

Optimasi Kondisi Iklim Mikro terhadap Unsur Kenyamanan Termal pada Bangunan Pendapa Ageng Mangkunegaran Surakarta

Bonifacio Bayu Senasaputro¹, J. Ade Prasetya², Rosalia Rachma R³, Krisprantono⁴

^{1,3,4} Laboratorium Teori dan Sejarah Arsitektur, Program Studi Arsitektur, Fakultas Arsitektur dan Desain, Universitas Katolik Soegijapranata Semarang.

² Laboratorium Perencanaan dan Perancangan Teknologi Arsitektural, Program Studi Arsitektur, Fakultas Teknik, Universitas Atma Jaya Yogyakarta.

email korespondensi: bonifacio_bayu@unika.ac.id

Abstrak

Perubahan iklim yang terjadi dalam suatu lingkungan terbangun memberikan dampak yang signifikan terhadap tingkat kenyamanan termal pada lingkungan dan bangunan yang terdapat pada kawasan tersebut. Terlebih ketika lingkungan dan bangunan tersebut merupakan salah satu aset cagar budaya yang masih berperan fungsinya dalam kegiatan yang bersifat sakral, salah satunya adalah bangunan Pendapa Ageng Mangkunegaran Surakarta. Pendapa merupakan salah satu elemen arsitektural pada tatanan ruang pada arsitektur Jawa, yang keberadaannya menyatu dan menjadi bagian dari ruang luar, dan seringkali disebut sebagai elemen bangunan semi-tertutup karena bentuk dan kondisi fisiknya yang tanpa dinding. Pendapa Ageng Mangkunegaran merupakan salah satu pendapa terbesar di Indonesia, menjadikan ini sebagai salah satu yang khas untuk dikaji terkait optimasi kenyamanan termal lingkungan yang diperoleh dari kondisi iklim mikro. Penelitian ini bertujuan merumuskan pengaruh kondisi iklim mikro yang terdapat baik di sekitar lingkungan maupun bangunan di dalam pendapa terhadap kondisi termal yang diperoleh. Hasil penelitian ini akan mengarahkan pada optimasi terhadap kondisi iklim mikro supaya dapat diperoleh hasil kenyamanan termal yang ideal. Penelitian ini merupakan penelitian deskriptif dengan metode kuantitatif yang didukung oleh simulasi eksperimental melalui analisis komputasi ENVI-met. Penelitian ini dilaksanakan melalui tiga tahap, yakni tahap pertama berupa tahap empiris pengukuran kondisi iklim mikro, tahap kedua berupa simulasi menggunakan ENVI-met untuk mengetahui kondisi termal yang tercipta dari elemen lanskap di sekitar pendapa ageng dan area yang dinaungi oleh atap pendapa, tahap ketiga adalah upaya optimasi berdasarkan hasil simulasi yang diperoleh berupa rekomendasi yang bertujuan untuk menciptakan kondisi iklim mikro yang ideal.

Kata-kunci: Pendapa Ageng Mangkunegaran, kondisi iklim mikro, sistem ENVI-met, optimasi kenyamanan termal

Pengantar

Bangunan Pendapa Ageng Mangkunegaran merupakan bagian dari kawasan Istana Pura Mangkunegaran Surakarta, yang menjadi salah satu unsur daya tarik wisata dan cagar budaya yang patut dijaga kelestariannya. Pendapa Ageng Mangkunegaran merupakan salah satu representasi Arsitektur Jawa, dimana fungsi dari eksistensinya memberikan suatu pengaruh yang positif bagi bumi lingkungannya. Arsitektur tradisional Jawa, saat ini diyakini dari generasi ke generasi terus berkembang dan sesuai dengan kondisi pada masa kini, dimana perubahan-perubahan yang ada sangat memungkinkan terjadi tidak hanya ditinjau dari aspek fisik bangunan, melainkan juga perubahan kondisi yang terdapat pada lingkungan di sekitar obyek fisik bangunan, salah satunya

adalah jarak antar massa dengan bangunan di sekitar, vegetasi, unsur-unsur alami pada lanskap seperti air dan material penutup tanah (*paving*). Landasan berpikir dari eksistensi bangunan Pendapa Ageng Mangkunegaran ialah ciri fisiknya yang khas dan merupakan ruang semi terbuka yang tidak lepas eksistensinya yang merupakan bagian dari ruang luar. Pendapa merupakan sarana pernaungan yang berfungsi menjalin komunikasi dengan sesama manusia, sebagai ruang untuk menjalin pertemuan silaturahmi melalui upacara maupun pagelaran seni (Priyotomo, 1984). Dalam filosofi tatanan ruang dalam arsitektur Jawa, pendapa merupakan bagian dari tatanan konfigurasi rumah Jawa dengan oposisi biner, yakni keberadaannya di antara "luar" dan "dalam", antara "ruang aktivitas" dengan "ruang istirahat", sehingga keberadaannya sebagai bagian dari ruang luar menjadi salah satu faktor yang paling diperhitungkan dalam upaya membentuk iklim mikro pada lingkungan binaan (Santosa, 2000).

Latar Belakang Masalah

Eksistensi bangunan Pendapa Ageng Mangkunegaran sebagai bagian dari elemen bangunan dengan karakter struktur fisik "semi-terbuka" terhadap pelataran (ruang luar) maupun ruang dalam (area pernaungan atap pendapa) tentu tidak terlepas dari faktor penentu fisik elemen tata ruang luar di sekitar bangunan pendapa. Area pelataran di sekitar bangunan pendapa beberapa dekade ini mengalami perubahan elemen fisik, beberapa diantaranya pengurangan beberapa elemen vegetasi berupa pohon peneduh, perubahan permukaan tanah yang ditutup dengan *paving*, serta elemen air pada kolam yang saat ini tidak beroperasi. Di samping itu, faktor keberadaan bangunan di sekeliling bangunan pendapa yang saat ini direnovasi juga berpengaruh terhadap perubahan suhu yang signifikan. Perubahan elemen fisik di sekitar Pendapa Mangkunegaran diduga mempengaruhi faktor UHI (*Urban Heat Island*) yang sangat menentukan pengaruh yang signifikan terhadap tingginya suhu udara di dalam suatu kawasan, sehingga mempengaruhi kualitas udara yang terdapat di sekitar bangunan. Ruang terbuka yang terdapat pada sekitar bangunan Pendapa Mangkunegaran yang direpresentasikan melalui elemen desain pelataran sisi barat, timur dan selatan, yang ditata untuk memperoleh unsur keindahan, kenyamanan, serta kesehatan dari pengguna. Ruang terbuka (pelataran) yang terdapat di sekitar bangunan pendapa memiliki peranan penting sebagai pengendali iklim mikro yang berpengaruh pula terhadap kenyamanan termal pada bangunan pendapa. Dengan mengetahui pengaruh perubahan iklim mikro yang terdapat pada area di sekitar bangunan pendapa, akan diperoleh data empiris mengenai seberapa besar perubahan iklim mikro yang terdapat pada area di sekitar Pendapa Ageng Mangkunegaran dapat mempengaruhi unsur kenyamanan termal pada bangunan pendapa.

Pertanyaan Penelitian :

- Bagaimana elemen desain pelataran Pendapa Mangkunegaran dapat mempengaruhi kondisi iklim mikro yang berdampak pada unsur kenyamanan termal?
- Elemen desain apa yang paling signifikan mempengaruhi unsur kenyamanan termal pada bangunan Pendapa Mangkunegaran?
- Bagaimana rekomendasi yang disarankan untuk memperoleh kondisi ideal dalam menyikapi fenomena perubahan iklim mikro di Pendapa Mangkunegaran?

Fokus Kajian

Fokus penelitian ini adalah pada isu perubahan elemen desain di pelataran Pendapa Mangkunegaran dan mengkaji apakah terdapat pengaruh yang signifikan terhadap perubahan iklim mikro sehingga berpengaruh terhadap kenyamanan termal.

Metode

Metoda yang digunakan untuk penelitian ini adalah metode kuantitatif, yang dilaksanakan melalui dukungan simulasi komputasi (eksperimental). Simulasi merupakan metode penelitian yang terkontrol dalam konteks riil (data yang sesuai fakta sebenarnya) yang bertujuan mempelajari interaksi *fluid* (dinamis) dalam suatu pengaturan (Wang, 2002).

Penelitian ini dilaksanakan melalui 3 (tiga) tahap. Tahap pertama adalah pengukuran empirik, yang bertujuan mengetahui kondisi iklim mikro dan analisis iklim mikro (eksisting) dengan melakukan pendataan terhadap suhu temperatur, kelembaban dan kecepatan angin, yang diukur di lokasi penelitian. Penentuan titik lokasi ditentukan 4 (empat) titik utama, yakni 3 (tiga) titik pelataran sekitar Pendapa Ageng Mangkunegaran, dan 1 (satu) titik di area ruang Pendapa Ageng. Data-data dan variabel tambahan juga diukur seperti vegetasi bertajuk rindang, sedang, serta elemen vegetasi yang lain. Selain itu juga pendataan elemen perkerasan, tanah pelataran, serta elemen air pada lanskap. Tahap kedua, yakni dengan melakukan studi simulasi melalui sistem ENVI-met untuk mengetahui pengaruh eksisting tata ruang sekitar pendapa terhadap kondisi unsur kenyamanan termal. Tahap ketiga merupakan simulasi optimasi, yakni melalui program yang sama, untuk meninjau tahapan menuju pada kondisi yang lebih baik.

Penelitian ini dilaksanakan melalui dukungan simulasi komputasi dengan *software* ENVI-met berupa permodelan iklim mikro 3 (tiga) dimensional yang dirancang untuk permodelan bentuk bangunan, ruang antara pada pelataran, dan permukaan selubung bangunan pada bangunan di sekitar Pendapa Ageng Mangkunegaran. Selain itu unsur vegetasi dan *paving block* pada pelataran sekitar pendapa dan interaksi udara pada iklim skala mikro melalui resolusi khas 0.5-10m pada area ruang dalam Pendapa Ageng Mangkunegaran dengan rentan waktu tertentu. *Engine* atau mekanik simulasi permodelan dalam ENVI-met ini didasari oleh hukum mekanika fluida dan termodinamika. Model simulasi dilaksanakan pada aliran di sekitar dan di dalam area pendapa, proses pertukaran panas serta uap pada permukaan tanah, bangunan, turbulensi, pertukaran parameter vegetasi dan bioklimatologi, dan partikel *disperse* (Kim et al, 2020).

Pengumpulan Data

Penelitian dimulai dengan melakukan pengukuran lapangan pada kawasan Pendapa Ageng Mangkunegaran Surakarta. Hasil pengukuran tersebut lalu digunakan untuk melakukan proses validasi *software* Envi-met v4.0 dengan tujuan membuktikan kesahihannya mereplika kejadian lingkungan di kawasan Pendapa Ageng Mangkunegaran. Setelah target validasi tercapai, dikembangkan skenario-skenario model lingkungan dengan Envi-met v4.0 yang disimulasikan lalu diperbandingkan secara termal untuk mendapatkan kesimpulan.

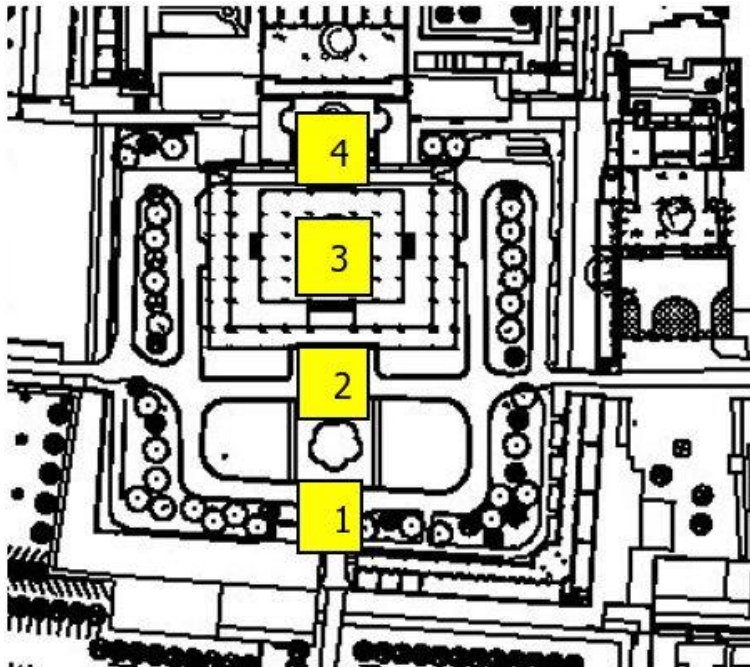
Observasi & Pengukuran Data Lapangan

Pengukuran lapangan dilakukan dengan alat ukur suhu udara dan kecepatan angin *Hobo Data Logger U12-012* interior berjumlah dua buah, *Hobo Data Logger U002-64* pendant eksterior satu buah, dan sebuah anemometer digital *Lutron LM-8000A*. Karena terdapat aturan yang ketat selama pandemi pada obyek kajian Pendapa Mangkunegaran, maka pengukuran hanya dapat dilakukan selama 30 menit pada tanggal 5 Juni 2021 pukul 10.40–11.10 WIB.



Gambar 1. Ilustrasi Alat Ukur *Hobo U12-012* (Kiri), *Hobo U002-64* (Tengah), dan *Lutron LM-8000A* (Kanan)

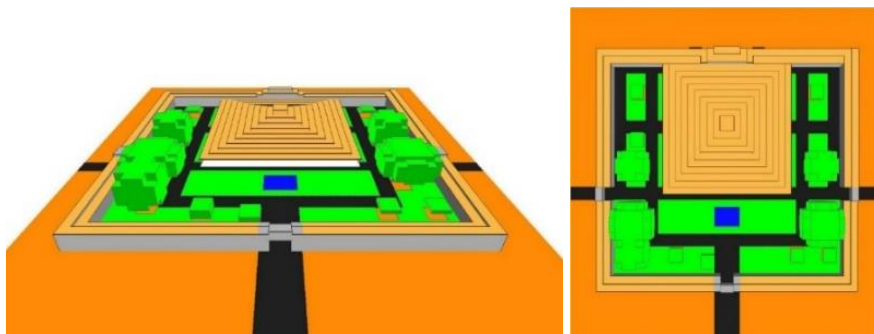
Posisi titik ukur pada pendapa adalah seperti gambar di bawah ini. Posisi 1 ditetapkan pada area gerbang sisi selatan bertujuan untuk mengukur suhu udara luar. Posisi 2 diletakkan pada area depan pendapa untuk mengukur kecepatan angin yang masuk ke dalam pendapa. Posisi 3 terdapat di area tengah pendapa untuk mengukur suhu udara yang terdapat di dalam pendapa. Kemudian, posisi 4 terletak pada area terdalam pendapa untuk mengetahui suhu udara terjauh dari arah angin yang masuk. Pengukuran lapangan hanya berfokus pada suhu udara dan kecepatan angin saja karena keterbatasan kemampuan alat ukur *Hobo Data Logger U002-64* yang dapat mengukur suhu udara saja. Dengan demikian, validasi hanya dapat dilakukan terhadap suhu udaranya saja. Sedangkan, data kecepatan angin yang direkam oleh alat *Lutron* akan digunakan sebagai acuan input angin saat proses validasi dan simulasi berjalan.



Gambar 2. Posisi Pemasangan Alat Ukur pada Kawasan Pendapa Ageng Mangkunegaran

Hasil Analisis dan Pembahasan

Validasi dimulai dengan memodelkan kawasan Pendapa Ageng Mangkunegaran sesuai kondisi nyatanya (eksisting) dalam Envi-met v4 seperti di bawah ini. Permodelan dikhususkan hanya pada area Kawasan Pendapa, bangunan-bangunan lain tidak disertakan pada simulasi ini.



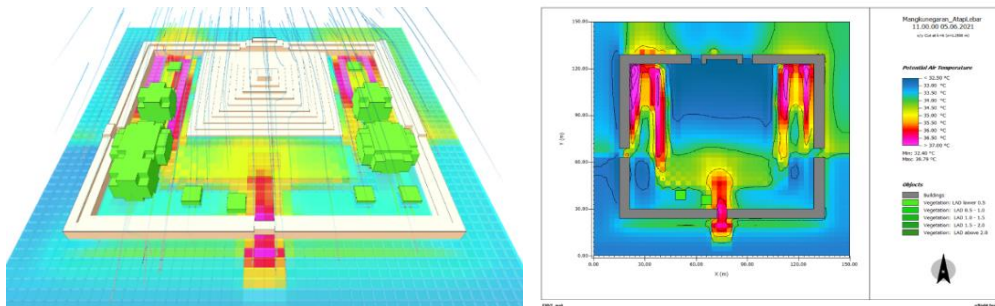
Gambar 3. Model Perspektif (Kiri) dan Tampak Atas (Kanan) Kawasan Pendapa Ageng Mangkunegaran Eksisting

Tabel 1. Kondisi Lingkungan Sekitar Pendapa Ageng Mangkunegaran

	Suhu Udara (luar)	Kecepatan Angin (rerata Titik 2)	Arah Angin
Nilai	27-38°C	0.8 m/s	dari selatan

Kemudian, hasil simulasi akan diperbandingkan dengan data suhu udara yang telah diukur pada titik 1, titik 3 dan titik 4. Jika hasil simulasi mendekati pengukuran lapangan dengan simpangan tidak lebih dari 5%, maka simulasi dapat dinyatakan valid.

Hasil simulasi peta kontur suhu udara di kawasan Pendapa Ageng Mangkunegaran eksisting ditunjukkan melalui gambar berikut :

**Gambar 4.** Hasil Simulasi Kontur Suhu Udara Kawasan Pendapa Ageng Mangkunegaran Eksisting

Area gerbang selatan mendapatkan suhu udara tertinggi dengan area sudut utara kawasan karena paparan matahari yang terik dan perkerasan aspal di lokasi tersebut. Adapun hasil komparasi titik 1, titik 3, dan titik 4 dengan data pengukuran lapangan dapat dilihat pada tabel di bawah ini.

Tabel 2. Hasil Validasi *Software* Envi-met v4.0

	Titik 1	Titik 3	Titik 4
Pengukuran Lapangan (°C)	36.7	33.7	32.7
Hasil Simulasi (°C)	36.6	33.2	32.6
Simpangan (%)	0.27	1.48	0.3

Berdasarkan tabel diatas, seluruh nilai simpangan pada titik-titik ukur menunjukkan nilai dibawah 5%. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa *software* Envi-met v4 mampu digunakan untuk mensimulasikan kejadian suhu udara di kawasan Pendapa Ageng Mangkunegaran.

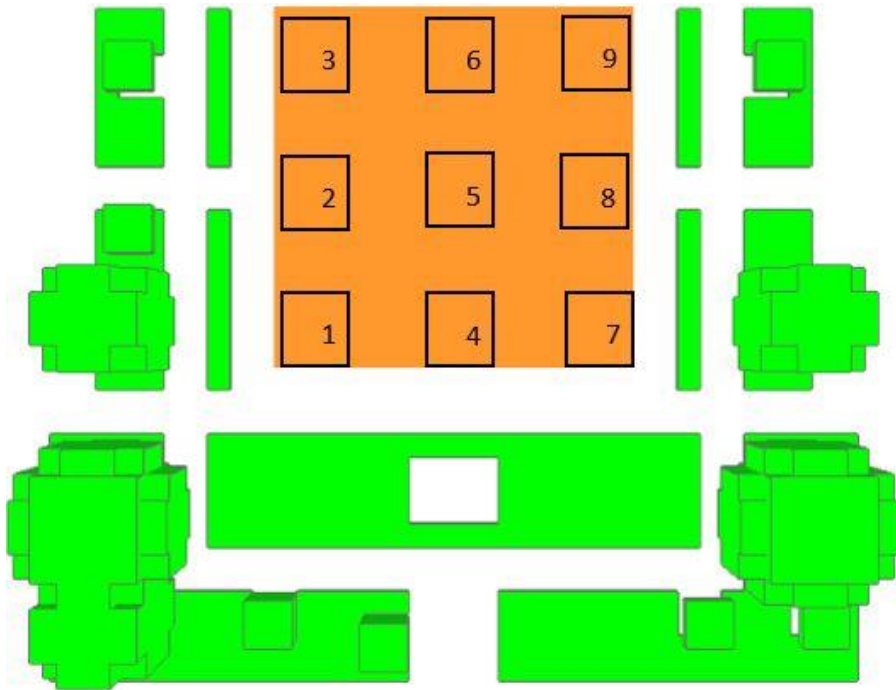
Pengembangan Skenario Model Envi-met v4.0

Penelitian dilanjutkan dengan membangun skenario untuk menjawab pertanyaan penelitian sebagai berikut :

- Model Atap Lebar, merupakan model eksisting kawasan dan bangunan pendapa saat ini yang atapnya telah diperlebar. Model ini menjadi acuan analisis hasil simulasi bagi model-model lain.
- Model Atap Awal, adalah model desain pendapa mula-mula tanpa tambahan emperan, bertujuan untuk menguji pengaruh desain emperan tambahan Pendapa Mangkunegaran terhadap kenyamanan termalnya.
- Model Atap Tinggi, yaitu model pendapa eksisting (Model Atap Lebar) dengan atap yang dinaikkan setinggi 2 meter, untuk menguji pengaruh elemen bangunan pendapa yang berupa perubahan ketinggian peneduh.
- Model Iklim Mikro, adalah model desain lanskap dengan tambahan vegetasi perindang setinggi 15 meter disekeliling pendapa beserta air mancur setinggi 4 meter yang dipasang pada kolam

air depan pendapa. Model ini digunakan untuk menguji apakah perubahan desain lanskap dan iklim mikro memiliki pengaruh termal di dalam area Pendapa Mangkunegaran.

Keempat model tersebut disimulasikan dan diperbandingkan dengan kondisi eksisting untuk mengetahui pengaruh kenyamanan termal area pendapa. Penelitian mengambil data numerik hasil simulasi pada 9 titik yang tersebar merata di area pendapa seperti gambar dibawah ini. Waktu pengambilan data ditentukan sama seperti pengukuran lapangan, yaitu 5 Juni 2021 pukul 11.00 WIB dengan toleransi 1 jam sebelum dan sesudahnya, yaitu pukul 10.00, 11.00, dan 12.00 WIB dengan ketinggian 1,25 meter dari permukaan tanah.



Gambar 5. Lokasi Titik-Titik Pengambilan Data Numerik Faktor Lingkungan pada Bangunan Pendapa

Kesembilan titik diatas kemudian dicari nilai reratanya agar dapat mewakili kondisi-kondisi yang terdapat pada seluruh bagian pendapa. Nilai-nilai rerata tersebut lalu dibentuk grafik untuk memperbandingkan kinerja lingkungan termal antar skenario.

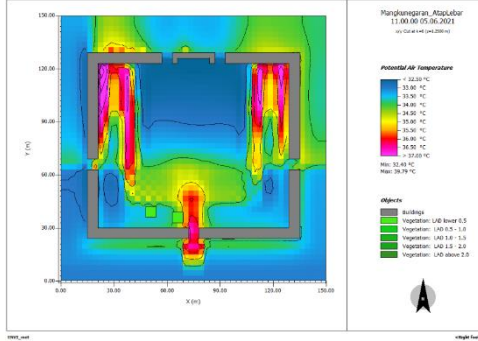
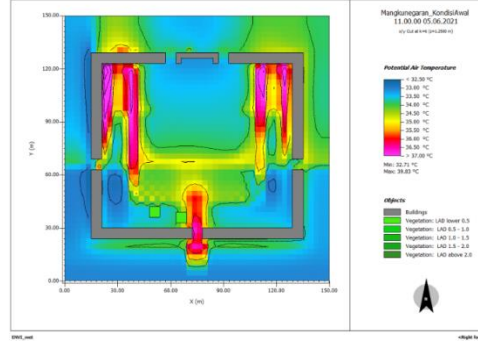
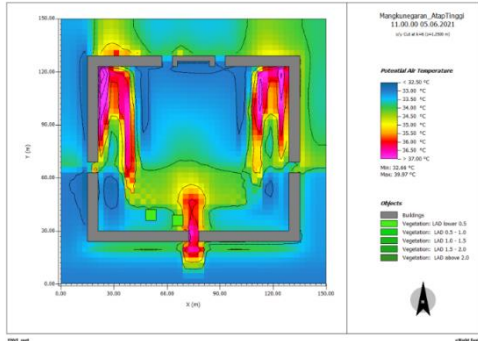
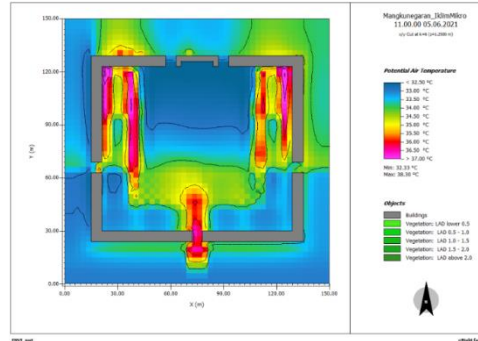
Hasil Simulasi Envi-met v4

Simulasi seluruh model akan dijalankan dengan fokus aspek lingkungan kenyamanan termal menurut Fanger yang meliputi; suhu udara, kecepatan angin, suhu radiasi rerata, kelembaban udara, dan skala PMV (*Predicted Mean Vote*) sebagai indikator penentu kesimpulannya. Penelitian ini akan menyajikan hasil simulasi Envi-met v4 berupa gambar-gambar visual peta kontur yang diambil pada ketinggian 1,25meter dari permukaan tanah serta grafik-grafik komparasi data numerik yang disertai dengan analisis untuk menjabarkan kejadian-kejadian lingkungannya.

Analisis Suhu Udara pada Masing-Masing Model

Hasil peta kontur suhu udara dengan skala warna yang telah disamakan pada masing-masing skenario model adalah sebagai berikut.

Tabel 3. Skenario Permodelan Peta Kontur Suhu Udara dengan Skala Warna

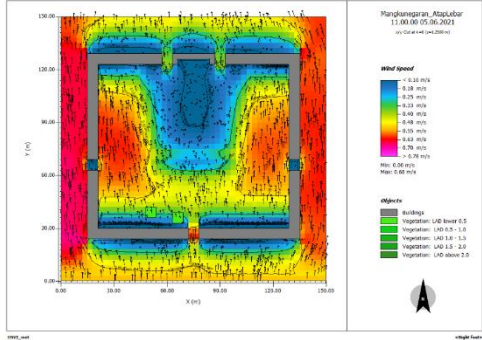
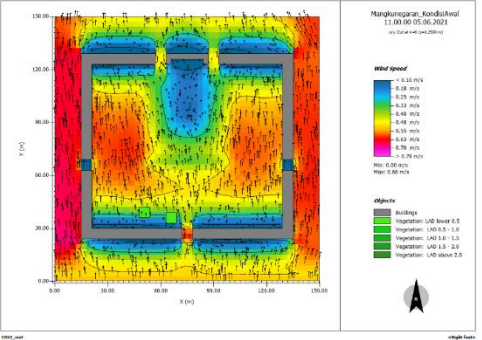
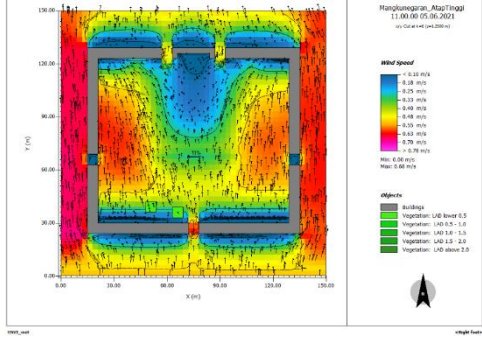
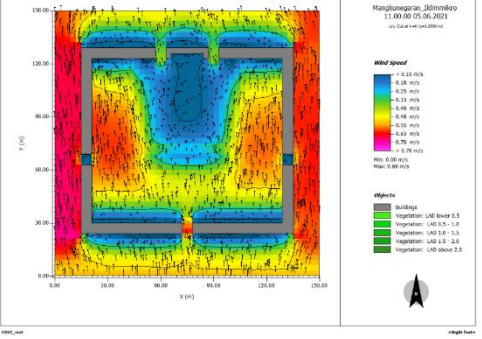
Model Atap Lebar (eksisting)	Model Atap Awal
 Handlungseplan, AtapLebar 11.00.00 05.06.2021 xy: 524.414 (x=200.00) Potential Air Temperature 32.00 °C 33.00 °C 34.00 °C 35.00 °C 36.00 °C 37.00 °C Max: 37.00 °C Min: 32.00 °C Legend: - Building - Vegetation: LAD lower 0.5 - Vegetation: LAD 0.5 - 1.0 - Vegetation: LAD 1.0 - 1.5 - Vegetation: LAD 1.5 - 2.0 - Vegetation: LAD above 2.0	 Handlungseplan, KondisiAwal 11.00.00 05.06.2021 xy: 524.414 (x=200.00) Potential Air Temperature 32.00 °C 33.00 °C 34.00 °C 35.00 °C 36.00 °C 37.00 °C Max: 37.00 °C Min: 32.00 °C Legend: - Building - Vegetation: LAD lower 0.5 - Vegetation: LAD 0.5 - 1.0 - Vegetation: LAD 1.0 - 1.5 - Vegetation: LAD 1.5 - 2.0 - Vegetation: LAD above 2.0
Area pintu gerbang selatan dan sudut-sudut bangunan utara terjadi suhu tertinggi 37°C karena keberadaan perkerasan aspal dan minimnya pohon peneduh. Area sisi selatan pendapa bersuhu 34°C. Selain itu, suhu udara 33°C terjadi di bawah vegetasi perindang. Sedangkan area pendapa terdalam bersuhu 33–32°C.	Secara garis besar kejadian suhu udara pada area sekitar pendapa di skenario ini serupa dengan model eksisting. Perbedaannya, area pendapa mendapatkan suhu 33°C secara merata dan tidak terjadi suhu 32°C di area tersebut. Area bawah pohon perindang menjadi area bersuhu paling rendah 32°C.
Model Atap Tinggi	Model Iklim Mikro
 Handlungseplan, AtapTinggi 11.00.00 05.06.2021 xy: 524.414 (x=200.00) Potential Air Temperature 32.00 °C 33.00 °C 34.00 °C 35.00 °C 36.00 °C 37.00 °C Max: 37.00 °C Min: 32.00 °C Legend: - Building - Vegetation: LAD lower 0.5 - Vegetation: LAD 0.5 - 1.0 - Vegetation: LAD 1.0 - 1.5 - Vegetation: LAD 1.5 - 2.0 - Vegetation: LAD above 2.0	 Handlungseplan, IklimMikro 11.00.00 05.06.2021 xy: 524.414 (x=200.00) Potential Air Temperature 32.00 °C 33.00 °C 34.00 °C 35.00 °C 36.00 °C 37.00 °C Max: 37.00 °C Min: 32.00 °C Legend: - Building - Vegetation: LAD lower 0.5 - Vegetation: LAD 0.5 - 1.0 - Vegetation: LAD 1.0 - 1.5 - Vegetation: LAD 1.5 - 2.0 - Vegetation: LAD above 2.0
Secara garis besar kejadian suhu udara pada area sekitar pendapa di skenario ini serupa dengan model eksisting. Perbedaannya, area pendapa ini bersuhu lebih hangat daripada Model Atap Lebar tetapi lebih dingin daripada Model Atap Awal antara 33–32°C. Sedangkan area bawah pohon perindang bersuhu paling rendah, yaitu 32°C.	Keberadaan pohon peneduh di sekeliling pendapa membuat area sekitar pendapa bersuhu lebih rendah. Area depan pendapa tetap bersuhu 34°C. Lalu, area dalam pendapa dan pringgitan bersuhu terendah 32°C secara lebih merata karena naungan atap yang lebar seperti Model Atap Lebar (eksisting).

Tabel diatas menunjukkan area suhu udara rendah lebih luas terdapat pada Model Atap Lebar dan Model Iklim Mikro. Model Atap Tinggi mendapatkan suhu udara lebih hangat pada area tengah pendapa. Model Atap Awal tidak menghasilkan suhu udara serendah ketiga model yang lain. Sebagai tambahan, Model Iklim Mikro mampu memberikan suhu udara rendah yang merata pada area taman selatan serta mengurangi suhu tinggi pada area sudut-sudut sisi barat laut dan timur laut kawasan.

Optimasi Kondisi Iklim Mikro terhadap Unsur Kenyamanan Termal pada Bangunan Pendapa Ageng Mangkunegaran Surakarta
Analisis Kecepatan Angin pada Masing-Masing Model

Hasil simulasi berupa peta kontur kecepatan angin pada masing-masing skenario model adalah sebagai berikut. Sebagai tambahan, arah angin digambarkan dengan simbol panah-panah kecil berwarna hitam.

Tabel 4. Skenario Permodelan Peta Kontur Kecepatan Angin

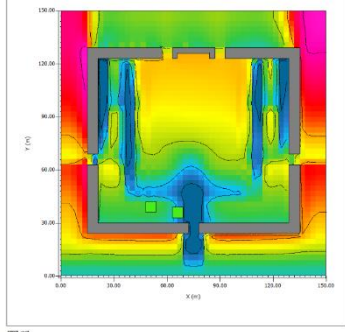
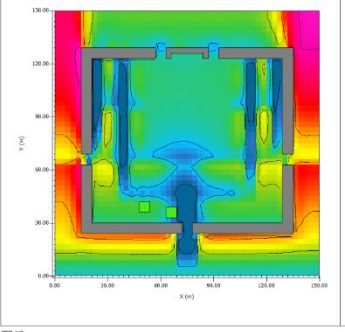
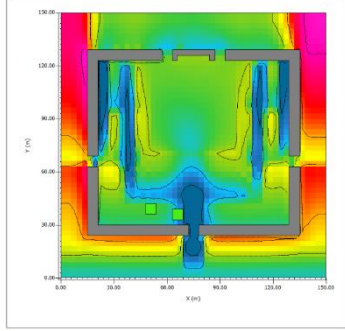
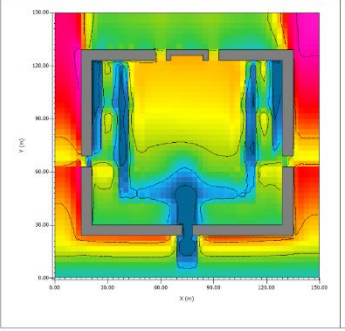
Model Atap Lebar (eksisting)	Model Atap Awal
 Area pintu gerbang selatan menjadi masukan utama angin dengan kecepatan 0,7m/s. Pintu gerbang timur dan barat terjadi angin dibawah 0,1m/s karena angin bergerak ke utara melalui taman samping 0,4–0,6m/s dan keluar melalui dua pintu di sisi pringgitan. Sedangkan, area pendapa terjadi pelemahan kecepatan angin 0,4–0,1m/s ke utara.	 Secara garis besar kejadian angin pada area sekitar pendapa di skenario ini serupa dengan model eksisting. Perbedaannya terletak pada atap pendapa yang lebih kecil sehingga menyebabkan angin lebih leluasa dan lebih cepat 0,5-0,1m/s memasuki area pendapa sampai akhirnya keluar melalui pintu utara di kanan-kiri pringgitan.
Model Atap Tinggi	Model Iklim Mikro
 Secara garis besar kejadian angin pada area sekitar pendapa di skenario ini serupa dengan model eksisting. Meskipun pendapa ini memiliki luasan lebih besar dari Model Atap Awal, tetapi atap yang lebih tinggi menyebabkan angin bergerak leluasa ketika memasuki area pendapa 0,5-0,1m/s sampai akhirnya keluar melalui pintu kanan-kiri pringgitan.	 Secara garis besar kejadian angin pada area sekitar pendapa di skenario ini serupa dengan model eksisting. Karena masukan kecepatan angin yang rendah, 0,7m/s, penambahan pohon perindang setinggi 15meter dan air mancur di kolam selatan tidak mengubah pola angin yang mengalir di dalam kawasan Pendapa Ageng Mangkunegaran ini.

Kecepatan angin ditentukan oleh luasan dan ketinggian atap pendapa. Atap yang semakin kecil dan tinggi membuat angin bertiup leluasa sehingga kecepatannya lebih tinggi. Penambahan vegetasi setinggi 15 meter tidak memiliki pengaruh terhadap kecepatan maupun pola angin di area pendapa karena tajuk penghalangnya terletak diatas ketinggian 3 meter.

Analisis Kelembaban Relatif pada Masing-masing Model

Simulasi ini bertujuan untuk mengetahui perubahan nilai kelembaban relatif ketika terjadi penambahan jumlah vegetasi perindang serta air mancur di lingkungan sekitar pendapa.

Tabel 5. Simulasi Permodelan untuk Menentukan Kelembaban Relatif

Model Atap Lebar (eksisting)  Model Atap Lebar (eksisting)	Model Atap Awal  Model Atap Awal
Area bersuhu tinggi di kawasan ini, seperti pintu gerbang selatan serta sudut-sudut timur laut dan barat laut mendapatkan kelembaban yang lebih rendah (55%) dibandingkan area pendapa (65-70%) yang bersuhu rendah. Selain itu, area bawah pohon perindang terdapat kelembaban relatif udara sebesar 67,5%.	Area pendapa memiliki kelembaban relatif 60-65% karena suhu udara yang lebih tinggi. Kecepatan angin yang lebih kencang menyebabkan pergantian udaranya menjadi lebih lancar sehingga udara menjadi lebih kering. Area bawah pohon perindang pada taman disekeliling pendapa mendapatkan kelembaban relatif udara sebesar 67,5%.
Model Atap Tinggi  Model Atap Tinggi	Model Iklim Mikro  Model Iklim Mikro
Area pendapa memiliki tingkat kelembaban berada diantara Model Atap Lebar dan Model Atap Awal, 60-67,5% karena memiliki suhu dan kecepatan angin yang nilainya berada diantara kedua model tersebut. Terjadi gradasi kelembaban udara yang mencolok dibanding Model Atap Awal, kelembaban semakin tinggi saat menuju area tepian pendapa dan pringgitan karena suhu udaranya lebih rendah.	Pola dan nilai kelembaban relatif di area pendapa serupa dengan Model Atap Lebar, 65-70%. Penambahan vegetasi perindang yang tinggi serta air mancur di kolam depan pendapa tidak menyebabkan peningkatan nilai kelembaban. Fenomena ini terjadi karena kawasan pendapa yang luas menyebabkan pergerakan udara kawasan lancar dan terus berganti dengan udara luar.

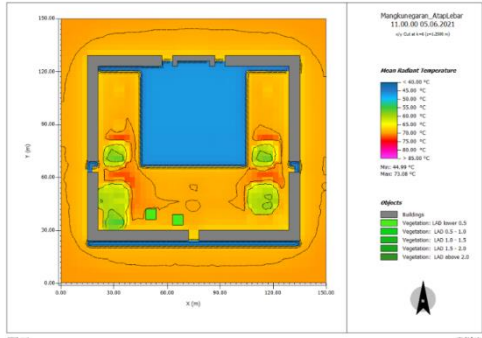
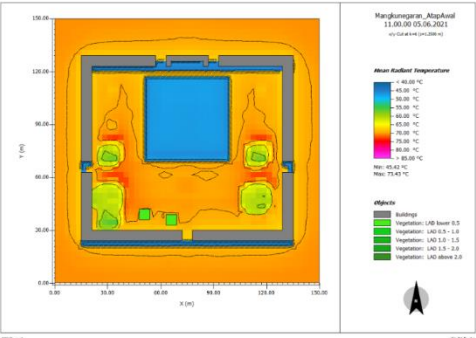
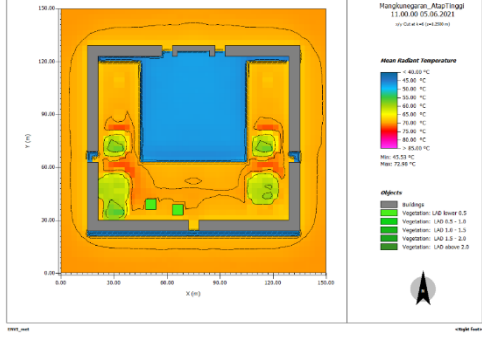
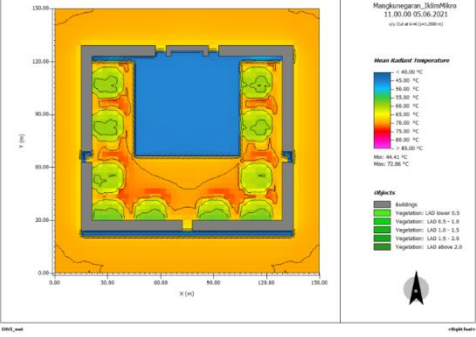
Perubahan kelembaban udara di kawasan Pendapa Ageng Mangkunegaran dipengaruhi oleh suhu udara dan kecepatan angin yang terjadi di setiap titik. Jika suhu udara dan kecepatan angin meningkat,

Optimasi Kondisi Iklim Mikro terhadap Unsur Kenyamanan Termal pada Bangunan Pendapa Ageng Mangkunegaran Surakarta maka kelembaban udara akan turun. Sedangkan perubahan tata letak dan penambahan vegetasi serta air mancur tidak memberikan dampak terhadap kelembaban udara.

Analisis Suhu Radiasi Rerata pada Masing-masing Model

Untuk mendapatkan besaran pengaruh radiasi lingkungan, penelitian ini memasukkan pertimbangan simulasi suhu radiasi rerata seperti di bawah ini.

Tabel 6. Permodelan Simulasi Analisis Suhu Radiasi Rerata

Model Atap Lebar (eksisting) 	Model Atap Awal 
Suhu radiasi tertinggi 75°C terjadi karena tereksposnya perkerasan untuk penutup tanah di sekitar pendapa oleh matahari, seperti aspal dan conblok yang digunakan sebagai sarana sirkulasi kawasan ini. Pohon perindang dapat mengurangi suhu radiasi dibawahnya menjadi 60°C. Sedangkan atap pendapa dapat menurunkan suhu radiasi lingkungan menjadi 50°C.	Secara umum, nilai radiasi lingkungan serupa dengan model eksisting (Model Atap Lebar). Perbedaannya, luasan atap pendapa yang kecil pada model ini mengurangi luasan peneduhannya untuk menurunkan suhu radiasi lingkungan menjadi 50°C. Akibatnya, luasan lanskap yang terpapar radiasi matahari menjadi semakin besar dan berkontribusi melepaskan kalor lebih besar ke lingkungannya.
Model Atap Tinggi 	Model Iklim Mikro 
Perubahan suhu radiasi rerata oleh Model Atap Tinggi tidak dapat dianalisis dari potongan visual kontur warna 2 dimensi diatas karena dampak kenaikan ketinggian atap adalah peningkatan paparan radiasi lingkungan secara 3 dimensional.	Spot-spot bersuhu radiasi tertinggi 75°C terjadi lebih banyak pada permukaan sisi utara pohon perindang karena pantulan matahari tanggal 5 Juni yang berada di utara. Walaupun demikian, pohon-pohon tersebut mengurangi suhu radiasi menjadi 60°C.

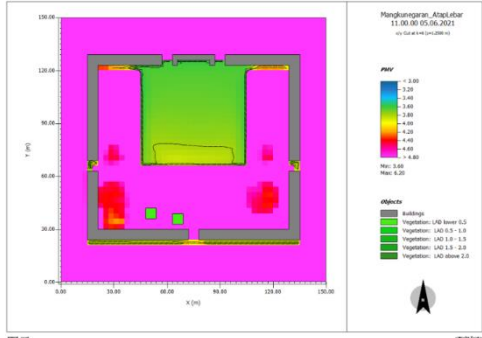
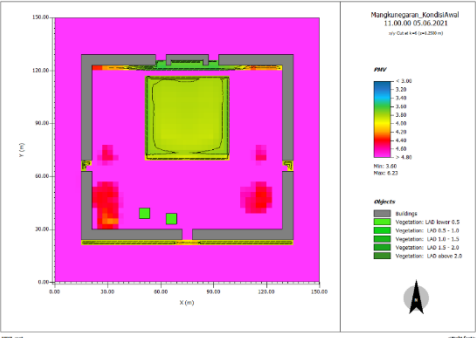
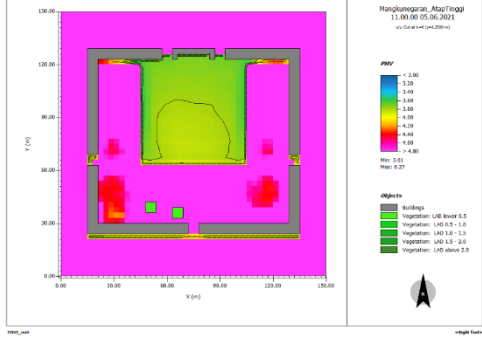
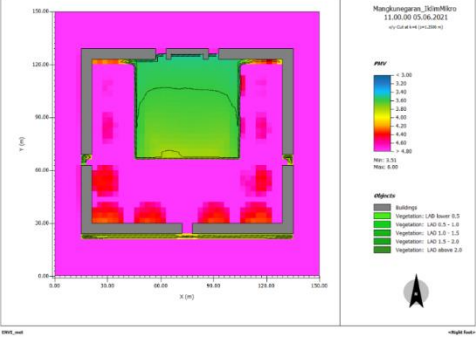
Suhu radiasi rerata lingkungan di siang hari dipengaruhi oleh peneduhan-peneduhan dari bangunan pendapa dan pohon-pohon perindang. Dengan demikian, upaya meminimalisir paparan terik matahari

siang hari dengan pelebaran atap dan memperbanyak pohon perindang menjadi solusi efektif mengurangi suhu radiasi rerata yang meningkatkan kenyamanan termal manusia.

Analisis Skala PMV pada Masing-Masing Model

Selain faktor-faktor lingkungan diatas, perhitungan skala PMV dapat berperan sebagai kesimpulan kejadian kenyamanan termal di Pendapa Ageng Mangkunegaran. Adapun hasil kontur skala PMV pada masing-masing skenario model adalah sebagai berikut.

Tabel 7. Permodelan Simulasi Skala PMV pada Masing-Masing Model

Model Atap Lebar (eksisting) 	Model Atap Awal 
Skala PMV pada area terbuka mencapai angka diatas 4,8. Area bawah pohon perindang di bagian selatan mendapatkan skala 4,4. Area dalam pendapa 3,5–3,8 dengan nilai terbesar berada di selatan pendapa karena adanya udara hangat bertiup dari selatan serta tingginya suhu radiasi dari permukaan aspal. Skala PMV terkecil 3,5 terdapat pada sisi utara pendapa yang berdekatan dengan pringgitan.	Secara umum, nilai PMV serupa dengan model eksisting (Model Atap Lebar). Perbedaannya, skala PMV area dalam pendapa meningkat menjadi 3,8–4,0 dengan nilai terbesar terdapat di bagian selatan karena udara hangat yang bertiup dari selatan serta tingginya suhu radiasi rerata dari permukaan aspal. Skala PMV terkecil 3,8 terdapat pada sisi selatan pringgitan.
Model Atap Tinggi 	Model Iklim Mikro 
Secara umum, nilai PMV serupa dengan model eksisting (Model Atap Lebar). Terdapat sedikit perbedaan pada area dalam pendapa dengan skala PMV 3,6–4,0 dengan nilai terbesarnya ada di bagian selatan. Skala PMV terkecil terdapat pada tepian timur, barat, dan utara pendapa.	Penambahan pohon perindang di sisi selatan kawasan pendapa membuat skala 4,3 terjadi secara lebih luas. Sedangkan area dalam pendapa mendapatkan skala 3,4–4,0 dengan nilai terbesarnya terdapat di sisi selatan yang berbatasan dengan lanskap.

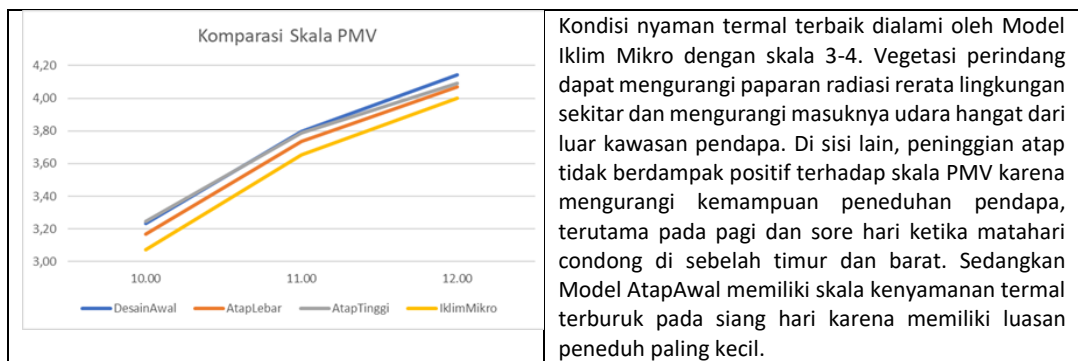
Model Atap Lebar, Model Atap Tinggi, dan Model Iklim Mikro memiliki skala PMV yang lebih rendah dibandingkan Model Atap Awal. Sehingga, peran atap sebagai elemen penauang penting untuk mencapai kenyamanan termal di iklim tropis. Skala PMV lebih tinggi pada Model Atap Tinggi terjadi karena udara hangat lingkungan mampu masuk lebih banyak dibandingkan Model Atap Lebar dan Model Iklim Mikro. Selain itu peran suhu radiasi rerata lingkungan yang lebih besar pada Model Atap Tinggi turut menaikkan skala PMV-nya. Skala PMV terendah terlihat pada Model Iklim Mikro di area terdalam dekat pringgitan.

Rekapitulasi Faktor Lingkungan pada Masing-masing Model

Penelitian mengambil data numerik hasil simulasi dari sembilan titik pendapa masing-masing model seperti yang telah dijelaskan pada bab sebelumnya dan menuangkannya dalam tabel dibawah ini.

Tabel 8. Grafik Rekapitulasi Faktor-faktor Lingkungan pada Masing-masing Model

Simulasi Suhu Udara dan Kecepatan Angin	Simulasi Kelembaban Relatif dan Radiasi Rerata
Komparasi Suhu Udara dan Kecepatan Angin Desain eksisting telah berada pada tingkat suhu udara yang rendah. Suhu udara Model Iklim Mikro berdempetan dengan Model Atap Lebar menunjukkan bahwa perubahan lanskap tidak berdampak terhadap kejadian suhu udara pendapa. Ketika atap ditinggikan 2 meter (Model Atap Tinggi), suhu udara pendapa meningkat terutama pagi oleh pembayangan yang berkurang. Model Desain Awal saat pendapa belum mendapatkan tambahan emperan mendapatkan suhu udara tertinggi karena luasan atap yang lebih kecil. Model Desain Awal memiliki kecepatan angin tertinggi 0,35-0,36 m/s karena luasan pendapa lebih sempit sehingga hambatan anginnya berkurang. Peninggian atap 2 meter membuat volume ruang pendapa menjadi lebih luas lalu meningkatkan kecepatan angin menjadi 0,3 m/s. Sedangkan, geometri atap yang sama pada Model Iklim Mikro dengan model eksisting menyebabkan perilaku angin yang mirip.	Komparasi Kelembaban Relatif dan Radiasi Rerata Nilai kelembaban tertinggi didapatkan oleh Model Atap Lebar dan Iklim Mikro 62-74% karena perilaku termal keduanya mirip pada faktor kecepatan angin dan suhu udara. Perubahan tata lanskap dengan penambahan vegetasi perindang dan air mancur pada Model Iklim Mikro tidak menyebabkan kelembaban udaranya meningkat. Hal ini dapat terjadi karena lingkungan pendapa yang luas dan pergantian udara area pendapa yang terus terjadi. Di sisi lain, seiring dengan kenaikan suhu area pendapannya, kelembaban relatif pada Model Atap Tinggi dan Atap Awal pun menjadi lebih rendah. Perbedaan suhu radiasi rerata terlihat jelas pada Model Iklim Mikro yang memiliki nilai terendah 41-47°C karena penambahan perindang disekeliling pendapa. Hal ini membuktikan bahwa perubahan desain tata lanskap di sekitar pendapa memiliki peran yang besar dalam menciptakan kenyamanan termal pada pendapa.
Komparasi Skala PMV	Keterangan Komparasi Skala PMV



Kesimpulan

1. Fungsi peneduh pada atap pendapa merupakan faktor utama untuk menciptakan kenyamanan termal yang optimal di iklim tropis lembab seperti di Surakarta, Indonesia. Alternatif berupa pelebaran dan perluasan atap atau area teritisan menjadi solusi terbaik untuk meningkatkan kenyamanan termal yang ideal. Kaitannya dengan penyesuaian terhadap kaidah pelestarian, penambahan hanya diperbolehkan dengan model teritisan semi permanen seperti kanopi dengan tanaman rambat tanpa harus membongkar bangunan asli.
2. Peningkatan kecepatan angin pada area pendapa dengan mengurangi luasan atap atau meninggikan atap tidak berdampak positif terhadap kenyamanan termalnya. Bahkan pada kasus udara luar yang lebih hangat justru akan meningkatkan suhu udara di area ini.
3. Peninggian atap memberikan paparan radiasi lingkungan yang lebih banyak, studi mengenai pengaruh tata lanskap minim suhu radiasi rerata dan elemen pembayang tambahan pada pendapa untuk mengurangi paparan matahari yang condong timur-barat dapat mengurangi dampak negatif peninggian atap secara termal.
4. Pengurangan paparan perkerasan dengan vegetasi perindang di sekitar pendapa dapat secara signifikan menurunkan suhu radiasi rerata di area pendapa.
5. Studi lanjutan mengenai pemilihan jenis vegetasi perindang dengan berbagai nilai LAD (*Leaf Area Density*) dapat memberikan rekomendasi jenis vegetasi yang cocok ditanam di kawasan ini dari aspek kenyamanan termal.
6. Efek samping penambahan vegetasi dan air mancur berupa kenaikan kelembaban udara tidak mengurangi kenyamanan termal pendapa karena terdapat aliran udara yang selalu mengalir di kawasan dan area tersebut.
7. Perkerasan berupa aspal menjadi sumber penyerapan dan penyebaran kalor yang tinggi di halaman pendapa. Perubahan jenis material penutup tanah dapat menjadi solusi pengganti material perkerasan.

Saran

Studi mengenai pengaruh desain ruang luar terhadap kenyamanan termal di area pendapa Mangkunegaran atau kasus serupa di iklim tropis memiliki potensi besar untuk didalami lebih jauh. Elemen-elemen desain lanskap yang beraneka ragam dapat memberikan berbagai rekomendasi desain lanskap terbaik untuk diterapkan dalam rangka mengoptimalkan kenyamanan termal manusia ketika berkegiatan di area terbuka dan semi-terbuka seperti pendapa. Selain itu, pemanfaatan alat bantu simulasi lingkungan seperti Envi-met v4 secara penuh selama 24 jam akan memberikan gambaran lengkap perilaku termal harian kawasan sesuai kejadian nyatanya.

Daftar Pustaka

- Dalong Liua, Songshu Hua, Jiaping Liua. (2020). *Contrasting The Performance Capabilities of Urban Radiation Field Between Three Microclimate Simulation Tools*. Building and Environment 175
- Grey, G.W & F.I Deneke, (1978). *Urban Forestry*. London: John Wiley & Sons.
- Groat, L. & Wang, D. (2002). *Architectural Research Methods*. New York: John Wiley & Sons.
- Hyon-U Kim, Sang-Il Jong. (2020). *Development of A System for Evaluating The Flow Field Around A Massive Stadium: Combining A Microclimate Model and A CFD Model*. Building and Environment 172
- Karyono, Tri Harso. (1999). *Arsitektur, Kemapanan, Kenyamanan dan Penghematan Energi*. Jakarta: Catur Libra Optima.
- Katia Perini, Ata Chokhachian, Sen Dong, Thomas Auer. (2017). Modeling and Simulating Urban Outdoor Comfort: Coupling ENVI-Met and TRNSYS by Grasshopper. Energy and Buildings 152; 373–384.
- Krisnawati, Eny. (2014). *Tinjauan Aspek Budaya Pada Pura Mangkunegaran Surakarta Dalam Upaya Menggali Ide Konsep Rumah Tinggal Jawa*. Jurnal Teknik Sipil dan Arsitektur. Surakarta: UTP.
- Lippsmeier, Georg. (1997). *Bangunan Tropis*. Jakarta: Erlangga.
- Nicol, Fergus. 2004. *Adaptive Thermal Comfort Standards in The Hot-Humid Tropics*. UK: Elsevier.
- Peter J. Crank, David J. Sailor,¹ George Ban-Weiss, Mohammad Taleghani. (2018). *Evaluating the ENVI-met Microscale Model for Suitability in Analysis of Targeted Urban Heat Mitigation Strategies*. Urban Climate 26; 188–197
- Soegijanto, (1998). *Bangunan di Indonesia dengan Iklim Tropis Lembab ditinjau dari Aspek Fisika Bangunan*. Jakarta: Dirjen Pendidikan Tinggi dan Kebudayaan.
- Tania Sharmin, Koen Steemers, Andreas Matzarakis, (2017). *Microclimatic Modelling in Assessing The Impact of Urban Geometry On Urban Thermal Environment*. Sustainable Cities and Society 34; 293–308