

# Mitigasi *Urban Heat Island* (UHI) dengan Pemodelan Vegetasi Menggunakan ENVI-met (Studi Kasus: Ruas Jalan Kaliurang)

Diinaa Romiizahathuuf Haniifah<sup>1</sup>, Taqia Rahman<sup>1\*</sup>, Latif Budi Suparma<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, INDONESIA

\*Corresponding author: taqia.rahman@ugm.ac.id

## INTISARI

Fenomena *Urban Heat Island* (UHI) merupakan salah satu dampak dari urbanisasi yang menyebabkan peningkatan suhu di daerah perkotaan, fenomena ini dapat mempengaruhi kenyamanan termal serta kualitas hidup masyarakat. Salah satu metode mitigasi yang efektif adalah melalui penanaman vegetasi, yang dapat meningkatkan albedo permukaan, meningkatkan evapotranspirasi, dan mengurangi suhu udara serta suhu permukaan. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas vegetasi dalam mengurangi efek UHI menggunakan pemodelan mikroklimat dengan ENVI-met 5.0. Simulasi dilakukan pada ruas Jalan Kaliurang, Yogyakarta, dengan membandingkan beberapa vegetasi skenario, seperti *london pine tree* dan *honey locust*. Hasil validasi menunjukkan bahwa model ENVI-met memiliki akurasi tinggi dengan RMSE sebesar 0,68 ( $R^2=0,96$ ) untuk suhu udara dan 0,95 ( $R^2=0,97$ ) untuk suhu permukaan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa *london plane* dengan jumlah penanaman sebanyak 69 pohon lebih memiliki efek menurunkan suhu udara, suhu permukaan, dan PET, terutama karena kanopi yang lebih luas dan tingkat evapotranspirasi yang lebih tinggi. Skenario ini menurunkan suhu udara hingga 0,80°C, suhu permukaan 3,48°C dan PET 1,26°C, hal ini dikarenakan *London Plane Tree* lebih memiliki efek mengurangi radiasi langsung, sehingga memberikan kenyamanan termal lebih baik.

Kata kunci: UHI, Vegetasi, ENVI-met.

## 1 PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Fenomena *Urban Heat Island* (UHI) merupakan salah satu tantangan utama yang dihadapi oleh kota – kota besar akibat urbanisasi yang cepat, fenomena UHI merupakan kondisi dimana suhu permukaan dan udara di wilayah perkotaan lebih tinggi dibandingkan wilayah sekitarnya yang lebih rural (Martin *dkk.* 2015). Fenomena ini terjadi akibat beberapa faktor, diantaranya tutupan lahan alami, seperti ruang hijau dan sumber daya air (Rahman, Zudhy Irawan, *dkk.* 2023) dan dapat menyebabkan efek UHI berkontribusi terhadap kenyamanan termal yang rendah, peningkatan konsumsi energi, dan risiko kesehatan masyarakat (Arifwidodo *dkk.* 2021). Berbagai metode telah dikembangkan untuk mengurangi efek UHI, seperti dengan meningkatkan fluks panas laten melalui vegetasi (Sinsel *dkk.* 2021), memodifikasi albedo material perkerasan (Nurrahma 2024), penerapan cool pavement (Rahman, Dawson, *dkk.* 2023). Penanaman vegetasi dianggap sebagai strategi yang paling efektif karena meningkatkan feel evapotranspirasi, memberikan keteduhan, serta meningkatkan albedo permukaan (Wong *dkk.* 2021). Namun, efektivitas vegetasi dalam mengurangi UHI sangat bergantung pada jenis tanaman yang digunakan (Richards *dkk.* 2020). Dalam konteks ini, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas berbagai jenis vegetasi, termasuk *london plane tree* dan *honey locust*, dalam mengurangi suhu udara dan meningkatkan kenyamanan termal di lingkungan perkotaan. Dengan memahami bagaimana vegetasi memengaruhi kondisi termal di lingkungan perkotaan, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi bagi strategi mitigasi UHI yang lebih efektif serta mendukung pengembangan kebijakan tata ruang berkelanjutan.

## 2 METODE PENELITIAN

### 2.1 Lokasi Penelitian

Jalan Kaliurang terletak di DI Yogyakarta yang selama sepuluh tahun terakhir banyak mengalami perubahan yang signifikan, di mana jalan ini menjadi semakin padat dengan bangunan hunian komersial, hal tersebut berdampak pada lingkungan atmosfer di kawasan ini. Penelitian dilakukan pada ruas Jalan Kaliurang, Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta. Gambar lokasi penelitian dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1 Lokasi Penelitian (Google Earth 2024).

2.2 Peralatan penelitian

Untuk melakukan simulasi yang akurat data – data meteorologi divalidasi dengan pengukuran di lapangan. Peralatan yang digunakan dalam menunjang pengambilan data terdiri dari *Automatic Weather Station (AWS)*, *Albedometer* dan *Thermocouple* seperti terlihat pada Tabel 1.

Tabel 1 Peralatan pengukuran di lapangan (Nurrahma 2024).

Nama	Gambar	Target Pengukuran	Nama	Gambar	Target Pengukuran	Nama	Gambar	Target Pengukuran
<i>Automatic Weather Station (AWS)</i>		Mengukur suhu udara, kelembapan relatif, kecepatan dan arah angin	Thermocouple		Mengukur suhu permukaan	Albedometer		Digunakan untuk mengukur SW dir dan albedo

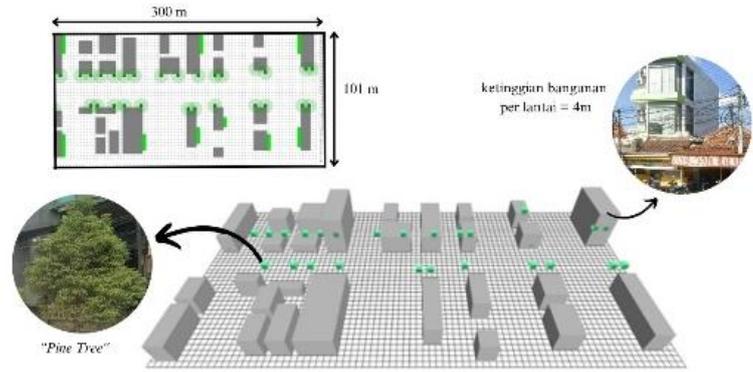
2.3 Simulasi ENVI-met

Simulasi dilakukan dengan bantuan ENVI-met 5.0 untuk memodelkan iklim mikro perkotaan. Model tersebut mampu digunakan untuk menganalisis medan angin tiga dimensi, suhu udara, suhu permukaan, kelembapan, fluks radiasi, dan interaksi antara vegetasi, bangunan, dan atmosfer (Brahimi *dkk.* 2023). Model ini dinilai akurat dan berfungsi untuk memodelkan lingkungan perkotaan (Sinsel *dkk.* 2021). Untuk menambahkan keakuratan model yang disimulasikan, dilakukan validasi untuk membandingkan suhu udara dan suhu permukaan yang dihasilkan dari simulasi ENVI-met dengan pengukuran di lapangan. validasi yang digunakan adalah Root Mean Square Error (RMSE) dan  $R^2$ . Validasi ini digunakan untuk mengukur tingkat kesalahan prediksi suhu oleh model, model dikatakan valid apabila RMSE dan  $R^2$  mendekati 1 (Eingrüber *dkk.* 2023), selain itu validasi model juga digunakan dalam penelitian untuk memastikan bahwa hasil simulasi yang dilakukan mampu merepresentasikan kondisi nyata di lapangan dengan tingkat akurasi yang tinggi (Nurrahma dan Rahman 2024).

### 3 ANALISA DAN PEMBAHASAN

#### 3.1 Validasi Data Pemodelan

Sebelum dilakukan validasi terhadap data pemodelan Jalan Kaliurang terlebih dahulu dilakukan pemodelan kawasan, dalam penelitian ini dilakukan simplifikasi pemodelan kawasan dengan grid 80x40x50 seperti terlihat pada Gambar 2. Setelah dilakukan pemodelan kawasan, langkah berikutnya adalah melakukan pengaturan terhadap *profile material* untuk menyesuaikan kondisi di lapangan, berikut merupakan penyesuaian *profile material*.

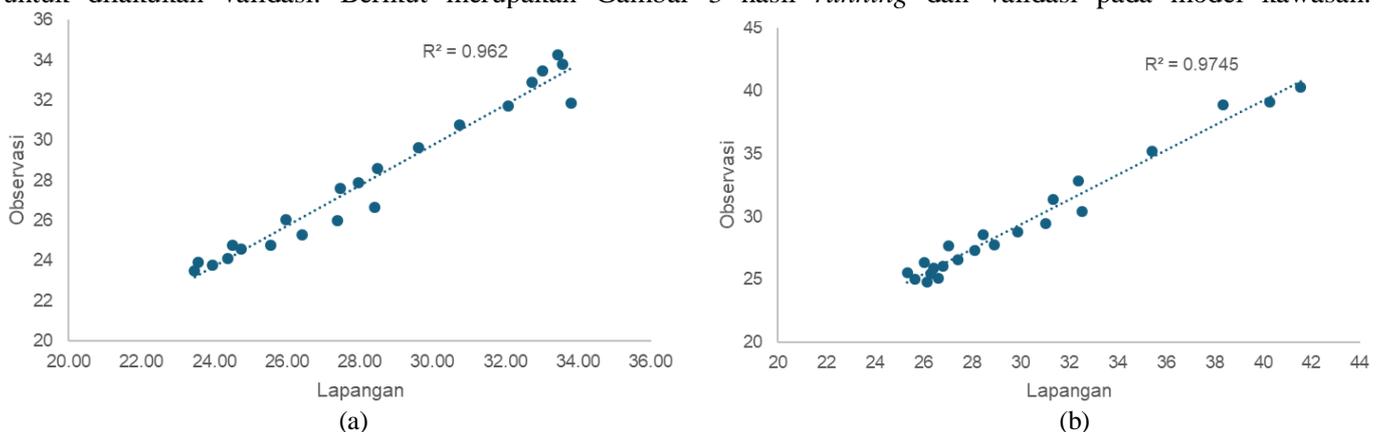


Gambar 2 Lokasi Penelitian

Tabel 2 Profile material.

Indikator	Base Subbase	Subgrade	Aspal
	Nilai	Nilai	Nilai
Type of material	Natural Soil	Natural Soil	Artificial Material
Water content at saturation	0,435	0,42	0
Water content at field capacity	0,195	0,255	0
Water content at wilting point	0,114	0,175	0
Matrix potential	-0,218	-0,299	0
Hydraulic conductivity	34,1	6,3	0
Volumetric heat capacity	1,32	1,175	2,5
Clapp & hornberger constanta	4,9	7,12	0
Hat conductivity	0,2	0,35	0
Vegetasi		Perkerasan Jalan Kaliurang	
Indikator	Nilai	Indikator	Nilai
CO2 fixation type	C3	Z0 roughness length	0,01
Leaf type	Grass	Albedo	0,05
Albedo	0,4	Emissivity	0,47
Emissivity	0,97	EstraID	0
Transmittance	0,3	Surface is irrigated	False
Plant height	2	Water: mixing coefficient	0,001
Root zone depth	2	Water: turbidity/extinction	2,1

Setelah dilakukan penyesuaian *input* langkah selanjutnya adalah melakukan *running* pada *software* ENVI-met untuk mendapatkan hasil simulasi untuk selanjutnya hasil tersebut akan dilakukan perbandingan dengan nilai lapangan untuk dilakukan validasi. Berikut merupakan Gambar 3 hasil *running* dan validasi pada model kawasan.



Gambar 3 (a) validasi suhu udara Jalan Kaliurang RMSE=0,68 ( $R^2=0,96$ ) (b) validasi suhu permukaan Jalan Kaliurang RMSE=0,95 ( $R^2=0,97$ ).

Berdasarkan hasil analisis *Root Mean Square Error* (RMSE) dan  $R^2$ , model kawasan yang digunakan dalam penelitian ini telah memenuhi kriteria validitas. Nilai RMSE dan  $R^2$  menunjukkan perbedaan yang kecil antara hasil simulasi dan data observasi lapangan, yang mengindikasikan bahwa model ini mampu merepresentasikan kondisi nyata dengan tingkat akurasi yang memadai. Validitas ini memperkuat keandalan model dan dapat diterapkan sebagai alat analisis yang valid dalam studi terkait desain kawasan perkotaan dan evaluasi strategi *Urban Heat Island* (UHI).

3.2 Skenario Simulasi

Untuk mengetahui efektivitas vegetasi dalam mitigasi UHI, terdapat beberapa skenario yang akan disimulasikan menggunakan model ENVI-met 5.0 skenario ini berfokus pada variasi jenis vegetasi dan jumlah vegetasi dengan parameter lain seperti material perkerasan dan kondisi meteorologi sesuai dengan data lapangan

a. Pengaruh jenis vegetasi terhadap suhu kawasan

Skenario pertama adalah penerapan variasi jenis vegetasi untuk menganalisis pengaruhnya terhadap menurunkan suhu kawasan, jenis vegetasi yang digunakan sebagai skenario dipilih dengan mempertimbangkan keunggulan dan kelemahan seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3 Setiap jenis vegetasi memiliki perbedaan dalam efek shading, evapotranspirasi, dan albedo, yang memengaruhi suhu udara, suhu permukaan, serta kenyamanan termal di kawasan perkotaan. Skenario yang akan digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 4.

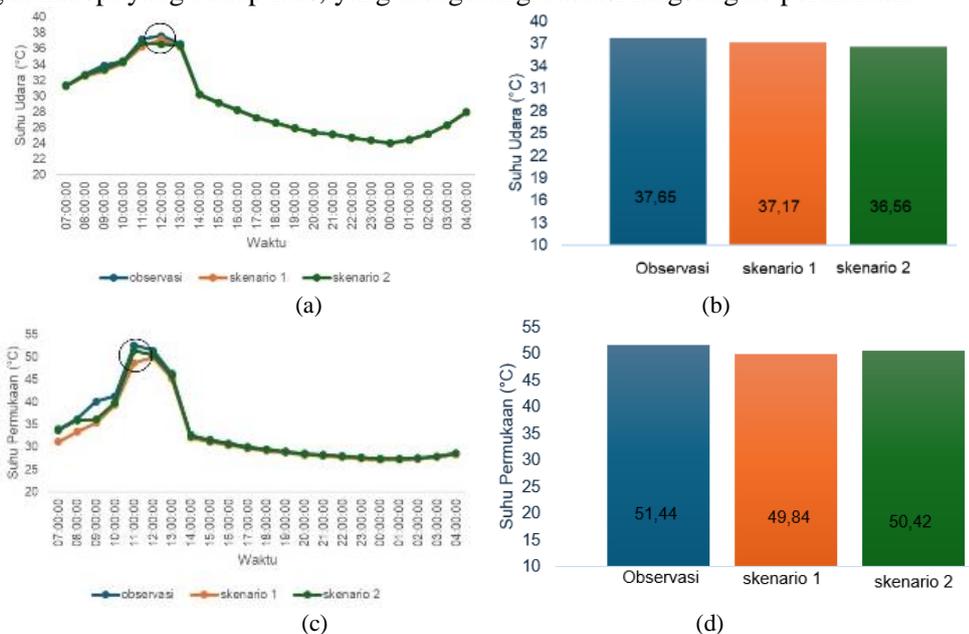
Tabel 3 Kelebihan dan kekurangan vegetasi (Sanusi dan Livesley 2020)

Jenis Vegetasi	Keunggulan	Kelemahan
<i>London plane tree</i>	Memiliki daun lebar yang mampu menyerap polutan udara serta memberikan efek pendinginan yang tinggi melalui evapotranspirasi	Daun banyak gugur pada musim tertentu sehingga dapat menyumbat drainase serta membutuhkan pemeliharaan yang intensif di area perkotaan
<i>Palm</i>	Mampu meningkatkan kelembapan udara melalui proses transpirasi, dan membantu menyejukan lingkungan	Efektivitas pendinginan lebih rendah dibandingkan pohon dengan daun yang lebih rimbun

Tabel 4 Skenario variasi jenis vegetasi

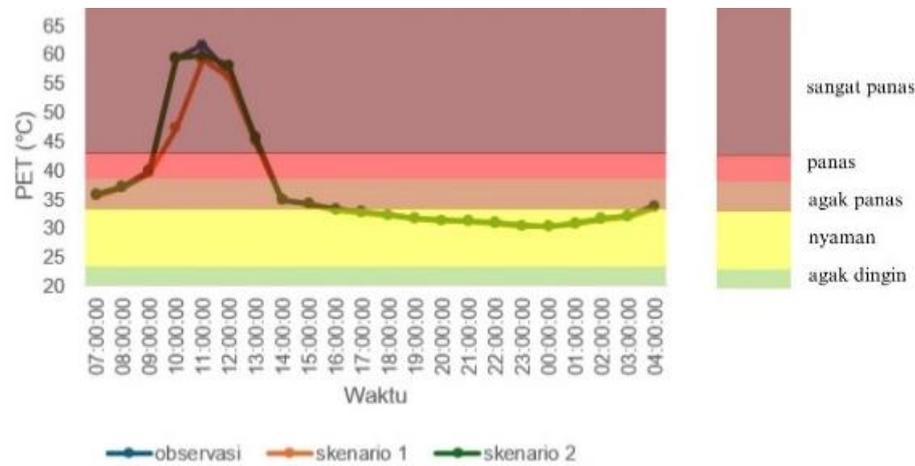
Skenario	Jenis vegetasi	Jumlah vegetasi yang ditanam (buah)
1	<i>London plane tree</i>	28
2	<i>palm</i>	28

Hasil simulasi seperti terlihat pada Gambar 4 menunjukkan bahwa keberadaan vegetasi berkontribusi terhadap penurunan suhu udara dan suhu permukaan. dua skenario simulasi diuji untuk mengevaluasi dampak variasi jenis pohon dalam mitigasi UHI. Pada skenario 1 terjadi penurunan suhu udara rata-rata sebesar 0,19°C, dan suhu permukaan turun 1,09°C. Sedangkan pada skenario 2 terjadi penurunan suhu udara rata-rata sebesar 0,12°C, dan suhu permukaan turun 0,45°C. Efek pendinginan ini disebabkan oleh kombinasi evapotranspirasi tinggi dan naungan kanopi yang cukup luas, yang mengurangi radiasi langsung ke permukaan.



Gambar 4 Perubahan suhu akibat variasi jenis vegetasi (a) suhu udara (b) perubahan suhu udara pada pukul 12.00 (c) suhu permukaan (d) perubahan suhu permukaan pada pukul 12.00

Selain mempengaruhi suhu udara dan suhu permukaan, skenario jenis vegetasi juga berpengaruh pada nilai PET. Dengan input *body parameter* untuk disimulasikan adalah perempuan dengan usia 25 tahun didapatkan hasil seperti terlihat pada Gambar 5. skenario 1 memberi pengaruh penurunan suhu rata-rata 0,90 sedangkan skenario 2 memberi pengaruh penurunan suhu rata-rata 0,10. Untuk mengetahui kategori nilai PET berdasarkan skenario yang ada dapat dilihat pada Gambar 5, kategori tersebut diperoleh dari penelitian yang dilakukan oleh Deb dan Alur (2010).



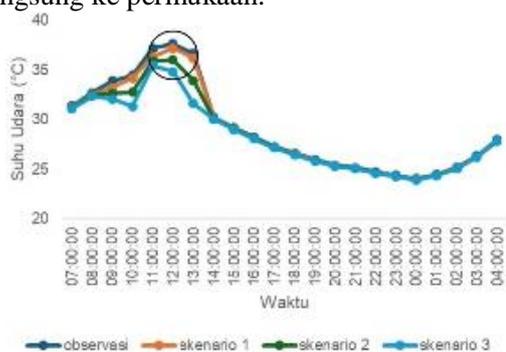
Gambar 5 Pengaruh variasi jenis vegetasi terhadap PET.

- b. Pengaruh jumlah vegetasi terhadap penurunan suhu kawasan  
 Berdasarkan analisis pada skenario variasi jenis vegetasi, pengaruhnya dalam menurunkan suhu kawasan perlu dilakukan peningkatan agar memberikan hasil yang lebih maksimal. Salah satu upaya untuk menurunkan adalah dengan menambah jumlah vegetasi. Studi menunjukkan bahwa kepadatan ruang hijau perkotaan berpengaruh dalam menurunkan suhu kawasan (Adyatma, S. dkk 2019). Skenario yang digunakan pada simulasi terkait dengan penambahan jumlah vegetasi dapat dilihat pada Tabel 5.

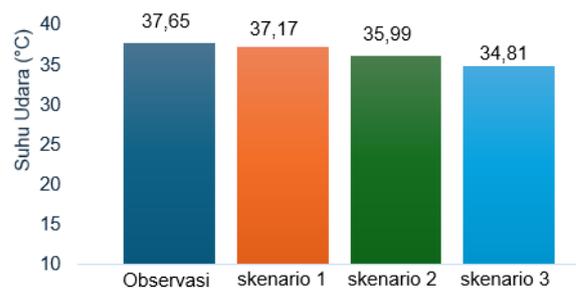
Tabel 5 Skenario jumlah vegetasi.

Skenario	Jumlah vegetasi yang ditanam (buah)	Interval penanaman (m)	Skenario	Jumlah vegetasi yang ditanam (buah)	Interval penanaman (m)
<i>London pine tree</i>			<i>palm</i>		
1	28	4	1	28	4
2	52	2	2	52	2
3	69	1	3	69	1

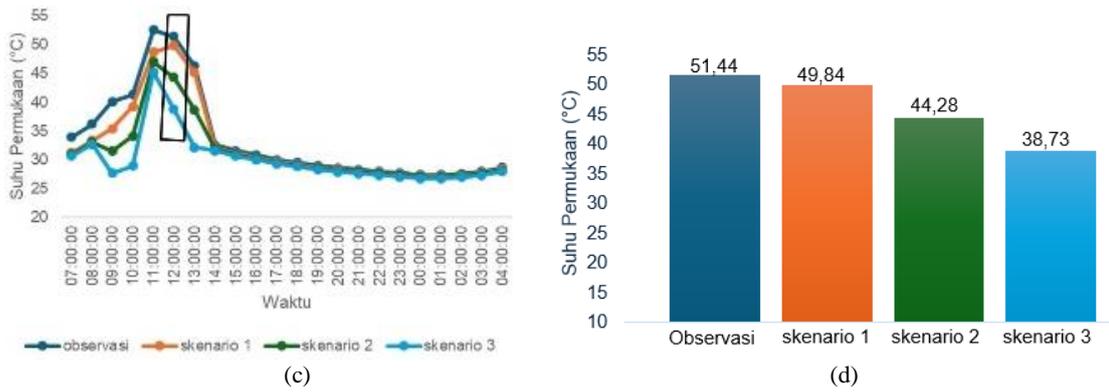
Hasil simulasi seperti terlihat pada Gambar 6 menunjukkan bahwa jumlah pada vegetasi *london pine tree* berkontribusi terhadap penurunan suhu udara dan suhu permukaan. tiga skenario simulasi diuji untuk mengevaluasi dampak jumlah *london pine tree* yang ditanam sebagai upaya mitigasi UHI. Pada skenario 1 terjadi penurunan suhu udara rata-rata sebesar 0,19°C, dan suhu permukaan turun 1,09°C. Pada skenario 2 terjadi penurunan suhu udara rata-rata sebesar 0,49°C, dan suhu permukaan turun 2,29°C. Sedangkan pada skenario 3 terjadi penurunan suhu udara rata-rata sebesar 0,80°C, dan suhu permukaan turun 3,48°C. Efek pendinginan ini disebabkan oleh kombinasi evapotranspirasi tinggi dan naungan kanopi yang cukup luas, yang mengurangi radiasi langsung ke permukaan.



(a)

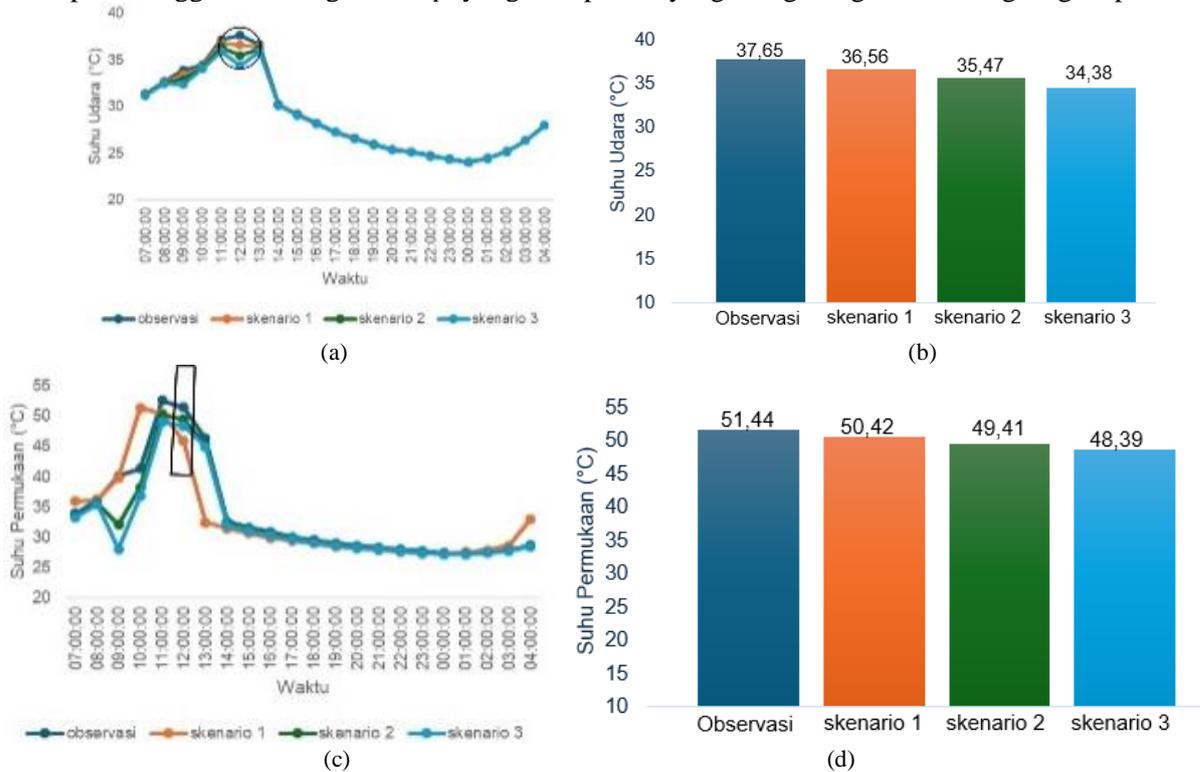


(b)



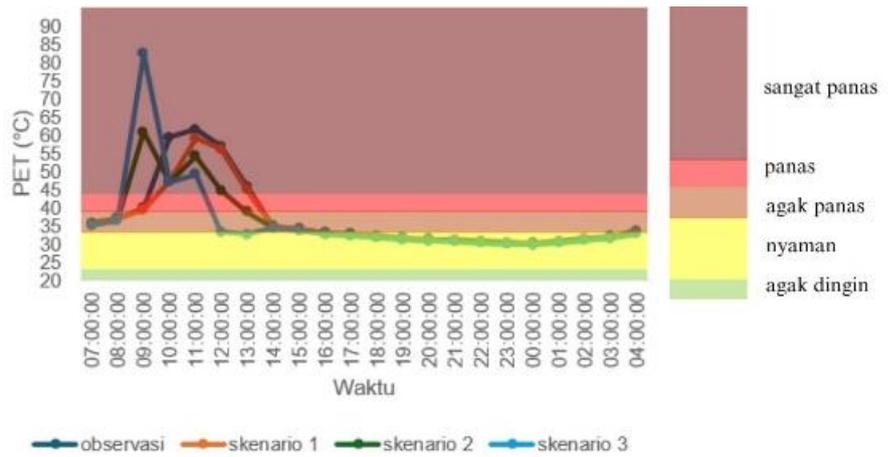
Gambar 6 Perubahan suhu akibat penambahan jumlah pada *vegetasi london pine tree* (a) suhu udara (b) perubahan suhu udara pada pukul 12.00 (c) suhu permukaan (d) perubahan suhu permukaan pada pukul 12.00

Hasil simulasi seperti terlihat pada Gambar 7 menunjukkan bahwa jumlah pada *vegetasi palm* berkontribusi terhadap penurunan suhu udara dan suhu permukaan. tiga skenario simulasi diuji untuk mengevaluasi dampak jumlah *palm* yang ditanam sebagai upaya mitigasi UHI. Pada skenario 1 terjadi penurunan suhu udara rata-rata sebesar 0,13°C, dan suhu permukaan turun 0,47°C. Pada skenario 2 terjadi penurunan suhu udara rata-rata sebesar 0,26°C, dan suhu permukaan turun 0,93°C. Sedangkan pada skenario 3 terjadi penurunan suhu udara rata-rata sebesar 0,40°C, dan suhu permukaan turun 1,40°C. Efek pendinginan ini disebabkan oleh kombinasi evapotranspirasi tinggi dan naungan kanopi yang cukup luas, yang mengurangi radiasi langsung ke permukaan.

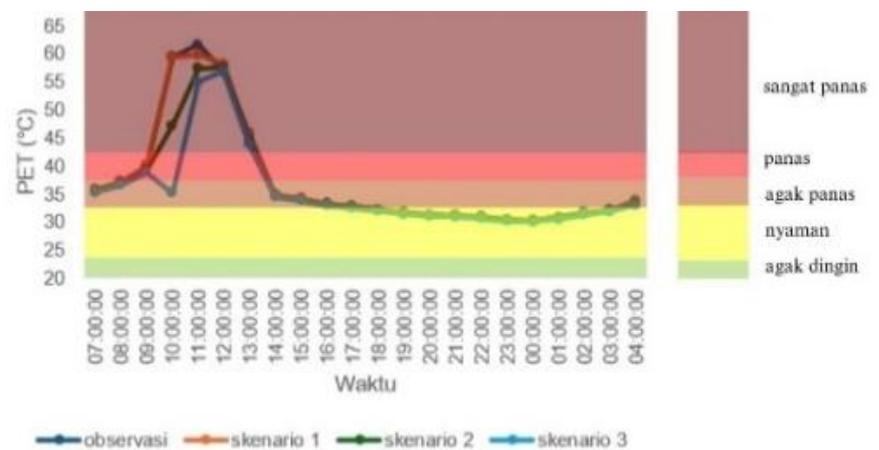


Gambar 7 Perubahan suhu akibat penambahan jumlah pada *vegetasi london pine tree* (a) suhu udara (b) perubahan suhu udara pada pukul 12.00 (c) suhu permukaan (d) perubahan suhu permukaan pada pukul 12.00

Selain mempengaruhi suhu udara dan suhu permukaan, skenario jumlah vegetasi *london pine tree* juga berpengaruh pada nilai PET. Dengan input *body parameter* untuk disimulasikan adalah perempuan dengan usia 25 tahun. Skenario 1 memberi pengaruh penurunan suhu rata-rata 0,90°C skenario 2 memberi pengaruh penurunan suhu rata-rata 1,08°C dan skenario 3 memberi pengaruh penurunan suhu rata-rata 1,26°C. Sedangkan pada vegetasi *palm* memberikan pengaruh terhadap PET. Skenario 1 memberi pengaruh penurunan suhu rata-rata 0,10°C skenario 2 memberi pengaruh penurunan suhu rata-rata 1,00°C dan skenario 3 memberi pengaruh penurunan suhu rata-rata 1,90°C. Untuk mengetahui kategori nilai PET berdasarkan skenario yang ada dapat dilihat pada Gambar 9 dan Gambar 10, kategori tersebut diperoleh dari penelitian yang dilakukan oleh Deb dan Alur (2010).



Gambar 8 Pengaruh skenario jumlah vegetasi *london pine tree* terhadap PET.



Gambar 9 Pengaruh skenario jumlah vegetasi *palm* terhadap PET.

### 3.3 Usulan mitigasi UHI melalui penanaman vegetasi

Untuk meningkatkan kenyamanan termal dalam skenario yang diusulkan serta untuk mengurangi fenomena UHI, pemilihan jenis vegetasi dan jumlah vegetasi menjadi faktor dalam menentukan efektivitas strategi mitigasi. Vegetasi memiliki kemampuan untuk meningkatkan albedo, mengurangi radiasi permukaan, serta meningkatkan efek evapotranspirasi yang berkontribusi dalam penurunan suhu udara, permukaan serta peningkatan kondisi termal di lingkungan perkotaan. Skenario *london pine tree* dengan jumlah vegetasi 69 pohon dapat dijadikan sebagai bahan pertimbangan karena dampaknya dalam mengurangi suhu udara dan permukaan, serta meningkatkan kenyamanan termal bagi pengguna jalan. Penurunan suhu yang dihasilkan oleh vegetasi dalam skenario ini juga dapat dikaitkan dengan peningkatan kelembaban udara akibat transpirasi, yang secara langsung berkontribusi terhadap keseimbangan termal dalam lingkungan perkotaan.

## 4 KESIMPULAN

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pemilihan vegetasi memiliki dampak dalam mitigasi UHI di lingkungan perkotaan. Sebelum menentukan efektivitas terlebih dahulu dilakukan validasi untuk memastikan bahwa model akurat. Validasi model menunjukkan tingkat akurasi tinggi dengan RMSE suhu udara sebesar 0,68 ( $R^2=0,96$ ) dan RMSE suhu permukaan sebesar 0,95 ( $R^2=0,97$ ), yang menunjukkan kesesuaian hasil simulasi dengan kondisi nyata. Selain itu hasil simulasi menunjukkan bahwa *london plane tree* dengan jumlah penanaman sebanyak 69 pohon lebih memiliki efek menurunkan suhu udara, suhu permukaan, dan PET, terutama karena kanopi yang lebih luas dan tingkat evapotranspirasi yang lebih tinggi. Skenario ini menurunkan suhu udara hingga 0,80°C, suhu permukaan 3,48°C dan PET 1,26°C, hal ini dikarenakan *London Plane Tree* lebih memiliki efek mengurangi radiasi langsung, sehingga memberikan kenyamanan termal lebih baik. Untuk memaksimalkan efektivitas penanaman vegetasi dalam mitigasi Urban Heat Island (UHI), diperlukan optimasi dalam pemilihan jenis pohon, pola penanaman, serta integrasi dengan strategi lain, seperti penggunaan material perkerasan beralbedo tinggi dan peningkatan ruang terbuka hijau.

Selain itu, monitoring jangka panjang dan pemeliharaan berkala sangat penting untuk memastikan efektivitas vegetasi dalam berbagai kondisi cuaca dan musim. Penggunaan teknologi sensor dan pemantauan suhu juga disarankan agar data yang diperoleh lebih akurat dan aplikatif dalam perencanaan tata kota.

#### REFERENSI

- Adyatma, S., Muhaimin, M., Arisanty, D., & Rajiani, I., 2019. The Density of the Urban Green Space Effect on Thermal Comfort.
- Arifwidodo, S.D., Ratanawichit, P., dan Chandrasiri, O., 2021. Understanding the Implications of Urban Heat Island Effects on Household Energy Consumption and Public Health in Southeast Asian Cities: Evidence from Thailand and Indonesia. 33–42.
- Brahimi, M., Benabbas, M., dan Djaghroui, D., 2023. Setting up the ENVI-met digital tool to evaluate climatic conditions at an urban scale: a case study of Djelfa, Algeria. *Journal of the Bulgarian Geographical Society*, 49, 113–127.
- Deb, C. dan Alur, R., 2010. The significance of Physiological Equivalent Temperature (PET) in outdoor thermal comfort studies. *Chirag Deb et. al. / International Journal of Engineering Science and Technology*, 2 (7), 2825–2828.
- Eingrüber, N., Korres, W., Löhnert, U., dan Schneider, K., 2023. Investigation of the ENVI-met model sensitivity to different wind direction forcing data in a heterogeneous urban environment. *Advances in Science and Research*, 20, 65–71.
- Google Earth, 2024. GOOGLE EARTH [online].
- Martin, P., Baudouin, Y., dan Gachon, P., 2015. An alternative method to characterize the surface urban heat island. *International Journal of Biometeorology*, 59 (7), 849–861.
- Nurrahma, S., 2024. Dampak Variasi Albedo Permukaan Jalan Terhadap Performa Termal Perkerasan: Pemodelan Microclimate Menggunakan ENVI-MET.
- Nurrahma, S. dan Rahman, T., 2024. Road cooling in tropical environments: microclimate modelling of pavement cooling scenarios using ENVI-met. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1416 (1), 012003.
- Rahman, T., Dawson, A., Thom, N., Sudiby, T., Carvajal-Munoz, J.S., Suwanto, F., dan Ahmed, I., 2023. Spray water cooling of newly laid asphalt pavement for rapid opening to traffic. *Road Materials and Pavement Design*, 24 (4), 1103–1129.
- Rahman, T., Zudhy Irawan, M., Noor Tajudin, A., Rizka Fahmi Amrozi, M., dan Widyatmoko, I., 2023. Knowledge mapping of cool pavement technologies for urban heat island Mitigation: A Systematic bibliometric analysis. *Energy and Buildings*, 291, 113133.
- Richards, D., Fung, T., Belcher, R., dan Edwards, P., 2020. Differential air temperature cooling performance of urban vegetation types in the tropics. *Urban Forestry & Urban Greening*, 50, 126651.
- Sanusi, R. dan Livesley, S.J., 2020. London Plane trees (*Platanus x acerifolia*) before, during and after a heatwave: Losing leaves means less cooling benefit. *Urban Forestry & Urban Greening*, 54, 126746.
- Sinsel, T., Simon, H., Broadbent, A.M., Bruse, M., dan Heusinger, J., 2021. Modeling the outdoor cooling impact of highly radiative “super cool” materials applied on roofs. *Urban Climate*, 38 (April), 100898.
- Wong, N.H., Tan, C.L., Kolokotsa, D.D., dan Takebayashi, H., 2021. Greenery as a mitigation and adaptation strategy to urban heat. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2 (3), 166–181.