



Analisis Suhu Interior dan Kenyamanan Termal Bangunan Pendidikan dengan Bukaas Fasad Reconfigurable-Kirigami Menggunakan Honeybee - Grasshopper

Nadiya Rahmah¹, Gilar Sundara², Suhendri Suhendri³

¹ Architecture, Faculty of Engineering, Architecture, Information of Technology, The University of Queensland.

² Desain Furnitur, Politeknik Furnitur dan Industri Pengolahan Kayu.

³ Kelompok Keahlian Teknologi Bangunan, Sekolah Arsitektur, Perencanaan dan Pengembangan Kebijakan, Institut Teknologi Bandung.

| Diterima 04 Maret 2025 | Disetujui 21 Juni 2025 | Diterbitkan 30 Juni 2025 |
| DOI <http://dx.doi.org/10.32315/jlbi.v14i2.468> |

Abstrak

Perancangan yang berorientasi pada kenyamanan termal perlu dimodelkan dengan akurat oleh arsitek agar kualitas bangunan tercapai. Simulasi dan analisis kenyamanan termal dapat dilakukan secara cepat dengan Grasshopper dan Ladybug. Penelitian ini bertujuan untuk memperlihatkan korelasi langsung antara pemilihan jenis elemen *shading* pada fasad bangunan terhadap suhu udara interior yang disimulasikan dengan Ladybug. Jenis fasad yang disimulasikan adalah *shading* vertikal, *shading* horizontal, dan *shading reconfigurable-kirigami* dengan sudut 15, 30, dan 45 derajat (dengan rasioutupan cahaya langsung berturut-turut 34%, 47%, dan 51%). Fasad kirigami sebagai bentuk fasad adaptif dapat menjawab kebutuhan penyesuaian termal terhadap waktu. Penggunaan elemen *shading kirigami* mengurangi suhu interior hingga 6.3 °C dari model tanpa elemen *shading*. Hasil simulasi memperlihatkan sudut bukaan elemen *shading kirigami* mempengaruhi batas atas dan batas bawah nilai *illuminance*, namun tidak terlalu banyak mempengaruhi perubahan suhu interior. Dengan sudut yang sama, kerapatan tertinggi menghasilkan nilai TCP yang lebih tinggi daripada kerapatan rendah dan sedang. Perbedaan kerapatan menghasilkan perubahan suhu hingga 0.7 °C. Informasi dari hasil simulasi dapat mendukung arsitek untuk memutuskan strategi pendinginan pasif yang diterapkan pada tahap pengembangan perancangan.

Kata-kunci: Elemen Shading Kinetik, Kenyamanan Termal, Kirigami, Reconfigurable, Suhu Udara Interior

Indoor Air Temperature and Thermal Comfort Analysis in Educational Building with Reconfigurable-Kirigami Façade Using Honeybee - Grasshopper

Abstract

Thermal comfort-oriented design must be modeled accurately by the architect so that the design requirement is met. Rapid simulation and thermal analysis were available using parametric-based software, Grasshopper and Ladybug. This research aims to present a correlation between shading device configuration and indoor air temperature, since the air temperature is one of the main environmental parameters that reflect indoor quality. The shapes of shading devices are vertical louvre, horizontal louvre, and configurable-kirigami mechanical façade. The kirigami façade was varied with pattern angle respectively 15, 30, and 45 degrees parallel to façade plane; and penetration ratio 34%, 47%, dan 51%. Kirigami shading devices decrease the interior temperature up to 6.3 °C. The result shows that the opening angle affects the range of illuminance (lux), but does not affect the interior temperature much. However, the higher density shading device (smaller panel, larger number of rows and columns) were able to condition the interior with better TCP. The different densities had been affecting the indoor temperature with a maximum difference of 0.7 °C. Insight from the simulation may encourage the architect to decide on the passive-cooling strategy during the design development stage.

Keywords: Kinetic Shading Element, Kirigami, Indoor Air Temperature, Thermal Comfort, Reconfigurable

Kontak Penulis

Nadiya Rahmah
Architecture, Faculty of Engineering, Architecture, Information of Technology, The University of Queensland
St. Lucia, Brisbane, QLD
E-mail : rahmahnadiya@gmail.com



Pendahuluan

Bangunan tipikal berbasis keramik (batu bata dan beton serta variasinya) secara alami akan menjadi masa penyimpan kalor (*thermal mass*) yang ikut berkontribusi dalam memanaskan suhu sekitar (suhu interior dan suhu urban) [1], [2], [3]. Padahal, kebutuhan utama di daerah sekitar khatulistiwa adalah penyesuaian penghawaan untuk mencapai suhu interior ideal [4], [5], [6]. Terutama di siang hari baik dengan sistem pasif maupun aktif. Selain itu juga diperlukan usaha penurunan suhu lingkungan pada kawasan lingkungan binaan [7], [8]. Metode pasif yang efektif salah satunya adalah penambahan elemen *shading* baik di depan bukaan [4] maupun di depan permukaan selubung bangunan [9]. Tingkat efektivitas metode tersebut perlu disimulasikan oleh arsitek secara cepat di dalam proses perancangan, agar dapat menghasilkan rancangan pendinginan pasif berbasis data objektif.

Salah satu alat pemodelan untuk melakukan simulasi dan analisis terkait kenyamanan termal adalah Ladybug-Honeybee dalam Grasshopper. Ladybug-Honeybee menggunakan formula perhitungan *adaptive comfort* (AC) atau disebut juga aPMV [10]. Selain itu, di dalam Ladybug-Honeybee juga terdapat pilihan untuk menggunakan formula *predictive mean vote comfort* (PMV), dan *Universal Thermal Climate index* (UTCI).

Indeks yang digunakan untuk menghitung kenyamanan termal di antaranya ada tiga, yaitu: *Adaptive Comfort* [11], *Predictive Mean Vote Comfort* (PMV) dan *Per centation of People Dissatisfied* (PPD), dan *Universal Thermal Climate Index* (UTCI) Comfort [12]. Fanger (dalam [10]) menyebutkan bahwa ketiga indeks tersebut merupakan tiga contoh indeks di antara lebih dari 40 indeks yang telah diajukan untuk menghitung kenyamanan termal.

Algoritma yang digunakan dalam perhitungan *adaptive comfort* telah dikembangkan oleh banyak peneliti sejak tahun 1978 – 2020 [10], [11, p.566]. Algoritma *adaptive comfort* merupakan respons terhadap beragam bentuk deviasi hasil perolehan data lapangan dengan hasil prediksi menggunakan simulasi PMV.

Aspek adaptasi dalam *Adaptive PMV* (aPMV) yang bersumber dari PMV yang dibuat Fanger (dalam [10]), terbagi ke dalam tiga kategori, yaitu perilaku, fisiologis, dan psikologis [10, p.11]. Adaptasi terkait perilaku dapat dilihat dalam bentuk parameter pakaian (*clothing*), menyalakan atau mematikan *air conditioner*, atau penyesuaian aktivitas. Adaptasi fisiologi berkaitan dengan regulasi termal dalam tubuh, seperti

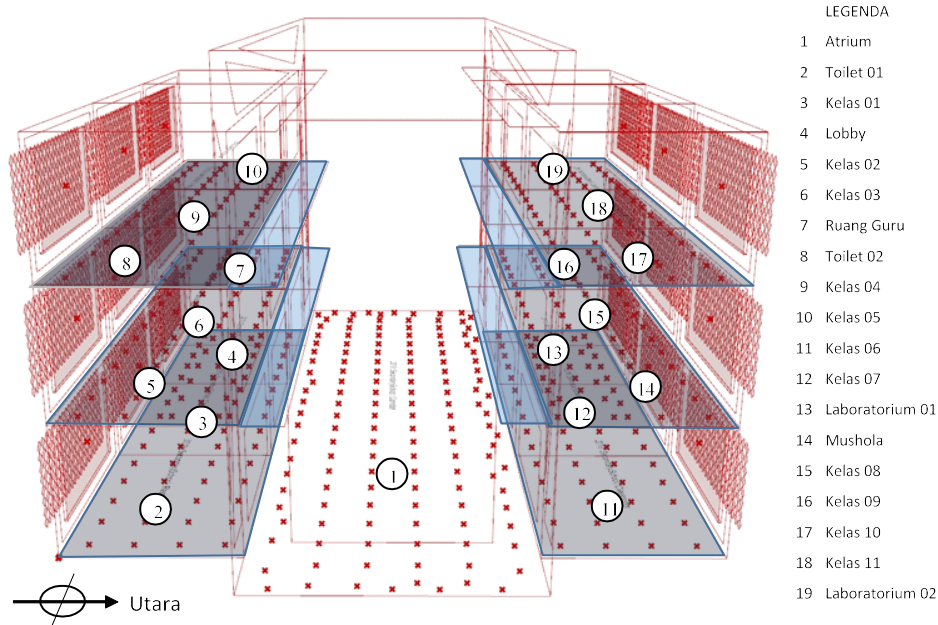
perubahan aliran darah, berkeringat, dan kondisi menggigil. Adaptasi psikologis adalah perubahan persepsi suhu akibat perubahan kondisi psikologis, di antaranya suasana hati, perubahan memori termal, serta perubahan skala kenyamanan termal subjektif.

UTCI setara dengan temperatur yang dirasakan oleh orang yang berjalan dengan kecepatan 1-4 km/jam dengan jenis pakaian sesuai musim, pada lingkungan eksterior (*outdoor*) dengan kelembapan relatif (RH) 50%, kondisi udara tenang (*still air*) dengan kelajuan angin 0.5 m/detik di atas 10 meter di atas permukaan tanah, dan rata-rata suhu radiasi (T_{mrt} atau setara *ambient temperature*) dengan nilai referensi 29 °C pada tekanan uap (vP) 20hPa atau lebih [12, p.522], [13, p.170].

Parameter lingkungan yang digunakan dalam perhitungan UTCI di antaranya: kelembapan udara (*relative humidity*), suhu udara (*air temperature*), kelajuan angin (*wind velocity*), tingkat metabolisme subjek (standar yang digunakan 135 W m⁻²), respons fisiologis, dan persepsi subjek. Sementara itu, respons fisiologis yang dinilai di antaranya suhu permukaan kulit (*skin temperature*), tekanan darah (*systolic blood pressure* (SBP) dan *diastolic blood pressure* (DBP)), detak jantung (*heart rate*), saturasi oksigen (*blood oxygen saturation*), tingkat keringat tubuh (*sweat rate*), dan kondisi menggigil (*shivering*) [12, p.522], [14, p.5].

Skala UTCI dapat berbeda-beda tergantung wilayah tapak yang diukur. Studi perbandingan yang dilakukan Young (dalam [15, p.51]) sebelumnya menghasilkan data bahwa faktor kenyamanan termal universal (*no thermal stress*) berkisar antara +9 sampai +26 °C pada skala UTCI. Suatu ruangan yang digunakan untuk aktivitas administratif, pelayanan umum, dan fungsi manajerial perlu dipertahankan kenyamanannya yakni dengan menjaga suhu kering di dalamnya antara 23 °C hingga 26 °C. Kenyamanan tersebut juga didukung oleh tingkat kelembapan relatif antara 40% hingga 60% [16].

Studi empiris sepanjang tahun menggunakan partisipan manusia (*human subject test*) yang dilakukan di Tianjin menyatakan bahwa UTCI kurang tepat digunakan sebagai parameter termal *outdoor* di wilayah beriklim dingin. Pada studi tersebut, regresi UTCI memiliki kemiripan dengan *Physiological Equivalent Temperature* (PET) untuk pengukuran sensasi termal eksterior (*outdoor*), akan tetapi UTCI disinyalir memiliki interval yang invalid (pada penurunan indeks) di bawah suhu 0 °C [14, p.13].



Gambar 1. Model bangunan untuk keperluan simulasi berupa selubung bangunan, elemen shading panel kirigami, dan grid sensor.

Sekalipun demikian, UTCI masih dapat digunakan untuk memodelkan kenyamanan termal *outdoor* di wilayah hangat dan panas.

Di antara ketiga metode yang tersedia dalam Grasshopper, metode perhitungan *adaptive comfort* (aPMV) dipilih untuk menghitung persentase kenyamanan termal interior dan menghitung penurunan suhu interior akibat penggunaan elemen *shading* pada fasad bangunan yang menghadap Selatan dan Utara. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh konfigurasi bentuk dan kerapatan elemen fasad bangunan (*shading*) terhadap suhu interior dan indeks kenyamanan termal menggunakan simulasi *Adaptive Predictive Mean Value* (aPMV) atau *Adaptive Comfort* pada konteks lingkungan beriklim panas lembap. Dengan kata lain, studi ini mencari bentuk elemen shading yang paling efektif pada studi kasus yang disimulasikan menggunakan Grasshopper

Metodologi

1. Metode Penelitian

Metode penelitian yang digunakan adalah studi kasus dengan pemodelan digital terhadap bangunan tipikal tipologi bangunan pendidikan. Bangunan ini diilustrasikan pada Gambar 1, menggunakan konfigurasi ruang *single-sided corridor*, menghadap atrium tertutup serta dilengkapi jendela pada arah utara, selatan, dan timur bangunan adalah barat-timur, sehingga bukaan terluar ruang kelas menghadap ke arah utara atau selatan. Model bangunan yang disimulasikan menggunakan data iklim dengan lokasi koordinat 6.88 LS - 107.60 BT +7 GMT ketinggian

791 dpl, atau pada stasiun Bandara Huseinsastranegara, Bandung.

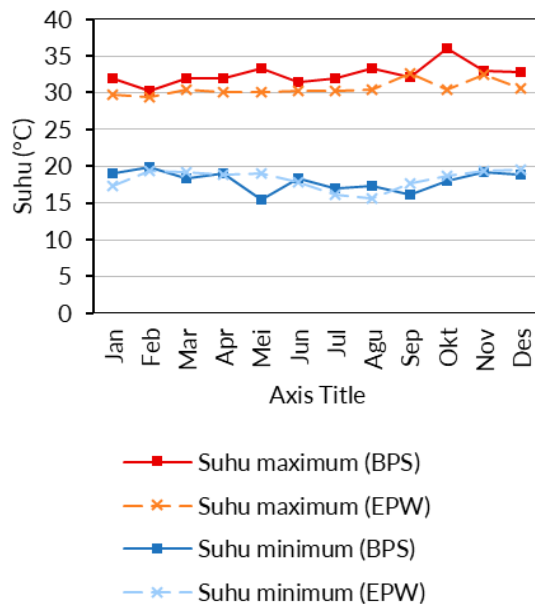
Model bangunan pendidikan yang menggunakan atrium dipilih karena alasan fungsional. Fungsi ruang kelas yang menghadap satu ruang publik beratap memiliki keunggulan pada aspek keamanan (*safety enclosure*) dan pengkondisian (*conditioning*). Model atrium digunakan dalam Beyraghshamshir et al [17], Mesloub et al [18], Romero-Odero et al [19], Najafabadi [20], serta Ma & Yang [21]. Pemodelan dilakukan di dalam *software* Rhinoceros dan Grasshopper. Elemen ruang dibuat menggunakan komponen Rectangle dan komponen Extrude agar terbentuk geometri berbentuk *closed polysurface* (*closed BREP*). Pemodelan bukaan jendela, pintu, bukaan untuk ventilasi, dan elemen peneduh (*shading*) dilakukan secara terpisah dalam komponen Surface dan masing-masing dikelompokkan sesuai jenisnya. Ruang Guru, Laboratorium 01, dan Laboratorium 02 diberi pengkondisian udara menggunakan HVAC.

2. Verifikasi Data Iklim

Gambar 2 menunjukkan grafik perbandingan suhu maksimum dan minimum rata-rata bulanan di Kota Bandung berdasarkan data EPW (EnergyPlus Weather) dengan data yang diperoleh dari BPS (Badan Pusat Statistik) tahun 2023 [22]. Suhu maksimum dari kedua sumber menunjukkan pola yang serupa, dengan perbedaan yang kecil, terutama pada bulan Mei dan Oktober, di mana data EPW sedikit lebih tinggi dibandingkan data BPS. Pola suhu minimum juga menunjukkan kesamaan, meskipun ada beberapa variasi kecil, khususnya pada bulan Juli hingga September. Secara keseluruhan, pola perubahan suhu

dari kedua data ini cenderung konsisten sepanjang tahun.

Perhitungan *Root Mean Squared Deviation* (RMSD) menunjukkan bahwa penyimpangan suhu rata-rata antara data EPW dan data BPS hanya sekitar 4%. Hal ini menunjukkan bahwa data EPW memiliki tingkat akurasi yang tinggi dan dapat diandalkan sebagai sumber untuk analisis iklim Kota Bandung. Konsistensi pola suhu antara kedua sumber data ini memberikan dasar yang kuat untuk penggunaan data EPW dalam simulasi iklim dan energi bangunan.



Gambar 2. Grafik kesesuaian data iklim EPW dan BPS

Parameter iklim dan cuaca yang berasal dari input peneliti adalah parameter kecepatan angin (*wind velocity*). Pada penelitian ini dicobakan simulasi dengan kecepatan angin 0.2 m/s, 0.6 m/s, dan 1.0 m/s. Nilai 0.2 mendekati batas minimum kecepatan angin pada kondisi tenang (*still air*). Sementara itu, kecepatan 1 m/s diasumsikan sebagai pergerakan angin interior ketika kecepatan angin eksterior di bawah 5 m/s [23, p.8,15].

3. Validitas Simulasi dengan Ladybug-Honeybee

Perhitungan *mean radiance temperature* (MRT) menggunakan algoritma Ladybug telah divalidasi dalam studi, di antaranya studi yang dilakukan oleh Nicholson et al [9]. Hasil penelitian tersebut menunjukkan kemiripan antara MRT yang dihitung menggunakan Ladybug dengan hasil pengukuran. Ibrahim et al [24] menyebutkan perbedaan nilai MRT yang dihitung menggunakan Envi-met dan Ladybug terutama pada pagi dan sore hari. Akan tetapi, bentuk kurva nilai MRT mendekati sama. Naboni et al [25, p.3237] menyebutkan bahwa sekalipun perhitungan komponen MRT dalam komponen Ladybug tidak

melibatkan data kalor yang dipantulkan bangunan, data tersebut masih dapat diinput menggunakan tambahan komponen Solar-Adjusted. Disimpulkan bahwa Ladybug dapat digunakan sebagai alat simulasi perhitungan MRT yang cukup akurat.

4. Metode Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan dengan melakukan simulasi menggunakan definisi Grasshopper yang melibatkan elemen plugin Ladybug dan Honeybee. Pada definisi tersebut, perhitungan simulasi kenyamanan termal dilakukan dengan menggunakan model Adaptive Comfort. Data yang dikumpulkan adalah matriks intensitas pencahayaan (*illuminance*), matriks suhu interior, dan matriks persentase kenyamanan termal. Sensor yang digunakan adalah sensor bola hitam pada grid berjarak 1.2 m dengan ketinggian 0.7 m dari permukaan lantai.

Perhitungan *Mean Radiance Temperatur* (MRT) di dalam Honeybee-Ladybug dilakukan dengan rumus:

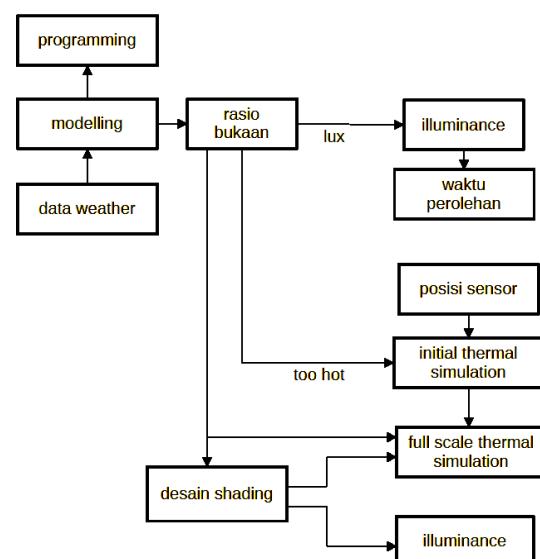
$$MRT = (V1 \cdot T1^4 + V2 \cdot T2^4 + \dots)^{1/4} \quad (1)$$

Di mana:

V = view factor

T = temperatur

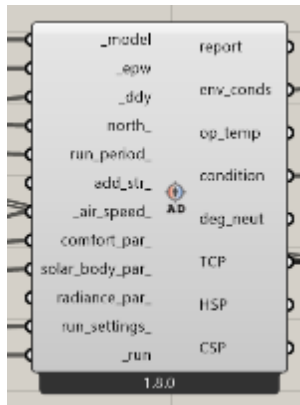
Perhitungan *Adaptive Comfort* di dalam Ladybug memerlukan data suhu interior dan kelembapan interior (yang diperoleh dari perhitungan software Energy Plus), *comfort parameter*, *solar body parameter*, dan data iklim setempat (suhu eksterior, kelembapan relatif (RH), kecepatan angin (*wind velocity*)). Parameter kenyamanan (*comfort parameter*) diatur menggunakan komponen LB *Adaptive Comfort Parameter* (AdaptPar), mencakup di antaranya jenis standar yang digunakan (ASHRAE), penggunaan air-



Gambar 3. Alur Metodologi Penelitian

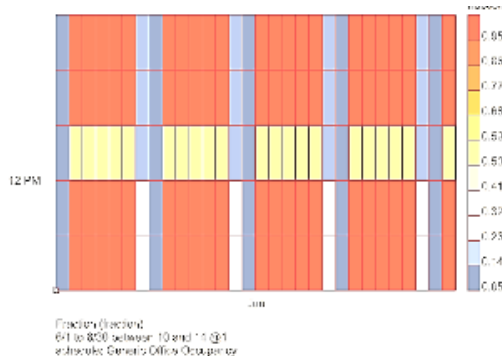
conditioning atau tidak, dan penggunaan standar skala kenyamanan normal.

Parameter subjek (*solar body parameter*) diatur menggunakan komponen LB Solar Body Parameter yang mencakup di antaranya postur tubuh, tingkat metabolisme tubuh (BMR), arah tubuh menghadap, tingkat serapan kalor dari indeks warna pakaian yang digunakan, dan tingkat emisi kalor (secara *default* nilainya 0.95, namun pada hukum Kirchoff nilainya 0.97 [9, p.4].



Gambar 4. Komponen perhitungan menggunakan model Adaptive Comfort dalam definisi Grasshopper.

Perhitungan TCP di dalam komponen Adaptive Comfort berarti persentase waktu penggunaan ruang dengan predikat nyaman secara termal (*comfortable / acceptable*). Pada rentang simulasi penelitian ini waktu penggunaan ruang tipikal kelas dan ruang kantor tipikal dengan nilai di atas 0.1 adalah sebagai berikut.



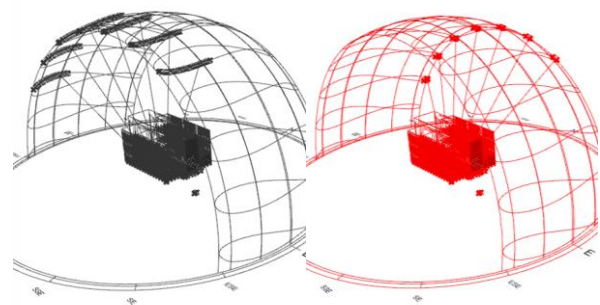
Gambar 5. Waktu penggunaan ruang dengan nilai hunian lebih dari 0.1 (Occupancy Rate)

Perangkat yang digunakan untuk melakukan simulasi pada penelitian ini adalah komputer dengan memori RAM 8 GB, prosesor Intel Core i7, operating system Windows 10, kartu grafis Intel HD Graphics 4600.

5. Menentukan masa bangunan dan rasio *glazing*.

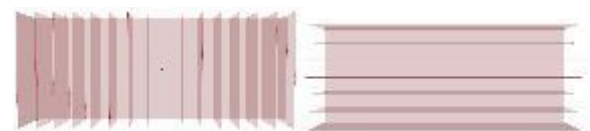
Rasio bukaan (*glazing*) yang dipilih adalah rasio bukaan sebesar 0.5. Nilai rasio bukaan ditentukan berdasarkan simulasi pendahuluan yang telah dilakukan, yaitu simulasi menggunakan rasio bukaan

0.3, 0.5, dan 0.7. Simulasi tersebut memberikan pembacaan bahwa dengan rasio bukaan 50%, ruangan atrium dan ruangan kelas lantai bawah yang berada di sisi Utara bangunan memperoleh pencahayaan alami lebih dari 800 lux seluruhnya. Bahkan pada beberapa segmen, terdapat tingkat silau yang cukup tinggi, dengan perolehan pencahayaan alami pada beberapa sensor sebesar 19,113 lux. Pada ruang kelas lantai dasar yang berada di sisi selatan, pencahayaan alami yang diperoleh adalah antara 320-800 lux. Ruang-ruang sisi selatan lantai 2 dan 3 memperoleh pencahayaan alami antara 80-240 lux. Sementara itu, ruang-ruang sisi utara di lantai 2 dan 3 memperoleh cahaya matahari antara 160-480 lux. Berdasarkan SNI 03-2396 - 2001 tentang Pencahayaan, nilai lux antara 100-250 mencukupi untuk ruangan interior secara umum, dengan catatan bahwa ruangan yang membutuhkan ketelitian khusus diberikan cahaya sebesar 300-750 lux. Da Silva et al., dalam Fazeli et al [26], mendefinisikan nilai pencahayaan efektif dengan nilai antara 300-1800 lux, dengan kemungkinan efek silau (*glare*) pada pencahayaan di atas 1800 lux.



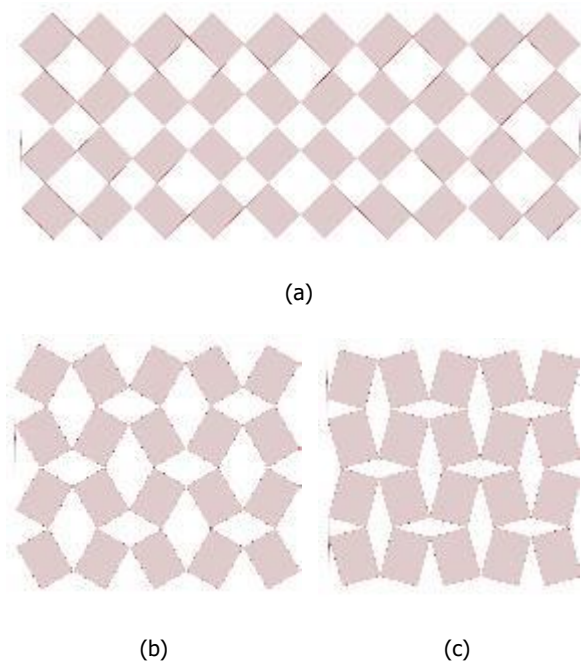
Gambar 6. (Kiri) Sunpath yang memperlihatkan posisi matahari di sisi selatan bangunan pada bulan Februari. (Kanan) Sunpath memperlihatkan posisi matahari di sisi utara pada bulan Juni.

6. Pemodelan Elemen *Shading Kirigami* dan Variasi Sudut Bukaan



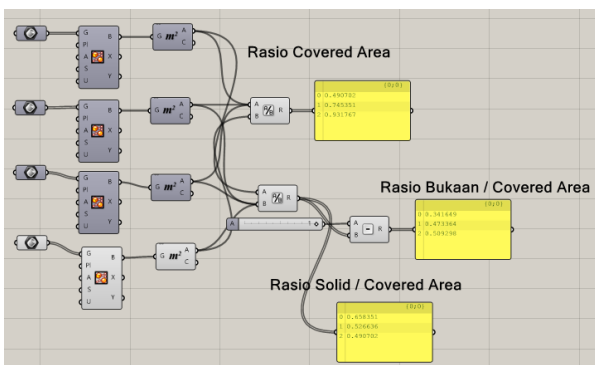
Gambar 7. (Kiri) Modul elemen shading vertikal, (kanan) modul elemen shading horizontal.

Elemen *shading* adalah bagian bangunan yang memberikan bayangan pada bukaan (*glazing*). Elemen ini termasuk salah satu strategi penghawaan pasif yang sangat penting untuk memperoleh suhu interior yang ideal. Panel *kirigami* digunakan sebagai elemen *shading* mekanis yang dapat diatur bentuknya. Kirigami berasal dari seni kertas yang menggunakan keratan pada selembar kertas [27]. Prinsip ini diadopsi untuk menghasilkan fasad adaptif-mekanis (*reconfigurable*).



Gambar 8. Panel kirigami dengan sudut bukaan panel (a) 45 derajat, (b) 30 derajat, dan (c) 15 derajat.

Sudut panel kirigami adalah sudut orientasi panel terhadap bidang YZ (vertikal). Terdapat tiga variasi sudut panel yang ditentukan oleh peneliti, yaitu 15, 30, dan 45 derajat. Nilai sudut di atas 45 menghasilkan perulangan bentuk yang serupa (*recursive pattern*). Selain itu juga terdapat perbedaan kerapatan dan dimensi panel, yaitu kerapatan rendah (panel besar, K1), kerapatan sedang (panel sedang, K2), dan kerapatan tinggi (panel kecil, K3).



Gambar 9. Perhitungan rasio bukaan

Sudut bukaan yang semakin besar akan merenggangkan panel *kirigami*, sehingga rasio area terbuka berbanding area tertutup semakin besar. Nilai rasio ini mempengaruhi banyak sedikitnya sinar matahari langsung yang masuk melalui jendela.

Tabel 1. Sudut panel kirigami yang mempengaruhi luas area bukaan dan luas area yang tertutupi panel.

	Dimensi Panel	Sudut	Jumlah Panel		Luas Tertutupi	Rasio Bukaan
			H	V		
K 1-15	40 x 50	15	10	4	115,440	0.34
K 1-30	40 x 50	30	10	4	144,312	0.47
K 1-45	40 x 50	45	10	4	154,880	0.51
K 2-15	20 x 25	15	20	8	121,000	0.34
K 2-30	20 x 25	30	20	8	151,014	0.47
K 2-45	20 x 25	45	20	8	162,000	0.51
K 3-15	10 x 13	15	40	16	126,240	0.34
K 3-30	10 x 13	30	40	16	157,747	0.53
K 3-45	10 x 13	45	40	16	169,280	0.51

7. Metode Analisis Data

Simulasi dilakukan untuk memperoleh data *illuminance* pada kondisi bangunan dengan rasio bukaan 0.5 tanpa elemen *shading*, dengan elemen *shading* horizontal, dengan elemen *shading* vertikal, dan dengan elemen *shading* kirigami.

Data yang diperoleh dibandingkan satu sama lain untuk melihat variasi elemen *shading* kirigami yang paling berpengaruh dalam menurunkan suhu interior dan meningkatkan persentase kenyamanan termal. Data yang digunakan sebagai kontrol adalah data hasil simulasi bangunan tanpa elemen *shading*. Data lainnya digunakan sebagai *benchmark* untuk memperkaya dan mempertajam analisis.

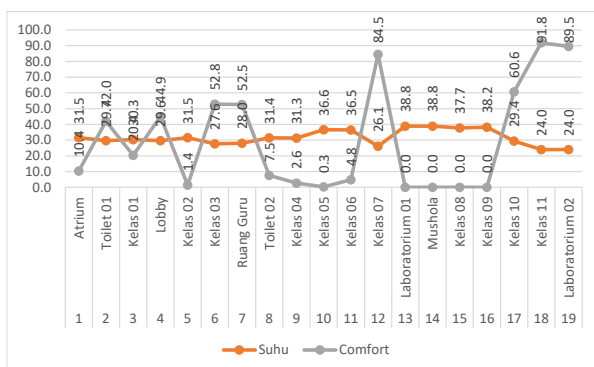
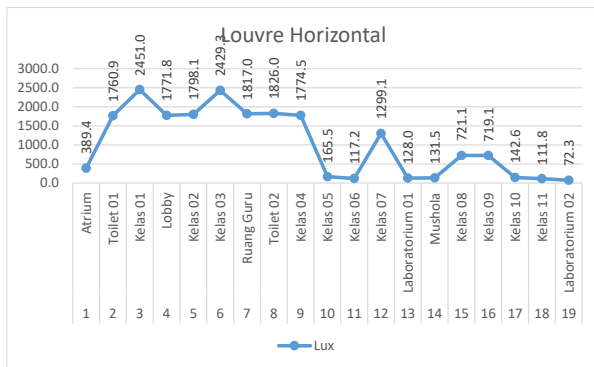
Data ditampilkan dalam bentuk grafik *illuminance*, grafik suhu, dan persentase kenyamanan termal. Perbandingan grafik pada variasi elemen *shading* K1, K2, dan K3 digunakan untuk melihat pengaruh kerapatan bukaan (dimensi panel dan jumlah panel), terhadap nilai *illuminance*, suhu interior, dan TCP. Analisis juga dilakukan dengan menggunakan penelitian terdahulu sebagai referensi, terutama untuk melihat validitas data yang diperoleh melalui simulasi.

Hasil dan Pembahasan

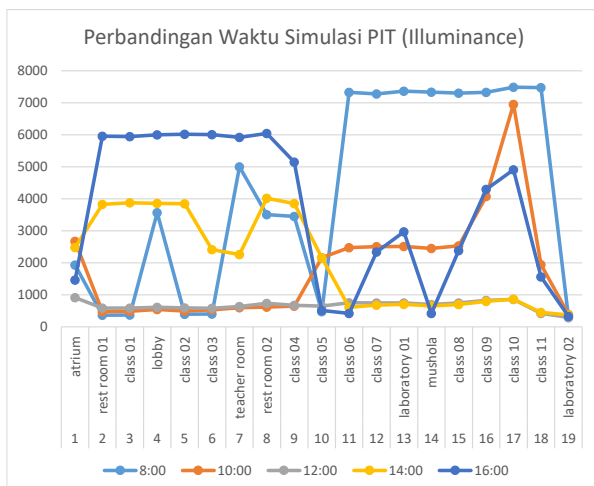
Tingkat pencahayaan alami dalam ruangan sangat dipengaruhi oleh desain arsitektur bangunan, rasio bukaan terhadap dinding, lokasi tapak, dan waktu perekaman data simulasi. Pada simulasi ini, bentuk bangunan memiliki orientasi memanjang dari arah barat ke timur. Pembagian gedung yang mengapit atrium dapat disebut sebagai gedung utara dan gedung selatan.

Ruang-ruang di gedung utara memperoleh banyak cahaya matahari pada pagi hingga sore hari, sementara ruang-ruang pada gedung selatan

memperoleh cahaya lebih banyak pada siang dan sore hari. Hal ini terkait erat dengan posisi tapak di bawah khatulistiwa (pada lintang 6.8 LS) dan waktu simulasi pukul 8 pagi bulan Februari.



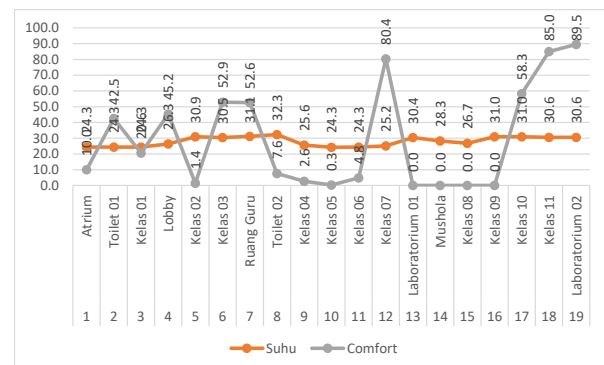
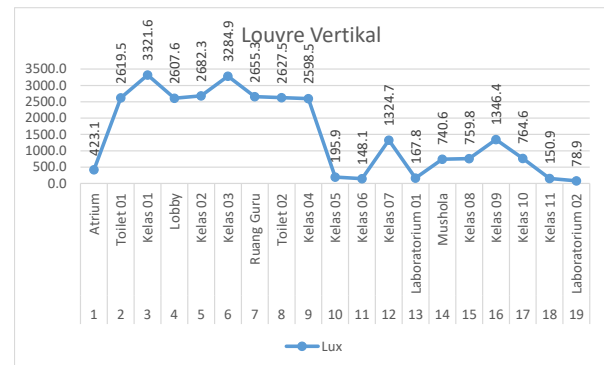
Gambar 10. Hasil simulasi dengan elemen shading horizontal.



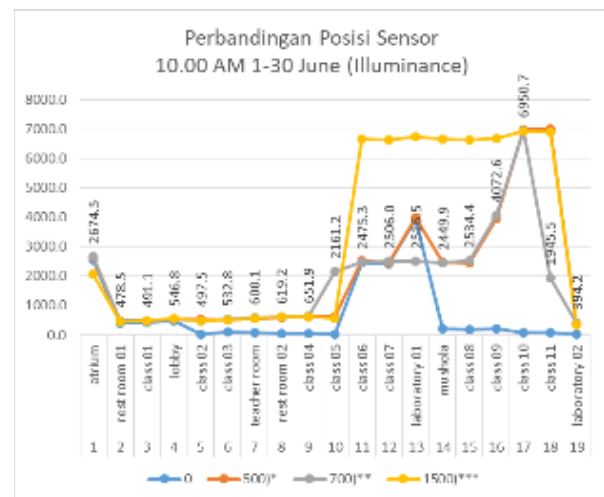
Gambar 11. Hasil simulasi nilai illuminance pada pukul 08:00, 10:00, 12:00, 14:00, 16:00. Di pagi hari, gedung selatan memperoleh cahaya matahari lebih banyak, sementara di sore hari, gedung utara memperoleh cahaya matahari lebih banyak.

Simulasi pada model tanpa elemen shading memperlihatkan suhu interior yang cukup tinggi, dengan nilai maksimum 38.8 °C. Elemen *shading kirigami* (sampel K3-30) berhasil menurunkan suhu interior hingga 6.3 °C pada ruang Laboratorium 01 (dari 38.8 ke 32.5) dan 6.1 °C pada ruang Mushola (38.8 ke 32.7). Pada bagian metodologi, dipaparkan

perbedaan posisi matahari bulan Februari dan Juni. Setelah dilakukan simulasi menggunakan ketinggian sensor yang berbeda-beda, ditemukan bahwa ketinggian sensor sangat mempengaruhi nilai *illuminance*.



Gambar 12. Hasil simulasi dengan elemen shading vertikal.



Gambar 13. Hasil simulasi nilai illuminance tiap ruangan dengan posisi sensor berbeda. Ketinggian 0 mm sejajar permukaan lantai, 500 mm dari muka lantai, 700 mm atau pada area kerja (meja), dan 1500 mm di ketinggian mata pada posisi berdiri.

Karenanya dilakukan penyesuaian metodologi dengan memilih sensor di ketinggian 700 mm dari lantai, yaitu ketinggian area kerja. Perbandingan simulasi pada waktu berbeda, yaitu antara pukul 08.00, pukul 10.00, 12.00, 14.00 dan 16.00 memperlihatkan nilai

illuminance terbaik pada pukul 10.00 dan 14.00. Akan tetapi, dengan mempertimbangkan adanya kemungkinan *heat gain* akibat penyimpanan kalor pada selubung bangunan sepanjang hari, maka selanjutnya simulasi untuk perhitungan suhu interior dan persentase kenyamanan termal menggunakan waktu pukul 10.00-14.00. Perhitungan pencahayaan dan kenyamanan termal tahunan (*annual daylighting + annual thermal analysis*) di luar lingkup penelitian ini karena adanya batasan penelitian.

Elemen *shading* yang digunakan sebagai pembanding (*benchmark*) pada penelitian ini adalah elemen *shading* berbentuk *louvre* (strip) vertikal dan horizontal. Terdapat perbedaan signifikan pada hasil simulasi yang menggunakan elemen *shading* horizontal, vertikal, dan yang menggunakan elemen *shading kirigami*.

Bentuk elemen *shading* berupa horizontal *louvre* berhasil mengurangi tingkat kesilauan (*glare*) dibandingkan desain K1-30 dan K1-45 dari 4547 lux dan 4395 lux menjadi 2451 lux (data Kelas 01). Sementara itu *shading* vertikal menghasilkan nilai *illuminance* kelas 01 3321 lux. Nilai TCP pada hasil simulasi *louvre* vertikal dan horizontal relatif rendah jika dibandingkan dengan data simulasi dengan elemen *shading kirigami*, terutama pada nilai TCP Kelas 02 (1.4%, 1.4%), Kelas 04 (2.6%, 2.6%), dan Toilet 02 (7.6%, 7.6%) yang memang memiliki nilai TCP cukup rendah di semua hasil simulasi. Nilai TCP rendah desain *shading* vertikal dan horizontal juga ditemukan pada ruang Atrium (10.4%, 10.0%), padahal pada alternatif desain yang menggunakan *shading Kirigami*, ruang Atrium sama sekali tidak diberikan elemen *shading*. Dapat diambil kesimpulan bahwa ruang tertentu (Atrium) justru memperoleh cahaya lebih banyak dan mencapai kenyamanan termal yang lebih baik ketika bukaan tidak diberi tambahan elemen *shading*. Ruang yang memperoleh pencahayaan pada rentang 300-1800 lux dengan TCP di atas 50% di antaranya Lobby, Toilet 01, Kelas 07, Ruang Guru, Laboratorium 02, Kelas 10, dan Kelas 11; dengan catatan Ruang Guru dan Laboratorium 02 menggunakan sistem HVAC, sementara ruang Kelas 11 masih kurang memperoleh pencahayaan alami.

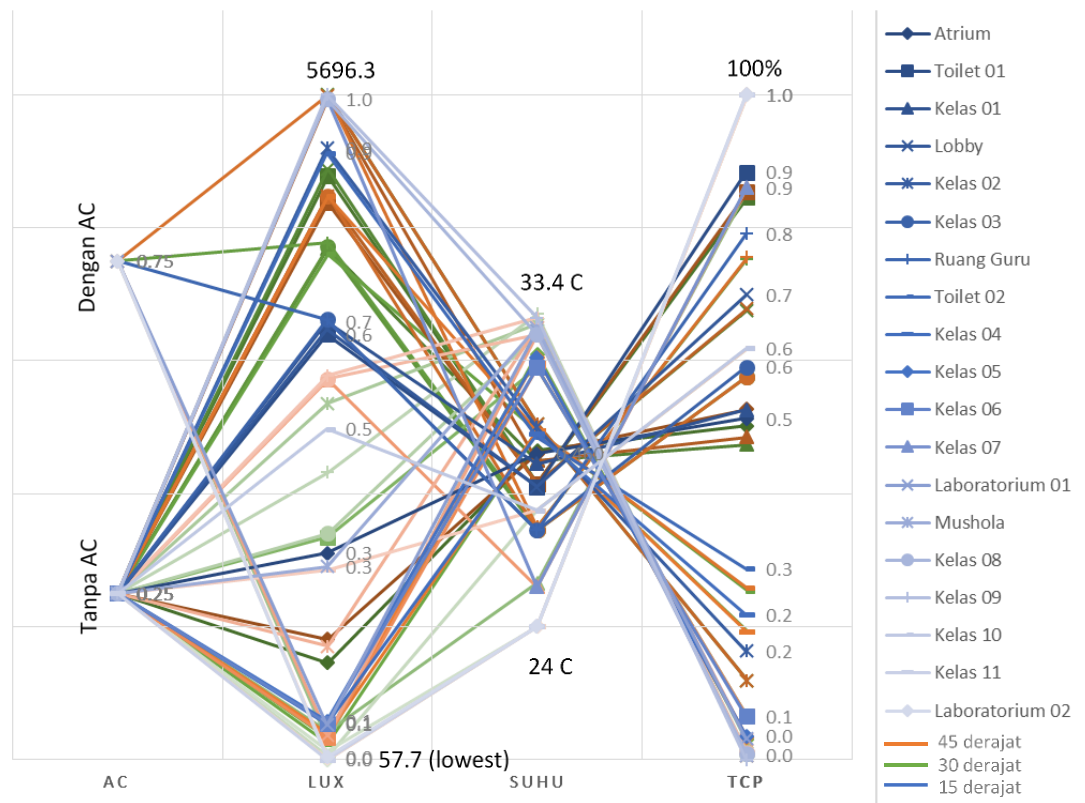
Intensitas pencahayaan alami (*illuminance*, satuan lux) juga diobservasi mengalami peningkatan terutama pada desain K2-15, K2-30, dan K2-45, dibandingkan dengan data *illuminance* pada K1-15, K1-30, dan K1-40. Pada ketiga hasil simulasi tersebut dapat pula diambil kesimpulan bahwa sudut bukaan panel *kirigami* mempengaruhi ambang batas atas dan ambang batas bawah nilai intensitas cahaya alami.

Temuan pada variasi *kirigami* kerapatan tinggi K3-45, bahwa ambang batas *illuminance* mengalami peningkatan namun ambang batas bawahnya mengalami penurunan. Sudut panel *kirigami* dapat menentukan banyak atau sedikitnya cahaya yang masuk ke dalam ruangan, sekalipun bentuk dan dimensi setiap panelnya sama. K2 lebih optimal dalam meningkatkan nilai lux yang mendekati batas *illuminance* di antara 300 dan 1800.

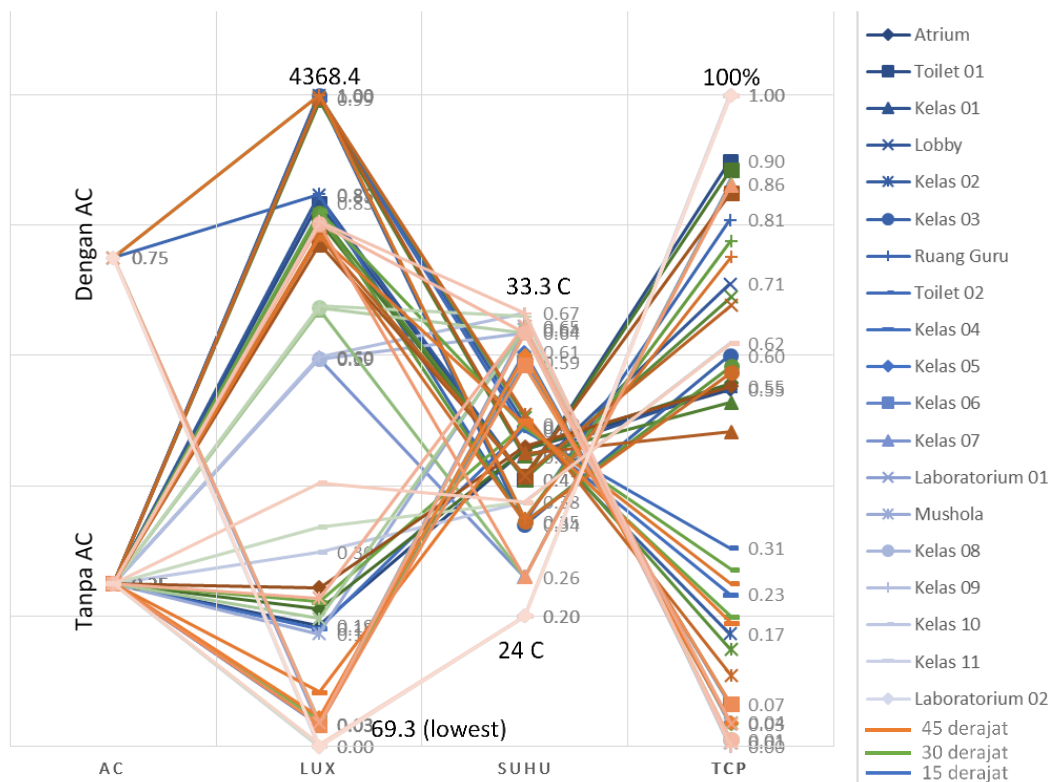
Peningkatan intensitas pencahayaan alami (lux) pada K2-30 dan K2-45 dibanding K2-15 tidak dibarengi dengan peningkatan suhu interior yang signifikan. Penurunan suhu terbesar dari K1-45 ke K3-45 adalah 0.2 °C (Kelas 02, Kelas 04, Toilet 02); sementara peningkatan suhu dari desain K1-45 ke K3-45 adalah 0.7 °C (Kelas 09). Sementara itu TCP mengalami peningkatan dari K1-45 ke K3-45 dengan nilai terbesar 5.39%. Peningkatan suhu interior tidak selalu berbanding lurus TCP. Variasi K2-45 dapat dipilih sebagai solusi yang memberikan pencahayaan lebih baik, sementara variasi K2-30 memberikan penurunan suhu terbanyak dari kondisi tidak menggunakan *shading*.

Perubahan sudut bukaan *kirigami* memberikan pengaruh signifikan pada nilai *illuminance* di gedung utara dan gedung selatan. Sebagian ruang di gedung selatan mengalami peningkatan batas atas *illuminance* ketika sudut bukaan berubah dari 15 ke 30 dan 45 derajat. Sementara itu, sebagian ruang di gedung utara mengalami penurunan batas atas *illuminance*. Hal ini dapat dilihat pada grafik nilai *illuminance* K1-15, K1-30, dan K1-45.

Simulasi memperlihatkan bahwa toleransi kenyamanan pengguna mencapai titik kritis ketika suhu interior berada di atas 30 °C. Akan tetapi nilai TCP dapat ditingkatkan dengan perubahan kecepatan angin (*wind velocity*, desain ventilasi silang). Pada suhu 29 °C, nilai kenyamanan berkisar antara 2.2-13.1%. Sementara itu, pada suhu di atas 30 derajat, nilai kenyamanannya sangat rendah, berkisar antara 1.2-3.6%. Studi lapangan yang dilakukan Yao et al [28] menunjukkan bahwa penilaian pengguna menyatakan ruang dengan suhu 34 °C ke atas (musim panas) terasa sangat panas (skor 3, tertinggi pada skala ASHRAE); sementara ruang dengan suhu 30-34 terasa hangat (berada pada skor 1.5-3). Pantavou et al (dalam [14]) menyebutkan penilaian suhu 29.1 – 34.1 °C sebagai suhu sangat panas (*strong heat stress*). Crh.noaa.gov dalam Blazejczyk et al [12] menggunakan indeks panas (Heat Indeks) yaitu hasil perhitungan variabel suhu dan kelembapan sebagai salah satu skala penilaian panas, di mana nilai HI 27-32 celcius



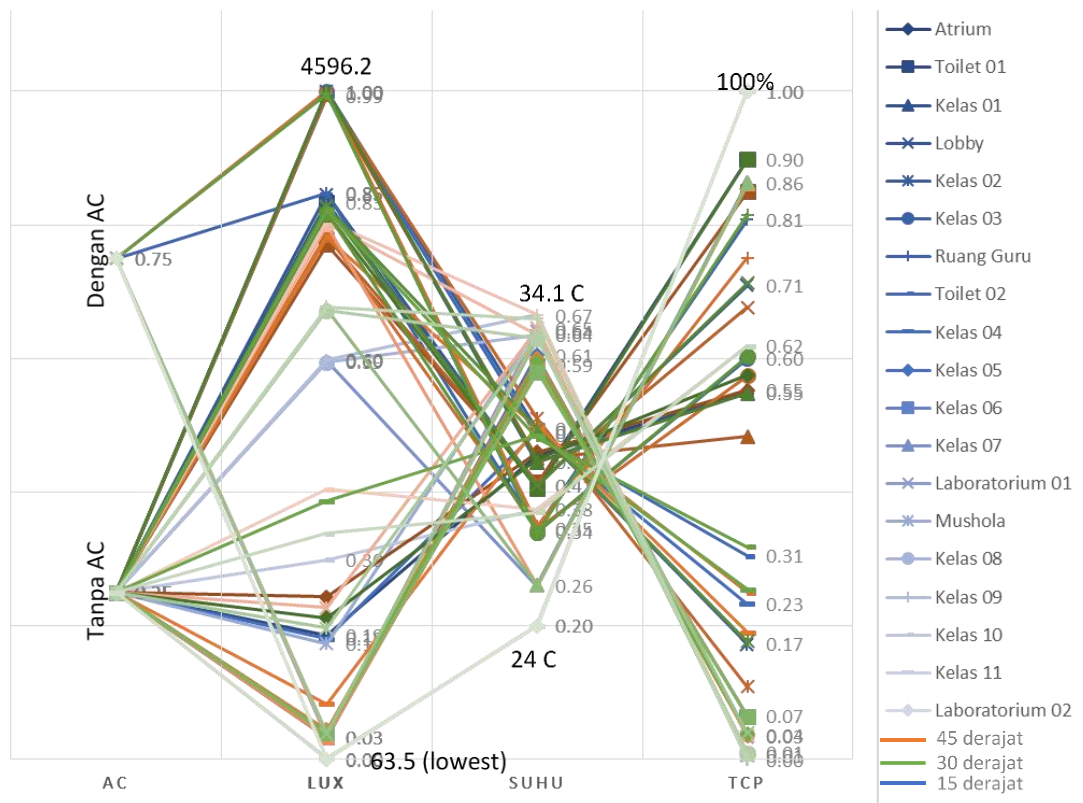
Gambar 14. Hasil Simulasi K1-15, K1-30, dan K1-45.



Gambar 15. Simulasi K2-15, K2-30, K2-45.

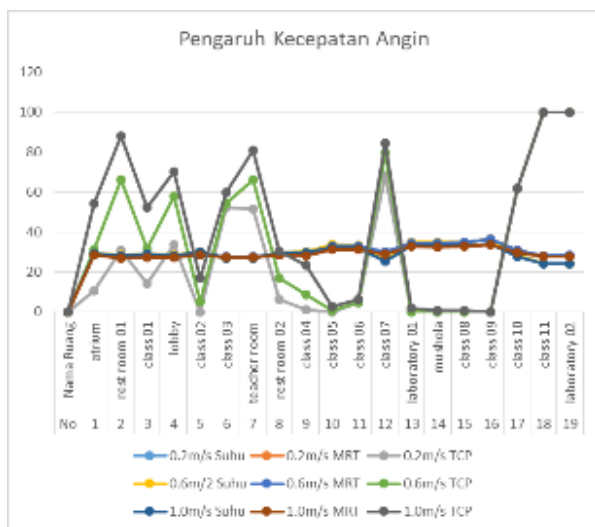
termasuk kategori peringatan (*caution*), HI 32-41 celcius termasuk kategori peringatan tinggi (*extreme caution*) yang dapat menyebabkan sengatan panas (*sunstroke / heatstroke*), kram otot, kelelahan akibat paparan berkepanjangan dan atau aktifitas fisik.

Perbedaan kecepatan angin (*wind velocity*) terbukti mempengaruhi peningkatan nilai TCP, akan tetapi tidak terlalu berpengaruh dalam menurunkan suhu interior dan MRT.



Gambar 16. Simulasi K3-15, K3-30, K3-45.

Hal ini dapat dilihat pada hasil perhitungan dan simulasi K3-45 yang diuji coba dengan beberapa nilai kecepatan angin yang berbeda (Gambar 17, data parameter angin diinput oleh peneliti).



Gambar 17. Pengaruh kecepatan angin terhadap nilai persentase kenyamanan, suhu dan MRT. Dapat dilihat bahwa kecepatan angin sangat mempengaruhi kenyamanan termal.

Tingkat signifikansi perbedaan kerapatan

Elemen *shading* dengan kerapatan sedang (K2), yaitu panel *kirigami* dengan ukuran panel 20 x 25 cm dan jumlah panel 20 kolom x 8 baris panel, lebih efektif dalam menurunkan suhu interior sekaligus meningkatkan pencahayaan alami dibandingkan

dengan elemen *shading* kerapatan rendah (K1), yaitu panel *kirigami* dengan ukuran panel 40 x 50 cm berjumlah 10 kolom x 4 baris panel. Ruang Kelas 04, misalnya, mengalami peningkatan dari 190 lux pada desain K1-45 ke 373 dengan desain K2-45. Artinya pencahayaan menjadi memenuhi batas minimal 300 lux. Tren ini berbanding terbalik dengan batas atas illuminance yang mengalami penurunan, pada Ruang Guru, desain K1-45 menghasilkan 4439 lux dan pada desain K2-45 menjadi 3269 lux. Nilai ini meningkat lagi pada K3-45 menjadi 3913 lux.

Peningkatan kerapatan panel dalam simulasi ini dapat mengurangi suhu interior hingga 0.2 C (Kelas 02, Toilet 02, Kelas 04), tetapi pada gedung Utara mengalami peningkatan suhu hingga 0.7 C (Kelas 9). Data ini berlaku baik pada desain K1-30 ke K3-30 maupun K1-45 ke K3-45.

Perolehan data *illuminance* lantai dasar yang lebih tinggi dari pada lantai dua ditemukan pada hasil simulasi yang dilakukan oleh Mesloub et al [18] pada tipologi bangunan dengan atrium dan *skylight*. Data pencahayaan alami sepanjang tahun yang ditampilkan memperlihatkan nilai persentase UDI<300 yang lebih tinggi pada lantai 2 sisi Utara dan Timur, dibandingkan dengan nilai UDI<300 lantai dasar. Nilai UDI<300 lantai 2 pada tipologi *celestory* dan tipologi *courtyard* justru lebih rendah daripada lantai dasarnya. Hasil ini dapat digunakan sebagai rujukan sekunder untuk

membuat revisi desain, atau digunakan untuk pertimbangan simulasi lanjutan.

Simulasi menggunakan Ladybug dan Honeybee di dalam Grasshopper merupakan metode asesmen ringkas yang dapat digunakan oleh arsitek baik di tahap awal perancangan maupun pada tahap pengembangan perancangan (*desain development*). Pemodelan tidak perlu melibatkan seluruh elemen bangunan, tetapi menggunakan perwakilan selubung, yaitu dinding, lantai, langit-langit, dan bukaan. Pemodelan demikian cukup ringan bila dilihat dari sudut pandang komputasi.

Simulasi yang menyeluruh meliputi pengumpulan data per jam sepanjang tahun serta simulasi yang melibatkan optimisasi memerlukan perangkat *hardware* dan *software* yang mendukung. Pembacaan terhadap data dan analisis terhadap hasil simulasi dapat menentukan keputusan desain.

Kesimpulan

Simulasi kenyamanan termal dan perhitungan suhu interior menggunakan Honeybee terbukti bermanfaat dalam perancangan. Temuan dalam penelitian ini di antaranya:

1. Pemilihan model perhitungan kenyamanan termal dapat mempengaruhi hasil simulasi, sebab persentase kenyamanan dapat dihitung dengan formulasi dan indeks yang berbeda-beda. *Adaptive Comfort* atau *Adaptive Predictive Mean Vote* (PMAv) memiliki kesamaan dengan hasil menggunakan studi lapangan pada beberapa zona iklim berbeda.
2. Model bangunan yang disimulasikan harus memiliki informasi dimensi ruang, dimensi bukaan, bentuk dan kerapatan elemen shading yang sangat spesifik, orientasi bangunan, dan data lokasi yang terkait dengan data iklim.
3. Sudut bukaan panel kirigami 45 derajat memberikan pencahayaan alami lebih banyak ke dalam ruangan dibandingkan sudut 15 dan 30 derajat, sejalan dengan rasio bukaan terhadap area tertutup panel yang lebih besar. Penggunaan elemen *shading* kirigami dapat menurunkan suhu interior hingga 6.3 °C dari model bangunan tanpa elemen *shading*. Perbedaan kerapatan elemen memperlihatkan selisih suhu interior hingga 0.7 °C, sementara selisih tingkat pencahayaan mencapai 1170 lux.
4. Kerapatan dan sudut panel *shading* kirigami mempengaruhi nilai *illuminance*. Akan tetapi,

ruang Atrium memperlihatkan kondisi tingkat pencahayaan (*illuminance*) dan TCP lebih baik ketika tidak diberikan tambahan elemen *shading*.

Penelitian lanjutan dapat berupa simulasi yang juga melibatkan analisis ventilasi silang pada ruang interior terkait usaha perolehan suhu interior yang ideal serta kenyamanan termal yang optimal. Penelitian tersebut akan memberikan informasi baru terkait inovasi yang mungkin dapat dioptimalkan dalam perolehan kenyamanan termal.

Simulasi yang dilengkapi dengan perangkat optimasi akan lebih memudahkan proses pencarian solusi ideal terkait bukaan dan kenyamanan termal, akan tetapi tentunya perlu didukung oleh perangkat *hardware* dan *software* yang sesuai.

Kontribusi Penulis: N.R.: penulisan naskah orisinal, konsep, metodologi, pemodelan, program, simulasi, proses data, analisis, supervisi, G.S.: penulisan, ilustrasi diagram, review, editing; S.S.: validasi data, penulisan, editing. Setiap penulis telah membaca dan menyetujui naskah yang dipublikasi.

Daftar Pustaka

- [1] J. Nyers, L. Kajtar, S. Tomić, and A. Nyers, "Investment-savings method for energy-economic optimization of external wall thermal insulation thickness," *Energy Build*, vol. 86, pp. 268–274, Jan. 2015, doi: 10.1016/J.ENBUILD.2014.10.023.
- [2] D. Baggs and N. Mortensen, "Thermal Mass in Building Design," Dec. 2006.
- [3] S. Wonorahardjo and I. M. Sutjahja, *Bangunan Gedung Hijau Untuk Daerah Tropis - ITB Press*. Bandung: ITB Press, 2018.
- [4] H. Lin, H. Ni, Y. Xiao, and X. Zhu, "Couple simulations with CFD and ladybug + honeybee tools for green façade optimizing the thermal comfort in a transitional space in hot-humid climate," *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, vol. 22, no. 3, pp. 1317–1342, May 2023, doi: 10.1080/13467581.2022.2081574;WGROU:STRING: PUBLICATION.
- [5] S. Rao, "EVAPORATIVE COOLING OF EXTERNAL WALLS and ITS INFLUENCE ON INDOOR AIR TEMPERATURES IN AN EQUATORIAL CLIMATE." Accessed: Jun. 19, 2025. [Online]. Available: https://www.academia.edu/7050201/EVAPORATIVE_COOLING_OF_EXTERNAL_WALLS_and_ITS_INFLUENCE_ON_INDOOR_AIR_TEMPERATURES_IN_A_N_EQUATORIAL_CLIMATE
- [6] N. Rahmah and S. Wonorahardjo, "Critical Review of Advanced Material for Transit-Oriented Development in a Hot-Humid Climate," *IOP Conf Ser Earth Environ Sci*, vol. 532, no. 1, p. 012015, Jul. 2020, doi: 10.1088/1755-1315/532/1/012015.

- [7] H. Sugawara, S. Shimizu, S. Hagiwara, K.-I. Narita, and T. Mikami, "How much does urban green cool town? *1 National Defense Academy of Japan *2 Tokyo Metropolitan Univ. (present affiliation: Hokkaido Government) *3 National Museum of Nature Study."
- [8] A. M. RIZWAN, L. Y. C. DENNIS, and C. LIU, "A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island," *Journal of Environmental Sciences*, vol. 20, no. 1, pp. 120–128, Jan. 2008, doi: 10.1016/S1001-0742(08)60019-4.
- [9] S. Nicholson, M. Nikolopoulou, R. Watkins, M. Löve, and C. Ratti, "Data driven design for urban street shading: Validation and application of ladybug tools as a design tool for outdoor thermal comfort," *Urban Clim*, vol. 56, p. 102041, Jul. 2024, doi: 10.1016/J.UCLIM.2024.102041.
- [10] R. Yao *et al.*, "Evolution and performance analysis of adaptive thermal comfort models – A comprehensive literature review," *Build Environ*, vol. 217, p. 109020, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.buildenv.2022.109020.
- [11] J. F. Nicol and M. Humphrey, "Understanding the adaptive approach to thermal comfort," *ASHRAE Trans*, vol. 104, pp. 991–1004, 1998.
- [12] K. Blazejczyk, Y. Epstein, G. Jendritzky, H. Staiger, and B. Tinz, "Comparison of UTCI to selected thermal indices," *Int J Biometeorol*, vol. 56, no. 3, p. 515, 2011, doi: 10.1007/S00484-011-0453-2.
- [13] M. Baaghideh, F. Mayvaneh, A. Shekari Badi, and T. Shojae, "Evaluation of human thermal comfort using UTCI index: case study Khorasan Razavi, Iran," *Natural Environment Change*, vol. 2, no. 2, pp. 165–175, Jul. 2016, Accessed: Jun. 18, 2025. [Online]. Available: https://jnec.ut.ac.ir/article_61007.html
- [14] T. Nie, D. Lai, K. Liu, Z. Lian, Y. Yuan, and L. Sun, "Discussion on inapplicability of Universal Thermal Climate Index (UTCI) for outdoor thermal comfort in cold region," *Urban Clim*, vol. 46, p. 101304, Dec. 2022, doi: 10.1016/J.UCLIM.2022.101304,AND',.
- [15] S. Zare *et al.*, "A comparison of the correlation between heat stress indices (UTCI, WBGT, WBGT, TSI) and physiological parameters of workers in Iran," *Weather Clim Extrem*, vol. 26, p. 100213, Dec. 2019, doi: 10.1016/J.WACE.2019.100213.
- [16] "Permenaker No. 5 Tahun 2018. ".
- [17] M. Beyraghshamshir and E. Sarkardehei, "A comparison of the cooling and heating performance of two passive systems of central courtyards and atriums at an elementary school in Yazd City," *Solar Energy*, vol. 252, pp. 156–162, Mar. 2023, doi: 10.1016/J.SOLENER.2023.01.034.
- [18] A. Mesloub *et al.*, "The Daylighting Optimization of Integrated Suspended Particle Devices Glazing in Different School Typologies," *Buildings* 2024, Vol. 14, Page 2574, vol. 14, no. 8, p. 2574, Aug. 2024, doi: 10.3390/BUILDINGS14082574.
- [19] J. A. Romero-Odero, C. Galán-Marín, and C. Rivera-Gómez, "Atrium Impact on a School-Building: Thermal Performance in a Hot Climate," *Proceedings 2019*, Vol. 38, Page 18, vol. 38, no. 1, p. 18, Jan. 2020, doi: 10.3390/PROCEEDINGS2019038018.
- [20] F. A. Najafabadi, "Effect of Atrium on Thermal Comfort," *Eastern Mediterranean University (EMU)-Doğu Akdeniz Üniversitesi (DAÜ)*, 2013.
- [21] J. Ma and Q. Yang, "Optimizing Annual Daylighting Performance for Atrium-Based Classrooms of Primary and Secondary Schools in Nanjing, China," *Buildings* 2023, Vol. 13, Page 11, vol. 13, no. 1, p. 11, Dec. 2022, doi: 10.3390/BUILDINGS13010011.
- [22] Badan Pusat Statistik, *STATISTIK INDONESIA 2023*. Badan Pusat Statistik, 2023.
- [23] N. R. M. Sakiyama, J. Frick, T. Bejat, and H. Garrecht, "Using CFD to Evaluate Natural Ventilation through a 3D Parametric Modeling Approach," *Energies* 2021, Vol. 14, Page 2197, vol. 14, no. 8, p. 2197, Apr. 2021, doi: 10.3390/EN14082197.
- [24] Y. Ibrahim, T. Kershaw, and P. Shepherd, "A methodology For Modelling Microclimates: A Ladybug-tools and ENVI-met verification study."
- [25] E. Naboni, M. Meloni, C. MacKey, and J. Kaempf, "The Simulation of Mean Radiant Temperature in Outdoor Conditions: A review of Software Tools Capabilities," *Building Simulation Conference Proceedings*, vol. 16, pp. 3234–3241, Sep. 2019, doi: 10.26868/25222708.2019.210301.
- [26] N. Fazeli, M. Mahdavejad, and M. Bermanian, "Dynamic Envelope and Control Shading Pattern for Office Buildings Visual Comfort in Tehran," *Space Ontology International Journal* vol. 4 31, vol. 4, no. 3, p. 31, Sep. 2019, Accessed: Jun. 18, 2025. [Online]. Available: <http://sanad.iau.ir/en/Journal/soij/Article/938362>
- [27] S. J. P. Callens and A. A. Zadpoor, "From flat sheets to curved geometries: Origami and kirigami approaches," *Materials Today*, vol. 21, no. 3, pp. 241–264, Apr. 2018, doi: 10.1016/J.MATTOD.2017.10.004.
- [28] R. Yao, B. Li, and J. Liu, "A theoretical adaptive model of thermal comfort – Adaptive Predicted Mean Vote (aPMV)," *Build Environ*, vol. 44, no. 10, pp. 2089–2096, Oct. 2009, doi: 10.1016/J.BUILDENV.2009.02.014.