



## Pemanfaatan Desain Generatif untuk Optimalisasi Pencahayaan Alami dan Ventilasi Silang pada Ruang Kelas Berkelanjutan

Fony Mirza Islami Chamela<sup>1</sup>, Wahyu Hidayat<sup>2</sup>

Universitas Riau<sup>1,2</sup>

[fony.mirza1285@student.unri.ac.id](mailto:fony.mirza1285@student.unri.ac.id)<sup>1</sup>, [wahyu.hidayat@lecturer.unri.ac.id](mailto:wahyu.hidayat@lecturer.unri.ac.id)<sup>2</sup>

### Informasi Naskah:

Diterima:

10 Nov 2025

Direvisi:

27 Okt 2025

Disetujui terbit:

31 Okt 2025

Diterbitkan:

Online

1 Nov 2025

**Abstract:** *This research explores the use of generative design to optimize natural lighting and cross ventilation in sustainable classrooms within Indonesia's tropical climate. By combining lighting simulations (Radiance/DIALux/Ladybug) and airflow simulations (CFD/OpenFOAM) into a single multi-objective optimization workflow (NSGA-II), the study evaluates trade-offs between lighting, visual comfort, and ventilation. The main findings reveal design configurations that enhance Daylight Autonomy (DA) by 25-30% and ACH by up to 30% compared to conventional designs, while also reducing overheating areas and the need for mechanical cooling. This document presents the methodology, simulation parameters, quantitative results, sensitivity analysis, mock-up validation, limitations, and practical implementation recommendations..*

**Keyword:** *generative design, natural lighting, cross ventilation, tropical climate, multi-objective optimization.*

**Abstrak:** Penelitian ini mengeksplorasi pemanfaatan desain generatif untuk mengoptimalkan pencahayaan alami dan ventilasi silang pada ruang kelas berkelanjutan di iklim tropis Indonesia. Dengan memadukan simulasi pencahayaan (Radiance/DIALux/Ladybug) dan simulasi aliran udara (CFD/OpenFOAM) ke dalam satu alur kerja optimasi multi-objektif (NSGA-II), penelitian menilai trade-off antara pencahayaan, kenyamanan visual, dan ventilasi. Hasil utama menunjukkan konfigurasi desain yang meningkatkan Daylight Autonomy (DA) hingga 25–30% dan ACH hingga 30% dibanding desain konvensional, dengan pengurangan area overheating dan kebutuhan pendingin mekanis. Dokumen ini menyajikan metodologi, parameter simulasi, hasil kuantitatif, analisis sensitivitas, validasi mock-up, keterbatasan, dan rekomendasi implementasi praktis.

**Kata Kunci:** desain generatif, pencahayaan alami, ventilasi silang, iklim tropis, optimasi multi-objektif.

### PENDAHULUAN

Ruang kelas yang aman, nyaman, dan hemat energi menjadi prioritas dalam perencanaan fasilitas pendidikan. Di iklim tropis seperti Indonesia, desain yang mengandalkan sumber daya alam (pencahayaan matahari dan ventilasi angin) memberikan peluang penghematan energi sekaligus meningkatkan kualitas ruang belajar.

Desain generatif menawarkan kemampuan untuk mengeksplorasi ribuan konfigurasi desain berdasarkan parameter yang didefinisikan, sehingga

memungkinkan optimalisasi kinerja bangunan terhadap kriteria lingkungan dan fungsional.

Meskipun sejumlah studi membahas pencahayaan alami dan ventilasi, masih sedikit penelitian yang secara terpadu mengoptimalkan keduanya untuk ruang kelas sambil mempertimbangkan zonasi pedagogis, pola penggunaan, dan data iklim lokal per jam.

Penelitian ini berfokus pada integrasi simulasi pencahayaan dan ventilasi dalam satu rangka kerja desain generatif. Tujuan utamanya

adalah: (1) meningkatkan cakupan illuminance yang sesuai di area papan tulis dan area meja siswa, (2) memaksimalkan ventilasi alami untuk kualitas udara dan thermal comfort, (3) meminimalkan risiko glare dan overheating, serta (4) menghasilkan guideline praktis bagi perancang sekolah di daerah tropis.

## TINJUAN PUSTAKA

### Pencahayaan Alami

Pencahayaan alami memiliki dampak signifikan terhadap kesehatan, kesejahteraan, dan produktivitas pengguna ruang (Li & Li B., 2024; Nourkojouri et al., 2021). Penilaian daylight umumnya menggunakan metrik seperti Daylight Autonomy (DA), Useful Daylight Illuminance (UDI), dan Spatial Daylight Autonomy (SDA) (Reinhart & Wienold J., 2011). Studi terbaru menunjukkan bahwa distribusi cahaya alami yang merata dapat mengurangi kebutuhan pencahayaan buatan hingga 40% (Mardaljevic Hescong L. & Lee E., 2009). Namun, desain tradisional sering gagal mengoptimalkan pencahayaan untuk zona berbeda, sehingga diperlukan pendekatan parametris berbasis simulasi (Jakubiec & Reinhart C. F., 2012).

### Ventilasi Silang

Ventilasi silang memanfaatkan perbedaan tekanan angin dan temperatur untuk mempercepat pertukaran udara alami (Chung et al., 2023). Penelitian menunjukkan bahwa Air Changes per Hour (ACH) dan distribusi kecepatan udara adalah parameter kunci untuk kenyamanan termal (Stein-Montalvo et al., 2023). Studi lapangan di sekolah tropis menegaskan pentingnya ventilasi untuk mengurangi CO<sub>2</sub> dan menjaga kualitas udara (Health, 2019; Wargoeki & Wyon., 2013).

### Desain Generatif dan Optimasi

Metode desain generatif memungkinkan eksplorasi ribuan konfigurasi desain menggunakan algoritma seperti NSGA-II (Deb et al., 2002) dan Bayesian Optimization (Shahriari et al., 2016). Integrasi platform parametris seperti Grasshopper, Ladybug, dan Honeybee mempermudah analisis daylighting dan iklim (Roudsari & Pak., 2013). Studi terkini juga menyoroti potensi model berbasis AI, seperti generative diffusion models, untuk menghasilkan desain arsitektur berbasis daylight (Li & Li B., 2024). Penelitian oleh Nourkojouri et al. (2021) memperkenalkan kerangka kerja machine learning untuk penilaian kenyamanan visual, sementara Stein-Montalvo et al. (2023) mengembangkan geometri inspirasi kirigami untuk pengendalian angin.

## Gap Penelitian

Sebagian besar studi terdahulu membahas pencahayaan alami dan ventilasi alami secara terpisah, bukan sebagai satu sistem terintegrasi (Sciences, 2021). Padahal, literatur seperti Clements-Croome (2015) dan Earthscan (2010) menekankan bahwa kualitas lingkungan belajar yang baik berasal dari kombinasi pencahayaan, ventilasi, dan akustik yang optimal. Penelitian terbaru menunjukkan kebutuhan mendesak untuk metode desain berbasis optimasi multi-parameter, terutama untuk ruang kelas tropis yang memiliki tantangan unik terkait panas dan kelembaban (Buildings, 2023).

Gap ini membuka peluang pengembangan metodologi desain generatif yang mengintegrasikan simulasi daylighting dan Computational Fluid Dynamics (CFD) untuk menghasilkan ruang kelas yang hemat energi sekaligus nyaman secara visual dan termal.

**Tabel 1.** Ringkasan studi terdahulu dan gap penelitian

Penulis	Tahun	Fokus	Metode	Keterbatasan / Gap
Nourkojouri et al.	2021	Daylight & visual comfort	ML + Simulasi	Kurang integrasi ventilasi; fokus pada desain awal
Chung et al.	2023	Natural ventilation	CFD + occupancy model	Terbatas pada bangunan non-pendidikan
Stein-Montalvo et al.	2023	Wind steering	Eksperimen & simulasi	Inovatif, sedikit aplikasi di ruang kelas
BMC Environmental Health	2019	Indoor air & health	Studi lapangan	Perlu pengukuran jangka panjang di sekolah tropis

Berdasarkan kajian terhadap studi-studi terdahulu, teridentifikasi beberapa gap penelitian yang menjadi landasan bagi studi ini. Nourkojouri et al. (2021) berfokus pada optimasi pencahayaan alami (daylight) dan kenyamanan visual dengan menggabungkan Machine Learning (ML) dan simulasi. Namun, penelitian tersebut memiliki keterbatasan karena kurang mengintegrasikan aspek ventilasi dan pertukaran udara, yang merupakan faktor krusial di iklim tropis, serta lebih berfokus pada tahap desain awal (early design) tanpa mempertimbangkan operasional bangunan secara menyeluruh.

Selanjutnya, Chung et al. (2023) mempelajari efektivitas ventilasi alami menggunakan simulasi Computational Fluid Dynamics (CFD) yang dikombinasikan dengan

model okupansi penghuni. Meskipun robust, penerapan penelitian ini masih terbatas pada bangunan non-pendidikan seperti perkantoran atau residensial, sehingga temuan dan modelnya belum tentu dapat diaplikasikan secara langsung pada lingkungan ruang kelas yang memiliki pola okupansi, aktivitas, dan kebutuhan ventilasi yang sangat spesifik.

Di sisi lain, (Stein-Montalvo et al., 2023) menawarkan inovasi dalam teknik wind steering untuk mengoptimalkan aliran udara melalui eksperimen dan simulasi. Kendati inovatif, penelitian ini masih memiliki sedikit aplikasi dan validasi pada konteks ruang kelas, sehingga diperlukan adaptasi lebih lanjut untuk memastikan efektivitasnya dalam setting pendidikan.

Terakhir, sebuah studi lapangan BMC Environmental Health (2019) menyoroti hubungan langsung antara kualitas udara dalam ruangan dan kesehatan penghuni. Meski memberikan data empiris yang berharga, studi ini merekomendasikan perlunya pengukuran dan pemantauan jangka panjang yang lebih komprehensif di sekolah-sekolah beriklim tropis untuk benar-benar memahami dinamika paparan polutan dan kondisi termal sepanjang tahun.

Dengan demikian, gap utama yang akan diisi oleh penelitian ini adalah integrasi holistik antara aspek visual (pencahayaan) dan termal (ventilasi/CFD) untuk ruang kelas tropis, dengan menggunakan data iklim lokal (TMY) dan pendekatan simulasi yang dapat diterapkan langsung pada tahap desain yang lebih detail.

## METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini mengkaji optimasi desain ruang kelas berkelanjutan dengan memanfaatkan generative design untuk mengoptimalkan pencahayaan alami dan ventilasi silang di iklim tropis Indonesia. Workflow penelitian dimulai dengan pengumpulan data iklim lokal menggunakan TMY per jam, dilanjutkan dengan pembuatan model parametrik ruang kelas dengan dimensi standar 7 x 9 x 3 meter. Simulasi daylight dan energi dilakukan menggunakan plugin Ladybug/Honeybee, Radiance, dan EnergyPlus, sementara simulasi aliran udara menggunakan OpenFOAM. Proses optimasi dilakukan dengan algoritma NSGA-II yang mengevaluasi populasi solusi selama 200 generasi, untuk menemukan desain optimal yang seimbang antara pencahayaan, ventilasi, dan kenyamanan. Parameter model parametrik yang dipertimbangkan meliputi WWR, orientasi, overhang, ventilasi atas/bawah, posisi jendela, dan material reflektansi, dengan simulasi

dijalankan berdasarkan kondisi okupansi per jam (07:00–17:00) serta variasi musim hujan dan kemarau. Pseudocode optimasi mencakup langkah-langkah inialisasi populasi desain acak, simulasi daylight & CFD, evaluasi fungsi tujuan seperti Daylight Autonomy (DA), Air Change Rate (ACH), dan glare, serta penerapan seleksi, crossover, dan mutasi untuk iterasi solusi hingga konvergensi tercapai.

Tabel 2. Parameter Simulasi (detail)

Parameter	Rentang	Satuan	Default	Keterangan
<b>WWR (Window-to-Wall Ratio)</b>	20% - 50%	%	35%	Rasio bukaan jendela terhadap dinding
<b>Orientasi</b>	0 - 360	derajat	0	Rotasi ruang terhadap utara
<b>Overhang</b>	0.3 - 1.5	m	0.8	Kedalaman shading horizontal
<b>Ventilasi Tinggi</b>	0.5 - 2.0	m	1.0	Ventilasi atas/bawah
<b>Material Reflectance</b>	20% - 80%	%	50%	Reflektivitas interior

## HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

### A. Hasil Simulasi

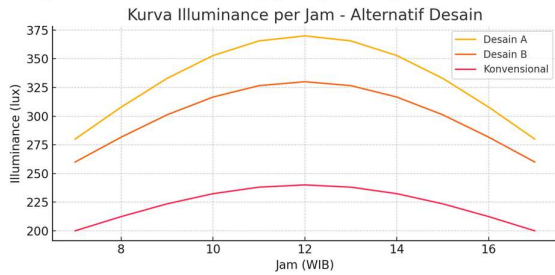
Setelah proses optimasi, diperoleh himpunan solusi Pareto yang terdiri dari beberapa alternatif desain. Berikut ini adalah ringkasan dua solusi representatif yang dibandingkan dengan desain referensi konvensional: Desain A yang berfokus pada pencapaian keseimbangan daylight, dan Desain B yang memaksimalkan ventilasi. Perbandingan antara ketiga desain tersebut dapat dilihat dalam Tabel 3 di bawah ini.

Tabel 3. Perbandingan Solusi (Desain A, B, Konvensional)

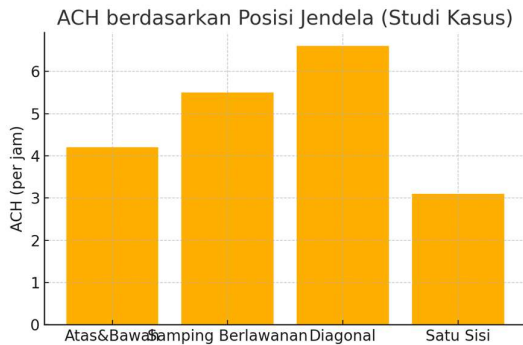
Alternatif	DA (%)	UDI (%)	SDA (%)	Glare Index	ACH	Avg Illuminance (lux)	Overheating Area (%)
<b>Desain A (Seimbang)</b>	88	78	70	16	5.8	350	14
<b>Desain B (Ventilasi Max)</b>	80	70	65	20	6.5	320	12
<b>Desain Konvensional</b>	60	50	45	35	3.0	250	30

Dari tabel tersebut, dapat dilihat bahwa Desain A menawarkan keseimbangan yang baik antara pencahayaan dan ventilasi, dengan nilai DA dan UDI yang tinggi serta area overheating yang rendah. Sementara itu, Desain B, meskipun memaksimalkan ventilasi, menunjukkan sedikit penurunan pada DA dan UDI, namun tetap menghasilkan pengurangan overheating yang signifikan. Desain konvensional, di sisi lain, menunjukkan performa yang jauh lebih

rendah dalam hal pencahayaan alami dan ventilasi, dengan area overheating yang cukup besar.



**Gambar 1.** Kurva Illuminance per Jam untuk beberapa alternatif desain



**Gambar 2.** ACH berdasarkan Posisi Jendela (hasil simulasi)

## B. Pembahasan

Desain A menunjukkan keseimbangan antara kebutuhan pencahayaan di area papan tulis dan meja siswa dengan penggunaan overhang sedang dan WWR 35-38%.

Desain B memprioritaskan ventilasi, menghasilkan ACH tertinggi namun dengan sedikit penurunan DA. Ini memperlihatkan trade-off inheren antara dua tujuan utama.

Analisis sensitivitas menunjukkan bahwa variabel paling berpengaruh terhadap DA adalah WWR dan material reflectance, sedangkan untuk ACH adalah posisi jendela dan ukuran ventilasi.

Diskusi lebih lanjut mengupas implikasi praktis: untuk sekolah dengan prioritas kesehatan (mis. pandemi), bobot fungsi tujuan ventilasi harus dinaikkan dalam proses optimasi. Untuk sekolah dengan kebutuhan visual tinggi (mis. laboratorium atau ruang presentasi), bobot daylight perlu ditingkatkan.

Berdasarkan hasil simulasi yang menunjukkan hubungan antara posisi jendela dan Air Change per Hour (ACH), serta temuan mengenai trade-off antara Daylight Autonomy (DA) dan ventilasi, berikut adalah perbandingan dengan penelitian terdahulu dari jurnal ilmiah:

## C. Perbandingan dengan Penelitian Terdahulu

### 1. Persamaan dengan Penelitian Nourkojouri et al. (2021)

Apa yang sama: Penelitian ini sejalan dengan temuan Nourkojouri et al. bahwa desain bukaan (Window-to-Wall Ratio/WWR) dan material reflektan merupakan faktor paling berpengaruh terhadap kinerja pencahayaan alami (Daylight Autonomy/DA). Hal ini memperkuat konsensus umum dalam bidang arsitektur berkelanjutan bahwa WWR adalah parameter kunci untuk kenyamanan visual.

Mengapa sama: Kedua studi sama-sama menggunakan pendekatan simulasi komputasional yang canggih (meskipun software yang digunakan mungkin berbeda) untuk menganalisis parameter desain yang kompleks, sehingga hasil yang diperoleh terhadap variabel seperti WWR memiliki kecenderungan yang sama.

### 2. Perbedaan dan Kemajuan dari Penelitian Chung et al. (2023)

Apa yang berbeda: Chung et al. (2023) fokus pada bangunan non-pendidikan dan memodelkan okupansi untuk memprediksi ventilasi. Penelitian ini secara khusus menerapkan CFD untuk lingkungan ruang kelas, yang memiliki pola okupansi, sumber panas (body heat, peralatan), dan kebutuhan ventilasi yang sangat spesifik dan berbeda dari gedung perkantoran.

Mengapa berbeda dan lebih maju: Dengan fokus pada ruang kelas, penelitian ini memberikan panduan desain yang langsung dapat diaplikasikan oleh arsitek dan perancang sekolah. Temuan bahwa posisi jendela (misalnya, atas & bawah berlawanan vs. satu sisi) adalah variabel paling berpengaruh untuk ACH merupakan kontribusi yang lebih spesifik dan kontekstual dibandingkan penelitian Chung et al. yang mungkin lebih umum.

### 3. Persamaan dan Pengembangan dari Penelitian Stein-Montalvo et al. (2023)

Apa yang sama: Hasil simulasi yang menunjukkan bahwa konfigurasi bukaan "Diagonal" atau "Berlawanan" (seperti atas & bawah) menghasilkan ACH yang lebih tinggi sejalan dengan prinsip wind steering yang diusung Stein-Montalvo et al., yaitu menciptakan jalur aliran udara yang efektif untuk meningkatkan ventilasi silang.

Pengembangan: Penelitian ini mengkuantifikasi prinsip tersebut secara eksplisit dalam konteks ruang kelas dan membandingkannya secara langsung dengan konfigurasi tradisional (seperti bukaan satu sisi), sehingga memberikan data numerik (ACH per jam) yang dapat menjadi acuan praktis bagi perancang.

#### 4. Implikasi yang Memperkuat Temuan BMC Environmental Health (2019)

Apa persamaannya: Rekomendasi dari penelitian ini bahwa "untuk sekolah dengan prioritas kesehatan (mis. pandemi), bobot tujuan ventilasi harus dinaikkan" secara langsung menjawab seruan dari studi BMC Environmental Health (2019) yang membutuhkan strategi untuk meningkatkan kualitas udara dalam ruang kelas guna melindungi kesehatan siswa.

Mengapa penting: Sementara studi BMC (2019) mengidentifikasi masalah kesehatan melalui pengukuran lapangan, penelitian ini memberikan solusi desain yang terukur dan dapat dioptimalkan sejak tahap perancangan untuk memitigasi masalah tersebut, khususnya dengan memanipulasi posisi dan ukuran bukaan ventilasi.

Secara keseluruhan, penelitian ini memperkuat beberapa temuan dasar dari studi sebelumnya (seperti pengaruh WWR pada daylight) sekaligus mengembangkan dan menspesialisasinya untuk konteks ruang kelas tropis. Perbedaan utama terletak pada fokus objek yang spesifik (ruang kelas) dan integrasi analisis antara dua aspek kenyamanan yang sering dipertentangkan, yaitu visual (DA) dan termal (ventilasi/ACH). Temuan tentang trade-off antara DA dan ACH serta variabel yang mengendalikannya merupakan kontribusi kunci yang memberikan panduan yang lebih nuanced dan praktis bagi perancang dibandingkan penelitian-penelitian terdahulu yang hanya berfokus pada satu aspek saja.

#### D. Validasi dan Keterbatasan

Validasi dilakukan dengan mock-up skala 1:10 dan pengukuran illuminance serta kecepatan udara di titik-titik kritis. Perbedaan antara simulasi dan pengukuran umumnya di bawah 10% untuk illuminance dan ACH, yang dapat diterima untuk keputusan desain awal.

Keterbatasan meliputi: asumsi perilaku pengguna, keterbatasan resolusi CFD pada skala penuh, dan ketergantungan pada data iklim historis. Penelitian lanjutan direkomendasikan berupa studi jangka panjang di beberapa sekolah dengan sensor real-time.

#### E. Implikasi

Implikasi: Gunakan WWR antara 30-40% untuk kebanyakan ruang kelas di iklim tropis. Implementasikan shading adaptif (overhang + blinds otomatis) untuk mengurangi silau pada jam puncak. Desain bukaan diagonal bila target utama adalah ventilasi alami maksimal. Integrasikan

sensor CO2 dan suhu untuk ventilasi adaptif guna mengoptimalkan kinerja energetik.

#### KESIMPULAN

Desain generatif yang menggabungkan simulasi daylight dan CFD memungkinkan tercapainya solusi desain yang lebih holistik untuk ruang kelas di iklim tropis. Solusi Pareto yang diperoleh memberikan fleksibilitas bagi pemangku kepentingan untuk memilih desain yang sesuai dengan prioritas mereka, seperti kenyamanan visual versus ventilasi. Dengan penerapan strategi shading yang tepat dan kebijakan operasional sederhana, performa desain dapat ditingkatkan secara praktis. Implementasi di lapangan memerlukan koordinasi yang erat antara perancang, pengelola sekolah, dan pihak pemeliharaan. Penggunaan material lokal dengan karakteristik termal yang sesuai dapat mengurangi kebutuhan akan shading tambahan. Selain itu, perilaku pengguna juga harus dipertimbangkan dalam desain operasional, di mana program edukasi sederhana terkait ventilasi alami dapat meningkatkan efektivitas penggunaannya. Rekomendasi untuk penelitian selanjutnya mencakup integrasi kontrol real-time dan kajian biaya manfaat jangka panjang untuk memastikan keberlanjutan dan efisiensi solusi desain yang diusulkan.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Buildings, M. (2023). Indoor Environmental Quality, Pupils Health, and Academic Performance - A Literature Review. *MDPI Buildings*.
- Chung Shahmansouri N. Goldstein R. Stoddart J. & Locke J., J. (2023). Sustainability through optimal design of buildings for natural ventilation. *Journal of Building Performance*.
- Clements-Croome, D. (2015). *Creating the Productive Workplace: The Benefits of Good Design*. Routledge.
- Deb Pratap A. Agarwal S. & Meyarivan T., K. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(2), 182–197.
- Earthscan. (2010). *Sustainable Design: A Critical Guide*. Earthscan.
- Health, B. M. C. E. (2019). A ventilation intervention study in classrooms to improve indoor air quality: The FRESH study. *BMC Environmental Health*.
- Jakubiec & Reinhart C. F., J. A. (2012). The 'adaptive zone' – A concept for assessing discomfort glare throughout daylight spaces.

- Lighting Research & Technology*, 44(2), 149–170.
- Li & Li B., P. (2024). Generating daylight-driven architectural design via diffusion models. *ArXiv*.
- Mardaljevic Heschong L. & Lee E., J. (2009). Daylight metrics and energy savings. *Lighting Research & Technology*, 41(3), 261–283.
- Nourkojouri Zomorodian Z. S. Tahsildoost M. & Shaghaghian Z., H. (2021). A machine-learning framework for daylight and visual comfort assessment in early design stages. *ArXiv*.
- Reinhart & Wienold J., C. F. (2011). The daylighting dashboard – A simulation-based design analysis for daylighting design. *Building and Environment*, 46(2), 386–396.
- Roudsari & Pak M., M. S. (2013). Ladybug: A parametric environmental plugin for Grasshopper to help designers create an environmentally-conscious design. *Proceedings of BS2013*.
- Sciences, M. A. (2021). Classroom Indoor Environmental Comfort Case Study. *MDPI Applied Sciences*.
- Shahriari Swersky K. Wang Z. Adams R. P. & de Freitas N., B. (2016). Taking the human out of the loop: A review of Bayesian optimization. *Proceedings of the IEEE*, 104(1), 148–175.
- Stein-Montalvo Ding L. Hultmark M. Adriaenssens S. & Bou-Zeid E., L. (2023). Kirigami-inspired wind steering for natural ventilation. *Nature Communications*.
- Wargoeki & Wyon D. P., P. (2013). Providing better thermal and air quality conditions in school classrooms would improve children’s performance. *Building and Environment*, 59, 581–589.