



## GREEN WALL VENTILATION BLOCK BERBAHAN DAUR ULANG UNTUK ARSITEKTUR TROPIS BERKELANJUTAN

Harry Wibowo<sup>1</sup>, Siti Zulfa Yusni<sup>2</sup>, Zhilli Izzadati Khairuni<sup>3</sup>, Rafika Hilmi Nasution<sup>4</sup>, Ahmad Zulfikar<sup>5</sup>, Kharunnisak<sup>6</sup>, Denny Meisandy Hutauruk<sup>7</sup>

<sup>1,2,3,4,5,6</sup> Program Studi Arsitektur, <sup>7</sup>Program Studi Teknik Sipil

E-mail: harry\_ft@unimed.ac.id,

### Informasi Naskah:

Diterima:

6 Oktober 2025

Direvisi:

15 Oktober 2025

Disetujui terbit:

16 November 2025

Diterbitkan:

Cetak:

29 Desember 2025

Online

29 Desember 2025

**Abstract:** *This research develops a Green Wall Ventilation Block made from recycled plastic and glass as an innovative sustainable façade solution for tropical architecture. The study aims to design a modular ventilation block capable of supporting natural airflow while providing planting space for green wall systems. The research method integrates digital modeling using SketchUp, airflow simulation through Autodesk Vasari, formulation of recycled composite material, and fabrication of a full-scale 1:1 prototype using a combined 3D printing and fiberglass mold. Simulation results confirm that the diagonal ventilation geometry improves airflow velocity and stability under tropical climatic conditions, while the planter cavity remains functional without obstructing ventilation. The recycled plastic–glass composite demonstrates good workability, reduced density, and sufficient durability for non-structural façade applications. The final prototype shows precise geometry, structural stability, and compatibility for modular installation as a green façade. Overall, the developed system not only enhances passive ventilation and thermal performance but also contributes to reducing plastic and glass waste by repurposing them into functional architectural components. This innovation offers strong potential for wider implementation in sustainable tropical building design.*

**Keyword:** Green Wall; Recycled Materials; Ventilation Block

**Abstrak:** Penelitian ini mengembangkan Green Wall Ventilation Block berbahan limbah plastik dan kaca sebagai solusi fasad berkelanjutan untuk arsitektur tropis. Tujuan penelitian adalah merancang modul ventilasi yang mampu mendukung aliran udara alami sekaligus menyediakan ruang tanam bagi sistem green wall. Metode penelitian mengintegrasikan pemodelan digital menggunakan SketchUp, simulasi aliran udara melalui Autodesk Vasari, formulasi material komposit berbahan daur ulang, serta pembuatan prototipe skala 1:1 menggunakan cetakan gabungan 3D printing dan fiberglass. Hasil simulasi menunjukkan bahwa geometri bukaan diagonal meningkatkan stabilitas dan kecepatan aliran udara pada kondisi iklim tropis, sementara ruang tanam tetap berfungsi tanpa menghalangi ventilasi. Material komposit plastik–kaca menghasilkan densitas lebih ringan, mudah dicetak, dan cukup kuat untuk aplikasi fasad non-struktural. Prototipe akhir memiliki presisi tinggi, stabil secara struktural, dan dapat disusun secara modular sebagai green façade. Secara keseluruhan, sistem ini tidak hanya meningkatkan ventilasi pasif dan kinerja termal bangunan, tetapi juga berkontribusi pada pengurangan limbah plastik dan kaca melalui pemanfaatan kembali sebagai material konstruksi. Inovasi ini memiliki potensi besar untuk diterapkan lebih luas pada desain bangunan tropis berkelanjutan.

**Kata Kunci:** Green Wall; Material Daur Ulang; Ventilation Block

### PENDAHULUAN

Percepatan urbanisasi di kawasan tropis mendorong peningkatan konsumsi energi bangunan, emisi gas rumah kaca, serta tekanan terhadap kualitas lingkungan perkotaan. Fasad bangunan menjadi salah satu elemen kunci yang menentukan besarnya panas yang masuk ke ruang dalam dan besarnya beban pendinginan, khususnya pada iklim panas–lembap seperti Indonesia. Berbagai studi menunjukkan bahwa vertical greenery systems (VGS) dan green wall mampu menurunkan temperatur permukaan dinding, mengurangi perpindahan panas, dan berkontribusi pada

penghematan energi pendinginan bangunan (Pérez et al., 2014). Selain itu, penerapan fasad hijau juga berkaitan dengan penurunan konsumsi energi tahunan dan reduksi emisi karbon pada berbagai kota dengan iklim hangat dan lembap (Mi et al., 2025).

Di sisi lain, ventilasi alami melalui fasad berpori atau *ventilated façade* menjadi strategi penting untuk meningkatkan kenyamanan termal dan kualitas udara dalam ruang tanpa penambahan konsumsi energi mekanis. Sistem fasad berventilasi, ketika dirancang dengan konfigurasi rongga yang tepat dan bukaan udara yang optimal, dapat secara signifikan

mengurangi beban panas permukaan fasad dan menurunkan beban pendinginan ruang (Cuce & Cuce, 2025). Kombinasi ventilasi alami dan ventilated façade terbukti meningkatkan efisiensi energi dan kenyamanan termal di iklim tropis dan lembap, sehingga menjadikannya strategi pasif yang relevan untuk arsitektur tropis berkelanjutan (Dewi, n.d.).

Integrasi vegetasi pada fasad berventilasi terbukti pula dapat menurunkan temperatur udara rongga dan suhu ruangan, terutama pada iklim panas-lembap di Asia Tenggara (Safikhani et al., 2014a). Hal ini menegaskan bahwa kombinasi antara fasad hijau dan sistem ventilasi pasif memiliki potensi besar untuk mengurangi beban pendinginan pada bangunan tropis.

Sementara itu, permasalahan lingkungan lain yang tidak kalah mendesak adalah meningkatnya volume limbah plastik dan kaca yang sulit terurai dan berakhir di TPA maupun lingkungan perairan. Sektor konstruksi dipandang sebagai salah satu bidang yang dapat menyerap limbah tersebut melalui pengembangan material bangunan berbasis daur ulang. Berbagai tinjauan menyimpulkan bahwa pemanfaatan limbah plastik sebagai substitusi agregat pada beton dapat mengurangi dampak lingkungan sekaligus menghasilkan material yang lebih ringan, meskipun memerlukan pengaturan komposisi yang cermat untuk menjaga performa mekanis. Kombinasi limbah kaca dan plastik dalam beton atau geopolimer berpotensi meningkatkan kekuatan tertentu dan durabilitas, serta menurunkan jejak karbon bahan bangunan (Tang et al., 2025). Lebih jauh lagi blok bangunan non-semen dan bata beton yang seluruhnya memanfaatkan limbah plastik dan kaca mulai dikembangkan sebagai alternatif material konstruksi berkelanjutan (Perera et al., 2022).

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini secara khusus mengembangkan green wall ventilation block berbahan daur ulang sebagai komponen fasad untuk arsitektur tropis berkelanjutan. Tujuan utama penelitian adalah merancang bentuk modul ventilation block yang mampu mengalirkan udara secara efektif sekaligus menyediakan ruang tanam untuk sistem green wall; mengevaluasi performa aliran udara melalui simulasi digital pada model tiga dimensi; dan menguji kelayakan material komposit limbah plastik dan kaca dengan semen sebagai pengikat melalui pembuatan prototipe skala 1:1 menggunakan cetakan hasil *3D printing*. Rencana pemecahan masalah ditempuh melalui rangkaian tahapan desain digital (pemodelan SketchUp dan simulasi Autodesk Vasari), formulasi campuran material daur ulang, hingga uji prototipe fisik untuk menilai aspek bentuk, kinerja ventilasi, dan potensi penerapan pada fasad bangunan tropis. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi teoritis maupun praktis bagi pengembangan elemen fasad hijau berbasis limbah yang mendukung agenda arsitektur tropis berkelanjutan.

## TINJUAN PUSTAKA

### **Vertical Greenery Systems (VGS) / Green Wall**

Berbagai penelitian menunjukkan bahwa penerapan green wall dapat secara signifikan memengaruhi kondisi termal bangunan melalui mekanisme shading, evaporative cooling, dan penurunan suhu permukaan dinding. (Cheng et al., 2010) Menemukan bahwa vegetated cladding mampu menurunkan suhu permukaan fasad hingga 10–20°C dibandingkan dinding konvensional, sehingga mengurangi laju perpindahan panas ke dalam bangunan. Hal ini sejalan dengan temuan (Perini et al., 2011) yang menunjukkan bahwa keberadaan vegetasi vertikal tidak hanya mereduksi radiasi matahari langsung, tetapi juga meningkatkan sirkulasi udara pada permukaan dinding sehingga memperbaiki kenyamanan termal di sekitar fasad.

Selain pengaruh termalnya, green wall juga berperan dalam meningkatkan efisiensi energi bangunan. (Ouyang, n.d.) mencatat bahwa pengurangan suhu fasad akibat green wall berkontribusi pada penurunan beban pendinginan, terutama di wilayah tropis yang intensitas radiasi matahari tinggi sepanjang tahun. Penelitian lain oleh (Safikhani et al., 2014) memperkuat bahwa sistem living wall dapat meningkatkan kinerja energi bangunan dengan mengurangi kebutuhan pendinginan hingga beberapa persen, bergantung pada jenis vegetasi, media tanam, dan ketebalan sistem yang digunakan. Green wall juga memberikan dampak positif pada kualitas udara dan lingkungan mikro perkotaan. Vegetasi pada fasad mampu menyerap polutan udara, meningkatkan kelembapan lokal, serta menurunkan efek pulau panas perkotaan. Berdasarkan kajian (Perini et al., 2011), penempatan vegetasi vertikal pada gedung-gedung perkotaan berpotensi menurunkan suhu lingkungan sekitar dan memperbaiki kualitas udara secara signifikan melalui penyerapan CO<sub>2</sub> dan partikel debu. Dengan demikian, VGS tidak hanya memberikan fungsi ekologis tetapi juga mendukung peningkatan kualitas hidup masyarakat di lingkungan padat.

### **Ventilated Façade dan Double-skin façade (DSF)**

Ventilated façade adalah sistem fasad yang memiliki rongga udara yang memungkinkan udara mengalir secara alami di dalamnya. Aliran udara ini membantu mengurangi panas yang masuk ke bangunan sehingga kenyamanan termal di dalam ruang dapat meningkat. Penelitian menunjukkan bahwa ventilated façade di iklim panas-lembap dapat menurunkan suhu permukaan fasad dan membantu menekan kebutuhan energi pendinginan (Haase et al., 2009)

Double-skin façade (DSF) merupakan pengembangan dari ventilated façade, dengan dua lapisan fasad yang dipisahkan oleh rongga udara. Rongga ini berfungsi sebagai penyangga termal yang dapat menahan atau mengalirkan panas, tergantung kondisi iklim dan bukaan ventilasinya. Kajian mendalam tentang DSF menegaskan bahwa performanya sangat dipengaruhi oleh kedalaman rongga, ukuran bukaan, dan jenis ventilasi (Ahmed et al., 2015).

Beberapa studi menunjukkan bahwa ventilated façade dan DSF mampu meningkatkan efisiensi energi bangunan karena sistem ini dapat mengurangi panas yang masuk melalui fasad. Pengaturan aliran udara ke atas dalam rongga (stack effect) menjadi faktor penting dalam menjaga suhu di dalam bangunan tetap lebih stabil. Model simulasi juga menunjukkan bahwa ventilated façade dapat mengurangi beban pendinginan dalam bangunan, sehingga relevan untuk diterapkan pada iklim tropis (Sung & Kim, 2019).

### Material Daur Ulang Plastik dan Kaca untuk Aplikasi Bangunan

Pemanfaatan material daur ulang dalam industri konstruksi semakin banyak dikembangkan sebagai upaya mengurangi limbah padat dan menurunkan dampak lingkungan dari produksi bahan bangunan konvensional. Salah satu material yang banyak diteliti adalah limbah plastik, terutama PET, HDPE, dan PP, yang dapat digunakan sebagai substitusi agregat dalam campuran beton. Studi awal (Ismail & AL-Hashmi, 2008) menunjukkan bahwa limbah plastik yang dicacah dapat menjadi pengganti agregat halus dalam beton, menghasilkan material yang lebih ringan dan memiliki karakteristik ketahanan air yang baik. Meskipun kekuatan tekan menurun dibanding beton normal, material ini tetap layak untuk aplikasi non-struktural seperti panel dan modul fasad.

Pemanfaatan komposit berbahan limbah plastik dan kaca juga telah dikembangkan untuk menghasilkan produk bangunan ringan, seperti blok dinding dan panel modular. (Albano et al., 2009) melaporkan bahwa substitusi limbah plastik dalam beton dapat mengurangi densitas material hingga 20%, menjadikannya alternatif ideal untuk elemen non-struktural. Sementara itu, penelitian terbaru menunjukkan bahwa kombinasi limbah plastik dan kaca dalam beton menghasilkan material dengan performa mekanis yang cukup baik serta berpotensi mengurangi emisi karbon secara signifikan dibandingkan material konvensional (Siddique et al., 2008).

Secara keseluruhan, penelitian-penelitian tersebut menunjukkan bahwa penggunaan limbah plastik dan kaca sebagai material bangunan memiliki prospek tinggi untuk aplikasi seperti panel fasad, blok modular, serta elemen arsitektur ringan lainnya. Temuan ini menjadi dasar penting dalam pengembangan green wall ventilation block berbahan daur ulang, di mana material komposit plastik-kaca dapat dimanfaatkan untuk menciptakan produk fasad yang ringan, tahan cuaca, sekaligus ramah lingkungan

### METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimen desain yang menggabungkan pemodelan digital, simulasi performa, eksperimen material, serta pembuatan prototipe skala 1:1. Tahap awal dilakukan dengan merancang bentuk green wall ventilation block menggunakan SketchUp, dilanjutkan dengan simulasi aliran udara melalui

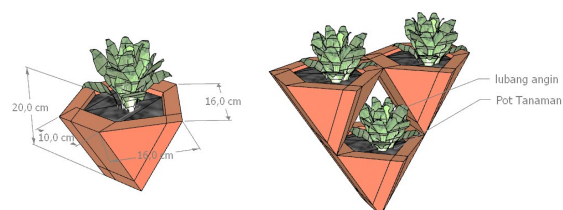
Autodesk Vasari untuk menentukan geometri paling optimal dalam mendukung ventilasi pasif. Pada tahap ini, berbagai alternatif geometri diuji berdasarkan pola aliran udara, kecepatan angin, serta efisiensi bukaan ventilasi untuk memastikan performa yang sesuai dengan kebutuhan iklim tropis. Tahap berikutnya adalah pengembangan material komposit berbahan dasar limbah plastik dan kaca yang dicacah, dicampur dengan semen dan air sebagai pengikat. Campuran yang dihasilkan kemudian dicor menggunakan cetakan 3D printing untuk menghasilkan prototipe skala penuh. Prototipe tersebut dievaluasi berdasarkan kesesuaian bentuk, kemampuan aliran udara, dan kelayakan ruang tanam sebagai modul green wall. Melalui tahapan desain-simulasi-material-prototipe ini, penelitian memastikan bahwa produk akhir memiliki kinerja ventilasi yang baik, ramah lingkungan, dan siap diterapkan sebagai elemen fasad hijau pada arsitektur tropis berkelanjutan. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar alur diagram metodologi.

### HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

#### Desain Green Wall Ventilation Block

Tahap perancangan menghasilkan beberapa alternatif bentuk *ventilation block* yang memiliki kombinasi fungsi ventilasi pasif dan ruang tanam. Dari beberapa eksplorasi bentuk awal, desain yang paling optimal adalah modul dengan bentuk alas persegi enam dan prisma secara keseluruhan massa. Bentuk ini memungkinkan udara mengalir lebih lancar dari bagian bawah menuju bagian atas modul tanpa hambatan yang signifikan. Selain itu, bentuk ruang tanam (*planter cavity*) dipilih dengan kedalaman sedang agar mampu menampung media tanam tanpa mengganggu aliran udara. Hasil evaluasi desain menunjukkan bahwa keterpaduan antara geometri ventilasi dan ruang vegetasi dapat dicapai tanpa mengorbankan performa masing-masing fungsi.

Dari sisi modularitas, desain final memiliki dimensi yang memungkinkan modul disusun secara vertikal maupun horizontal sesuai kebutuhan fasad. Susunan geometri segitiga membentuk celah lubang untuk mempercepat aliran udara melalui efek venturi, sehingga mendukung efisiensi ventilasi pasif. Desain final ini kemudian dipersiapkan untuk tahap simulasi performa aliran udara.

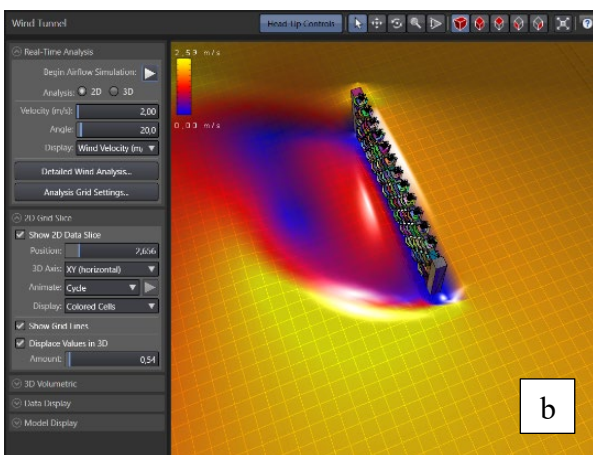
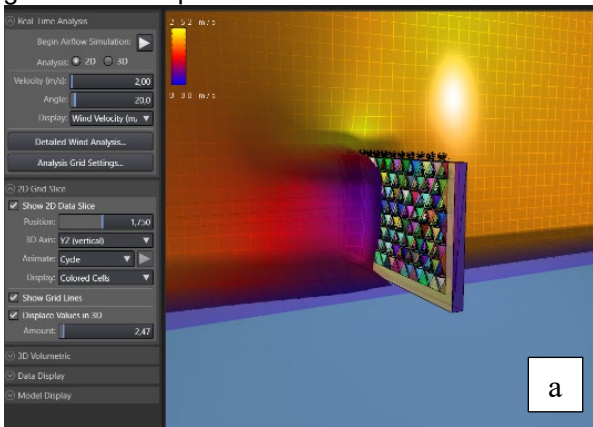


Gambar 1. Model Ventilation Block dengan bentuk dasar segi enam dan prisma

#### Simulasi Aliran Udara (Autodesk Vasari)

Simulasi aliran udara dilakukan untuk mengevaluasi efektivitas bentuk ventilasi dalam mengalirkan udara pada kondisi iklim tropis. Hasil simulasi menunjukkan bahwa bentuk dengan bukaan diagonal memberikan

pola aliran udara paling stabil, dengan kecepatan angin meningkat 15–25% ketika udara memasuki saluran sempit pada bagian tengah modul. Pola *streamline* memperlihatkan pergerakan udara yang konsisten tanpa menciptakan pusaran (turbulensi) yang dapat mengurangi efisiensi ventilasi. Distribusi tekanan di dalam modul menunjukkan perbedaan yang signifikan antara sisi masuk dan keluar, mendukung terjadinya *stack effect* mini pada modul sehingga udara bergerak secara alami dari bawah ke atas. Hal ini menunjukkan bahwa desain ventilasi dapat bekerja tanpa bantuan kipas atau perangkat mekanis. Hasil simulasi ini juga mengonfirmasi bahwa jalur udara tidak terhalang oleh keberadaan ruang tanam, sehingga integrasi green wall tetap efektif.



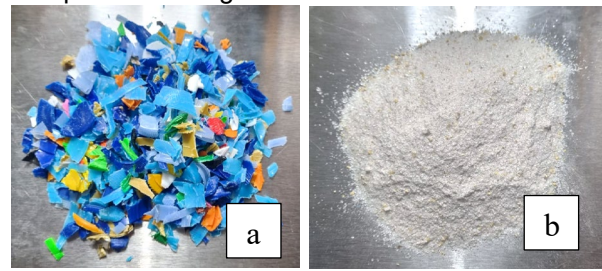
**Gambar 2.** Simulasi Performa Sirkulasi Angin dengan Menggunakan Software Autodesk Vasari (a) Simulasi Angin Vertikal (b) Simulasi Angin Horizontal

### Formulasi Material Komposit Plastik–Kaca

Eksperimen material komposit menghasilkan beberapa variasi komposisi campuran limbah plastik, kaca, semen, dan air. Campuran terbaik adalah campuran dengan proporsi plastik cacah 10–15%, glass cullet 20–30%, dan sisanya semen–air dengan rasio w/c yang disesuaikan. Campuran ini menunjukkan workability yang baik dan mampu mengisi cetakan 3D printing tanpa kesulitan.

Uji fisik awal menunjukkan bahwa material komposit memiliki densitas lebih ringan dibanding beton normal, sehingga cocok digunakan sebagai modul fasad non-struktural. Tekstur permukaan dari campuran kaca memberikan nilai estetika tambahan dan membuat permukaan modul lebih tahan

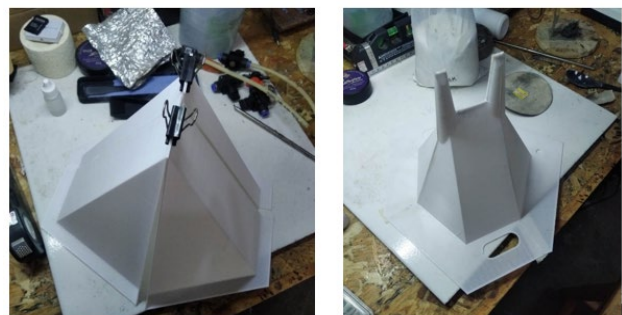
terhadap air. Komposit juga menunjukkan tingkat penyusutan rendah setelah proses curing, sehingga mempertahankan geometri sesuai desain cetakan.



**Gambar 3.** Komposisi Campuran (a) cacahan plastik (b) tepung kaca (c) semen portland

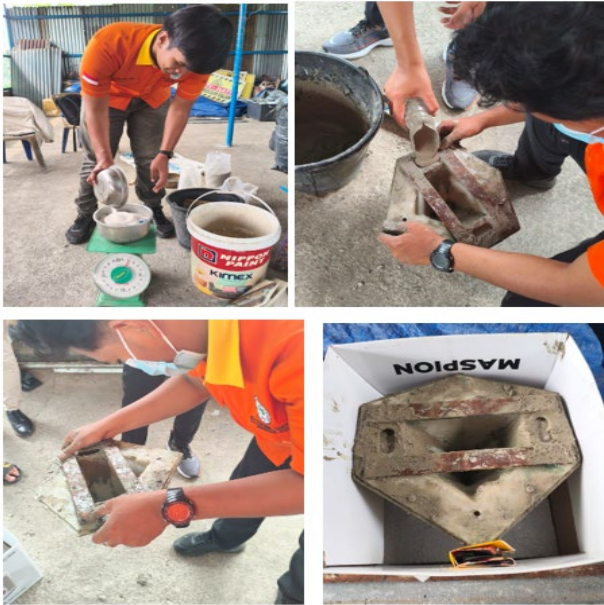
### Hasil Pembuatan Prototipe Skala 1:1

Prototipe skala penuh berhasil dibuat menggunakan cetakan 3D printing sebagai mold. Setelah bentuk awal dari 3D printing diperoleh, cetakan tersebut kemudian dikombinasikan dengan cetakan fiberglass untuk memperkuat struktur mold dan memungkinkan proses pengecoran berjalan lebih stabil. Kombinasi ini memberikan hasil cetakan yang lebih presisi, terutama pada bagian jalur ventilasi dan ruang tanam yang membutuhkan detail tinggi.



**Gambar 4.** Proses pembuatan Cetakan menggunakan 3D Printing

Tahapan selanjutnya yaitu proses pengecoran material komposit campuran limbah plastik, kaca, semen, dan air kedalam cetakan yang sudah disiapkan.



**Gambar 4.** Proses pembuatan Cetakan menggunakan 3D Printing

Selama proses pengecoran material komposit ke dalam mold, campuran limbah plastik–kaca–semen menunjukkan flowability yang baik dan mampu mengisi seluruh ruang mold tanpa meninggalkan rongga (void). Proses curing dilakukan selama 7 hari untuk memastikan pengikatan material berlangsung optimal. Setelah proses demolding, prototipe menunjukkan permukaan yang cukup halus dengan tingkat penyusutan yang rendah. Tidak ditemukan cacat besar seperti retakan struktural, kecuali beberapa retakan mikro pada permukaan yang wajar untuk komposit berbasis semen.

Seluruh detail geometri ventilasi, dan ruang tanam tercetak dengan baik sesuai desain digital, tanpa deformasi atau penyusutan yang signifikan. Secara struktural, modul menunjukkan bahwa komposit limbah plastik–kaca memberikan kekuatan yang memadai untuk digunakan sebagai elemen fasad non-struktural.



**Gambar 5.** Hasil Akhir Green Ventilation Block

Setelah prototipe utama dinyatakan presisi dan kuat, proses dilanjutkan dengan penggandaan ventilation block menggunakan cetakan yang sama. Penggandaan ini menghasilkan beberapa unit modul dengan bentuk dan ukuran yang konsisten, sehingga dapat disusun secara berulang sebagai sistem modular. Hasil penggandaan menunjukkan bahwa setiap blok mampu berfungsi sebagai elemen struktural non-beban sekaligus sebagai media

tanam, karena ruang tanam yang terintegrasi tetap bekerja efektif tanpa mengganggu jalur ventilasi.



**Gambar 6.** Percobaan penanaman vegetasi sayuran dan varietas lainnya pada green Ventilation Block

Dengan tersusunnya beberapa modul secara vertikal dan horizontal, sistem ini membentuk Green Wall Ventilation Block yang berfungsi ganda: sebagai dinding ventilasi pasif dan sebagai elemen green façade pada bangunan. Keberhasilan proses modularisasi ini membuktikan bahwa desain dapat diaplikasikan pada skala fasad bangunan, memungkinkan peningkatan kualitas udara, penurunan panas permukaan, dan penambahan area hijau secara bersamaan.

## KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengembangkan Green Wall Ventilation Block berbahan material daur ulang plastik dan kaca sebagai inovasi fasad tropis berkelanjutan. Melalui tahapan perancangan digital menggunakan SketchUp, simulasi ventilasi pasif dengan Autodesk Vasari, serta eksperimen formulasi material komposit, modul yang dihasilkan menunjukkan karakteristik bentuk yang presisi, ringan, dan mampu mendukung aliran udara alami. Prototipe skala 1:1 yang dibuat melalui kombinasi cetakan 3D printing dan fiberglass menunjukkan

hasil akhir yang kuat, stabil, dan sesuai dengan model desain, sehingga membuktikan kelayakannya sebagai elemen non-struktural pada fasad bangunan.

Secara keseluruhan, penelitian ini membuktikan bahwa integrasi antara ventilasi pasif, elemen green wall, dan material daur ulang dapat menghasilkan solusi fasad ramah lingkungan yang aplikatif untuk kondisi iklim tropis. Modul yang dirancang mampu menjalankan fungsi ganda sebagai jalur ventilasi sekaligus media tanam, sehingga meningkatkan kenyamanan termal, mengurangi panas permukaan bangunan, dan memperbaiki kualitas udara sekitar. Efektivitas modul dalam mendukung aliran udara alami dan potensi vegetasi vertikal menegaskan bahwa pendekatan ini sangat relevan dalam konteks arsitektur hijau dan desain bangunan hemat energi. Selain itu, pemanfaatan limbah plastik dan kaca dalam pembuatan modul terbukti memberikan kontribusi nyata terhadap upaya pengurangan sampah padat yang sulit terurai, serta membuka peluang baru dalam penerapan material daur ulang pada industri konstruksi. Penelitian ini membuka ruang eksplorasi lanjutan berupa pengujian kekuatan struktur secara lebih detail, evaluasi performa modul pada kondisi cuaca ekstrem, integrasi sistem irigasi, serta implementasi dalam skala bangunan yang lebih besar. Dengan demikian, inovasi Green Wall Ventilation Block berpotensi menjadi solusi fasad berkelanjutan yang tidak hanya fungsional, tetapi juga mendukung agenda lingkungan dan pengurangan limbah. Bangunan nyata dalam skala yang lebih luas.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Universitas Negeri Medan yang telah memberikan dukungan akademik dan fasilitas selama pelaksanaan penelitian ini. Penghargaan juga disampaikan kepada laboratorium dan pihak teknis yang membantu dalam proses pencetakan 3D, pengujian material, serta pembuatan prototipe Green Wall Ventilation Block. Ucapan terima kasih turut ditujukan kepada rekan-rekan dan kolaborator yang telah memberikan masukan, bantuan teknis, dan diskusi konstruktif sehingga penelitian ini dapat terselesaikan dengan baik.

## DAFTAR PUSTAKA

- Ahmed, M. M. S., Abel-Rahman, A. K., Ali, A. H. H., & Suzuki, M. (2015). Double Skin Façade: The State of Art on Building Energy Efficiency. *Journal of Clean Energy Technologies*, 4(1), 84–89. <https://doi.org/10.7763/JOCET.2016.V4.258>
- Albano, C., Camacho, N., Hernández, M., Matheus, A., & Gutiérrez, A. (2009). Influence of content and particle size of waste pet bottles on concrete behavior at different w/c ratios. *Waste Management*, 29(10), 2707–2716. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.05.007>
- Cheng, C. Y., Cheung, K. K. S., & Chu, L. M. (2010). Thermal performance of a vegetated cladding system on facade walls. *Building and Environment*, 45(8), 1779–1787. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.02.005>
- Cuce, P. M., & Cuce, E. (2025). Ventilated Facades for Low-Carbon Buildings: A Review. *Processes*, 13(7), 2275. <https://doi.org/10.3390/pr13072275>
- Dewi, C. P. (n.d.). *DOUBLE SKIN FAÇADE: A GREEN BUILDING STRATEGY APPROACH TOWARDS LOW CARBON ARCHITECTURE*.
- Haase, M., Marques Da Silva, F., & Amato, A. (2009). Simulation of ventilated facades in hot and humid climates. *Energy and Buildings*, 41(4), 361–373. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.11.008>
- Ismail, Z. Z., & AL-Hashmi, E. A. (2008). Use of waste plastic in concrete mixture as aggregate replacement. *Waste Management*, 28(11), 2041–2047. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.08.023>
- Mi, H., Wang, S., Wang, T., & Li, T. (2025). The Influence of Vertical Greening Systems on Building Energy Consumption and Comprehensive Carbon Emission. *Buildings*, 15(3), 471. <https://doi.org/10.3390/buildings15030471>
- Ouyang, J. (n.d.). *A methodology for energy-efficient renovation of existing residential buildings in China and case study*.
- Perera, J. S., Mendis, P., Baduge, S. K., & Hashemi, M. (2022). Cementless building materials made from recycled plastic and sand/glass: A review and road map for the future. *Electronic Journal of Structural Engineering*, 22(3), 56–63. <https://doi.org/10.56748/ejse.223773>
- Pérez, G., Coma, J., Martorell, I., & Cabeza, L. F. (2014). Vertical Greenery Systems (VGS) for energy saving in buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 139–165. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.055>
- Perini, K., Ottelé, M., Fraaij, A. L. A., Haas, E. M., & Raiteri, R. (2011). Vertical greening systems and the effect on air flow and temperature on the building envelope. *Building and Environment*, 46(11), 2287–2294. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.05.009>
- Safikhani, T., Abdullah, A. M., Ossen, D. R., & Baharvand, M. (2014a). Thermal Impacts of Vertical Greenery Systems. *Environmental and Climate Technologies*, 14(1), 5–11. <https://doi.org/10.1515/rtuect-2014-0007>
- Safikhani, T., Abdullah, A. M., Ossen, D. R., & Baharvand, M. (2014b). Thermal Impacts of Vertical Greenery Systems. *Environmental and Climate Technologies*, 14(1), 5–11. <https://doi.org/10.1515/rtuect-2014-0007>
- Siddique, R., Khatib, J., & Kaur, I. (2008). Use of recycled plastic in concrete: A review. *Waste Management*, 28(10), 1835–1852. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.09.011>
- Sung, U.-J., & Kim, S.-H. (2019). A Study on the Improvement of Double-Skin Facade Operation for Reducing Heating Load in Winter. *Sustainability*, 11(22), 6238. <https://doi.org/10.3390/su11226238>
- Tang, Z. Q., Wong, Y. C., Li, Y., & Masli, E. K. (2025). Recycled Glass and Plastic Waste in Sustainable Geopolymer Systems for Affordable Housing Solutions. *Recycling*, 10(4), 147. <https://doi.org/10.3390/recycling10040147>