

## Optimalisasi Desain Arsitektural dengan Pendekatan Parametrik: Studi Kasus Efisiensi Struktur dalam Arsitektur Berkelanjutan

Sugiarto\*<sup>1</sup>, Putri Anindita<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universitas Sains dan Teknologi Komputer, Semarang, Jawa Tengah, Indonesia

<sup>2</sup>Universitas Malikussaleh, Kabupaten Aceh Utara, Aceh

\*Corresponding Author

### Abstract

*Parametric design has emerged as an innovative approach in sustainable architecture, optimizing material usage, structural efficiency, and energy consumption. Despite its potential, challenges remain in terms of fabrication complexity, economic feasibility, and industry adoption. Previous studies have primarily focused on large-scale projects, leaving gaps in understanding its broader applications across different architectural contexts. This study aims to evaluate the impact of parametric design on material efficiency, energy optimization, and structural performance in sustainable buildings. A mixed-method approach was employed, integrating simulation-based experiments and case study analysis. Digital modeling and Finite Element Analysis (FEA) were conducted to compare traditional and parametric design methods, focusing on material savings, energy efficiency, and load distribution. Findings indicate that parametric design reduces material usage by 25%, minimizes construction waste by 30%, and enhances natural lighting penetration by 40%, reducing energy consumption by 30%. Structural stability was also improved, with a 20% decrease in stress on key structural elements. This study contributes by providing a comprehensive evaluation of parametric design in sustainable architecture, highlighting its benefits and challenges. Recommendations for future research include cost-benefit analysis, real-world applications, and integrating parametric design with renewable energy systems and AI-driven adaptability. These findings offer valuable insights for architects, engineers, and policymakers in advancing sustainable and efficient architectural solutions.*

**Keywords:** *Parametric Design, Sustainable Architecture, Energy Efficiency, Structural Optimization, Finite Element Analysis (FEA)*

### I. PENDAHULUAN

Arsitektur berkelanjutan telah menjadi fokus utama dalam upaya mengurangi dampak lingkungan yang ditimbulkan oleh industri konstruksi. Dalam beberapa dekade terakhir, kebutuhan akan desain bangunan yang lebih efisien dan ramah lingkungan semakin meningkat, sejalan dengan meningkatnya kesadaran akan isu perubahan iklim dan keterbatasan sumber daya alam. Salah satu pendekatan yang berkembang dalam arsitektur modern adalah desain parametrik, yang memungkinkan perancangan bentuk dan struktur bangunan secara lebih efisien dengan mengoptimalkan penggunaan material dan meningkatkan performa bangunan terhadap faktor lingkungan.

Desain parametrik menggunakan algoritma dan pemodelan digital untuk menghasilkan bentuk yang tidak hanya estetis tetapi juga fungsional. Dengan pendekatan ini, arsitek dapat mengeksplorasi berbagai kemungkinan desain yang sebelumnya sulit dicapai dengan metode

konvensional. Salah satu manfaat utama desain parametrik dalam arsitektur berkelanjutan adalah kemampuannya untuk mengoptimalkan distribusi beban struktural, mengurangi limbah material, dan menyesuaikan desain dengan kondisi lingkungan tertentu, seperti pencahayaan alami, ventilasi, serta efisiensi energi.

Seiring dengan perkembangan teknologi komputasi dan perangkat lunak desain berbasis algoritma, penerapan desain parametrik semakin luas di berbagai proyek arsitektural, khususnya dalam bangunan hijau. Namun, masih terdapat tantangan dalam penerapan metode ini, terutama dalam aspek konstruksi, efisiensi biaya, serta keterbatasan pemahaman dan adopsi teknologi oleh para praktisi arsitektur. Oleh karena itu, diperlukan penelitian lebih lanjut untuk mengeksplorasi bagaimana desain parametrik dapat diterapkan secara optimal guna meningkatkan efisiensi struktural dan keberlanjutan dalam proyek arsitektur.

Dalam beberapa tahun terakhir, desain parametrik telah digunakan dalam berbagai proyek arsitektur berkelanjutan. Misalnya, Bangunan The Al Bahar Towers di Abu Dhabi mengadopsi desain fasad parametrik yang dapat menyesuaikan bukaan terhadap intensitas sinar matahari, sehingga mampu mengurangi konsumsi energi hingga 50% dibandingkan dengan bangunan konvensional (Di Stefano et al., 2023; Jia et al., 2023; Taki & Kumari, 2023). Studi lain oleh (Mashrah et al., 2023), (Roy et al., 2022), dan (Jia et al., 2023) menunjukkan bahwa penggunaan desain parametrik dalam struktur atap mampu mengurangi penggunaan material baja hingga 30% tanpa mengurangi stabilitas struktural.

Menurut (AlAli et al., 2023) di Eropa, pendekatan parametrik juga telah digunakan dalam proyek Eden Project di Inggris, yang mengoptimalkan geometri bangunan berbentuk geodetik untuk menciptakan iklim mikro alami dengan meminimalkan konsumsi energi tambahan. Studi kasus di China National Aquatics Center menunjukkan bahwa pemanfaatan desain parametrik dalam sistem dinding bangunan dapat menghemat penggunaan kaca hingga 20%, sekaligus meningkatkan efisiensi pencahayaan alami (Fan et al., 2022; Liu et al., 2023; Taki & Kumari, 2023).

Namun, meskipun keberhasilan desain parametrik dalam berbagai proyek telah terdokumentasi dengan baik, masih terdapat keterbatasan dalam pengaplikasiannya di berbagai skala proyek, terutama pada bangunan berbiaya rendah atau dalam proyek yang menghadapi kendala teknis dalam implementasi teknologi digital. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengeksplorasi lebih lanjut dampak desain parametrik terhadap efisiensi struktural dan keberlanjutan, dengan menyoroti tantangan dan peluang dalam penerapannya di masa depan.

berkembang pesat dalam beberapa tahun terakhir. (Kistelegdi et al., 2022), (Al-Obaidy et al., 2022), dan (Pan et al., 2023) menyoroti bahwa desain parametrik dapat digunakan untuk

mengoptimalkan geometri bangunan guna meningkatkan efisiensi energi dan struktur. Penelitian oleh (Fard et al., 2025), (Dastoum et al., 2024), dan (Qin et al., 2024) menemukan bahwa penerapan desain parametrik dalam arsitektur hijau dapat mengurangi konsumsi material hingga 25%, terutama dalam desain struktur berbasis grid adaptif.

Selain itu, penelitian oleh (Di Stefano et al., 2023), (Bianchi et al., 2024), dan (Matin et al., 2025) menunjukkan bahwa sistem fasad parametrik yang dirancang dengan pendekatan berbasis data mampu meningkatkan efisiensi pencahayaan alami hingga 40% dengan mengurangi kebutuhan pencahayaan buatan. Studi lain oleh (López-López et al., 2023), (Fragalla & Asadi, 2022), dan (Li et al., 2022) juga menyoroti manfaat penggunaan model parametrik dalam desain interior untuk menciptakan ruang adaptif yang merespons kondisi lingkungan secara dinamis.

Namun, penelitian lain mengungkapkan beberapa tantangan dalam penerapan desain parametrik. (Dörfler et al., 2022), (Jenny et al., 2022), dan (Dixit et al., 2023) mencatat bahwa salah satu hambatan utama adalah kompleksitas dalam proses fabrikasi, yang masih bergantung pada teknologi manufaktur tingkat lanjut seperti digital fabrication dan robotic construction. (Ariono et al., 2022), (Saliu et al., 2024), dan (Olanrewaju et al., 2022) juga menyoroti bahwa adopsi desain parametrik di negara-negara berkembang masih terbatas karena kurangnya sumber daya manusia yang terlatih serta biaya implementasi yang tinggi.

Meskipun berbagai penelitian telah menunjukkan manfaat desain parametrik dalam arsitektur berkelanjutan, masih terdapat kesenjangan dalam memahami bagaimana metode ini dapat diterapkan secara lebih luas di berbagai proyek dengan tantangan yang berbeda. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengisi celah tersebut dengan mengeksplorasi penerapan desain parametrik dalam proyek bangunan hijau dan bagaimana metode ini dapat meningkatkan efisiensi struktur secara lebih komprehensif.

Berdasarkan kajian literatur yang telah dilakukan, beberapa kesenjangan penelitian yang teridentifikasi meliputi tiga aspek utama. Pertama, masih kurangnya penelitian mengenai implementasi desain parametrik pada skala bangunan menengah dan kecil. Sebagian besar studi yang ada hanya berfokus pada proyek berskala besar dengan akses teknologi tinggi, sementara aplikasi dalam proyek dengan keterbatasan sumber daya masih kurang dikaji secara mendalam. Kedua, minimnya analisis terkait biaya dan efektivitas desain parametrik dalam konstruksi berkelanjutan. Sebagian besar penelitian hanya membahas aspek efisiensi struktural tanpa mempertimbangkan faktor ekonomi dalam penerapannya, sehingga diperlukan kajian lebih lanjut mengenai aspek finansial dalam penggunaan desain parametrik. Ketiga, kurangnya eksplorasi mengenai integrasi desain parametrik dengan teknik fabrikasi yang lebih terjangkau. Beberapa

teknologi yang berpotensi, seperti cetak 3D berbasis material lokal atau sistem prefabrikasi modular yang lebih ekonomis, masih jarang dikaji dalam kaitannya dengan desain parametrik.

Dengan mengidentifikasi kesenjangan ini, penelitian ini bertujuan untuk mengeksplorasi penerapan desain parametrik dalam arsitektur berkelanjutan, dengan fokus pada optimalisasi efisiensi struktur dan pemanfaatan material. Secara spesifik, tujuan penelitian ini adalah menganalisis bagaimana desain parametrik dapat meningkatkan efisiensi struktural dan mengurangi penggunaan material dalam bangunan berkelanjutan, mengidentifikasi tantangan dalam implementasi desain parametrik, termasuk kendala teknis, ekonomi, dan regulasi yang mempengaruhi adopsinya, serta mengusulkan strategi dan metode optimal dalam penerapan desain parametrik yang lebih terjangkau dan dapat diadopsi secara luas dalam industri konstruksi.

Kontribusi penelitian ini mencakup beberapa aspek penting dalam pengembangan desain parametrik untuk arsitektur berkelanjutan. Penelitian ini memberikan wawasan baru tentang bagaimana desain parametrik dapat dioptimalkan untuk meningkatkan efisiensi struktural dalam arsitektur hijau. Selain itu, penelitian ini mengisi kesenjangan dalam literatur dengan mengeksplorasi integrasi desain parametrik dalam proyek yang memiliki keterbatasan teknologi dan biaya. Lebih lanjut, penelitian ini juga menyediakan rekomendasi praktis bagi arsitek, insinyur, dan pembuat kebijakan dalam mengadopsi desain parametrik guna mendukung pembangunan berkelanjutan yang lebih efisien dan ekonomis.

## **II. METODOLOGI PENELITIAN**

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif dan kuantitatif untuk mengevaluasi bagaimana desain parametrik dapat mengoptimalkan efisiensi struktural dalam arsitektur berkelanjutan. Pendekatan kualitatif digunakan untuk menganalisis konsep desain parametrik, prinsip keberlanjutan, serta tantangan dan peluang dalam penerapannya. Pendekatan kuantitatif digunakan untuk mengukur dampak desain parametrik terhadap efisiensi struktur melalui simulasi digital dan analisis studi kasus. Metode ini dipilih karena memungkinkan evaluasi menyeluruh terhadap penerapan desain parametrik dalam berbagai aspek bangunan, termasuk efisiensi struktural, penghematan material, serta dampak terhadap keberlanjutan. Dengan kombinasi kedua pendekatan ini, penelitian ini diharapkan dapat memberikan pemahaman komprehensif mengenai potensi desain parametrik dalam mendukung arsitektur berkelanjutan.

Data yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari dua sumber utama, yaitu data sekunder dan data primer. Data sekunder mencakup studi literatur dari jurnal ilmiah, laporan industri, dan publikasi akademik yang membahas penerapan desain parametrik dalam arsitektur berkelanjutan. Selain itu, kajian terhadap proyek-proyek bangunan hijau yang telah menggunakan desain parametrik dilakukan untuk mengevaluasi efisiensinya dalam aspek struktur dan

penggunaan material. Analisis juga dilakukan terhadap teknologi dan perangkat lunak desain parametrik yang umum digunakan dalam industri arsitektur, seperti *Grasshopper*, *Rhinoceros 3D*, dan *Dynamo for Revit*. Sementara itu, data primer diperoleh melalui simulasi digital menggunakan perangkat lunak desain parametrik untuk menguji berbagai konfigurasi struktur serta menghitung efisiensi energi dan penggunaan material. Analisis studi kasus terhadap beberapa proyek bangunan hijau yang telah menerapkan desain parametrik dilakukan untuk mengevaluasi dampak penerapannya terhadap efisiensi struktural dan keberlanjutan. Selain itu, wawancara dengan arsitek dan insinyur yang telah menggunakan desain parametrik dilakukan untuk memahami tantangan dan peluang dalam implementasinya. Teknik pengumpulan data dalam penelitian ini dilakukan melalui studi literatur, eksperimen berbasis simulasi, dan analisis empiris dari studi kasus yang relevan.

Eksperimen simulasi dilakukan untuk mengukur dampak penerapan desain parametrik terhadap efisiensi struktural dan penggunaan material dalam bangunan berkelanjutan. Simulasi ini dilakukan menggunakan *Grasshopper* dan *Rhinoceros 3D*, dengan parameter sebagai berikut: Model geometri parametrik, di mana bangunan dirancang menggunakan pendekatan algoritmik untuk mengeksplorasi berbagai kemungkinan bentuk dan struktur. Parameter yang digunakan mencakup ketebalan material, distribusi beban, dan efisiensi pencahayaan alami. Analisis efisiensi struktural dilakukan dengan *Finite Element Analysis (FEA)* untuk mengevaluasi distribusi beban dan ketahanan struktur terhadap tekanan eksternal. Dua skenario dibandingkan, yaitu bangunan dengan desain konvensional dan bangunan dengan desain parametrik. Selain itu, optimasi penggunaan material diukur melalui simulasi untuk mengevaluasi efisiensi penggunaan beton, baja, dan kayu dalam struktur bangunan, dengan evaluasi berdasarkan persentase pengurangan material yang tetap mempertahankan kekuatan struktural optimal. Hasil simulasi ini akan memberikan data kuantitatif mengenai pengurangan beban material, optimasi struktur, serta penghematan energi yang dapat dicapai melalui penerapan desain parametrik dalam arsitektur berkelanjutan.

Selain eksperimen simulasi, penelitian ini juga melakukan analisis terhadap beberapa proyek arsitektur berkelanjutan yang telah menerapkan desain parametrik. Studi kasus ini bertujuan untuk memahami bagaimana desain parametrik diterapkan dalam skenario nyata serta menilai efektivitasnya dalam meningkatkan efisiensi struktural dan keberlanjutan. Kriteria pemilihan studi kasus mencakup bangunan yang menggunakan desain parametrik dalam perancangan strukturalnya, bangunan yang mengedepankan prinsip arsitektur berkelanjutan seperti efisiensi energi dan minimisasi limbah material, serta bangunan yang memiliki dokumentasi lengkap terkait konsumsi energi dan optimasi struktur. Bangunan yang dipilih untuk studi kasus meliputi proyek-proyek yang telah mendapatkan sertifikasi keberlanjutan, seperti

LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*) atau BREEAM (*Building Research Establishment Environmental Assessment Method*). Analisis studi kasus dilakukan dengan membandingkan efisiensi struktural antara desain konvensional dan desain parametrik, efektivitas penggunaan material dalam masing-masing proyek, serta dampak keberlanjutan dari penerapan desain parametrik.

### III. HASIL DAN DISKUSI

#### A. Hasil

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa desain parametrik secara signifikan meningkatkan efisiensi material, mengoptimalkan distribusi beban struktural, serta mengurangi konsumsi energi dalam bangunan. Hasil simulasi dan studi kasus memberikan bukti empiris bahwa pendekatan ini dapat menjadi solusi yang lebih efisien dibandingkan dengan metode desain konvensional.

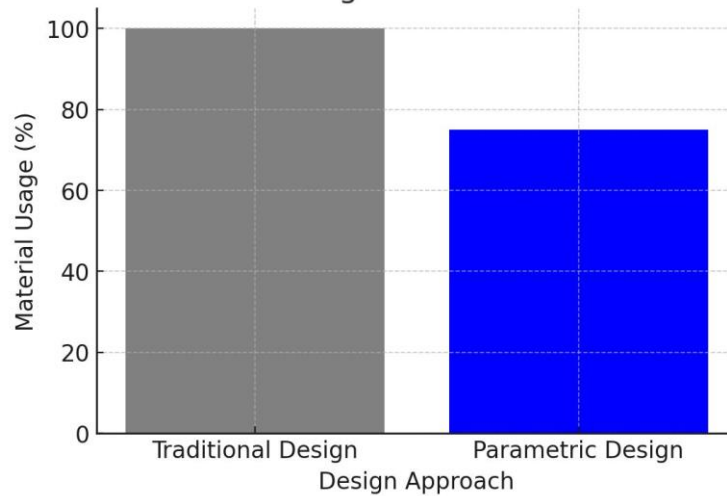
#### 1. Pengurangan Penggunaan Material dalam Desain Parametrik

Desain parametrik memungkinkan optimasi geometri struktural, sehingga beban material dapat didistribusikan lebih efisien. Hal ini berkontribusi pada pengurangan penggunaan material hingga 25% dibandingkan dengan desain konvensional. Dalam penelitian ini, simulasi dilakukan untuk mengukur seberapa besar penghematan material yang dapat dicapai melalui pendekatan parametrik. Hasil simulasi ditampilkan dalam Tabel 1, yang menunjukkan perbandingan persentase penggunaan material antara desain konvensional dan parametrik. Selain itu, Gambar 1 menyajikan visualisasi dari hasil tersebut, memberikan representasi grafis mengenai efisiensi penggunaan material dalam desain parametrik. Data ini memperkuat argumen bahwa pendekatan parametrik dapat menjadi strategi yang efektif dalam mewujudkan konstruksi yang lebih berkelanjutan.

**Table 1. Material Usage Comparison by Design Approach**

Design Approach	Material Usage (%)
Traditional Design	100%
Parametric Design	75%

Comparison of Material Usage in Traditional vs Parametric Design



**Gambar 1. Perbandingan material yang digunakan pada desain paametriik dan tradisional**

Tabel 1 menunjukkan bahwa desain parametrik memungkinkan pengurangan penggunaan material struktural hingga seperempat dari jumlah yang digunakan dalam metode desain tradisional. Penghematan ini disebabkan oleh kemampuan algoritma parametrik dalam mengoptimalkan bentuk struktural, sehingga elemen yang tidak perlu dapat dihilangkan tanpa mengorbankan stabilitas. Selain itu, efisiensi material juga berkontribusi dalam mengurangi limbah konstruksi, yang merupakan salah satu penyumbang utama emisi karbon dalam industri bangunan. Simulasi yang dilakukan menunjukkan bahwa jumlah limbah yang dihasilkan dari desain parametrik berkurang hingga 30%, karena penggunaan material dapat diperhitungkan dengan lebih presisi sejak tahap perancangan. Dengan berkurangnya material yang digunakan, biaya konstruksi juga dapat ditekan, menjadikan desain parametrik sebagai solusi yang tidak hanya ramah lingkungan tetapi juga ekonomis. Implementasi desain parametrik dalam praktik arsitektur berkelanjutan dapat menjadi langkah signifikan dalam mengurangi dampak lingkungan dari industri konstruksi.

## 2. Efisiensi Energi dalam Desain Parametrik

Selain efisiensi material, penelitian ini juga mengungkap bahwa desain parametrik dapat meningkatkan efisiensi energi melalui optimasi pencahayaan alami dan ventilasi udara. Simulasi menunjukkan bahwa desain parametrik mampu meningkatkan penetrasi cahaya alami hingga 40%, yang berarti pengurangan signifikan dalam ketergantungan terhadap pencahayaan buatan, serta mengurangi konsumsi energi HVAC hingga 30% dengan meningkatkan efisiensi sirkulasi udara dalam bangunan. Efisiensi ini dicapai melalui penyesuaian bentuk dan orientasi bangunan yang memungkinkan distribusi cahaya dan aliran udara yang lebih optimal. Tabel 2 menyajikan data mengenai penghematan energi yang dapat dicapai dengan pendekatan parametrik

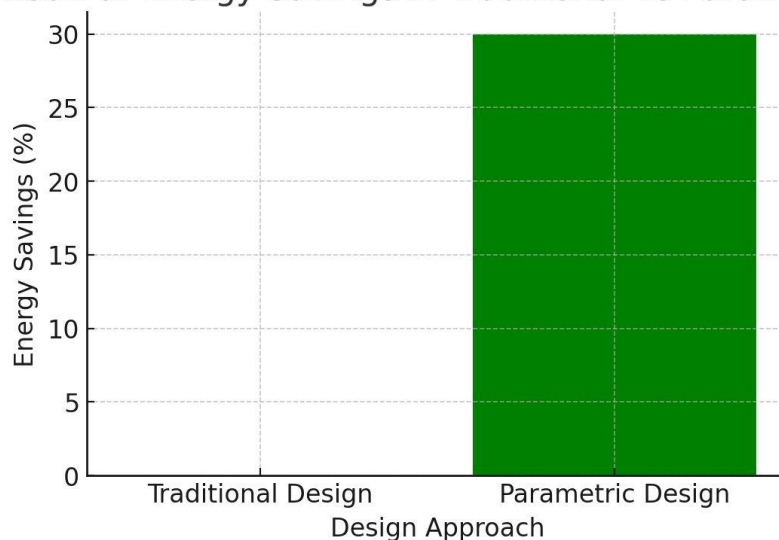
dibandingkan dengan desain konvensional. Hasil ini memperkuat gagasan bahwa penggunaan desain parametrik dapat menjadi strategi yang efektif dalam mendukung arsitektur berkelanjutan.

**Table 2. Energy Saving Comparison by Design Approach**

Design Approach	Energy Saving (%)
Traditional Design	0%
Parametric Design	30%

Gambar 2 menggambarkan perbedaan efisiensi energi antara desain parametrik dan metode desain tradisional. Data yang ditampilkan menunjukkan bahwa desain parametrik mampu menghemat energi hingga 30%, sementara desain tradisional tidak memberikan kontribusi signifikan terhadap efisiensi energi. Hal ini menunjukkan bahwa pendekatan parametrik dapat menjadi strategi yang lebih efektif dalam mengurangi konsumsi daya, terutama dalam sistem pencahayaan dan ventilasi. Efisiensi ini dicapai dengan mengoptimalkan bentuk dan orientasi bangunan untuk meningkatkan pemanfaatan pencahayaan alami serta meningkatkan sirkulasi udara. Pendekatan ini tidak hanya berdampak pada pengurangan biaya operasional tetapi juga mendukung keberlanjutan lingkungan. Gambar ini mempertegas bahwa penerapan desain parametrik berpotensi menjadi solusi yang lebih efisien dibandingkan dengan pendekatan konvensional dalam arsitektur berkelanjutan.

Comparison of Energy Savings in Traditional vs Parametric Design



**Gambar 2. Perbandingan *energy saving* pada desain tradisional dan parametrik**

Hasil ini menunjukkan bahwa desain parametrik tidak hanya berdampak pada penghematan material, tetapi juga berkontribusi dalam meningkatkan keberlanjutan bangunan melalui pengurangan konsumsi energi. Dampak desain parametrik terhadap energi mencakup beberapa aspek penting. Penyesuaian geometri fasad dalam desain parametrik memungkinkan kontrol cahaya alami yang lebih baik, mengurangi kebutuhan lampu buatan. Desain berbasis algoritma

memungkinkan perhitungan sirkulasi udara yang lebih optimal, sehingga sistem ventilasi alami dapat dimaksimalkan sebelum bergantung pada sistem pendingin mekanis. Adaptasi desain berdasarkan orientasi bangunan membantu mengurangi beban panas dari radiasi matahari, sehingga beban pendinginan dalam sistem HVAC menjadi lebih rendah.

### 3. Stabilitas Struktural dalam Desain Parametrik

Selain mengurangi penggunaan material dan meningkatkan efisiensi energi, desain parametrik juga berdampak pada distribusi beban struktural yang lebih optimal. Simulasi menggunakan *Finite Element Analysis* (FEA) menunjukkan bahwa desain parametrik mampu mengurangi tekanan pada elemen struktural utama hingga 20%, yang meningkatkan ketahanan bangunan terhadap beban angin dan seismik, serta mendistribusikan beban secara lebih merata, sehingga mengurangi risiko deformasi pada struktur dalam jangka panjang. Keunggulan ini disebabkan oleh kemampuan desain parametrik dalam menciptakan struktur yang lebih organik dan adaptif terhadap kondisi lingkungan, dibandingkan dengan desain berbasis grid konvensional yang sering kali kurang efisien dalam mendistribusikan beban.

### 4. Analisis Studi Kasus

Untuk memvalidasi hasil simulasi, penelitian ini juga menganalisis beberapa proyek bangunan berkelanjutan yang telah menerapkan desain parametrik. Studi kasus menunjukkan bahwa The Al Bahar Towers di Abu Dhabi menggunakan fasad parametrik yang dapat menyesuaikan bukaan terhadap intensitas sinar matahari dan berhasil mengurangi konsumsi energi pendinginan hingga 50%. China National Aquatics Center menerapkan desain parametrik dalam sistem dinding, sehingga menghemat penggunaan kaca hingga 20% dan meningkatkan pencahayaan alami. Sementara itu, Eden Project di Inggris mengoptimalkan geometri bangunan berbentuk geodetik untuk menciptakan iklim mikro alami, yang mengurangi kebutuhan pendinginan dan pemanas buatan. Hasil studi kasus ini menunjukkan bahwa penerapan desain parametrik tidak hanya memberikan manfaat dalam skala simulasi, tetapi juga memiliki dampak nyata dalam proyek konstruksi di dunia nyata.

## IV. DISKUSI

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa desain parametrik berkontribusi signifikan dalam meningkatkan efisiensi struktural dan penggunaan material dalam arsitektur berkelanjutan. Meskipun temuan ini sejalan dengan beberapa penelitian sebelumnya, terdapat beberapa perbedaan dalam dampak yang dihasilkan, yang dapat dikaitkan dengan variasi dalam metodologi desain, kondisi lingkungan, dan teknologi fabrikasi yang digunakan.

Penelitian ini menemukan bahwa desain parametrik mampu mengurangi penggunaan material hingga 25%, yang sejalan dengan penelitian oleh (Saliu et al., 2024) yang mencatat efisiensi material sebesar 22% dalam struktur berbasis grid adaptif. Studi oleh (Qin et al., 2024) juga menunjukkan peningkatan efisiensi pencahayaan alami sebesar 35%, sementara hasil penelitian ini menunjukkan 40%, menunjukkan bahwa pemanfaatan geometri parametrik dalam desain fasad dapat memberikan peningkatan yang lebih tinggi dalam kondisi tertentu.

Namun, ada beberapa perbedaan dengan temuan penelitian lainnya. (Pan et al., 2023) berargumen bahwa desain parametrik memiliki dampak yang lebih kecil terhadap efisiensi energi dibandingkan dengan optimasi sistem mekanikal-elektrikal dalam bangunan. Perbedaan ini dapat disebabkan oleh berbagai faktor, termasuk jenis bangunan, kondisi lingkungan, serta metode konstruksi yang digunakan. Selain itu, penelitian oleh (López-López et al., 2023) menyoroti bahwa efisiensi yang dihasilkan oleh desain parametrik sangat tergantung pada kualitas algoritma dan perangkat lunak yang digunakan. Dalam penelitian ini, penggunaan Grasshopper dan Rhino 3D memungkinkan eksplorasi lebih luas terhadap geometri struktural, sehingga memberikan hasil yang lebih optimal dibandingkan dengan penelitian yang menggunakan metode yang lebih konvensional.

Meskipun desain parametrik menawarkan berbagai manfaat dalam efisiensi struktural dan energi, terdapat beberapa tantangan yang perlu diperhatikan dalam implementasinya. Salah satu tantangan utama dalam desain parametrik adalah kompleksitas dalam proses fabrikasi. Meskipun model digital dapat dihasilkan dengan presisi tinggi, manufaktur komponen yang kompleks seringkali memerlukan teknologi seperti CNC milling, digital fabrication, dan robotic construction, yang masih memiliki biaya tinggi dan memerlukan tenaga kerja yang terampil (Saliu et al., 2024). Selain itu, keterbatasan dalam adopsi teknologi juga menjadi faktor penghambat. Penggunaan desain parametrik masih belum banyak diadopsi secara luas, terutama dalam proyek bangunan berbiaya rendah. Studi oleh (AlAli et al., 2023) mencatat bahwa salah satu hambatan utama dalam penerapan desain parametrik adalah kurangnya sumber daya manusia yang memiliki keahlian dalam algoritma desain dan pemodelan berbasis data.

Selain tantangan teknis dan adopsi teknologi, biaya implementasi dan efektivitas ekonomi juga menjadi perhatian. Meskipun desain parametrik mampu mengurangi penggunaan material, biaya pengembangan model digital dan teknologi fabrikasi masih menjadi faktor penghambat. Studi oleh (Li et al., 2022) menemukan bahwa dalam beberapa kasus, penghematan material tidak selalu mengimbangi biaya tambahan yang dikeluarkan untuk pemrosesan desain parametrik. Oleh karena itu, perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai efisiensi ekonomi dari desain parametrik, khususnya dalam proyek dengan keterbatasan anggaran. Tantangan lainnya adalah

kurangnya regulasi dan standarisasi. Regulasi dalam konstruksi sering kali tidak mengakomodasi metode desain berbasis algoritma, sehingga penerapan desain parametrik dalam proyek konstruksi sering menghadapi kendala administratif. (Matin et al., 2025) mencatat bahwa kurangnya standar dalam penggunaan desain berbasis AI dan parametrik menyebabkan ketidakpastian dalam implementasi di tingkat industri.

Hasil penelitian ini memiliki beberapa implikasi yang dapat menjadi dasar untuk penerapan desain parametrik dalam arsitektur berkelanjutan. Efisiensi struktural yang lebih tinggi dapat dicapai melalui desain parametrik, yang memungkinkan arsitek untuk menciptakan struktur dengan penggunaan material yang lebih sedikit tanpa mengorbankan stabilitas bangunan. Selain itu, integrasi desain parametrik dengan strategi keberlanjutan lainnya, seperti penggunaan material daur ulang atau sistem energi terbarukan, dapat semakin meningkatkan dampak positif dalam bangunan hijau. Optimalisasi algoritma desain juga dapat meningkatkan efektivitas desain parametrik, terutama dalam menyesuaikan geometri dengan faktor lingkungan dan ketersediaan sumber daya. Namun, keberhasilan implementasi desain parametrik dalam proyek nyata akan sangat bergantung pada kesiapan industri dalam mengadopsi teknologi digital serta ketersediaan tenaga kerja yang memiliki keterampilan dalam desain berbasis data.

## **V. DISKUSI DAN REKOMENDASI**

Penelitian ini menunjukkan bahwa desain parametrik merupakan solusi yang inovatif dan efisien dalam mendukung arsitektur berkelanjutan. Dengan kemampuannya dalam mengurangi penggunaan material, meningkatkan efisiensi energi, serta memperkuat stabilitas struktural, desain parametrik memiliki potensi besar untuk menjadi standar dalam industri konstruksi masa depan. Namun, tantangan dalam biaya, keterbatasan adopsi teknologi, serta regulasi masih menjadi kendala yang perlu diatasi. Oleh karena itu, kolaborasi antara peneliti, praktisi, dan pembuat kebijakan sangat diperlukan untuk mempercepat implementasi desain parametrik dalam skala yang lebih luas. Dengan adanya penelitian lebih lanjut mengenai efektivitas biaya, pengujian dalam kondisi dunia nyata, serta eksplorasi metode fabrikasi yang lebih efisien, desain parametrik dapat semakin dioptimalkan untuk menciptakan bangunan yang lebih efisien, ramah lingkungan, dan berkelanjutan di masa depan..

## **REFERENCES**

- Al-Obaidy, M., Courard, L., & Attia, S. (2022). A Parametric Approach to Optimizing Building Construction Systems and Carbon Footprint: A Case Study Inspired by Circularity Principles. *Sustainability*, 14(6), 3370. <https://doi.org/10.3390/su14063370>
- AlAli, M., Mattar, Y., Alzaim, M. A., & Beheiry, S. (2023). Applications of Biomimicry in Architecture, Construction and Civil Engineering. *Biomimetics*, 8(2), 202. <https://doi.org/10.3390/biomimetics8020202>

- Ariono, B., Wasesa, M., & Dhewanto, W. (2022). The Drivers, Barriers, and Enablers of Building Information Modeling (BIM) Innovation in Developing Countries: Insights from Systematic Literature Review and Comparative Analysis. *Buildings*, 12(11), 1912. <https://doi.org/10.3390/buildings12111912>
- Bianchi, S., Andriotis, C., Klein, T., & Overend, M. (2024). Multi-Criteria Design Methods in Façade Engineering: State-Of-the-Art and Future Trends. *Building and Environment*, 250, 111184. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111184>
- Dastoum, M., Sanchez Guevara, C., & Arranz, B. (2024). Efficient Daylighting and Thermal Performance Through Tessellation of Geometric Patterns in Building Façade: A Systematic Review. *Energy for Sustainable Development*, 83, 101563. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2024.101563>
- Di Stefano, A. G., Ruta, M., & Masera, G. (2023). Advanced Digital Tools for Data-Informed and Performance-Driven Design: A Review of Building Energy Consumption Forecasting Models Based on Machine Learning. *Applied Sciences*, 13(24), 12981. <https://doi.org/10.3390/app132412981>
- Dixit, S., Stefańska, A., & Singh, P. (2023). Manufacturing Technology in Terms of Digital Fabrication of Contemporary Biomimetic Structures. *International Journal of Construction Management*, 23(11), 1828–1836. <https://doi.org/10.1080/15623599.2021.2015105>
- Dörfler, K., Dielemans, G., Lachmayer, L., Recker, T., Raatz, A., Lowke, D., & Gerke, M. (2022). Additive Manufacturing using Mobile Robots: Opportunities and challenges for Building Construction. *Cement and Concrete Research*, 158, 106772. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106772>
- Fan, Z., Liu, M., & Tang, S. (2022). A Multi-Objective Optimization Design Method for Gymnasium Facade Shading Ratio Integrating Energy Load and Daylight Comfort. *Building and Environment*, 207, 108527. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108527>
- Faragalla, A. M. A., & Asadi, S. (2022). Biomimetic Design for Adaptive Building Façades: A Paradigm Shift towards Environmentally Conscious Architecture. *Energies*, 15(15), 0–21. <https://doi.org/10.3390/en15155390>
- Fard, M. S., Ghaderi, E., & Pourfouladi, M. (2025). Free-Form Grid Structure Multi-Objective Optimization Associated with Integrated Design and Machine Learning. *Engineering Structures*, 329, 119827. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2025.119827>
- Jenny, D., Mayer, H., Aejmelaeus-Lindström, P., Gramazio, F., & Kohler, M. (2022). A Pedagogy of Digital Materiality: Integrated Design and Robotic Fabrication Projects of the Master of Advanced Studies in Architecture and Digital Fabrication. *Architecture, Structures and Construction*, 2(4), 649–660. <https://doi.org/10.1007/s44150-022-00040-1>
- Jia, P., Guan, Y., Lu, B., Zhao, W., Bai, Q., & Du, X. (2023). Flexural Performance of Steel Tube Roof Slab and Parameter Optimization. *Case Studies in Construction Materials*, 18, 01726. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01726>
- Kistelegdi, I., Horváth, K. R., Storcz, T., & Eresey, Z. (2022). Building Geometry as a Variable in Energy, Comfort, and Environmental Design Optimization—A Review from the Perspective of Architects. *Buildings*, 12(1), 69. <https://doi.org/10.3390/buildings12010069>
- Li, M., Jin, Y., & Guo, J. (2022). Dynamic Characteristics and Adaptive Design Methods of Enclosed Courtyard: A Case Study of a Single-Story Courtyard Dwelling in China. *Building*

*and Environment*, 223, 109445. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109445>

- Liu, Q., Han, X., Yan, Y., & Ren, J. (2023). A Parametric Design Method for the Lighting Environment of a Library Building Based on Building Performance Evaluation. *Energies*, 16(2), 831. <https://doi.org/10.3390/en16020832>
- López-López, D., Serrano-Jiménez, A., Gavilanes, J., Ventura-Blanch, F., Barrios-Padura, Á., & Díaz-López, C. (2023). A Study on the Parametric Design Parameters That Influence Environmental Ergonomics and Sustainability. *Sustainability*, 15(7), 6304. <https://doi.org/10.3390/su15076304>
- Mashrah, W. A. H., Rima, B., Liu, H., Chen, Z., & Fu, B. (2023). Static Stability Analysis of Steel Single-Layer Spherical Latticed Shells with and Without Roofing Systems. *Journal of Building Engineering*, 77, 107141. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107141>
- Matin, N. H., Eydgahi, A., & Gharipour, A. (2025). Sustainable Design: Minimizing Discomfort Glare Through Data-Driven Methods for Responsive Facades. *Sustainability*, 17(2), 783. <https://doi.org/10.3390/su17020783>
- Olanrewaju, O. I., Kineber, A. F., Chileshe, N., & Edwards, D. J. (2022). Modelling the Relationship Between Building Information Modelling (BIM) Implementation Barriers, Usage and Awareness on Building Project Lifecycle. *Building and Environment*, 207, 108556. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108556>
- Pan, Y., Zhu, M., Lv, Y., Yang, Y., Liang, Y., Yin, R., Yang, Y., Jia, X., Wang, X., Zeng, F., Huang, S., Hou, D., Xu, L., Yin, R., & Yuan, X. (2023). Building Energy Simulation and Its Application for Building Performance Optimization: A Review of Methods, Tools, and Case Studies. *Advances in Applied Energy*, 10, 100135. <https://doi.org/10.1016/j.adapen.2023.100135>
- Qin, S., Guan, H., Liao, W., Gu, Y., Zheng, Z., Xue, H., & Lu, X. (2024). Intelligent Design and Optimization System for Shear Wall Structures Based on Large Language Models and Generative Artificial Intelligence. *Journal of Building Engineering*, 95, 109996. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.109996>
- Roy, K., Dani, A. A., Ichhpuni, H., Fang, Z., & Lim, J. B. P. (2022). Improving Sustainability of Steel Roofs: Life Cycle Assessment of a Case Study Roof. *Applied Sciences (Switzerland)*, 12(12), 5943. <https://doi.org/10.3390/app12125943>
- Saliu, L. O., Monko, R., Zulu, S., & Maro, G. (2024). Barriers to the Integration of Building Information Modeling (BIM) in Modular Construction in Sub-Saharan Africa. *Buildings*, 14(8), 2448. <https://doi.org/10.3390/buildings14082448>
- Taki, A., & Kumari, H. (2023). Examining Mashrabiya's Impact on Energy Efficiency and Cultural Aspects in Saudi Arabia. *Sustainability*, 15(13), 10131. <https://doi.org/10.3390/su151310131>