

Dinamika Temporal Kenyamanan Termal Perkotaan Berdasarkan Model Estimasi *Temperature Humidity Index*

Muhammad Agung Fauzi^{1,3}, Tania June^{1*}, Rini Hidayati², dan Ardhasena Sopaheluwakan³

¹Departemen Geofisika dan Meteorologi, Institut Pertanian Bogor, Indonesia; e-mail: taniajune@apps.ipb.ac.id

²Pusat Pengelolaan Peluang dan Risiko Iklim Kawasan Asia Tenggara dan Pasifik, Institut Pertanian Bogor, Indonesia

³Kedeputian bidang Klimatologi, Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, Indonesia

ABSTRAK

Peningkatan urbanisasi berkontribusi terhadap perubahan kondisi termal perkotaan yang dapat menurunkan tingkat kenyamanan masyarakat. *Temperature Humidity Index* (THI) merupakan salah satu indikator yang banyak digunakan untuk mengevaluasi kenyamanan termal, namun pemantauan spasialnya masih terbatas oleh ketersediaan data observasi meteorologi. Penelitian ini bertujuan membangun model estimasi THI berbasis integrasi *Land Surface Temperature* (LST), membandingkan karakteristik kenyamanan termal antara wilayah urban (Kemayoran) dan suburban (Curug), serta menganalisis keterkaitannya dengan komponen neraca energi permukaan. Analisis dilakukan menggunakan data temperatur udara, kelembapan relatif, LST, dan parameter neraca energi periode 2015–2024. Model estimasi THI dikembangkan menggunakan pendekatan regresi linier, eksponensial non-linier, dan eksponensial linier. Hasil menunjukkan bahwa model regresi linier memberikan performa terbaik pada kedua lokasi dengan nilai R^2 sebesar 0,998–0,999 dan RMSE sebesar 0,043–0,049. Curug menunjukkan proporsi kondisi nyaman yang lebih tinggi dibandingkan Kemayoran, yang berkaitan dengan dominasi latent heat flux (LHF) dan nilai Bowen Ratio yang lebih rendah. Sebaliknya, Kemayoran memiliki proporsi sensible heat flux (SHF) yang lebih tinggi sehingga berkontribusi terhadap peningkatan ketidaknyamanan termal. Hasil penelitian menunjukkan bahwa integrasi LST dan parameter meteorologi mampu merekonstruksi THI dengan akurasi tinggi serta memberikan informasi yang berguna untuk memahami pengaruh karakteristik permukaan terhadap kenyamanan termal di wilayah perkotaan.

Kata kunci: Kenyamanan Termal, Neraca Energi Permukaan, *Temperature Humidity Index*

ABSTRACT

Rapid urbanisation alters urban thermal conditions and can reduce public comfort. The *Temperature Humidity Index* (THI) is widely used to assess thermal comfort, but its spatial monitoring is limited by the availability of meteorological observations. This study develops a THI estimation model by integrating *Land Surface Temperature* (LST), compares thermal comfort characteristics between the urban area of Kemayoran and the suburban area of Curug, and examines their relationship with surface energy balance components. The analysis used air temperature, relative humidity, LST, and surface energy balance data from 2015 to 2024. THI estimation models were developed using linear regression, non-linear exponential, and linear exponential approaches. The linear regression model performed best at both locations, with R^2 values of 0.998–0.999 and RMSE values of 0.043–0.049. Curug had a higher proportion of comfortable conditions than Kemayoran, associated with dominant latent heat flux (LHF) and a lower Bowen Ratio. In contrast, Kemayoran had a higher proportion of sensible heat flux (SHF), contributing to greater thermal discomfort. These findings show that integrating LST and meteorological parameters can reconstruct THI with high accuracy and provide useful insight into how surface characteristics influence urban thermal comfort.

Keywords: Surface Energy Balance, *Temperature Humidity Index*, Thermal Comfort

Citation: Fauzi, M. A., June, T., Hidayati, R., dan Sopaheluwakan, A. (2026). *Dinamika Temporal Kenyamanan Termal Perkotaan Berdasarkan Model Estimasi Temperature Humidity Index*. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 24(2), 350-364, doi:10.14710/jil.24.2.350-364

1. PENDAHULUAN

Kondisi iklim dan kenyamanan termal menjadi isu penting di wilayah perkotaan dimana pada umumnya memiliki kondisi lingkungan dengan banyak

bangunan perkantoran, vegetasi tertentu, bangunan perumahan, kolam air dan lapangan terbuka. Pada wilayah perkotaan yang memiliki keikliman dengan temperatur tinggi tentunya kenyamanan termal

menjadi penting untuk studi pemahaman tingkat kenyamanan dalam melakukan aktivitas di area terbuka. Urbanisasi di perkotaan yang cepat menyebabkan banyak masalah lingkungan yang mempengaruhi iklim lokal dan global melalui efek biogeokimia dan biofisik (Choudhury et al, 2018). Penelitian oleh Bhargava et al (2017) menunjukkan daerah yang dibangun menguapkan lebih sedikit air yang mengakibatkan peningkatan suhu permukaan dan suhu udara di perkotaan. Hal ini menunjukkan besarnya efek dari sifat-sifat material perkotaan yang terdiri dari reflektansi matahari, emisivitas termal dan kapasitas panas dengan kemampuan untuk memantulkan, memancarkan dan menyerap energi matahari. Hal ini menyebabkan pemanasan di daerah perkotaan dibandingkan dengan daerah sekitarnya. Sementara itu Maru et al (2015) dalam penelitiannya untuk wilayah Makassar menunjukkan bahwa suhu rata-rata pada siang hari lebih tinggi pada malam hari, dimana secara spasial pada siang hari menunjukkan bahwa suhu tinggi umumnya berada di daerah pusat kota yang padat dengan bangunan seperti perumahan, perkantoran dan pertokoan. Sementara itu, suhu yang lebih rendah umumnya berada di daerah pedesaan atau di luar kota yang berupa area hijau dan lahan terbuka.

Penelitian Jenerette et al (2015) di Amerika Serikat menunjukkan bahwa *Land surface Temperature* (LST) siang hari dapat menjadi salah satu indikator spasial risiko penyakit akibat serangan suhu panas. Hal ini dilihat dari hubungan positif antara risiko penyakit akibat suhu panas dengan variabilitas LST, serta hubungan positif yang jauh lebih kuat antara LST siang hari dengan kematian akibat serangan suhu panas. Suhu lingkungan yang panas dapat menyebabkan dehidrasi, sakit kardiovaskular, hingga heat stroke (serangan jantung karena cuaca panas). Konsekuensi dari konsistensi kondisi peningkatan panas yang berdampak terhadap kematian memiliki hubungan yang signifikan dimana setiap kenaikan satu unit dalam rata-rata LST memiliki risiko peningkatan kematian (Johnson et al, 2009). Urbanisasi di perkotaan menjadi salah satu penyebab meningkatnya LST dimana indikatornya adalah peningkatan panas pada lanskap urban seperti bangunan, jalan raya, area parkir, dan lain-lainnya. Tingkat ketidaknyamanan meningkat seiring dengan peningkatan LST dimana pada tutupan lahan dengan area vegetasi lebih rendah nilainya dibanding area terbangun (Imran et al, 2022). Sehingga nilai dari LST dapat diasumsikan menggambarkan temperatur tutupan lahan dimana lanskap urban memiliki temperatur lebih tinggi dibandingkan tutupan lahan vegetasi. Beberapa studi penelitian mengkaitkan LST dengan tingkat kenyamanan termal sebagai acuan kepekaan respon manusia terhadap kondisi temperatur lingkungan.

Kategori ketidaknyamanan pada *Temperature Humidity Index* (THI) didominasi pada tutupan lahan area terbangun / built-up area (Ige et al, 2017). Temperatur dan kelembapan tinggi dapat

menyebabkan kondisi kepekaan terhadap ketidaknyamanan dan bahkan hingga tingkat stress karena panas. Penelitian terkait kenyamanan termal juga dilakukan untuk beberapa wilayah Indonesia terutama penggunaan indeks kenyamanan dengan THI yang menunjukkan tingkat kenyamanan dimana semakin ke tengah kota semakin besar prosentase tidak nyaman. Peningkatan indeks THI dengan signifikansi $> 50\%$ menggambarkan tingkat kenyamanan di Daerah Khusus Ibukota (DKI) Jakarta cenderung semakin tidak nyaman (Wati & Fatkhuroyan, 2017). Kemudian berdasarkan hasil penelitian terkait parameter Kelembapan udara (RH) dan THI, dapat diketahui terjadi perubahan suhu udara permukaan yang diikuti perubahan RH. Serta terjadi perubahan THI terutama di pesisir utara bagian barat Pulau Jawa. Selain itu, THI di sekitar DKI Jakarta juga memiliki nilai korelasi yang tinggi dengan jumlah penduduk dimana hasil penelitian ini mengindikasikan peningkatan jumlah penduduk berdampak terhadap peningkatan THI pada DKI Jakarta (Kartika et al. 2021; Arif et al. 2023). Korelasi signifikan didapatkan pada tingkat kenyamanan thermal terhadap temperatur udara observasi, namun masih terdapat bias pada korelasi antara LST dengan indeks termal yang dapat digunakan sebagai pendekatan kenyamanan termal jika dihubungkan dengan land use (Goldblatt et al, 2021).

Tingkat kenyamanan termal dapat dikalkulasikan dengan beberapa metode diantaranya THI yang membutuhkan data iklim seperti temperatur, kelembapan, serta radiasi matahari baik dengan data observasi dan juga data satelit. THI tetap menjadi indeks paling umum diterapkan untuk diluar ruangan yang digunakan di wilayah tropis (Emmanuel, 2005). Simulasi THI dan *Urban Heat Island* (UHI) dengan parameter iklim dan radiasi menghasilkan hubungan sangat baik yang dibangun dari persamaan linier dan persamaan non-linier kubik (Effendy et al, 2006). Dampak UHI terhadap THI dan neraca energi permukaan dengan menggambarkan penggunaan radiasi netto (R_n) pada tutupan lahan yang berbeda-beda. Penelitian dari Hou et al (2020) menunjukkan dinamika dan variasi UHI di perkotaan dan pedesaan yang ditandai dengan perubahan temperatur dari kontribusi panas laten (λE) dan panas sensibel (H).

Penelitian dampak LST yang mengakibatkan ketidaknyamanan dan penyakit akibat suhu panas hingga menyebabkan kematian masih sangat minim terutama di wilayah tropis seperti di Indonesia. Pemanasan LST di perkotaan tidak dikarakterisasi dengan baik pada resolusi spasial skala mikro. Untuk itu diperlukan lebih banyak penelitian komparatif mengenai variabilitas temporal dalam suhu panas permukaan di wilayah perkotaan terhadap kenyamanan. Terkait hal tersebut maka perlu dirumuskan permasalahan pada penelitian ini dengan ingin mengetahui lebih lanjut mengenai kondisi panas perkotaan yang dapat digambarkan melalui nilai estimasi LST dan THI yang bervariasi berdasarkan waktu. Selain itu perlu dijelaskan lebih lanjut

mengenai hubungan LST dan THI untuk wilayah tropis terutama perkotaan di Indonesia dengan memodifikasi THI dan menerapkannya di beberapa kota seperti DKI Jakarta. Berbagai penelitian sebelumnya telah memanfaatkan THI untuk mengevaluasi kenyamanan termal di wilayah perkotaan berdasarkan data temperatur udara dan kelembapan relatif. Di sisi lain, perkembangan penginderaan jauh telah menyediakan data LST dengan cakupan spasial yang luas dan kontinuitas pengamatan yang tinggi sehingga berpotensi mendukung pemantauan kenyamanan termal secara lebih detail. Namun demikian, kajian yang mengintegrasikan LST dengan parameter meteorologi untuk membangun model estimasi THI dan mengaitkannya dengan karakteristik neraca energi permukaan pada lingkungan urban dan suburban di Indonesia masih relatif terbatas. Neraca energi permukaan merupakan komponen penting dalam pengendalian iklim mikro karena menentukan distribusi energi radiasi yang diterima permukaan ke dalam bentuk panas sensibel, panas laten, dan panas tanah. Variasi distribusi energi tersebut secara langsung memengaruhi temperatur udara, kelembapan atmosfer, dan pada akhirnya tingkat kenyamanan termal suatu wilayah. Oleh karena itu, penelitian ini tidak bertujuan mengembangkan indeks kenyamanan termal baru, melainkan mengevaluasi potensi integrasi LST dalam membangun model estimasi THI berbasis pendekatan regresi linier, eksponensial non-linier, dan eksponensial linier. Selain itu, penelitian ini membandingkan karakteristik kenyamanan termal antara wilayah urban (Kemayoran) dan suburban (Curug) serta menganalisis keterkaitannya dengan komponen neraca energi permukaan dan Bowen Ratio selama periode 2015–2024.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan di Kemayoran Jakarta dengan koordinat 6,1556° Lintang Selatan dan 106,8400° Bujur Timur, dan di daerah pinggirannya di Curug Tangerang dengan koordinat 6,2873° Lintang Selatan dan 106,5677° Bujur Timur. Dari segi kondisi iklim memiliki karakteristik beriklim tropis di kedua wilayah tersebut. Kemayoran dipilih sebagai representasi wilayah urban dengan kepadatan bangunan tinggi dan dominasi permukaan kedap air, sedangkan Curug mewakili wilayah suburban dengan proporsi vegetasi lebih tinggi dan tingkat urbanisasi yang lebih rendah.

Data yang digunakan pada penelitian ini berasal dari data observasi Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) dan mengakuisisi data satelit untuk data LST, serta didukung indikator iklim lainnya dari data model reanalisis. Detil data yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 1. Secara garis besar untuk data yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

- Indikator iklim untuk data observasi diantaranya data Temperatur Udara (T_T) dan data Kelembapan

Udara Relatif (RH) dengan periode setiap jam tahun 2015-2024 di Kemayoran dan Curug dari BMKG.

- Indikator iklim untuk LST periode siang hari tahun 2015-2024 data *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) satelit Terra dan Aqua dengan resolusi spasial 1 km dari *National Aeronautics and Space Administration* (NASA).
- Indikator iklim untuk panas sensibel dan panas laten dengan data reanalisis *ECMWF Reanalysis 5th Generation Land* (ERA5-LAND) dengan resolusi spasial 9 km yang dikembangkan oleh *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF).

Tabel 1. Data Penelitian Periode 2015 - 2024

No	Parameter	Satuan	Skala Waktu	Sumber
1	Temperatur Udara	°C	Per Jam	BMKG
2	Kelembapan Udara	%	Per Jam	BMKG
3	LST	°C	06.00 & 18.00 UTC	NASA
4	Panas Sensibel	W/m ²	Per Jam	ECMWF
5	Panas Laten	W/m ²	Per Jam	ECMWF
6	Radiasi Netto	W/m ²	Per Jam	ECMWF

Prosedur sinkronisasi temporal antara data observasi, Modis dan Reanalisis dengan meratakan nilai data masing-masing pada periode siang hari (10.00 – 14.00 LT). Penelitian dilakukan dalam beberapa tahapan yang dimulai dari persiapan data hingga menghasilkan tingkat kenyamanan termal dengan model estimasi THI serta dilakukan analisis lanjut dengan neraca energi permukaan. Detil dari tahapan metode penelitian dijelaskan sebagai berikut:

2.1. Analisis Data Parameter Iklim

Pada penelitian ini dilakukan langkah-langkah awal dalam pengolahan data berupa melakukan *gap-filling* (pengisian data kosong). Sebelum analisis dilakukan, data yang hilang (*missing values*) pada temperatur udara, kelembapan relatif, dan LST diidentifikasi dan dihitung persentasenya terhadap total data pengamatan. Rata-rata data yang hilang pada temperatur udara dan kelembapan relatif 1-7%, sedangkan LST mencapai 60-80% karena tutupan awan terutama pada musim hujan. Melakukan analisis pola *missing data* untuk melihat apakah ada pola yang tidak biasa dan terjadi secara berkala yang menunjukkan kesalahan sistematis. Salah satu metodenya dengan menggunakan *Fast Fourier Transform* (FFT) dalam pengisian celah data pada data observasi. FFT adalah algoritma efisien untuk menghitung *Discrete Fourier Transform* (DFT) dari suatu sinyal. Metode ini dipilih karena deret waktu meteorologi dan iklim umumnya memiliki pola periodik dan musiman yang kuat sehingga komponen frekuensi dominan dapat direkonstruksi secara efektif melalui transformasi Fourier. Hal ini menggunakan interpolasi berbasis frekuensi untuk mengisi celah data yang hilang agar dapat direkonstruksi dengan FFT. Dalam konteks pengisian

celah data observasi maka DFT formulanya seperti pada persamaan (1).

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] * e^{-j2\pi kn/N} \quad (1)$$

Kemudian dilakukan Invers DFT (IDFT) untuk merekonstruksi sinyal. Nilai hasil rekonstruksi digunakan untuk menggantikan nilai yang hilang dalam sinyal asli dengan formulasi IDFT pada persamaan (2) berikut ini:

$$x[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X[k] * e^{j2\pi kn/N} \quad (2)$$

dimana,

$X(k)$: Sinyal hasil transformasi di domain frekuensi

$X(n)$: Sinyal input di domain waktu

N : Jumlah data

j : bilangan imajiner $\sqrt{-1}$

2.2. Analisis THI dan Modifikasi THI

Analisa tingkat kenyamanan dinyatakan dalam indeks kenyamanan yaitu Temperature Humidity Index (THI) merupakan suatu indeks dengan satuan derajat celsius sebagai besaran yang dapat dikaitkan dengan tingkat kenyamanan yang dirasakan populasi manusia di wilayah perkotaan. Persamaan (3) menunjukkan indeks THI yang menggunakan rumus (Nieuwolt, 1977):

$$THI = 0.8 * T_T + \left(\frac{RH * T_T}{500} \right) \quad (3)$$

dimana:

T_T : Temperatur Udara ($^{\circ}\text{C}$)

RH : Kelembapan Udara relatif (%)

THI : Temperature Humidity Index ($^{\circ}\text{C}$)

Pada uji empiris pada THI dan kenyamanan populasi menurut Emmanuel (2005), memiliki korelasi dengan baik untuk wilayah tropis dengan kategori:

$21 \leq THI \leq 24 = 100\%$ merasa nyaman

$24 < THI \leq 26 = 50\%$ sebagian nyaman

$THI > 26 = 100\%$ merasa tidak nyaman

THI dianggap masih mengabaikan efek panas radiasi yang langsung mempengaruhi kenyamanan termal. Kategori THI Nieuwolt masih banyak digunakan pada studi kenyamanan termal tropis, namun masih adanya keterbatasan karena kategori tersebut dikembangkan beberapa dekade lalu. Karena itu sangat penting untuk mengembangkan indeks dengan gabungan THI dan parameter lain yang mudah diukur dan berkorelasi erat dengan radiasi matahari (Zheng et al, 2022). Pengembangan model estimasi THI dapat dibangun dengan persamaan linier dan persamaan non-linier untuk mendapatkan hubungan matematis antara satu variabel dengan variabel lainnya.

Pada penelitian ini dilakukan pengembangan THI Nieuwolt dengan beberapa persamaan matematis untuk pendekatan modifikasi THI. Diawali dengan

persamaan regresi linier yang melibatkan parameter LST, T_T , dan RH. Berikut ini formulanya:

$$THI_{LR} = a + b * LST + c * T_T + d * RH \quad (4)$$

dimana:

THI-LR : Modifikasi THI dengan regresi linier ($^{\circ}\text{C}$)

a, b, c, d : Nilai koefisien

LST : Land Surface Temperature ($^{\circ}\text{C}$)

T_T : Temperatur Udara ($^{\circ}\text{C}$)

RH : Kelembapan Udara relatif (%)

Persamaan matematis berikutnya untuk pendekatan modifikasi THI adalah dengan eksponensial linier multivariat dan eksponensial non-linier multivariat. Berikut formulanya:

Untuk persamaan eksponensial non-linier:

$$THI_{NLE} = a * \exp(b * T_T + c * RH + d * LST) + e \quad (5)$$

Kemudian persamaan eksponensial linier:

$$THI_{LE} = a * \exp(b * T_T) + c * RH + d * LST + e \quad (6)$$

dimana:

THI-NLE : Modifikasi THI eksponen non-linier ($^{\circ}\text{C}$)

THI-LE : Modifikasi THI eksponen linier ($^{\circ}\text{C}$)

a, b, c, d, e : Nilai koefisien

LST : Land Surface Temperature ($^{\circ}\text{C}$)

T_T : Temperatur Udara ($^{\circ}\text{C}$)

RH : Kelembapan Udara relatif (%)

Penelitian ini menggunakan pemilihan model eksponensial linier atau non-linier dalam regresi statistik dimaksudkan untuk mengetahui lebih jauh pada bentuk hubungan antara variabel bebas dan variabel terikat. Hal ini bertujuan untuk analisis keeratan antar parameter pendukung modifikasi THI. Analisis lebih lanjut adalah melakukan perhitungan R-square (R^2) dan Root Mean Square Error (RMSE) untuk mengetahui seberapa baik model persamaan dapat menjelaskan hubungan antar data parameter. Berikut ini formula umumnya:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y})^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \quad (7)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y})^2} \quad (8)$$

dimana,

R^2 : Koefisien determinasi

RMSE : Nilai Root Mean Square Error

N : Jumlah data

$\hat{y}$: Nilai estimasi dari y

$\bar{y}$: Nilai rata-rata dari y

Kemudian melakukan plot kurva *Probability Density Function* (PDF) dan Boxplot untuk memahami bagaimana probabilitas suatu nilai THI terdistribusi di rentang nilai tertentu dan pada periode waktu siang hari serta musimannya. Selain itu dilakukan perhitungan persentase tingkat kenyamanan

Modifikasi THI berdasarkan kategori THI Nieuwolt pada periode siang hari.

2.3. Analisis Model THI dan Neraca Energi Permukaan

Berdasarkan teori keseimbangan energi permukaan (Oke et al, 2017) dimana dapat menjelaskan mengenai perubahan lingkungan termal di perkotaan dengan persamaan berikut:

$$R_n = SHF + LHF + GHF \quad (9)$$

dimana:

R_n = Radiasi netto

SHF = Fluks panas sensibel

LHF = Fluks panas laten

GHF = Fluks panas Tanah

Radiasi netto (R_n) terdiri dari fluks panas sensibel (SHF) dan laten (LHF) yang berinteraksi dengan atmosfer dan konduksi panas tanah (GHF) sehingga hal ini menunjukkan interaksi urban dan THI (Humaida et al, 2015). Hal ini dapat melihat hubungan tutupan lahan dengan penggunaan energi panas laten dan panas sensibel yang mempengaruhi THI observasi dan model estimasi THI. Faktor interaksi atmosfer dan panas tanah GHF pada penelitian urban ini berdasarkan perhitungan radiasi netto terhadap panas sensibel dan panas latennya. Dalam penelitian ini radioasi netto, panas laten dan panas sensibel sudah tersedia dalam data reanalisis. Selanjutnya melakukan plot rata-rata harian untuk siang hari periode 2015-2024 dengan analisis perbandingan antara model estimasi THI dengan R_n , SHF , LHF , dan GHF . Kemudian melakukan perbandingan antara parameter T_r dengan SHF , dan RH dengan LHF . Selain itu juga melakukan perhitungan persentase antara SHF , LHF , dan GHF berdasarkan titik pengamatan. Bowen ratio merupakan perbandingan antara fluks panas sensibel (SHF) dan fluks panas laten (LHF) yang dipengaruhi oleh perbedaan temperatur udara dan kelembapan udara permukaan dan atmosfer (June et al, 2018). Analisis antara THI dan neraca energi permukaan dapat dilakukan dengan *scatterplot* (plot sebaran) antara THI dan Bowen Ratio pada periode musiman nya (Asyura et al, 2023). Hubungan antara THI dan Bowen Ratio dianalisis menggunakan korelasi Spearman untuk mengakomodasi pola hubungan yang tidak sepenuhnya linear dan adanya pengaruh musiman pada kedua variabel.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Analisis Parameter Iklim

Identifikasi data kosong maupun data duplikasi sangat penting sebelum melakukan analisis dengan pendekatan statistik dan matematik. Langkah ini untuk memastikan keakuratan dan integritas dataset. Hasil dari pengisian data kosong dapat dilihat pada Gambar 1 dengan wilayah Kemayoran dan Curug menjadi contoh untuk perbandingan antara wilayah urban dan sub-urban. Gambar 1 menunjukkan hasil simulasi pengisian celah data (*gap-filling*) untuk

wilayah Kemayoran (panel kiri) dan Curug (panel kanan) pada dua parameter iklim, yaitu temperatur udara (T_r) panel (A) dan (D), kelembapan udara relatif (RH) panel (B) dan (E), dan LST panel (C) dan (F) menggunakan metode Fast Fourier Transform (FFT). Setiap panel terdiri dari tiga bagian: data asli parameter (bagian atas), data dengan celah (bagian tengah), dan data setelah dilakukan proses pengisian celah (bagian bawah).

Pada panel (A) Kemayoran dan panel (D) Curug, data temperatur asli menunjukkan fluktuasi harian yang relatif stabil selama periode pengamatan (2015-2024). Namun masih ada sejumlah data yang kosong terutama di periode awal data pada bagian tengah panel (lingkaran merah) yang kemudian dilakukan proses pengisian celah kosong menggunakan FFT. Hasil rekonstruksi data (bagian bawah panel) menunjukkan pola yang sangat mirip dengan data asli, baik dari segi amplitudo maupun tren harian. Hal ini mengindikasikan bahwa metode FFT mampu mempertahankan karakteristik sinyal temperatur dengan cukup baik, terutama dalam merekonstruksi data yang memiliki periodisitas atau siklus musiman.

Panel (B) Kemayoran dan panel (E) Curug menunjukkan proses yang sama untuk parameter kelembapan udara relatif dimana pola variabilitas RH cenderung lebih tinggi dibandingkan temperatur. Namun, metode FFT tetap mampu melakukan estimasi nilai yang hilang secara efektif. Hasil pengisian celah (bagian bawah panel E) menunjukkan bahwa meskipun terdapat sedikit fluktuasi yang lebih kasar, pola umum tetap dapat direkonstruksi dengan akurasi yang memadai. Panel (C) Kemayoran dan (F) Curug memperlihatkan hasil simulasi yang sedikit berbeda dimana data asli LST (bagian atas panel) memiliki banyak celah data. Namun begitu hasil rekonstruksi data menunjukkan periodisitas yang konsisten mengikuti pola musimannya. Secara keseluruhan, Gambar 1 ini menegaskan bahwa metode FFT merupakan pendekatan yang efektif untuk mengatasi permasalahan celah data dalam deret waktu iklim. Keunggulan utama metode ini terletak pada kemampuannya menangkap pola frekuensi dominan dari sinyal asli, sehingga hasil pengisian celah data tetap mengikuti ritme musiman atau harian yang terdapat dalam data.

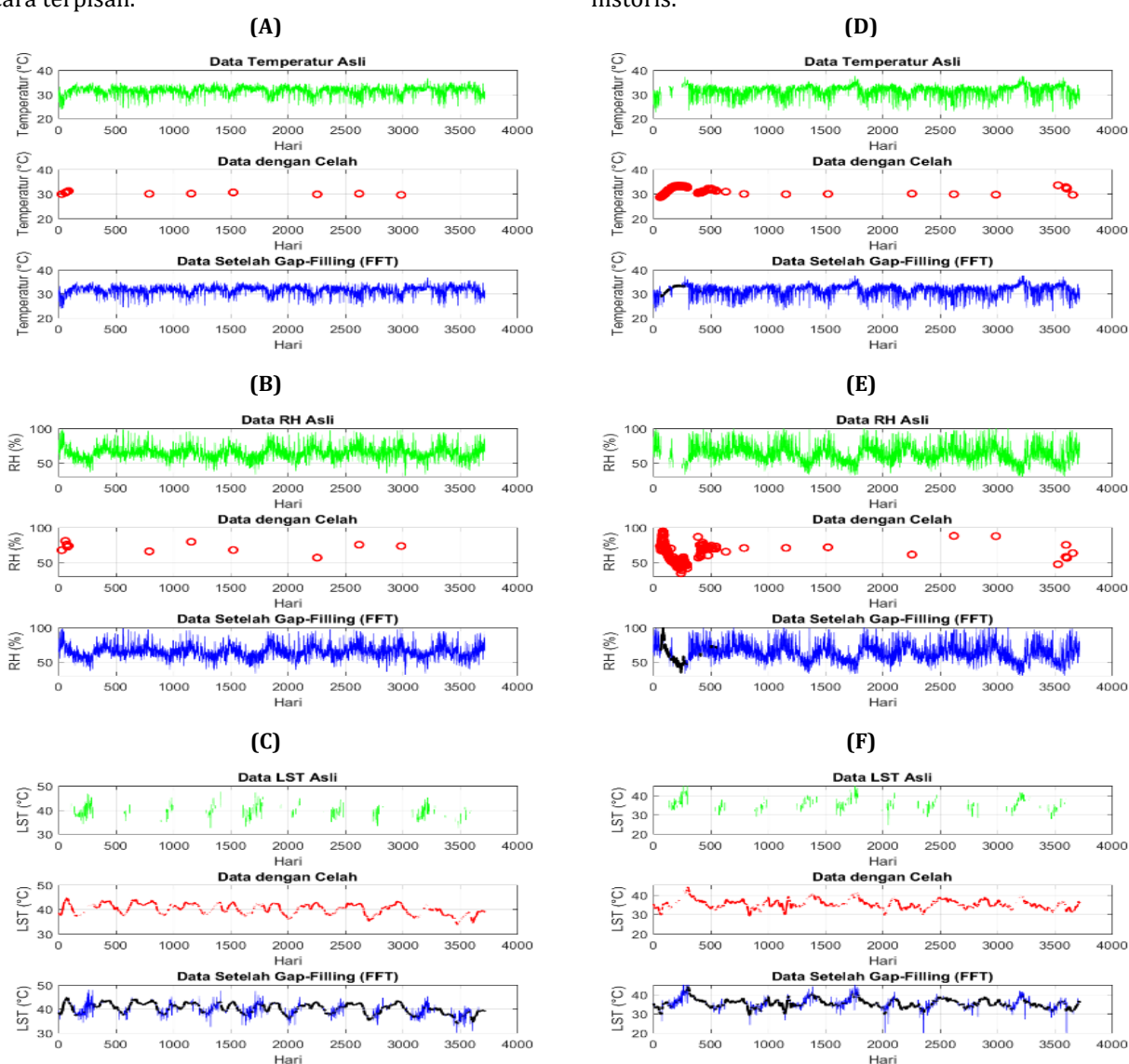
3.2. Analisis Modifikasi THI

Gambar 2 menunjukkan hubungan eksponensial antara T_r dan RH terhadap THI Nieuwolt dari persamaan (3), serta hasil estimasi THI berdasarkan model pendekatan eksponensial non - linier dibangun untuk Kemayoran (panel A, B, dan C) dan Curug (panel D, E, dan F). Panel (A) dan panel (D) memperlihatkan plot sebaran antara temperatur dan THI dengan lingkaran biru sedangkan garis merah merepresentasikan kurva hasil fitting eksponensial. Terlihat adanya korelasi positif yang kuat antara T_r dan THI dengan peningkatan T_r disertai peningkatan THI secara eksponensial. Pada bagian bawah panel menunjukkan perbandingan antara nilai THI (garis

biru) dan hasil estimasi model eksponensial berbasis T_T (garis merah) dengan kesesuaian yang cukup baik mengindikasikan bahwa T_T sendiri dapat digunakan sebagai prediktor THI dengan akurasi yang tinggi.

Panel (B) dan (E) menunjukkan plot sebaran antara RH dan THI dimana hubungannya sedikit berbeda dengan T_T . Hubungan antara RH dan THI membentuk korelasi negatif eksponensial yang terlihat dari arah penurunan kurva fitting merepresentasikan meningkatnya RH maka nilai THI cenderung menurun. Sedangkan bagian bawah masing-masing panel menggambarkan perbandingan antara THI dan hasil model eksponensial berbasis RH. Meskipun tren utama dapat diikuti namun terdapat lebih banyak deviasi antara dua kurva dibandingkan dengan model berbasis T_T . Hal ini menunjukkan bahwa RH memiliki pengaruh terhadap THI, namun tidak sekuat pengaruh T_T jika digunakan eksponensial secara terpisah.

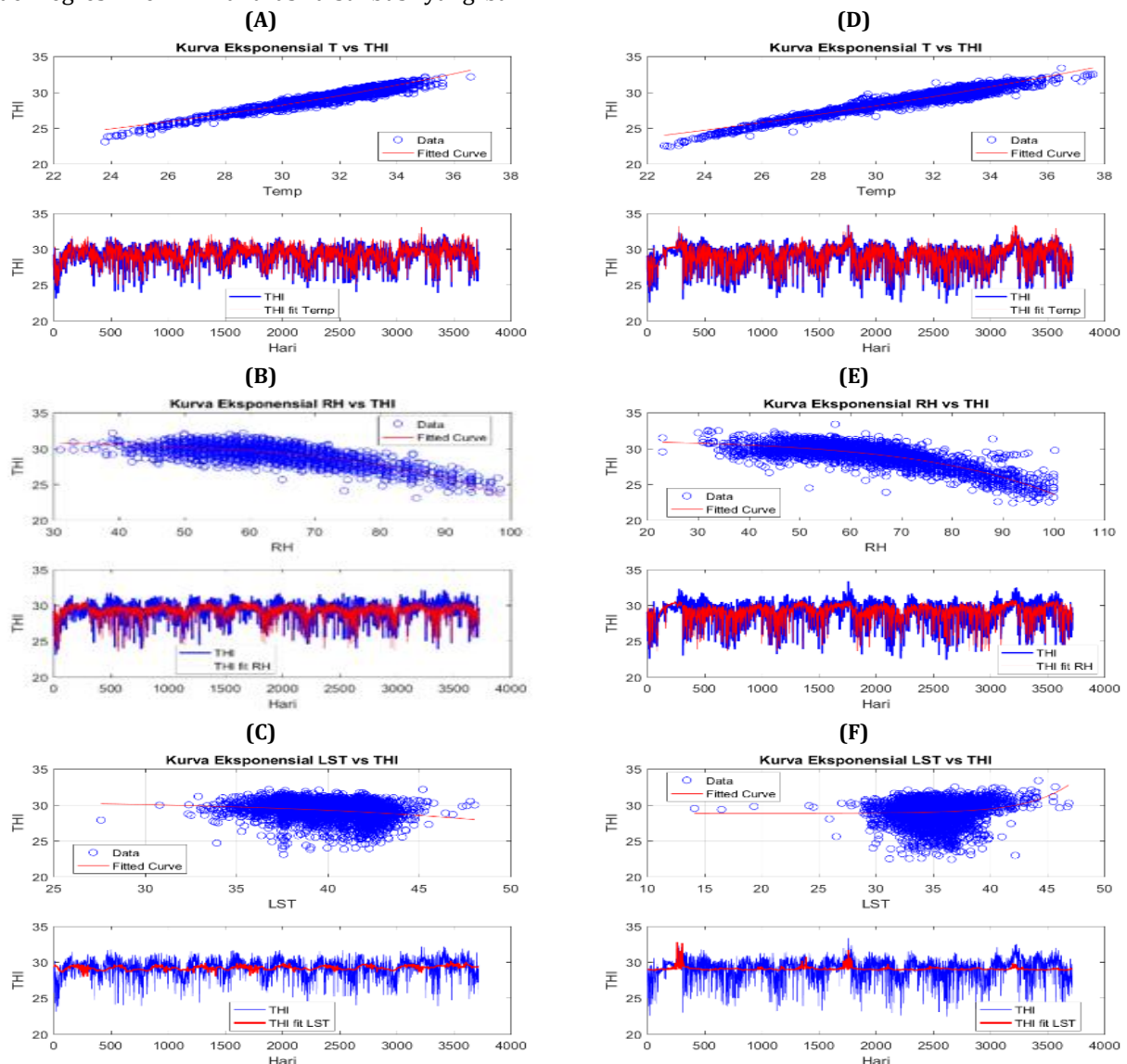
Pada bagian atas panel (C) Kemayoran menunjukkan plot sebaran antara LST dan THI dengan membentuk korelasi negatif eksponensial. Namun sedikit berbeda pada Curug (bagian atas Panel F) dengan korelasi positif lemah antara LST dan THI. Sementara itu pada bagian bawah masing-masing panel menggambarkan perbandingan antara THI dan hasil model eksponensial berbasis LST dengan tren tidak mengikuti pola umumnya dan terdapat banyak deviasi antara dua kurva dibandingkan dengan model berbasis T_T dan RH. T_T merupakan faktor dominan dalam pembentukan nilai THI dibandingkan RH dan LST karena model eksponensial non-linier berbasis T_T mampu merekonstruksi nilai THI dengan akurasi lebih baik dibandingkan model berbasis RH dan LST. Pendekatan ini dapat digunakan sebagai metode sederhana namun efektif dalam memodelkan dan memprediksi nilai THI berdasarkan data iklim historis.



Gambar 1. Pengisian Data Kosong Kemayoran (Panel Kiri) dan Curug (Panel Kanan) di Siang Hari untuk Parameter Temperatur Udara, RH, dan LST

Gambar 3 menunjukkan kurva *Probability Density Function* (PDF) dari nilai-nilai model estimasi THI yang diperoleh dari beberapa metode estimasi dibandingkan terhadap nilai THI hasil perhitungan standar berdasarkan rumus Nieuwolt di Kemayoran (panel A, B, dan C) dan di Curug (panel D, E, dan F). Tujuan dari analisis ini adalah untuk mengevaluasi sejauh mana distribusi probabilitas dari masing-masing metode untuk mendekati distribusi asli nya. Panel (A) dan (D) menunjukkan PDF dari nilai THI-LR berdasarkan metode regresi linier (garis merah putus-putus) dari persamaan (4) dibandingkan dengan PDF dari THI (garis hitam). Kedua kurva hampir identik, menunjukkan bahwa THI-LR menghasilkan distribusi estimasi yang sangat mirip dengan distribusi THI. Hal ini mengindikasikan bahwa model regresi memiliki akurasi distribusi yang baik

dalam merepresentasikan data THI. Panel (B) dan (E) memperlihatkan hasil estimasi THI-NLE menggunakan model eksponensial non-linier multivariat dari persamaan (5). Seperti halnya THI-LR, kurva PDF dari hasil model (garis merah) hampir tumpang tindih dengan PDF dari THI. Ini menunjukkan bahwa pendekatan THI-NLE juga memiliki performa yang sangat baik dalam menangkap distribusi probabilitas THI, terutama dalam konteks prediksi berbasis hubungan eksponensial terhadap suhu dan kelembapan. Panel (C) dan (F) menampilkan hasil pendekatan THI-LE dengan model eksponensial linier multivariat dari persamaan (6). Berbeda dengan dua panel sebelumnya, kurva PDF dari metode ini (garis merah) menyimpang lebih signifikan dari PDF THI.



Gambar 2. Eksponensial Non-Linier Kemayoran (Panel Kiri) dan Curug (Panel Kanan) di Siang Hari antara THI dengan parameter Temperatur Udara, RH, dan LST

Terdapat pergeseran puncak distribusi dan sedikit perbedaan pada lebar distribusi, yang menunjukkan bahwa model ini cenderung memberikan bias pada estimasi nilai THI. Ketidaksesuaian ini mengindikasikan bahwa model THI-LE kurang mampu merepresentasikan distribusi asli THI secara akurat. Hasil perbandingan PDF ini menekankan bahwa THI-LR dan THI-NLE mampu mempertahankan karakteristik distribusi dari THI.

THI-LE memiliki keterbatasan dalam mereproduksi distribusi dari parameter RH dan LST yang dapat menyebabkan deviasi dalam interpretasi kategori THI. Evaluasi dengan PDF merupakan pendekatan yang penting dalam validasi model estimasi karena mempertimbangkan kesesuaian tidak hanya terhadap nilai tengah, tetapi juga terhadap keseluruhan distribusi data.

Tabel 2 menyajikan bentuk persamaan serta nilai koefisien determinasi (R^2) dan *Root Mean Square Error* (RMSE) dari berbagai pendekatan regresi dan eksponensial multivariat. Persamaan ini untuk memodifikasi THI berdasarkan parameter temperatur (T_r), kelembapan udara (RH), dan LST di Kemayoran dan Curug.

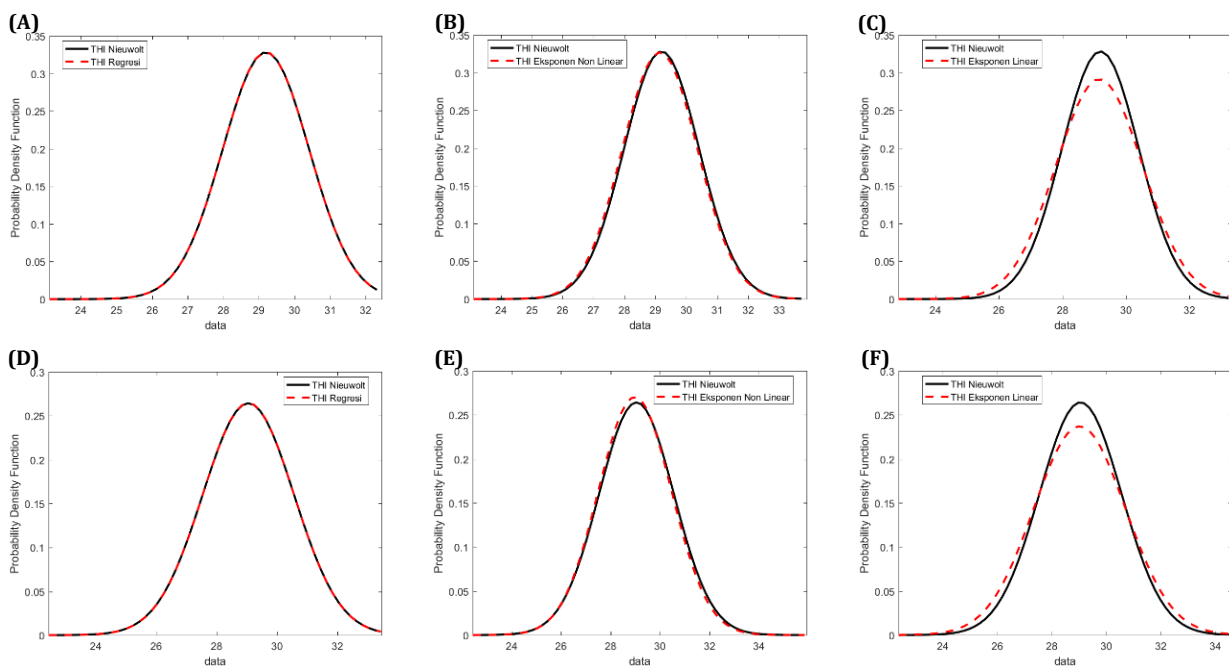
Di Kemayoran nilai THI-LR menunjukkan performa terbaik dengan nilai R^2 sebesar 0.998 dan

RMSE sangat rendah (0.049) yang menandakan bahwa model ini mampu menjelaskan hampir seluruh variabilitas THI dengan tingkat kesalahan yang sangat kecil. Persamaan linier yang melibatkan ketiga variabel prediktor ini menunjukkan bahwa kombinasi T, RH, dan LST secara linier dapat merepresentasikan kondisi termal secara akurat di wilayah urban seperti Kemayoran. Di sisi lain, THI-LE juga memberikan performa yang sangat baik ($R^2 = 0.973$; RMSE = 0.201), walaupun sedikit lebih rendah dibanding THI-LR. Sebaliknya THI-NLE memperlihatkan tingkat akurasi yang jauh lebih rendah ($R^2 = 0.873$; RMSE = 0.432) yang mengindikasikan bahwa bentuk fungsi ini kurang optimal di lingkungan urban yang memiliki dinamika energi permukaan yang lebih kompleks. Sementara itu di lokasi Curug, THI-LR kembali menunjukkan performa terbaik ($R^2 = 0.999$; RMSE = 0.043) yang menegaskan konsistensi dominasi model linier dalam memprediksi THI di kedua lokasi. Persamaan THI-LE di Curug juga menunjukkan hasil yang sangat memadai ($R^2 = 0.973$; RMSE = 0.193), setara dengan performa di Kemayoran. Namun menariknya THI-NLE menunjukkan peningkatan signifikan di Curug ($R^2 = 0.956$; RMSE = 0.246) dibandingkan dengan Kemayoran.

Tabel 2. Bentuk Persamaan dan Koefisien Korelasi untuk Modifikasi THI

Lokasi	Metode	Persamaan	R^2	RMSE
Kemayoran	THI-LR	$-4.757 + 0.001 \cdot LST + 0.948 \cdot T + 0.064 \cdot RH$	0.998	0.049
	THI-NLE	$1.178 \cdot \exp(0.062 \cdot T + 0.005 \cdot RH + 0.011 \cdot LST) + 12.035$	0.873	0.432
	THI-LE	$24.189 \cdot \exp(0.023 \cdot T) + 0.081 \cdot RH + 0.023 \cdot LST - 26.545$	0.973	0.201
	THI-LR	$-4.956 + 0.001 \cdot LST + 0.955 \cdot T + 0.064 \cdot RH$	0.999	0.043
Curug	THI-NLE	$4.525 \cdot \exp(0.041 \cdot T + 0.003 \cdot RH + 0.004 \cdot LST) + 5.740$	0.956	0.246
	THI-LE	$29.181 \cdot \exp(0.020 \cdot T) + 0.080 \cdot RH + 0.017 \cdot LST - 31.996$	0.973	0.193

Sumber: hasil analisis, 2025



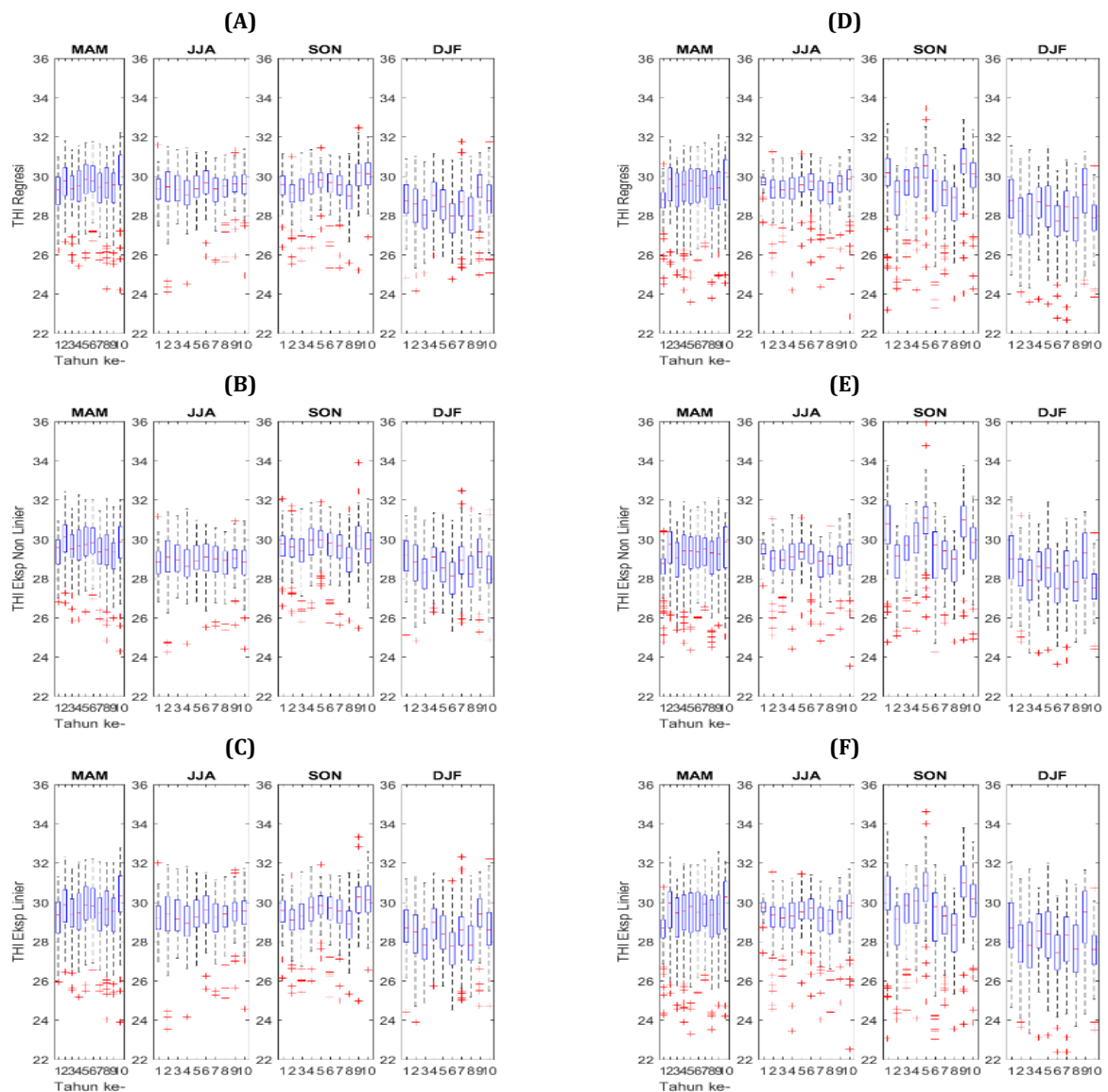
Gambar 3. Distribusi Model THI dengan PDF pada Kemayoran (Panel Atas) dan Curug (Panel Bawah) di Siang Hari antara THI dengan Regresi Linier, Eksponensial Non-Linier Multivariat dan Eksponensial Linier Multivariat

Hal ini mengindikasikan bahwa bentuk eksponensial dapat lebih merepresentasikan hubungan non-linier antara variabel mikroklimat di wilayah yang lebih vegetatif atau sub-urban seperti Curug. Kontribusi numerik LST terhadap persamaan memang relatif kecil dibanding temperatur udara dan kelembapan, namun tetap memberikan informasi tambahan terkait karakteristik permukaan dan dinamika *urban heat island*.

Secara umum, model regresi linier terbukti paling andal untuk memodifikasi nilai THI baik di wilayah urban maupun sub-urban dengan nilai R^2 mendekati 1 dan RMSE < 0.05. Namun untuk aplikasi tertentu yang mempertimbangkan dinamika mikroklimat yang non-linier, model eksponensial linier maupun non-linier tetap dapat menjadi alternatif khususnya di lokasi dengan kompleksitas permukaan dan kelembapan yang tinggi. Perlu dicatat bahwa variabel target dalam penelitian ini adalah THI yang secara

matematis dibangun dari temperatur udara dan kelembapan relatif. Oleh karena itu, tingginya nilai R^2 yang diperoleh, terutama pada model regresi linier, sebagian mencerminkan keterkaitan struktural antara variabel prediktor dan variabel target. Dengan demikian, model estimasi THI dalam penelitian ini lebih tepat diinterpretasikan sebagai model rekonstruksi atau estimasi THI berbasis integrasi LST daripada sebagai model prediksi independen kenyamanan termal.

Gambar 4 memperlihatkan distribusi musiman dari nilai model estimasi THI selama periode 10 tahun menggunakan pendekatan model THI-LR, THI-NLE dan THI-LE di Kemayoran (panel A, B, dan C) dan di Curug (panel D, E, dan F). Setiap panel menunjukkan boxplot model estimasi THI per musim Maret–April–Mei (MAM), Juni–Juli–Agustus (JJA), September–Oktober–November (SON), dan Desember–Januari–Februari (DJF).



Gambar 4. Distribusi Sebaran Model Estimasi THI dengan Boxplot Periode Musiman pada Kemayoran (Panel Kiri) dan Curug (Panel Kanan) di Siang Hari dengan Regresi Linier, Eksponensial Non-Linier Multivariat dan Eksponensial Linier Multivariat

Tabel 3. Jumlah dan Persentase Kategori THI

Lokasi		Kemayoran			Curug		
Kategori		Nyaman	Sebagian Nyaman	Tidak Nyaman	Nyaman	Sebagian Nyaman	Tidak Nyaman
THI	Jumlah	23	182	3514	93	289	3337
	%	0.62	4.89	94.49	2.50	7.77	89.73
THI-LR	Jumlah	18	188	3513	83	303	3333
	%	0.48	5.06	94.46	2.23	8.15	89.62
THI-NLE	Jumlah	15	180	3524	36	352	3331
	%	0.40	4.84	94.76	0.97	9.46	89.57
THI-LE	Jumlah	25	253	3441	106	364	3249
	%	0.67	6.80	92.52	2.85	9.79	87.36

Sumber: hasil analisis, 2025

Boxplot memberikan gambaran statistik lima serangkai (minimum, kuartil 1, median, kuartil 3, maksimum), serta outlier (ditandai dengan tanda + berwarna merah). Pada Gambar 4 (A) dan (D), THI-LR menunjukkan distribusi nilai model estimasi THI yang cenderung stabil dari tahun ke tahun di seluruh musim. Median model estimasi THI berada sekitar 29–30°C dan sebaran data tergolong sempit yang mengindikasikan prediksi yang konsisten. Outlier cukup banyak terutama pada musim DJF (musim hujan) yang mencerminkan prediksi ekstrem karena variasi kelembaban yang tinggi pada musim tersebut.

Gambar 4 (B) dan (E) menunjukkan hasil dari pendekatan THI-NLE dimana karakter distribusi model estimasi THI hampir serupa dengan THI-LR namun cenderung menghasilkan variabilitas lebih tinggi terutama pada musim SON dan DJF. Hal ini dapat disebabkan oleh sensitivitas model non-linier terhadap fluktuasi kelembaban atau suhu ekstrem. Meskipun demikian nilai median tetap konsisten pada kisaran yang sama dengan THI-LR. Gambar 4 (C) dan (F) memperlihatkan model THI-LE yang memiliki sebaran lebih lebar dibanding dua pendekatan sebelumnya. Hal ini mengindikasikan ketidakstabilan dalam prediksi dengan munculnya lebih banyak outlier negatif (nilai THI lebih rendah dari normal) terutama di Curug pada musim SON dan DJF. Variasi ini menunjukkan bahwa model eksponensial linier masih kurang presisi dalam menangkap pola musiman yang kompleks sehingga rentan terhadap deviasi ekstrem. Semua model menunjukkan pola musiman yang relatif stabil dengan nilai median model estimasi THI yang tidak jauh berbeda antar tahun.

Model THI-LR dan THI-NLE menunjukkan performa yang lebih *robust* dan akurat ditandai dengan persebaran nilai yang terkonsentrasi dan sedikit deviasi ekstrem. Sebaliknya model THI-LE memiliki distribusi yang lebih menyebar dan cenderung menghasilkan outlier negatif lebih banyak yang bisa berimplikasi pada rendahnya dalam penilaian kategori THI.

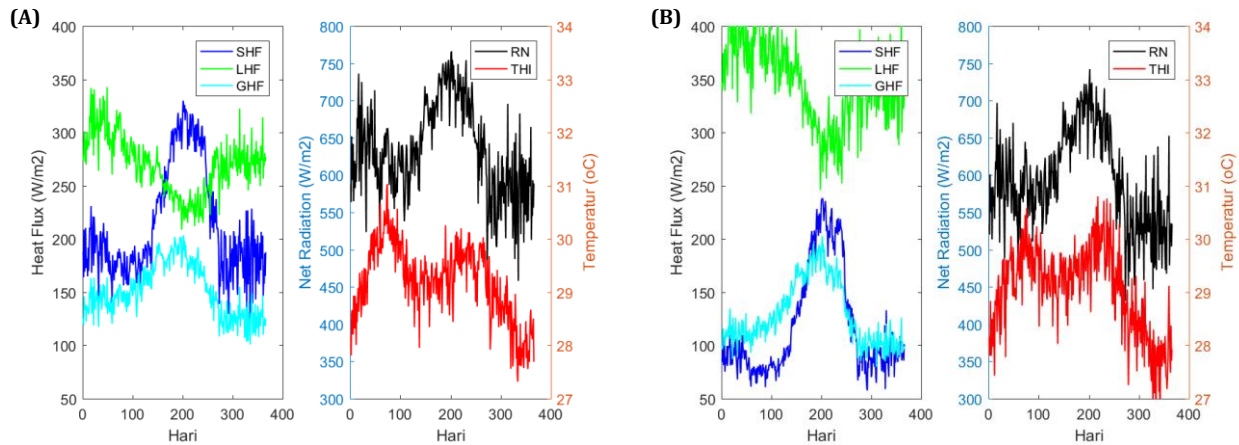
Berdasarkan Tabel 3, metode THI-LE menghasilkan klasifikasi THI paling optimis di kedua lokasi dengan persentase kondisi Nyaman dan Sebagian Nyaman tertinggi. Di Kemayoran metode ini

menghasilkan 0,67% kategori Nyaman dan 6,80% Sebagian Nyaman. Di Curug mencapai 2,85% Nyaman dan 9,79% Sebagian Nyaman yang lebih tinggi dibandingkan metode lain.

Sebaliknya metode THI-NLE menghasilkan kategori Tidak Nyaman tertinggi dengan 94,76% untuk Kemayoran dan 89,57% untuk Curug yang lebih tinggi dari metode lainnya. Sementara itu Metode THI dan THI-LR menunjukkan hasil yang cukup mirip satu sama lain. Curug secara umum menunjukkan kondisi THI yang lebih nyaman dibandingkan Kemayoran di seluruh metode dimana THI memiliki 2,50% Nyaman dan 7,77% Sebagian Nyaman yang jauh lebih tinggi daripada Kemayoran (0,62% dan 4,89%). Kemayoran lebih rentan terhadap kondisi panas ekstrem dengan >94% data jatuh dalam kategori Tidak Nyaman untuk semua metode yang menguatkan hasil dari statistik sebelumnya.

Meskipun metode THI-NLE memiliki pendekatan yang lebih kompleks secara fisik namun hasil klasifikasi menunjukkan cenderung lebih banyak kondisi sebagai Tidak Nyaman. Metode THI-NLE tampak lebih realistis dan sejalan dengan akurasi model (Tabel 2: R^2 tinggi) dan distribusi kategori THI yang logis. Hasil ini menunjukkan bahwa akurasi statistik saja tidak cukup dan model juga harus diuji terhadap interpretasi hasil akhir seperti klasifikasi kenyamanan. Curug secara konsisten lebih nyaman dibanding Kemayoran namun selisih kategori kenyamanan tidak terlalu besar sehingga interpretasi dilakukan secara proporsional.

Salah satu keterbatasan penelitian ini adalah adanya keterkaitan matematis antara variabel target (THI) dan sebagian variabel prediktor (TT dan RH). Kondisi ini berpotensi menghasilkan nilai koefisien determinasi yang tinggi karena model pada dasarnya merekonstruksi indeks yang dibangun dari komponen penyusunnya. Oleh karena itu, hasil penelitian ini lebih tepat diinterpretasikan sebagai evaluasi kemampuan integrasi LST dalam merekonstruksi THI daripada sebagai validasi independen kenyamanan termal. Penelitian selanjutnya perlu menguji model terhadap indeks kenyamanan termal independen seperti UTCI atau PET serta menggunakan lokasi validasi yang berbeda untuk menilai kemampuan generalisasi model.



Gambar 5. Rata-Rata Harian Periode 2015-2024 Parameter SHF, LHF, GHF, dan Rn di (A) Kemayoran, dan (B) Curug pada Siang Hari dengan THI-LE (Eksponensial Linier Multivariat)

3.3. Analisis Model Estimasi THI dan Neraca Energi Permukaan

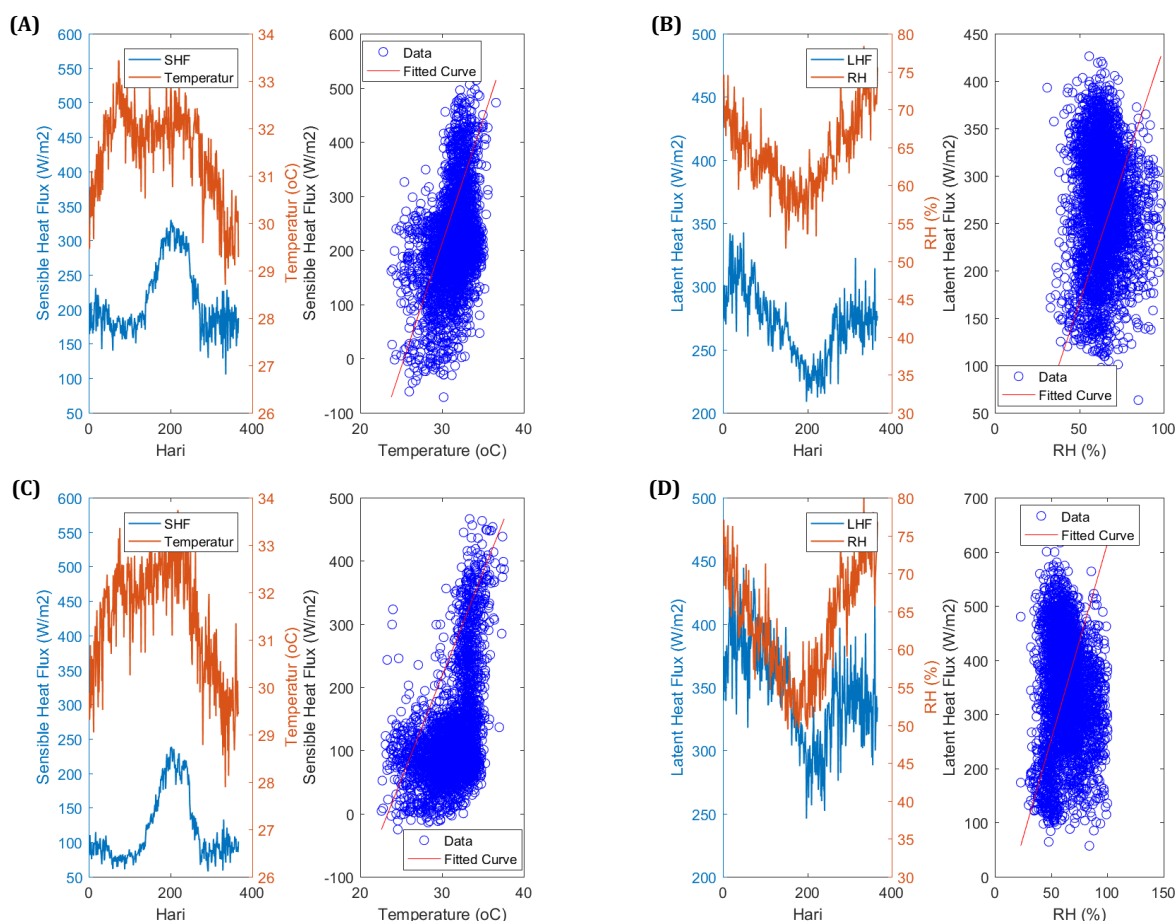
Gambar 5 menunjukkan dinamika harian komponen neraca energi permukaan yang terdiri dari *Sensible Heat Flux* (SHF), *Latent Heat Flux* (LHF), *Ground Heat Flux* (GHF), dan Radiasi Netto (Rn), serta hubungannya terhadap THI-LE Kemayoran dan Curug. Pada Kemayoran (panel A) LHF (garis hijau) mendominasi aliran energi permukaan sepanjang tahun, dengan nilai berkisar antara 250–350 W/m², SHF (garis biru) mengindikasikan kontribusi besar dari penguapan dan transpirasi. GHF (garis biru muda) lebih konstan dan berada di kisaran yang lebih rendah (sekitar 120–180 W/m²), mencerminkan aliran panas ke dalam tanah yang relatif stabil dan berperan kecil dalam fluktuasi THI-LE. Sedangkan Rn (garis hitam) juga menunjukkan puncak mendekati di Mei berkisar 700–750 W/m² yang mengkonfirmasi bahwa input energi total dari radiasi sangat mempengaruhi dinamika THI-LE. Korelasi THI-LE (garis merah) dengan Rn dan SHF tampak kuat secara visual di mana puncak-puncak nilai saling berimpit yang menandakan bahwa pada musim kemarau terdapat akumulasi energi permukaan meningkat dan menyebabkan lonjakan THI-LE yang dapat mengindikasikan Tidak Nyaman pada manusia.

Pada Curug (Panel B) LHF di Curug lebih dominan dan lebih tinggi dibanding Kemayoran dengan nilai mencapai hampir 400 W/m² pada musim hujan dimana mencerminkan kondisi yang lebih lembap. SHF dan GHF lebih rendah secara umum menunjukkan bahwa sebagian besar energi permukaan dikonversi menjadi panas laten ketimbang panas sensibel. Hal ini menjelaskan nilai THI-LE yang sedikit lebih rendah di Curug dibanding Kemayoran terutama pada musim puncak kemarau. Pola Rn dan THI-LE masih memperlihatkan hubungan positif namun dengan magnitudo THI-LE yang lebih berpola. Hal ini menunjukkan bahwa lingkungan yang lebih basah cenderung meredam kenaikan suhu permukaan yang berdampak langsung pada kenyamanan termal manusia. Ini konsisten dengan hasil analisis sebelumnya mengenai statistik

kenyamanan di Curug yang berkontribusi kondisi Nyaman yang lebih tinggi dibandingkan di Kemayoran. Secara umum THI-LE memiliki hubungan kuat dengan SHF dan Rn di kedua wilayah yang menunjukkan bahwa peningkatan energi permukaan terutama dalam bentuk panas sensibel dan radiasi netto, berperan besar dalam peningkatan Tidak Nyaman. LHF yang tinggi cenderung menurunkan THI-LE karena energi digunakan untuk penguapan dan bukan pemanasan udara. Ini menjelaskan mengapa wilayah seperti Curug yang memiliki LHF dominan memiliki THI yang lebih rendah dibanding Kemayoran.

Gambar 6 mendukung temuan sebelumnya dengan memberikan gambaran kuantitatif hubungan antara variabel-variabel utama neraca energi permukaan dan parameter meteorologi yang mempengaruhi THI. Pada panel (A) dan (C), terlihat adanya hubungan positif yang jelas antara SHF dan temperatur udara (T_r) di kedua lokasi. Rata-rata harian menunjukkan bahwa peningkatan SHF konsisten diikuti oleh peningkatan T_r khususnya saat mendekati musim kemarau. Plot sebaran pada kedua panel ini memperlihatkan hubungan linier yang cukup kuat yang mengindikasikan bahwa peningkatan aliran panas sensibel secara langsung berkaitan dengan peningkatan temperatur udara. Hubungan ini lebih tajam di Kemayoran yang menunjukkan sensitivitas wilayah urban terhadap akumulasi panas permukaan.

Sementara itu, panel (B) dan (D) menunjukkan hubungan antara LHF dan RH. Hubungan ini juga positif terutama pada nilai RH tinggi >70% dengan Curug menunjukkan nilai LHF yang lebih tinggi dibandingkan Kemayoran. Ini menunjukkan bahwa lingkungan Curug yang lebih lembap karena tutupan vegetasi dan curah hujan tinggi yang mendorong aliran energi dalam bentuk panas laten yang lebih besar dan sesuai dengan temuan June et al (2018). Hal ini berkontribusi dalam menurunkan suhu udara dan turunnya kategori THI. Plot sebaran memperlihatkan sebaran data yang lebih rapat di Curug dibandingkan Kemayoran yang menandakan hubungan yang lebih stabil antara kelembaban dan LHF.



Gambar 6 Perbandingan Rata-Rata Harian dan Plot Sebaran Periode 2015-2024 Parameter SHF dengan T_t , dan LHF dengan RH di Kemayoran (panel atas) dan Curug (panel bawah)

Secara keseluruhan analisis grafik dan plot sebaran ini memperkuat kesimpulan bahwa SHF dan RN memiliki peran utama dalam peningkatan THI, sedangkan LHF berperan sebagai faktor yang meredam kenaikan suhu. Hasil ini menggarisbawahi pentingnya pengelolaan lanskap dan peningkatan tutupan vegetasi sebagai strategi adaptif untuk mengurangi dampak Tidak Nyaman terutama di wilayah urban yang memiliki kecenderungan akumulasi panas yang lebih tinggi.

Berdasarkan Gambar 7 menyajikan plot sebaran hubungan antara nilai rata-rata musiman model THI dengan Bowen Ratio (BR) di Kemayoran (panel A) dan Curug (panel B). Analisis menunjukkan adanya perbedaan karakteristik yang signifikan antara kedua wilayah. Pada panel (A) terlihat adanya dua kelompok utama yaitu kelompok pertama dengan model THI < 29.5 °C menunjukkan BR yang relatif rendah dan stabil (sekitar 0.6–0.8), sedangkan kelompok kedua dengan model THI > 29.5 °C menunjukkan peningkatan BR yang tajam hingga >1.6. Nilai-nilai tinggi BR tersebut didominasi oleh musim kemarau dan transisi (JJA dan SON) yang mencerminkan peningkatan kontribusi energi ke dalam bentuk panas sensibel. Hal ini berkontribusi terhadap peningkatan model THI yang dirasakan dan mengindikasikan potensi Tidak Nyaman yang lebih tinggi. Sebaliknya pada panel (B) sebagian besar nilai BR tetap rendah

(<0.6) bahkan ketika model THI meningkat hingga lebih dari 30 °C. Ini menunjukkan dominasi aliran panas laten (LHF) dibanding panas sensibel (SHF) yang mencerminkan lingkungan dengan kelembapan tinggi akibat tutupan vegetasi yang lebat dan evapotranspirasi yang intensif seperti temuan June et al (2018). Periode JJA dan SON juga menunjukkan peningkatan BR dengan naiknya model THI namun dengan kemiringan kurva yang lebih landai dibanding Kemayoran. Hubungan antara THI dan Bowen Ratio bersifat musiman (season-dependent), sehingga Bowen Ratio bukan satu-satunya faktor yang mengontrol kenyamanan termal. Untuk memperkuat interpretasi sensitivitas musiman antara THI dan Bowen Ratio, dilakukan analisis korelasi Spearman pada masing-masing musim dan lokasi penelitian (tabel 4). Hasil menunjukkan bahwa hubungan keduanya tidak bersifat konsisten sepanjang tahun, melainkan dipengaruhi oleh variabilitas musiman dan karakteristik wilayah. Pada musim MAM diperoleh korelasi negatif yang signifikan di Kemayoran ($\rho = -0,345$; $p < 0,001$) dan Curug ($\rho = -0,501$; $p < 0,001$). Pada musim JJA, hubungan negatif masih terlihat di Kemayoran ($\rho = -0,328$; $p = 0,0015$), sedangkan di Curug tidak ditemukan hubungan yang signifikan ($\rho = -0,052$; $p = 0,626$). Sebaliknya pada musim SON Curug menunjukkan korelasi positif sedang dan signifikan ($\rho = 0,471$; $p < 0,001$), sementara Kemayoran tidak

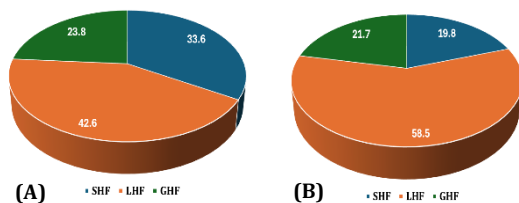
menunjukkan hubungan yang signifikan. Pada musim DJF, hubungan antara THI dan Bowen Ratio tidak signifikan di kedua lokasi.

Temuan ini mengindikasikan bahwa pengaruh distribusi energi permukaan terhadap kenyamanan termal bergantung pada kondisi musiman dan karakteristik tutupan lahan. Oleh karena itu, Bowen Ratio tidak dapat digunakan sebagai satu-satunya indikator untuk menjelaskan variasi kenyamanan termal sepanjang tahun, melainkan perlu diinterpretasikan bersama variabel meteorologi lain, terutama temperatur udara dan kelembapan relatif. Di Kemayoran model THI meningkat seiring dengan BR tinggi yang memperkuat kontribusi panas sensibel dalam menciptakan kondisi panas ekstrem. Sebaliknya energi permukaan di Curug lebih banyak dikonversi menjadi panas laten yang dapat meredam dampak kenaikan model THI. Temuan ini menunjukkan bahwa BR dapat digunakan sebagai indikator efisiensi penggunaan energi permukaan di mana nilai BR tinggi menunjukkan dominasi panas sensibel yang meningkatkan ketidaknyamanan. Oleh karena itu wilayah dengan BR rendah cenderung memiliki kondisi termal yang lebih nyaman seperti temuan dari Asyura et al (2023).

Tabel 4. Sensivitas Musiman THI dan Bowen Ratio

Lokasi	Kemayoran		Curug	
	Koefisien (ρ)	P-Value	Koefisien (ρ)	P-Value
MAM	-0,345	<0,001	-0,501	<0,001
JJA	-0,328	0,0015	-0,052	0,626
SON	0,094	0,377	0,471	<0,001
DJF	0,136	0,200	-0,081	0,450

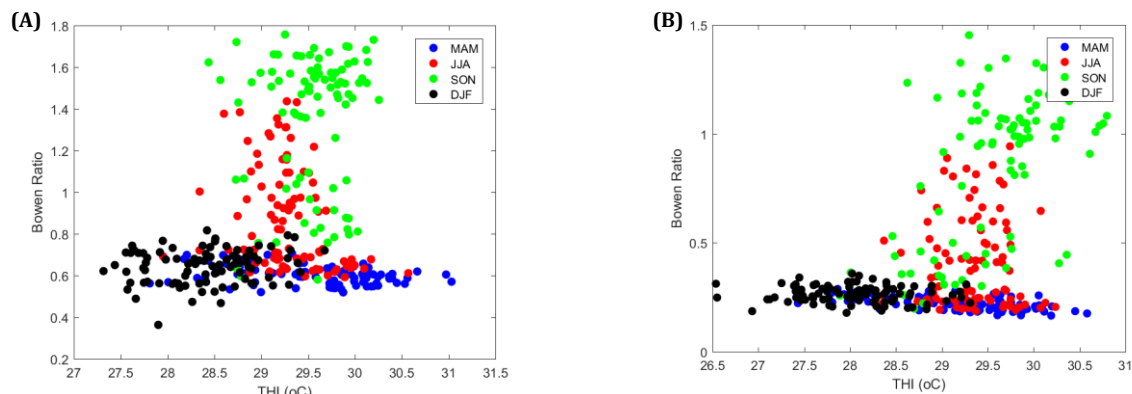
Sumber: hasil analisis, 2026



Gambar 8. Persentase Neraca Energi Permukaan di Wilayah (A) Kemayoran dan (B) Curug

Gambar 8 memperlihatkan komposisi neraca energi permukaan berdasarkan persentase kontribusi

SHF, LHF, dan GHF di Kemayoran dan Curug. Secara umum terlihat bahwa komposisi neraca energi di kedua lokasi memiliki pola distribusi energi yang berbeda yang mencerminkan karakteristik permukaan dan kondisi iklim masing-masing wilayah. Di Kemayoran LHF memiliki kontribusi terbesar dengan nilai 42,6% diikuti oleh SHF sebesar 33,6%, dan GHF sebesar 23,8%. Dominasi LHF menunjukkan adanya proses penguapan dan transpirasi yang cukup aktif namun nilai SHF yang relatif tinggi menunjukkan bahwa energi dalam jumlah besar juga digunakan secara tidak langsung untuk memanaskan udara permukaan. Ini mengindikasikan bahwa wilayah Kemayoran yang lebih urban cenderung memiliki lingkungan yang lebih panas akibat albedo permukaan yang tinggi dan vegetasi yang relatif minim. Sebaliknya di Curug proporsi LHF mencapai 58,5%, yang merupakan nilai tertinggi di antara ketiga komponen. Hal ini menandakan bahwa sebagian besar energi digunakan untuk proses evaporasi dan transpirasi yang mengarah pada kondisi lingkungan yang lebih lembap dan sejuk. SHF di Curug hanya sebesar 19,8%, jauh lebih rendah dibandingkan Kemayoran yang mencerminkan rendahnya pemanasan udara secara langsung. GHF di Curug sebesar 21,7% relatif mirip dengan Kemayoran. Perbedaan signifikan dalam kontribusi SHF dan LHF ini sejalan dengan hasil Bowen Ratio dan model THI pada analisis sebelumnya di mana Kemayoran cenderung memiliki nilai Bowen Ratio yang lebih tinggi serta kategori kenyamanan termal yang didominasi oleh kondisi Tidak Nyaman. Sedangkan Curug menunjukkan karakteristik sebaliknya dengan dominasi LHF yang mendukung nilai Bowen Ratio yang rendah dan kenyamanan termal yang lebih baik. Secara umum bahwa komposisi neraca energi permukaan dipengaruhi oleh kondisi tutupan lahan dan urbanisasi yang pada gilirannya berdampak langsung pada kenyamanan termal. Kawasan urban seperti Kemayoran menyerap dan menyimpan lebih banyak energi dalam bentuk panas nyata, sementara kawasan suburban atau semi-rural seperti Curug lebih mampu mempertahankan kelembapan permukaan melalui evapotranspirasi yang intensif.



Gambar 7. Plot Sebaran Rata-Rata Musiman Model THI dengan Bowen Ratio di (A) Kemayoran dan (B) Curug

4. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa integrasi Land Surface Temperature (LST) dan parameter meteorologi mampu membangun model estimasi Temperature Humidity Index (THI) dengan tingkat akurasi yang tinggi pada wilayah urban dan suburban. Dari tiga model yang diuji, model regresi linier memberikan performa terbaik dengan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,998 di Kemayoran dan 0,999 di Curug, serta nilai RMSE masing-masing sebesar 0,049 dan 0,043. Hasil ini menunjukkan bahwa model regresi linier merupakan pendekatan yang paling baik dalam merekonstruksi THI pada kedua lokasi penelitian. Namun model terbaik bukan hanya dilihat dari nilai statistik (R^2 /RMSE), tetapi juga dari kemampuannya merepresentasikan pola variabilitas temporal musiman. Dalam hal ini model eksponensial linier menjadi alternatif karena lebih seimbang antara kompleksitas, akurasi, dan interpretabilitas terutama untuk tujuan mitigasi dan adaptasi di bidang klimatologi perkotaan.

Analisis kenyamanan termal menunjukkan bahwa Kemayoran memiliki kondisi yang relatif lebih tidak nyaman dibandingkan Curug. Kondisi ini ditunjukkan oleh proporsi kategori Tidak Nyaman yang lebih dominan di Kemayoran sebesar 92,52% - 94,76%, sedangkan Curug sebesar 87,36% - 89,73%. Perbedaan tersebut berkaitan dengan karakteristik neraca energi permukaan, dimana Kemayoran memiliki proporsi sensible heat flux (SHF) yang lebih tinggi, sedangkan Curug didominasi oleh latent heat flux (LHF) yang mendukung proses evapotranspirasi dan membantu meredam peningkatan suhu lingkungan. Hubungan tersebut juga tercermin dari nilai Bowen Ratio yang cenderung lebih tinggi di Kemayoran dibandingkan Curug.

Hasil penelitian mengindikasikan bahwa pengelolaan tutupan lahan dan peningkatan ruang terbuka hijau yang mampu meningkatkan proporsi fluks panas laten berpotensi menjadi strategi adaptasi untuk mengurangi ketidaknyamanan termal di kawasan perkotaan. Temuan ini dapat dimanfaatkan sebagai informasi pendukung dalam perencanaan tata ruang dan mitigasi dampak urban heat island.

Penelitian ini memiliki keterbatasan diantaranya belum melakukan evaluasi kuantitatif secara khusus terhadap performa metode gap-filling yang digunakan. Kemudian karena variabel target yang digunakan adalah THI, yang secara matematis dibangun dari temperatur udara dan kelembapan relatif. Kondisi tersebut berpotensi menghasilkan nilai akurasi model yang tinggi akibat adanya keterkaitan struktural antara variabel prediktor dan variabel target. Oleh karena itu, hasil penelitian ini lebih tepat diinterpretasikan sebagai evaluasi kemampuan integrasi LST dalam merekonstruksi THI daripada sebagai validasi independen kenyamanan termal aktual. Penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan evaluasi gap-filling dan menguji model pada lokasi yang berbeda, menggunakan data validasi independen, serta membandingkannya

dengan indeks kenyamanan termal lain seperti UTCI dan PET guna meningkatkan kemampuan generalisasi model.

DAFTAR PUSTAKA

- Arif, N., B.S. Hadi, D.R.S. Sumunar, D.R. Nugraheni, Kharisma, A.N. Dewi, I. Kurniawati. 2023. Analysis of thermal comfort in urban area using Remote Sensing and Geographic Information System. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 1190 012013.
- Asyura, M.F., T. June, R. Salmayenti. 2023. Bowen ratio and evapotranspiration dynamics of oil palm. Intl J Trop Drylands, Volume 6, Number 1, Pages: 37-45. DOI: 10.13057/tropdrylands/t070105.
- Bhargava, A., S. Lakmini, S. Bhargava. 2017. Urban Heat Island Effect: It's Relevance in Urban Planning. J Biodivers Endanger Species 2017, 5:2. Doi: 10.4172/2332-2543.1000187.
- Charalampopoulos, I., A.S. Nouri. 2019. Investigating the behaviour of human thermal indices under divergent atmospheric conditions: A sensitivity analysis approach. Atmosphere, 10, 580. Doi: 10.3390/atmos 10100580.
- Choudhury, D., K. Das, A. Das. 2018. Assessment of land use land cover changes and its impact on variations of land surface temperature in Asansol-Durgapur Development Region. The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences 22 (2019) 203-218.
- Effendy, S., A. Bey, A.F.M. Zain, I. Santosa. 2006. Peranan ruang terbuka hijau dalam mengendalikan suhu udara dan urban heat island wilayah Jabotabek. J. Agromet Indonesia 20 (1) : 23 -33, 2016.
- Emmanuel, R. 2005. Thermal comfort implications of urbanization in a warm-humid city: the Colombo Metropolitan Region (CMR), Sri Lanka. Building and Environment 40 (2005) 1591-1601. doi:10.1016/j.buildenv.2004.12.004.
- Goldblatt, R.A. Addas, D. Crull, A. Maghrabi, G.G. Levin, S. Rubinyi. 2021. Remotely sensed derived Land Surface Temperature (LST) as a proxy for air temperature and thermal comfort at a small geographical scale. Land. 10, no.4: 410. doi: 10.3390/land10040410.
- Hou, H., K. Liu, X. Li, S. Chen, W. Wang, K. Rong. 2020. Assessing the urban heat island variations and its influencing mechanism in metropolitan areas of Pearl River Delta, South China. Physics and Chemistry of the Earth. ISSN 1474-7065. https://doi.org/10.1016/j.pce.2020.102953.
- Humaida, N., L.B. Prasetyo, S.B. Rushayati. 2015. Priority assessment method of green open space (case study: Banjarbaru City). The 2nd International symposium on LAPAN-IPB Satellite for Food Security and Environmental Monitoring. Doi:10-1016/j.proenv.2016.03.086.
- Ige, S.O., V.O. Ajayi, O.E. Adeyeri, K.S.A. Oyekan. 2017. Assessing remotely sensed temperature humidity index as human comfort indicator relative to landuse landcover change in Abuja, Nigeria. Spatial Information Research 25, no.4: 523-533. doi: 10.1007/s41324-017-0118-2.
- Imran, H.M., A. Hossain, M.I. Shammas, M.K Das, M.R. Islam, K. Rahman, M. Almazroui. 2022. Land Surface Temperature and human thermal comfort responses to land use dynamics in Chittagong City of

- Bangladesh. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*. Vol. 13, No. 1, 2283-2312. doi: 10.1080/19475705.2022.2114384.
- Jenerette, G.D., S.L. Harlan, A. Buyantuev, W.L. Stefanov, J.D. Barreto, B.L. Ruddell, S.W. Myint, S. Kaplan, X. Li. 2015. Micro-scale urban surface temperatures are related to land-cover features and residential heat related health impacts in Phoenix, AZ USA. *Landscape Ecology*. DOI: 10.1007/s10980-015-0284-3.
- Johnson, D.P., J.S. Wilson, G.C. Luber. 2009. Socioeconomic indicators of heat-related health risk supplemented with remotely sensed data. *International Journal of Health Geographics*. 2009, 8:57 doi:10.1186/1476-072X-8-57.
- June, T., N.W.S.P. Dewi, A. Meijide. 2018. Perbandingan metode aerodinamik, bowen ratio dan penman-monteith dalam penentuan evapotranspirasi pertanaman kelapa sawit. *Agromet* 31(1): 11-20, 2018. Doi: 10.29244/j.agromet.32.1.11-20.
- Kartika, Q.A., R. Hidayat, R.H. Virgianto. 2021. Perubahan temperature humidity index (THI) di pulau Jawa sejak 1981 hingga 2019. *Majalah Geografi Indonesia* Vol. 35, No. 2, 104-111.
- Maru, R., I.I. Baharuddin, R.Umar, R. Rasyid, Uca, W. Sanusi, Bayudin. 2015. Analysis of the heat island phenomenon in Makassar, South Sulawesi, Indonesia. *American Journal of Applied Sciences* 2015, 12 (9): 616.626. DOI: 10.3844/ajassp.2015.616.626.
- Munoz-Sabater, J., Dutra, E., Agusti-Panareda, A., C. Alberger. 2021. ERA5-Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth. Syst. Sci. Data*. 13. 4349-4383. Doi: 10.5194/essd-13-4349-2021.
- Nieuwolt, S. 1977. *Tropical Climatology: An Introduction to the Climates of the Low Latitudes*. 2nd Edition. John Wiley & Sons, Ltd. New York. ISBN 0471994065.
- Oke, T.R., G. Mills, A. Christen, J.A. Voogt. 2017. *Urban climates*. Cambridge University Press. ISBN 978-0-521-84950-0. DOI: 10.1017/9781139016476.
- Rakotoarivelo, T., Miranville, F., Gronfier, C., B. Malet-Damour. 2021. Thermal comfort analysis: comparison between model and experimental data in tropical climate. *Journal of Physics: Conference series*, 2042 (2021)012137. Doi: 10.1088/1742-6596/2042/1/012137.
- Wati, T., dan Fatkhuroyan. 2017. Analisis Tingkat Kenyamanan Di DKI Jakarta Berdasarkan Indeks THI (Temperature Humidity Index). *Jurnal Ilmu Lingkungan* (2017), 15 (1): 57-63, ISSN 1829-8907.
- Yasmeen, S., H. Liu. 2019. Evaluation of thermal comfort and heat stress indices in different countries and regions-A Review. *IOP Conf Series: Materials Science and Engineering* 609 (2019) 052037. Doi: 10.1088/1757-899X/609/5/052037.
- Z. Wan. 2013. MODIS Land Surface Temperature products Users guide. Doi: 10.5067/MODIS/MOD11A1.061.
- Zheng, X., N. Zhang, X. Wang. 2022. Development of modified thermal humidity index and its application to human thermal comfort of urban vegetation patches. *Ecosystem Health and Sustainability*. Vol. 8, No. 1, 2130095. doi: 10.1080/20964129.2022.2130095.