shading. Temuan: Adaptive façade mampu menurunkan irradiance hingga sekitar 40% pada iklim tropis.
Lokasi: Jakarta Barat. Tipologi: Fasad bangunan.		

Studi	Domain Fisik & Skala Adaptasi	Metode & Temuan Utama
Effectiveness of Adaptive Façade with Helicone Mechanisms on Energy Values and Natural Lighting in Indonesia (Anantama & Hariyadi, 2021)	Domain Fisik: Termal dan optik (OTTV, illuminance, glare). Skala Adaptasi: Komponen/mekanisme fasad (panel Helicone).	Metode: Simulasi parametrik dan analisis komparatif. Temuan: Menurunkan OTTV $\pm 21\%$, kebutuhan illuminance $\pm 33\%$, dan silau $\pm 14\%$.
Lokasi: Indonesia. Tipologi: Fasad adaptif mekanis (Helicone).		
Design Optimisation of Fixed and Adaptive Shading Devices on Four Façade Orientations of a High-Rise Office Building in the Tropics (Mangkuto et al., 2021)	Domain Fisik: Daylighting dengan implikasi termal. Skala Adaptasi: Perangkat shading sebagai elemen fasad.	Metode: Optimasi parametrik menggunakan Grasshopper/Honeybee. Temuan: Fixed shading efektif pada orientasi utara-selatan, sedangkan adaptive shading lebih optimal pada timur-barat dengan sDA $\geq 74\%$ dan ASE $\leq 12\%$.
Lokasi: Jakarta. Tipologi: Gedung perkantoran bertingkat tinggi.		

Studi	Domain Fisik & Skala Adaptasi	Metode & Temuan Utama
Implementasi of Dynamic Facade Using Temperature Sensor to Increase Indoor Thermal Comfort (Kwa & Sari, 2022)	Domain Fisik: Kontrol dan kenyamanan termal. Skala Adaptasi: Komponen fasad berupa sensor temperatur dan mekanisme aktuator.	Metode: Eksperimen menggunakan maket skala 1:5, Arduino, dan pengukuran suhu. Temuan: Sensor mampu menggerakkan fasad secara otomatis sehingga menurunkan temperatur ruang dan meningkatkan kenyamanan termal.
Lokasi: Jakarta Timur. Tipologi: Prototipe dynamic façade berbasis sensor.		
Simulasi Model Rancangan Fasade Bangunan Selimut Ganda untuk Bangunan yang Menerapkan Sistem Pendingin Aktif Berbasis Iklim Tropis untuk Efisiensi Energi (Wibowo & Yudhiarma, 2022)	Domain Fisik: Termal dan efisiensi energi. Skala Adaptasi: Envelope/ sistem bangunan (DSF dengan pendingin aktif).	Metode: Simulasi dan eksperimen melalui pemodelan serta pengukuran lapangan. Temuan: DSF berpotensi menurunkan beban pendinginan dan mendukung pedoman desain bangunan tropis.
Lokasi: Pontianak (iklim ekuator). Tipologi: Bangunan dengan double-skin façade dan pendingin aktif.		

Studi	Domain Fisik & Skala Adaptasi	Metode & Temuan Utama
Comparing the Effectiveness of Dynamic Facades for Natural Daylight and Energy Usage in Buildings (Sega et al., 2024)	Domain Fisik: Daylighting dan konsumsi energi. Skala Adaptasi: Tingkat sistem fasad melalui perbandingan berbagai tipe dynamic façade.	Metode: Studi simulasi komparatif berbagai jenis dynamic façade. Temuan: Menghasilkan peringkat efektivitas berbagai tipe dynamic façade serta menunjukkan trade-off antara pencahayaan alami dan beban pendinginan.
Lokasi: Jakarta. Tipologi: Berbagai tipologi bangunan.		
Penerapan Kinetic Facade dengan Pendekatan Biomimikri Upaya Efisiensi Pencahayaan Terhadap Bukaannya Ruang (Arfian & Setiawan, 2024)	Domain Fisik: Daylighting. Skala Adaptasi: Elemen kinetik façade berbasis biomimikri.	Metode: Simulasi menggunakan SketchUp dan Velux Daylight Visualizer serta evaluasi berdasarkan SNI. Temuan: Desain kinetik façade mampu memenuhi standar pencahayaan SNI dan menghasilkan parameter desain yang sesuai untuk bangunan pendidikan.
Lokasi: Creative Hub IPB, Bogor. Tipologi: Bangunan kampus (Creative Hub).		

(Sumber: Penulis, 2026)

Berdasarkan tabel di atas, ditemukan beberapa hal sebagai berikut:

Distribusi Lokasi Kajian

Sebagian besar penelitian CABS di Indonesia bersifat simulatif atau eksperimental skala kecil, dengan hanya sedikit studi di bangunan nyata. Misalnya, studi di Mall Olympic Garden Malang dan ruang kuliah Universitas Malikussaleh menggunakan kasus bangunan aktual, sedangkan sebagian besar lainnya

menggunakan pemodelan komputasi atau prototipe (Jakarta, Pontianak, dsb.). Penggunaan simulasi sangat dominan karena metodologinya cepat dan fleksibel pada tahap desain awal, meski hasilnya memerlukan validasi lapangan. Kondisi ini konsisten dengan literatur yang ditulis Tabadkani yang mencatat bahwa simulasi dan kalkulasi numerik banyak digunakan dalam riset fasad adaptif untuk prediksi performa, walaupun disadari akurasi bergantung pada penyederhanaan dan butuh pengujian nyata (Tabadkani et al., 2021).

Tipologi Bangunan

Tipologi bangunan yang diteliti cukup bervariasi. Banyak studi berfokus pada bangunan publik atau institusional, seperti mal komersial, ruang kelas kampus, dan kantor tinggi; diasumsikan karena intensitas penggunaan energi dan kebutuhan kenyamanan visual yang tinggi. Contoh yang muncul adalah fasad mal di Malang, fasad ruang kuliah universitas, fasad kantor di Jakarta, dan bangunan kampus inovatif. Pada sisi lain, ada pula studi pada tipologi perumahan atau prototipe eksperimen (misalnya rumah dengan cerobong surya, double-skin façade untuk iklim ekuator). Dengan kata lain, tidak ada satu tipologi yang dominan secara mutlak, namun kecenderungan menyoroiti bangunan skala besar (komersial/pendidikan) sebagai objek uji, yang memungkinkan manfaat fasad adaptif diuji dalam konteks penggunaan masif.

Domain Fisik dan Kecenderungan Multi-Domain

Sebagian besar studi CABS di Indonesia menitikberatkan pada domain termo-optik, yakni aspek termal dan optik (pencahayaan). Dari 10 riset, 7 studi mengeksplorasi pencahayaan alami (daylight) dan 6 mengevaluasi aspek termal/energi. Hal ini sesuai dengan kajian Loonen dkk. bahwa domain termo-optik

hadir pada hampir semua sistem fasad adaptif (Tabadkani et al., 2021). Sebaliknya, domain aliran udara atau kontrol elektronik jarang muncul (misal satu studi cerobong surya, satu studi prototipe sensor termal). Kecenderungan multi-domain juga kuat: 7 dari 10 studi menganalisis lebih dari satu domain (misalnya termal - optik), menunjukkan pendekatan terpadu untuk memaksimalkan penghematan energi sekaligus kenyamanan pencahayaan. Ulasan global menyebutkan integrasi termal dan optikal sebagai karakteristik dominan fasad adaptif (Tabadkani et al., 2021). Pola penelitian Indonesia mencerminkan hal ini, dengan hampir semua riset menilai efek simultan pengurangan panas dan peningkatan pencahayaan.

Skala Adaptasi

Pada skala adaptasi, studi di Indonesia lebih banyak menyoroiti level mikro (komponen atau elemen fasad) dibanding makro (sistem bangunan). Enam studi memusatkan perhatian pada elemen fasad seperti bilah sunshade, panel aluminium, atau sensor-teknologi pada skala panel, sedangkan empat studi mempelajari solusi yang lebih besar (misal keseluruhan façade kinetik atau sistem selubung ganda aktif). Pola ini sejalan dengan temuan Attia yang menunjukkan mayoritas riset fasad adaptif masih berada pada level material/komponen, jarang pada level bangunan utuh (Tabadkani et al., 2021). Dengan kata lain, inovasi fasad adaptif di Indonesia kerap berwujud perubahan pada elemen tertutup kecil (shading, panel mekanis, material cerdas), sementara strategi makro (struktur kinetik kompleks atau integrasi arsitektural tingkat bangunan) masih terbatas.

Metode Utama

Kebanyakan penelitian menggunakan simulasi komputasi dan pemodelan parametrik. Metode umum mencakup permodelan 3D dengan Rhino/Grasshopper,

simulasi daylight dengan plugin Honeybee/Ladybug, dan analisis termal/CFD menggunakan EnergyPlus atau software serupa. Pendekatan ini memungkinkan evaluasi cepat berbagai variasi desain fasad adaptif. Hanya sedikit yang melakukan eksperimen lapangan atau maket fisik (misal percobaan maket 1:5 dengan Arduino menggerakkan fasad). Tren ini konsisten dengan literatur yang menyatakan bahwa simulasi komputer dan perhitungan numerik merupakan metode cepat dan ekonomis untuk mendesain fasad adaptif pada tahap awal, meski metode tersebut memerlukan validasi lebih lanjut agar hasilnya dapat diandalkan.

Temuan Positif Konsisten

Secara konsisten, semua studi melaporkan keuntungan performa fasad adaptif dibanding fasad statis. Temuan umum mencakup: pengurangan radiasi matahari langsung (misalnya ~40% pada beberapa konfigurasi fasad), penurunan Indeks Total Transfer Value (OTTV) hingga ~20%, peningkatan pencahayaan dalam ruangan ($sDA \geq 74\%$ dan ASE rendah), pengurangan beban pendingin, serta peningkatan kenyamanan termal dan visual. Contohnya, Nugraha & Hariyadi (2021) menemukan bahwa fasad adaptif mekanisme Helicone secara signifikan lebih efektif daripada fasad statis dalam hal penggunaan energi dan penerangan alami (Anantama & Hariyadi, 2021). Studi lain juga melaporkan bahwa pengaturan sudut panel adaptif atau perangkat shading responsif mampu menurunkan kebutuhan penerangan buatan dan beban pendinginan, sekaligus memperbaiki estetika bangunan. Temuan-temuan ini mendukung konsep CABS: fasad yang dinamis dapat mengoptimalkan asupan cahaya dan penahanan panas sesuai kondisi, sekaligus menjaga kualitas tampilan bangunan.

Keterbatasan Riset

Beberapa keterbatasan riset yang berulang tampak jelas. Pertama, ketergantungan pada simulasi menuntut kehati-hatian interpretasi: hasil penelitian simulatif belum banyak diuji di lapangan, sehingga validitas model perlu dibuktikan lebih lanjut (Tabadkani et al., 2021). Kedua, hampir tidak ada studi yang melibatkan aspek perilaku pengguna secara langsung; literatur global menunjukkan keterbatasan serupa, yaitu sangat sedikit proyek adaptif yang melibatkan umpan balik penghuni (Tabadkani et al., 2021). Ketiga, penelitian cenderung terfokus pada satu atau dua domain teknis saja, sementara integrasi multiaspek (misal kenyamanan akustik, pasokan energi fotovoltaiik) belum dieksplorasi. Akhirnya, skala desain umumnya kecil dan belum mempertimbangkan aspek operasional atau pemeliharaan jangka panjang, sehingga implementasi praktis CABS di tropis masih memerlukan pedoman dan kajian mendalam. Hal-hal tersebut menjadi celah riset penting untuk pengembangan selanjutnya.

Secara keseluruhan, pola penelitian CABS di Indonesia menunjukkan fokus kuat pada simulasi desain fasad adaptif komponen, dengan pengukuran performa termal-optik yang positif. Tren ini menggarisbawahi potensi besar fasad adaptif tropis, namun juga menandakan kebutuhan riset lanjutan: seperti uji lapangan di bangunan tropis di lapangan, pengembangan kontrol yang melibatkan pengguna, dan integrasi ke dalam desain fasad. Identifikasi tren dan kekurangan ini dapat memandu pengembangan CABS sesuai konteks iklim tropis dan kebutuhan arsitektur Indonesia ke depan.

Kesimpulan dan Saran

Studi literatur ini membahas mengkaji potensi penerapan Climate Adaptive

Building Shells (CABS) di Indonesia dengan menelaah dan mensintesis penelitian-penelitian terdahulu yang relevan dalam konteks iklim tropis. Melalui analisis terstruktur terhadap lokasi kajian, tipologi bangunan, domain fisik, skala adaptasi, metode penelitian, serta temuan positif dan keterbatasan masing-masing studi, artikel ini berhasil memetakan perkembangan riset fasad adaptif di Indonesia secara sistematis.

Hasil sintesis menunjukkan bahwa penelitian CABS di Indonesia didominasi oleh pendekatan simulasi komputasional, khususnya pada domain termal dan optikal, dengan tujuan utama menurunkan beban pendinginan, meningkatkan pencahayaan alami, dan memperbaiki kenyamanan visual. Temuan-temuan tersebut secara konsisten mengindikasikan bahwa fasad adaptif memiliki potensi signifikan dalam meningkatkan efisiensi energi bangunan tropis. Namun demikian, artikel ini juga mengidentifikasi sejumlah keterbatasan utama, antara lain minimnya validasi lapangan, dominasi studi single-domain, serta masih terbatasnya pembahasan aspek biaya, operasional, dan keberlanjutan jangka panjang.

Selain itu, kajian ini menyoroti bahwa orientasi fasad, khususnya sisi timur dan barat, merupakan aspek krusial yang sering menjadi fokus penelitian karena paparan radiasi matahari yang tinggi, namun belum banyak dikaji dalam kerangka multi-domain yang terintegrasi. Dengan demikian, terdapat kesenjangan antara potensi teoretis CABS dan kesiapan implementasinya dalam praktik arsitektur di Indonesia.

Hasil kajian juga menegaskan urgensi penelitian lanjutan yang lebih integratif, berbasis multi-domain fisik, disertai uji lapangan dan pertimbangan ekonomi, guna menjembatani transisi CABS dari konsep dan simulasi menuju penerapan nyata pada bangunan tropis Indonesia.

Daftar Pustaka

- Anantama, A. N., & Hariyadi, A. (2021). *Effectiveness of adaptive façade with helicon mechanisms on energy values and natura lighting in Indonesia*. <https://doi.org/10.30822/arteks.v6i3.1071>
- Arfian, Z. A. H. Ri., & Setiawan, W. (2024). Penerapan Kinetic Facade dengan Pendekatan Biomimikri Upaya Efisiensi Pencahayaan terhadap Buka-an Ruang. *Prosiding (SIAR) Seminar Ilmiah Arsitektur*, 411–421. <https://proceedings.ums.ac.id/siar/article/view/4134>
- Atthailah, A., Wijayanti, S., & Hassan, S. M. (2018). Simulasi Desain Fasad Optimal Terhadap Pencahayaan Alami Pada Gedung Prodi Arsitektur Universitas Malikussaleh. *EMARA: Indonesian Journal of Architecture*, 4(1), 21–29. <https://doi.org/10.29080/EMARA.V4I1.228>
- Bachrun, A. S., Vidiyanti, C., Ismail, L. H., & Wahab, I. Abd. (2020). HOUSE'S SOLAR CHIMNEY A NUMERICAL ANALYSIS ON THE THERMAL PERFORMANCE IN JAKARTA. *SINERGI*, 24(3), 245–252. <https://doi.org/10.22441/SINERGI.2020.3.010>
- Barozzi, M., Lienhard, J., Zanelli, A., & Monticelli, C. (2016). The Sustainability of Adaptive Envelopes: Developments of Kinetic Architecture. *Procedia Engineering*, 155, 275–284. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.029>
- Budiman, C., Nugroho, A. C., & Rusmiati, F. (2024). ANALISIS PENERAPAN NEARLY ZERO EMISSION BUILDING DALAM UPAYA MENGURANGI EMISI KARBON PADA SEKTOR BANGUNAN (Analysis of the Implementation of Nearly Zero Emission Buildings Efforts to Reduce Carbon Emissions in the Building Sector). *Tesa Arsitektur*, 22(1), 55–70. <https://doi.org/10.24167/TESA.V22I1.12159>
- Fântână, G. I., & Oae, S. A. (2021). Evolution of Smart Buildings. *International Journal of Energy*, 15, 41–

43.
<https://doi.org/10.46300/91010.2021.15.7>
- Gadakari, T., & Mushatat, S. (2020). The Development And Validation Of An Ontology Of Intelligent Buildings. *WIT Transactions on The Built Environment*, 193, 101–112.
<https://doi.org/10.2495/GD170091>
- Gaspari, J., Naboni, E., Ponzio, C., & Ricci, A. (2019a). A study on the impact of climate adaptive building shells on indoor comfort. *Journal of Facade Design and Engineering*, 7(1), 27–39.
<https://doi.org/10.7480/jfde.2019.1.2778>
- Gaspari, J., Naboni, E., Ponzio, C., & Ricci, A. (2019b). A Study on the Impact of Climate Adaptive Building Shells on Indoor Comfort. *Journal of Facade Design and Engineering*, 7(1), 27–40.
<https://doi.org/10.7480/JFDE.2019.1.2778>
- Gupta, V., & Deb, C. (2023). Envelope design for low-energy buildings in the tropics: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 186.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113650>
- Hafizi, N., & Vural, S. M. (2022). New Taxonomy of Climate Adaptive Building Shell Office Buildings: Focus on User–Façade Interaction Scenarios. *Energies* 2022, Vol. 15, Page 5268, 15(14), 5268.
<https://doi.org/10.3390/EN15145268>
- Han, Y., Taylor, J. E., & Pisello, A. L. (2015). Toward mitigating urban heat island effects: Investigating the thermal-energy impact of bio-inspired retro-reflective building envelopes in dense urban settings. *Energy and Buildings*, 102, 380–389.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.05.040>
- Ignatius Nahor, S. J., Firza Utama, S., & Wizaka, W. (2023). Energy-Efficient Soho in South Jakarta with The Application of Adaptive Solar Facade. *E3S Web of Conferences*, 388, 01030.
<https://doi.org/10.1051/E3SCONF/202338801030>
- International Energy Agency. (2019a). *Key World Energy Statistics*. IEA.
- International Energy Agency. (2019b). *World Energy Outlook 2019*. IEA.
<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019>
- Juaristi, M., & Monge-Barrio, A. (2016). Adaptive façades in temperate climates . An in-use assessment of an office building. *11th Conference on Advanced Building Skins*.
<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.29634.99527>
- Karakoç, E., & Çağdaş, G. (2021). A Data-Driven Conceptual Framework for Climate Adaptive Building Shell: A Hybrid Control Strategy. *Civil Engineering and Architecture*, 9(2), 427–438.
<https://doi.org/10.13189/CEA.2021.090216>
- Kwa, T. R., & Sari, W. E. (2022). PENERAPAN DYNAMIC FACADE DENGAN SENSOR SUHU SEBAGAI UPAYA MENINGKATKAN KENYAMANAN TERMAL RUANG DALAM. *Jurnal RISA (Riset Arsitektur)*, 6(03), 332–349.
<https://doi.org/10.26593/RISA.V6I03.5946.332-349>
- Loonen, R. C. G. M., Rico-Martinez, J. M., Favoino, F., Brzezicki, M., Menezo, C., Ferla, G. La, & Aelenei, L. (Laura). (2015). *Design for façade adaptability: Towards a unified and systematic characterization* (pp. 1284–1294). Economic Forum.
<https://research.tue.nl/en/publications/design-for-fa%C3%A7ade-adaptability-towards-a-unified-and-systematic-c>
- Loonen, R. C. G. M., Trčka, M., Cóstola, D., & Hensen, J. L. M. (2013). Climate adaptive building shells: State-of-the-art and future challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25, 483–493.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.04.016>
- Mangkuto, R. A., Koerniawan, M. D., Apriliyanthi, S. R., Lubis, I. H., Atthailah, Hensen, J. L. M., & Paramita, B. (2021). Design Optimisation of Fixed and Adaptive Shading Devices on Four

- Façade Orientations of a High-Rise Office Building in the Tropics. *Buildings* 2022, Vol. 12, 12(1). <https://doi.org/10.3390/BUILDINGS12010025>
- Mols, T., & Blumberga, A. (2020). Inverse modelling of climate adaptive building shells. System dynamics approach. *Environmental and Climate Technologies*, 24(2), 170–177. <https://doi.org/10.2478/RTUECT-2020-0064>
- Mols, T., Blumberga, A., & Karklina, I. (2017). Evaluation of climate adaptive building shells: multi-criteria analysis. *Energy Procedia*, 128, 292–296. <https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2017.09.077>
- Oh, E. (2019, July 28). *Spotlight: Santiago Calatrava* | ArchDaily. Archdaily. <https://www.archdaily.com/531290/spotlight-santiago-calatrava>
- Ricci, A., Ponzio, C., Fabbri, K., Gaspari, J., & Naboni, E. (2020). Development of a self-sufficient dynamic façade within the context of climate change. *Architectural Science Review*, 1–16. <https://doi.org/10.1080/00038628.2020.1713042>
- Sari, D. P. (2021). A Review of How Building Mitigates the Urban Heat Island in Indonesia and Tropical Cities. *Earth 2021, Vol. 2, Pages 653-666*, 2(3), 653–666. <https://doi.org/10.3390/EARTH2030038>
- Sega, M., Purnama, S., Sangadji, F. A., Nugraha, D., Wael, N., Zakria, W., & Elkhatieb, M. A. (2024). Comparing the Effectiveness of Dynamic Facades for Natural Daylight and Energy Usage in Buildings. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1404(1), 012015. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1404/1/012015>
- Sinopoli, J. (2010). What Is a Smart Building? In *Smart Building Systems for Architects, Owners and Builders* (pp. 1–5). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-1-85617-653-8.00001-6>
- Tabadkani, A., Roetzel, A., Li, H. X., & Tsangrassoulis, A. (2021). Design approaches and typologies of adaptive facades: A review. *Automation in Construction*, 121, 103450. <https://doi.org/10.1016/J.AUTCON.2020.103450>
- Touitou, M. (2021). The Relationship between Economic Growth, Energy Consumption and CO2Emission in the Middle East and North Africa (MENA). *Folia Oeconomica Stetinensia*, 21(2), 132–147. <https://doi.org/10.2478/FOLI-2021-0020>
- U.S. Department of Energy. (2012). *2011 Buildings Energy Databook*.
- Viovetta, L., Santosa, H., & Iyati, W. (2017). Eksplorasi Fasade yang Dinamis dengan Material Aluminium Composite Panel pada Bangunan MOG di Malang. *Jurnal Mahasiswa Departemen Arsitektur*, 5(1). <https://arsitektur.studentjournal.ub.ac.id/index.php/jma/article/view/328>
- Wael, N., Zakria, W., Elkhatieb, M. A., -, al, Ahani, E., Zhang, Y., Wang, F., Yigit, S., Caglayan, S., Ozorhon -, B., Saputra, S., Hendarti, R., & Tomasowa, R. (2020). A study of an adaptive building façade in West Jakarta. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 426(1), 012107. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/426/1/012107>
- Wibowo, T., & Yudhiarma, Y. (2022). Simulasi Model Rancangan Fasade Bangunan Selimut Ganda untuk Bangunan yang Menerapkan Sistim Pendingin Aktif Berbasis Iklim Tropis untuk Efisiensi Energi. *Vokasi: Jurnal Publikasi Ilmiah*, 17(2), 91–110. <https://doi.org/10.31573/JV.V17I2.524>
- Yan, S., Li, X., Wang, B., Shi, W., & Lyu, W. (2019). A method to describe the thermal property of pipe-embedded double-skin façade: Equivalent glass window. *Energy and Buildings*, 195, 33–44.