

Tinjauan Pustaka: Kuantifikasi Zona Kenyamanan Termal di Area Perkotaan Tropis Menggunakan Pendekatan Data Penginderaan Jauh

Nurgiantoro^{a,b}

^aDepartemen Teknik Geomatika, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Kampus ITS Sukolilo, Surabaya, 60111, Indonesia

^bProdi Geografi, Universitas Halu Oleo, Kampus Hijau Bumi Tridharma Jl H.E.A Mokodompit Anduonohu, Kendari, 93232, Indonesia

*Korespondensi Penulis: nurgiantoro@uho.ac.id



Dikirim: 31 Agustus 2025;
Diterima: 4 September 2025;
Diterbitkan: 4 September
2025.

Abstrak. Eskalasi pengembangan wilayah perkotaan tropis telah memperburuk fenomena *Urban Heat Island* (UHI). Kondisi ini berdampak negatif pada kesehatan, produktivitas, dan konsumsi energi. Artikel ini merupakan tinjauan pustaka jenis bibliometrik tentang pemanfaatan penginderaan jauh untuk mengukur zona kenyamanan termal. Topik ini telah berkembang dari pengukuran anomali suhu secara fisik menjadi penilaian dengan pendekatan indeks kenyamanan termal. Hadirnya satelit seperti Landsat dan MODIS serta kerangka kerja *Local Climate Zone* (LCZ) menjadikan pengukuran dan penilaianannya semakin mencerminkan kondisi aktual. Meskipun demikian, tantangan terkait korelasi antara LST dari data satelit dan *zona kenyamanan termal* masih memerlukan penelitian lebih lanjut. Selain itu, ada keraguan tentang keakuratan indeks yang dikembangkan di iklim subtropis untuk diterapkan di wilayah tropis. Validasi model dengan pengukuran di

lapangan juga masih perlu dikembangkan, terutama di wilayah yang kekurangan data. Untuk menjamin kesenjangan tersebut, penelitian masa depan perlu mengintegrasikan faktor non-fisik seperti psikologi dan budaya serta memanfaatkan fusi data dan teknologi seperti *machine learning*, *digital twins*, dan *artificial realities* untuk mendukung perencanaan kota yang adaptif dan layak huni.

Kata kunci: LCZ; LST; Penginderaan jauh; Perkotaan tropis; UHI; Zona kenyamanan termal

Quantifying Thermal Comfort Zones in Tropical Urban Regions Using Remote Sensing Approach: A Bibliometric Literature Review

Abstract. The escalation of tropical urban development has exacerbated the Urban Heat Island (UHI) phenomenon, negatively impacting health, productivity, and energy consumption. This article presents a bibliometric literature review on the use of remote sensing to assess thermal comfort zones. The topic has evolved from physical temperature anomaly measurements to evaluations using thermal comfort indices. The availability of satellite data from platforms such as Landsat and MODIS, along with the Local Climate Zone (LCZ) framework, has made assessments increasingly reflective of actual conditions. Nevertheless, challenges remain regarding the correlation between satellite-derived LST and thermal comfort zones, which require further investigation. Additionally, concerns persist about the accuracy of indices developed in subtropical climates when applied to tropical regions. Field-based model validation also needs to be strengthened, particularly in data-scarce areas. To bridge these gaps, future research should incorporate non-physical factors such as psychological and cultural dimensions, and leverage data fusion and emerging technologies such as machine learning, digital twins, and artificial realities to support adaptive and livable urban planning.

Keywords: LCZ; LST; Remote sensing; Thermal comfort zone; Tropical urban regions; UHI

I. PENDAHULUAN

Pesatnya laju pengembangan perkotaan di zona iklim tropis telah menimbulkan berbagai tantangan lingkungan di dalam wilayahnya. Salah satu isunya adalah terjadinya perubahan iklim mikro yang kerap memunculkan fenomena *Urban Heat Island* (UHI). Fenomena ini ditandai oleh temperatur yang lebih hangat di area perkotaan dibandingkan dengan area-area di sekitarnya [1]. Perbedaan suhunya dapat mencapai 10°C [2], merupakan konsekuensi langsung dari aktivitas urbanisasi, termasuk akibat perubahan struktur permukaan alami menjadi bahan yang menyerap dan menahan lebih banyak panas seperti aspal dan beton [3].

Implikasi dari lingkungan termal berpengaruh pada peningkatan konsumsi energi untuk pendinginan, selain itu juga berimbas pada kesehatan, kesejahteraan, dan produktivitas populasi di perkotaan [4]. Kombinasi iklim di mana suhu lingkungan dan kelembapan udara yang tinggi akan menciptakan kondisi *stres* termal yang dapat merugikan penduduk kota [3]. Studi di wilayah kota-kota metropolitan telah menunjukkan bahwa suhu tinggi diperparah oleh faktor-faktor lain seperti kecepatan angin yang rendah. Akibatnya, interaksi antara kondisi cuaca dan iklim dengan makhluk hidup di wilayah perkotaan menjadi semakin kompleks [5]. Oleh karena itu, pemahaman yang komprehensif tentang zona kenyamanan termal (*Thermal Comfort Zone*, TCZ) sangat penting dikaji untuk mengembangkan strategi perencanaan dan desain kota yang berkelanjutan dan mempromosikan lingkungan yang berpusat pada aspek *biometeorologi* [4].

Secara historis, kajian mengenai iklim perkotaan umumnya terbatas pada pengamatan yang dilakukan melalui stasiun meteorologi [1]. Sementara itu, kuantifikasi kenyamanan termal dalam perkembangannya menggunakan pendekatan indeks biometeorologi dan metode yang paling umum digunakan adalah *physiological equivalent temperature* (PET) yang sangat sensitif terhadap suhu radiasi rata-rata [5], *universal thermal climate index* (UTCI) yang dikembangkan berdasarkan model fisiologis manusia [5], *discomfort Index* (DI) dan *humidex* merupakan indeks yang hanya mempertimbangkan suhu udara dan kelembapan relatif [6][7]. Meskipun metode-metode tersebut menghasilkan data yang berharga, keterbatasan dalam aspek spasial menyulitkan penilaian terhadap kondisi iklim di seluruh wilayah perkotaan. Hadirnya teknologi penginderaan jauh khususnya penginderaan jauh termal, mengubah cara pengamatan sebelumnya [1]. Penggunaan *platform* satelit membuat para peneliti mampu untuk mengamati dan menguantiifikasi pola termal perkotaan dari jarak jauh dengan cakupan area yang lebih luas. *Platform* tersebut telah menawarkan pendekatan baru secara komprehensif dalam hal pemantauan kondisi lingkungan termal perkotaan, dan memungkinkan analisis-analisis spatio-temporal yang sebelumnya tidak mungkin dilakukan [6]. Ketersediaan data satelit penginderaan jauh dengan

teknologinya yang terus berkembang saat ini telah membuka peluang bagi para peneliti untuk mempelajari lebih dalam terkait dinamika iklim perkotaan dan dampaknya [8].

Artikel ini merupakan sebuah tinjauan pustaka jenis bibliometrik yang meninjau kuantifikasi zona kenyamanan termal di area perkotaan tropis menggunakan pendekatan data penginderaan jauh. Tujuannya adalah untuk menyajikan tinjauan tingkat lanjut dalam mengidentifikasi tema-tema utama, juga secara kritis menganalisis tantangan, perbedaan pandangan, dan kesenjangan yang masih ada dalam pustaka. Penyusunan tinjauan pustaka ini menggunakan narasi yang terstruktur dan terukur guna menelusuri perkembangan topik kajian mulai dari konsep-konsep dasar hingga pendekatan kontemporer, harapannya dapat memvisualisasikan arah yang jelas bagi penelitian ilmiah di masa mendatang.

II. METODOLOGI

2.1 Data dan Tools

Preferensi tinjauan pustaka dalam artikel ini dihimpun seluruhnya menggunakan artikel bereputasi internasional dari basis data *scopus* dengan analisis bibliometrik. Basis data tersebut kami kumpulkan pada tanggal 25 Agustus 2025 menggunakan perangkat lunak *Publish or Perish* yang disediakan secara bebas terbuka oleh Harzing.com [9] dengan menggunakan kata kunci “*thermal comfort zone*; *remote sensing*” dan sebanyak 75 item bibliografi beserta judul, jumlah sitasi, penulis, dan tahun terbit diekspor dalam file *RIS/Refmanager* untuk analisis lebih lanjut di aplikasi VOSviewer version 1.6.20. VOSviewer adalah sebuah perangkat lunak yang berfungsi untuk membangun dan memvisualisasikan jaringan *bibliometric* [10]. Jaringan ini, misalnya, dapat mencakup jurnal, peneliti, atau publikasi individual, dan dapat disusun berdasarkan hubungan sitasi, *bibliographic coupling*, *co-citation*, atau *co-authorship*. VOSviewer juga menawarkan fungsionalitas penambangan *teks* yang dapat digunakan untuk membangun dan memvisualisasikan jaringan kemunculan bersama dari istilah-istilah penting yang diekstraksi dari sekumpulan pustaka ilmiah.

2.2 Analisis Tinjauan Pustaka Bibliometrik

Analisis tinjauan pustaka jenis bibliometrik adalah analisis yang kami gunakan untuk menggambarkan perkembangan topik TCZ yang dikuantifikasi dari data penginderaan jauh. Sedangkan untuk memvisualisasikan perkembangannya, kami menggunakan *network visualization*, *overlay visualization*, dan *density visualization* via VOSviewer. Metode ini merupakan algoritma normalisasi yang digunakan untuk menentukan seberapa kuat hubungan antar item (misalnya, kata kunci, penulis, negara) dalam sebuah jaringan bibliometrik. Cara kerja metodenya yaitu dengan membandingkan frekuensi kemunculan bersama (*co-occurrence*) dari dua item

dengan frekuensi kemunculan individu masing-masing item. Tujuannya adalah untuk mengukur kekuatan asosiasi yang tidak hanya bergantung pada frekuensi absolut [11] dengan formula sebagai berikut.

$$A_{ij} = \frac{C_{ij}}{W_i \cdot W_j} \quad (1)$$

di mana A_{ij} adalah kekuatan asosiasi antara item i dan j ; lalu C_{ij} adalah jumlah kemunculan bersama antara item i dan j ; kemudian W_i dan W_j masing-masing merupakan jumlah kemunculan item i dan j .

III. TINJAUAN PUSTAKA

3.1 Perkembangan Tema Penelitian

3.1.1 Pulau Panas Perkotaan dan Kenyamanan Termal

Konsep dasar dari ruang lingkup termal perkotaan terletak pada studi fenomena *urban heat island*. Penelitian awal oleh Lombardo tahun 1985 berfokus pada kuantifikasi suhu antara lingkungan perkotaan dan pedesaan menggunakan data satelit NOAA. Studi ini berhasil menunjukkan efek UHI yang signifikan dengan perbedaan suhu hingga 10°C [2]. Selanjutnya metodologis yang kritis diungkapkan oleh Roth, Oke, dan Emery tahun 1989. Meskipun kemajuan awal bidang ini terbatas pada deskripsi kualitatif dan korelasi dasar antara pola termal dan penggunaan lahan [1].

Transisi dari pengukuran UHI ke penilaian kenyamanan termal mewakili perkembangan yang krusial. Pengungkapan bahwa fenomena UHI tidak sepenuhnya mengungkap subjektifitas manusia terhadap panas dan ketidaknyamanan adalah yang mendorong pergeseran tersebut [2]. Asumsi lainnya, mengungkap bahwa tidak hanya suhu yang mempengaruhi ketidaknyamanan melainkan interaksi kompleks yang timbul dari faktor-faktor lingkungan juga menjadi penguat [12]. Perkembangan ini telah mentransformasi arah penelitian dari ilmu fisika menjadi bidang interdisipliner dengan mengintegrasikan faktor-faktor manusia. Pendekatan ini memungkinkan penilaian secara langsung dan dapat ditindaklanjuti kaitannya dengan dampak iklim perkotaan terhadap kesehatan dan kesejahteraan masyarakat [2].

3.1.2 Kehadiran Penginderaan Jauh sebagai Alat

Penelitian dengan topik lingkungan termal perkotaan awal tahun 2000-an dan sampai saat ini adalah hasil langsung dari meningkatnya ketersediaan data satelit dan teknologi penginderaan jauh yang semakin andal [13]. Tinjauan pada periode ini, seperti pustaka tahun 2003 oleh Voogt dan Oke mencatat potensi besar dari sensor yang ditingkatkan dengan resolusi spasial dan spektral yang

lebih tinggi [1]. Hadirnya *platform* satelit seperti Landsat dan MODIS dengan kemampuan akuisisi masing-masing menyediakan data-data untuk studi perkotaan yang lebih rinci [14].

Kekuatan satelit MODIS dengan resolusi temporalnya telah menjadi instrumen penting dalam menganalisis *trend Land Surface Temperature* (LST) dari waktu ke waktu, sementara resolusi spasial moderat Landsat lebih cocok untuk penilaian iklim mikro perkotaan [12]. Peningkatan aksesibilitas data tersebut, sering kali melalui *platform* seperti *Google Earth Engine* (GEE), mendemokratisasi penelitian dan memungkinkan studi perbandingan di berbagai lingkungan perkotaan [12]. Dampak dari kemajuan teknologi tersebut kian jelas di wilayah dengan infrastruktur berbasis pengamatan darat yang terbatas, seperti banyak kota di Afrika, di mana penginderaan jauh telah menjadi metode dominan untuk analisis UHI [8]. Meskipun hubungan antara urbanisasi dan kenyamanan termal masih terfragmentasi, akses data penginderaan jauh telah memungkinkan perkembangan riset secara global dan berkontribusi pada pemahaman yang lebih lengkap.

TABEL 1. RINGKASAN STUDI FUNDAMENTAL DAN TERKEMUKA

Penulis	Tahun	Kontribusi utama	Teknologi
Lombardo	1985	Kuantifikasi perintis UHI di São Paulo, Brasil, dengan perbedaan suhu 10°C .	Data satelit NOAA
Roth et al.	1989	Metodologis kunci untuk penginderaan jauh termal perkotaan.	Tinjauan konseptual
Rao	1972	Studi berbasis satelit awal yang menilai pola termal perkotaan.	Sensor satelit
Voogt & Oke	2003	Tinjauan komprehensif tentang keadaan penginderaan jauh termal untuk iklim perkotaan, mengidentifikasi kemajuan dan prospek perkembangan penelitian di masa depan.	Tinjauan konseptual
Dousset	1989, 1991	Menggabungkan penginderaan jauh dan berbasis pengamatan darat untuk mempelajari hubungan suhu permukaan.	Penginderaan jauh, pengamatan darat

3.2 Kemajuan Metodologis dalam Kuantifikasi

3.2.1 Indeks Biometeorologi Utama

Kuantifikasi kenyamanan termal manusia memerlukan pendekatan yang melampaui sekadar pengukuran suhu udara, dengan menggunakan indeks-indeks kompleks yang menggabungkan berbagai variabel lingkungan dan karakteristik individu. Pustaka ilmiah menunjukkan beragam indeks biometeorologi, masing-masing dengan keunggulan dan keterbatasannya. Indeks yang paling umum digunakan adalah PET dan UTCI [5]. Selain itu, indeks yang lebih sederhana seperti DI dan *Humidex* juga banyak diterapkan dalam studi di kota-kota tropis [6].

Sementara itu, pemilihan antara metode penilaian termal kondisi stabil dan dinamis merupakan pertimbangan krusial. Model stabil seperti *Predicted Mean Vote* (PMV) dan PET menghasilkan data kuantitatif yang mudah ditafsirkan, namun kurang mencerminkan respons adaptif manusia [15], terutama di iklim tropis di mana faktor fisiologis dan psikologis sangat berpengaruh [13]. Oleh karena itu, pemilihan indeks secara tepat menentukan relevansi hasil dan aplikasinya terhadap populasi lokal.

TABEL 2. PERBANDINGAN INDEKS BIOMETEOROLOGI UTAMA

Nama indeks	Variabel yang dibutuhkan	Penerapan/keterbatasan utama
PET	Suhu udara, radiasi rata-rata, tekanan uap, kecepatan udara, pakaian, tingkat aktivitas	digunakan untuk kenyamanan termal luar ruangan. Sensitif terhadap radiasi rata-rata.
UTCI	Suhu udara, kelembaban, kecepatan angin, radiasi	Terstandarisasi, tetapi tidak signifikan untuk kenyamanan termal bagi populasi yang beradaptasi di iklim tropis.
DI	Suhu udara, kelembaban relatif (melalui suhu titik embun)	Sederhana, banyak digunakan, terutama dalam studi historis kota-kota tropis. Tidak memperhitungkan angin atau radiasi.
Humidex	Suhu udara, kelembaban relatif (melalui suhu titik embun)	Sederhana, digunakan di iklim tropis/lembap seperti Semarang dan Jakarta. Tidak memperhitungkan angin atau radiasi.
PMV	Suhu udara, radiasi rata-rata, kelembaban relatif, kecepatan udara, tingkat metabolisme, insulasi pakaian	Awalnya untuk kenyamanan dalam ruangan. Akurasi prediksi rendah untuk pengaturan luar ruangan.

3.2.2 Sumber Data dan Platform

Kuantifikasi zona kenyamanan termal sangat bergantung pada ketersediaan dan karakteristik data satelit. *Platform* Landsat dan MODIS adalah tema yang sering muncul dalam pustaka. Landsat dengan resolusi spasialnya sangat berharga untuk menyediakan data terperinci, resolusi mediumnya cocok untuk analisis iklim mikro perkotaan [16]. Namun resolusi temporalnya masih menjadi kendala [17]. Sebaliknya, MODIS memberikan resolusi temporal yang lebih tinggi, cocok untuk menganalisis *trend* jangka panjang, tetapi lemah dalam resolusi spasialnya [14].

Pertukaran antara resolusi spasial dan temporal ini adalah tantangan mendasar di bidang ini. Satu satelit tidak dapat menyediakan baik detail spasial yang dibutuhkan untuk perencanaan kota di tingkat detail maupun kesinambungan temporal yang diperlukan untuk menangkap suhu harian dan musiman [17]. Oleh karena itu, arahan bagi riset-riset selanjutnya adalah melalui fusi data yaitu integrasi data dari beberapa sensor dengan karakteristik spasial dan temporal yang berbeda. Dengan menggabungkan kekuatan berbagai *platform* para peneliti dapat menciptakan peta termal yang lebih lengkap dan berkelanjutan dari lingkungan perkotaan. Pendekatan multisumber ini menjadi penting untuk mengatasi keterbatasan yang melekat dalam penggunaan *platform* penginderaan jauh tunggal.

TABEL 3. KEKUATAN DAN KELEMAHAN METODOLOGIS PLATFORM SATELIT

Platform satelit	Resolusi spasial	Resolusi temporal	Kasus penggunaan utama untuk kenyamanan termal perkotaan
Landsat (5, 8, 9)	30 m (pita Termal 100 m)	siklus 16 hari	Studi iklim mikro perkotaan terperinci, pemetaan LULC, dan klasifikasi LCZ.
MODIS	250 m, 500 m, 1 km	Harian, gabungan 8 hari	Analisis tren LST jangka panjang dan berskala besar.

3.2.3 Kerangka Kerja Local Climate Zone (LCZ)

Kerangka kerja LCZ telah muncul sebagai sistem yang terstandarisasi secara global untuk studi iklim perkotaan [16]. Kerangka ini menyempurnakan model klasifikasi *Land Use and Land Cover* (LULC) konvensional. LCZ mempartisi suatu area menjadi wilayah yang homogen berdasarkan sifat fisik seperti morfologi perkotaan, material yang digunakan, dan tutupan lahan [18]. Pendekatan terstandarisasi ini menghilangkan

subjektifitas yang terkait dengan skema LULC, memungkinkan analisis yang dapat dibandingkan secara global dan mendalam tentang bagaimana bentuk perkotaan memengaruhi lingkungan termal [17].

Kerangka kerja LCZ berfungsi sebagai jembatan kritis antara data penginderaan jauh dan wawasan perencanaan kota yang dapat ditindaklanjuti. Selain itu, memungkinkan para peneliti untuk membangun korelasi langsung antara bentuk perkotaan tertentu misalnya, bangunan tinggi yang padat, bangunan rendah yang terbuka dan kinerja termalnya [19]. Korelasi tersebut adalah kemajuan yang signifikan dibandingkan dengan korelasi LST dan LULC sederhana. Oleh karena itu, kerangka kerja LCZ memberi pemahaman mendalam dan terperinci bagi para perencana kota mengenai bagaimana merancang kota seperti desain ketinggian dan kepadatan bangunan yang turut memengaruhi suhu lingkungan [16]. Penggunaan LCZ menyediakan basis terstruktur dan didorong oleh data untuk merancang ruang perkotaan yang lebih tangguh terhadap iklim dan nyaman [5].

3.3 Studi Kunci, Temuan, dan Wawasan Regional

3.3.1 Efek Mitigasi Ruang Terbuka Hijau Perkotaan

Sebuah temuan yang konsisten di seluruh pustaka adalah efek pendinginan yang signifikan dari Ruang Terbuka Hijau (RTH) perkotaan. Penelitian di berbagai area perkotaan telah mendokumentasikan korelasi negatif yang kuat antara *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) dan LST [13]. Hubungan ini dikuantifikasi dalam sebuah studi di Colombo, Sri Lanka, yang menemukan bahwa PET rata-rata 5.61°C lebih rendah di bawah kanopi pohon dibandingkan dengan area yang terbuka [4].

Efek pendinginan yang diberikan oleh RTH tidak semata-mata bergantung pada fungsi peneduhan, melainkan juga dipengaruhi oleh berbagai faktor iklim mikro yang kompleks. Salah satu contohnya adalah *Sky View Factor* (SVF), yaitu ukuran proporsi langit yang terlihat dari suatu titik di permukaan tanah, atau rasio area langit yang terlihat dari suatu titik di ruang angkasa terhadap total area langit yang seharusnya terlihat, yang telah terbukti menjadi indikator signifikan dalam menentukan tingkat kenyamanan termal [3]. Rasio ini adalah parameter geometris yang penting dalam perencanaan kota dan penelitian iklim perkotaan karena memengaruhi keseimbangan radiasi permukaan, suhu udara, kenyamanan termal, dan kualitas udara di lingkungan perkotaan. Oleh karena itu, penempatan pohon dan ruang hijau yang strategis sangat penting. Dengan memahami interaksi iklim mikro ini, perencanaan kota dapat menggunakan penginderaan jauh untuk memandu penempatan RTH yang strategis untuk memaksimalkan efek pendinginannya dan meningkatkan zona kenyamanan termal [7].

3.3.2 Pengaruh Morfologi Perkotaan

Morfologi perkotaan dan material penutup lanskap perkotaan memainkan peranan penting dalam membentuk lingkungan termal dalam wilayahnya. Studi secara konsisten mengungkap bahwa material berbahan beton, aspal, dan *paving block* yang umumnya menutupi lanskap kota memiliki kapasitas serapan termal yang tinggi dan meningkatkan LST [14]. Sebuah studi di Semarang menemukan korelasi yang kuat yakni $R^2 = 0.87$ antara peningkatan cakupan bangunan dan nilai *Humidex* yang lebih tinggi, dan menjadi sebuah ukuran ketidaknyamanan termal [7].

Namun pustaka lainnya menyoroti hubungan antara bentuk perkotaan dan suhu lingkungan bersifat kompleks dan tidak selalu bersifat *linier*. Misalnya, sebuah studi di Mashhad, Iran, mengungkap bahwa zona bangunan menengah yang padat lebih dingin daripada area bangunan rendah yang ringan [16]. Demikian pula, penelitian di kota-kota padat di Tiongkok, seperti Hong Kong dan Guangzhou, menemukan bahwa meskipun zona dengan bangunan tinggi dan padat mengalami peningkatan suhu pada malam hari, kinerja termalnya dipengaruhi oleh faktor-faktor lokal seperti angin laut. Oleh karena itu, zona tersebut tidak selalu memiliki LST tertinggi pada siang hari [18]. Temuan-temuan tersebut menantang asumsi sederhana bahwa semua area dengan kepadatan bangunan tinggi secara konsisten lebih panas, serta menekankan pentingnya analisis yang lebih mendalam melalui penginderaan jauh dan pemetaan LCZ untuk memahami bagaimana geometri perkotaan tertentu mempengaruhi suhu.

3.3.3 Studi Kasus Regional

Penelitian di wilayah tropis memberikan bukti empiris yang kuat mengenai fenomena *urban heat island* dan dampaknya terhadap kenyamanan termal. Kajian fundamental oleh Lombardo (1985) memanfaatkan data satelit NOAA untuk mendokumentasikan UHI mencatat perbedaan suhu mencapai 10°C [3]. Di kawasan Asia Tenggara, studi yang dilakukan di Jakarta, Semarang, dan Penang juga menggunakan teknik penginderaan jauh untuk mengorelasikan fenomena UHI dengan intensitas pembangunan perkotaan [20]. Salah satu studi di Semarang menunjukkan bahwa peningkatan cakupan bangunan memiliki korelasi positif sangat kuat terhadap ketidaknyamanan termal yang diukur menggunakan indeks *Humidex* [7].

Penelitian di wilayah Afrika, khususnya di Addis Ababa, menekankan pentingnya pemanfaatan teknologi penginderaan jauh dalam konteks keterbatasan jumlah stasiun cuaca berbasis pengamatan darat [8]. Studi-studi tersebut telah berhasil mendokumentasikan transformasi kawasan perkotaan dari yang semula merupakan kota dalam hutan menjadi wilayah yang mengalami fenomena

urban heat island, serta menunjukkan bagaimana proses urbanisasi dapat secara signifikan mengubah iklim lokal [21]. Studi kasus regional ini mengilustrasikan bahwa meskipun fenomena UHI bersifat global, karakteristik spesifiknya dan strategi mitigasi yang paling efektif sangat bergantung pada iklim lokal, morfologi perkotaan, dan faktor-faktor sosial ekonomi.

TABEL 4. RINGKASAN TEMATIS TEMUAN PENELITIAN DARI STUDI KASUS TROPIS

Referensi	Kota	Indeks/ metode	Temuan kunci
Lombardo (1985) [2]	São Paulo Brasil	Data satelit NOAA untuk pemetaan UHI	Menemukan perbedaan suhu hingga 10°C antara area perkotaan dan pedesaan.
Su & Antoni [5]	Taipei Taiwan	PET	Kepadatan perkotaan memengaruhi kenyamanan termal, kecepatan angin yang rendah berkontribusi pada ketidaknyamanan yang tinggi.
Stathopoulou et al. (2004) [22]	Athena Yunani	DI dari AVHRR	Menunjukkan korelasi yang kuat antara suhu permukaan yang berasal dari satelit dan suhu udara yang diukur di lapangan.
Wati & Nasution (2018) [6]	Jakarta Indonesia	Humidex dari data stasiun meteorologi	Menemukan kenaikan indeks ketidaknyamanan dari 1985-2012, dengan peningkatan yang lebih kuat di area perkotaan.
Faridatussafura & Yulfiah [7]	Semarang Indonesia	Humidex dari citra Landsat 8	Korelasi kuat antara cakupan bangunan dan peningkatan ketidaknyamanan, korelasi negatif yang kuat dengan ruang terbuka hijau.
Abebe & Megento [21]	Addis Ababa Ethiopia	GIS, penginderaan jauh untuk klasifikasi LULC	Transformasi dari <i>forest cities</i> menjadi UHI karena urbanisasi yang pesat.

3.4 Pandangan yang Bertentangan dan Perdebatan yang Sedang Berlangsung

3.4.1 Kontradiksi antara LST dan PET

Perdebatan utama dalam bidang ini berkaitan dengan hubungan antara LST yang diperoleh dari citra satelit dan indeks PET yang digunakan dalam meneliti kenyamanan termal di tingkat pejalan kaki. Meskipun LST merupakan data termal yang paling mudah diakses, berbagai studi menunjukkan korelasi keduanya berkorelasi lemah. Bahkan, LST hanya mampu menjelaskan kurang dari 2% variasi dalam nilai PET [23]. Ketidaksesuaian ini terjadi karena LST mengukur suhu permukaan, sementara kenyamanan termal manusia merupakan persepsi kompleks yang dipengaruhi oleh suhu udara, kelembaban, kecepatan angin, dan radiasi rata-rata yakni variabel-variabel yang tidak dapat diukur langsung oleh satelit.

Kontradiksi antara *land surface temperature* dan *physiological equivalent temperature* merupakan tantangan konseptual yang mendorong pengembangan model multivariat yang lebih akurat. Ketidaksesuaian ini membantalkan penggunaan LST sebagai proksi sederhana untuk ketidaknyamanan termal manusia, dan menuntut integrasi data tambahan seperti *local climate zones*, energi surya, serta tutupan kanopi untuk meningkatkan akurasi prediktif [23]. Perdebatan ini turut mendorong inovasi metodologis dan mengarahkan bidang studi menuju pendekatan yang lebih holistik, yang mengakui kompleksitas iklim mikro perkotaan dan respon biometeorologis manusia.

3.4.2 Penerapan Indeks Global dalam Konteks Lokal

Perdebatan penting lainnya menyangkut penerapan universal indeks kenyamanan termal. Banyak indeks populer, seperti PMV dan UTCI, dikembangkan berdasarkan data dari populasi di iklim Eropa dan Amerika, sehingga mungkin kurang akurat untuk wilayah tropis [12]. Studi di Bangkok misalnya, menunjukkan bahwa penduduk lokal merasa nyaman pada suhu udara yang lebih tinggi dibandingkan standar internasional, mencerminkan aklimatisasi fisiologis dan psikologis terhadap lingkungan setempat [12].

Konflik tersebut menyoroti sifat dinamis kenyamanan termal manusia, yang dipengaruhi oleh riwayat termal, jenis pakaian, dan tingkat metabolisme. Hal ini mengungkap keterbatasan pendekatan dengan kondisi stabil (*steady-state*) yang mengasumsikan respon pasif terhadap lingkungan termal [15]. Tantangan tersebut mendorong pengembangan standar termal lokal yang disesuaikan dengan kondisi regional [24], serta menekankan perlunya pendekatan yang lebih holistik dengan mempertimbangkan strategi adaptif dan perilaku manusia.

3.4.3 Tantangan Validasi Model

Validasi model kenyamanan termal berbasis penginderaan jauh merupakan tantangan yang telah banyak didokumentasikan. Sejumlah studi menyatakan bahwa ketergantungan pada data satelit tanpa dukungan pengukuran *in-situ* yang memadai akan membatasi akurasi analisis [17]. Proses validasi ini memerlukan pendekatan bertahap untuk membandingkan data satelit dengan pengukuran langsung di lapangan guna memastikan keandalan model.

Kesulitan dalam validasi model kenyamanan termal berbasis penginderaan jauh menjadi hambatan mendasar dalam bidang ini. Meskipun penginderaan jauh menawarkan cakupan spasial yang luas, pengukuran *in-situ* diperlukan untuk memastikan kepresisian, terutama pada parameter seperti suhu udara dan kecepatan angin [15]. Tantangan ini semakin kompleks di kota-kota tropis yang sedang berkembang, di mana keterbatasan jaringan stasiun cuaca berbasis pengamatan darat menghambat proses validasi [8]. Tanpa prosedur validasi yang ketat dan terstandarisasi, keandalan model tidak dapat dinilai secara menyeluruh, sehingga berisiko menghasilkan penyimpangan dari kondisi nyata.

3.5 Kesenjangan dalam Pustaka dan Arah Riset

3.5.1 Di Luar Aspek Fisik: Peran Faktor Psikologis dan Sosial yang Kurang Diteliti

Kesenjangan utama dalam pustaka saat ini adalah dominasi pendekatan fisik terhadap kenyamanan termal, sementara pengaruh psikologis, budaya, sosial, dan genetik sering diabaikan [12]. Meskipun penelitian menunjukkan bahwa pola pikir, norma budaya, dan riwayat termal memengaruhi persepsi individu terhadap kenyamanan, variabel-variabel ini jarang diintegrasikan ke dalam model berskala besar berbasis penginderaan jauh.

Untuk menghasilkan model kenyamanan termal yang berpusat pada manusia, pendekatan dalam bidang ini perlu beralih dari ketergantungan penuh pada data penginderaan jauh menjadi bagian dari kerangka kerja interdisipliner yang lebih luas. Hal ini memerlukan integrasi antara data fisik berskala makro dari satelit dan data subjektif berskala mikro yang diperoleh melalui survei lapangan atau perangkat pemantauan individu. Penggabungan dimensi non-fisik ini penting untuk membentuk representasi kenyamanan termal yang lebih akurat dan komprehensif, dengan mempertimbangkan interaksi kompleks antara lingkungan dan pengalaman manusia.

3.5.2 Penyempurnaan Metodologi: Mengatasi Resolusi Temporal, Spasial, dan Fusi Data

Keterbatasan sensor tunggal dalam penginderaan jauh menjadi tantangan signifikan bagi bidang ini. Ketergantungan pada waktu lintasan satelit menghasilkan

data yang bersifat sesaat, sehingga tidak mencerminkan variasi suhu sepanjang hari [17]. Selain itu, meskipun efektif untuk analisis skala makro, penginderaan jauh kurang dapat menangkap variabel skala mikro seperti suhu udara dan kecepatan angin [5].

Solusi terhadap keterbatasan data penginderaan jauh terletak pada peningkatan metodologi dan integrasi multisumber. Penelitian mendatang perlu menggabungkan resolusi temporal dari *platform* seperti MODIS dengan resolusi spasial dari Landsat [14]. Selain itu, pengembangan model untuk merekonstruksi data yang hilang diperlukan guna menghasilkan pemetaan termal yang berkelanjutan dan beresolusi tinggi. Pendekatan fusi data ini penting untuk mengatasi keterbatasan saat ini dan memungkinkan representasi iklim mikro perkotaan yang lebih akurat.

3.5.3 Potensi Teknologi yang Muncul

Integrasi teknologi baru membuka peluang signifikan bagi pengembangan model kenyamanan termal [12]. Algoritma *machine learning* seperti *artificial neural networks* dan *random forests* telah digunakan untuk meningkatkan akurasi prediktif, terutama dalam memproses data multivariat dari penginderaan jauh dan mengidentifikasi hubungan kompleks yang tidak terdeteksi oleh metode statistik konvensional.

Perkembangan transformatif dalam perencanaan kota ditunjukkan oleh potensi digital twins dan *artificial realities*. Digital twins merupakan replika virtual dari kota nyata yang memungkinkan simulasi proses perkotaan [12]. Ketika dikombinasikan dengan virtual reality, model ini dapat merepresentasikan sensasi termal ruang kota, sehingga memungkinkan integrasi faktor fisik dan psikologis secara lebih mendalam. Pendekatan ini membuka peluang bagi perencanaan kota yang prediktif dan berpusat pada pengguna, memungkinkan pengujian berbagai skenario desain terhadap kenyamanan termal sebelum diterapkan, guna mendukung pembangunan kota yang tangguh terhadap iklim dan berkelanjutan.

IV. PEMBAHASAN

4.1 Klaster Perkembangan Topik Penelitian TCZ

Data pada tabel 5 menunjukkan klaster kata kunci atau label yang sering muncul bersama dalam penelitian mengenai TCZ yang menggunakan metode penginderaan jauh. Setiap klaster merepresentasikan fokus penelitian yang berbeda namun saling melengkapi. Klaster 1 memiliki frekuensi tertinggi dengan 7 entri, menunjukkan bahwa *assessment*, *GIS*, *impact*, *remote sensing*, dan *urban thermal comfort zone* adalah elemen kunci yang mengindikasikan bahwa penelitian sangat berfokus pada pemetaan kondisi TCZ menggunakan data penginderaan jauh. Sedangkan integrasi *GIS* sangat penting untuk

analisis spasial dan pemodelan dampak lingkungan terhadap TCZ. Menuju klaster 2 dengan 6 entri menyoroti hubungan antara efek, LCZ, data penginderaan jauh, lingkungan termal, dan zona fungsional perkotaan yang menitikberatkan pada efek pendinginan atau pemanasan. Lalu, penggunaan LCZ sebagai kerangka klasifikasi untuk membedakan karakteristik termal di berbagai area fungsional perkotaan menjadi sangat relevan.

TABEL 5. KLASTER DAN LABEL KUANTIFIKASI TERKAIT TCZ DARI PENGINDERAAN JAUH

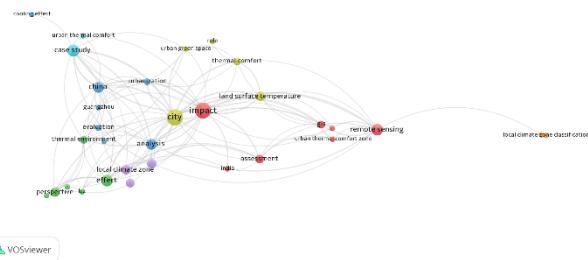
Klaster	Jumlah	Label
1	7	Assesment, GIS, Impact, Remote sensing, Urban thermal comfort zone
2	6	Effect, LCZ, Remote sensing data, Thermal environment, Urban functional zone
3	6	Analysis, Evaluation, Urban thermal environment, Urbanization
4	5	City, Land surface temperature, Thermal comfort, Urban green space,
5	3	Application, Local climate zone, Urban heat island
6	3	Case study, Cooling effect, Urban thermal comfort
7	2	Local climate zone classification, Nighttime light data

Klaster 3 juga memiliki 6 entri yang berpusat pada analisis, evaluasi, lingkungan termal perkotaan, dan urbanisasi, hasil ini mencerminkan upaya untuk menganalisis dan mengevaluasi perubahan lingkungan termal yang diakibatkan oleh proses urbanisasi, perubahan tata guna lahan, area hijau, dan area terbangun yang menjadi objek evaluasi utama. Kemudian klaster 4 dengan 5 entri menyoroti peran perkotaan, LST, *thermal comfort* dan RTH. Secara spesifik pengelompokan ini menekankan hubungan antara keberadaan RTH dan dampaknya terhadap LST. Sedangkan untuk klaster 5 sampai dengan 7 menyoroti tentang *cooling effect* dan terpusat pada label UHI dan LCZ. Sedangkan LST adalah salah satu parameter fisik yang paling sering diukur dengan penginderaan jauh untuk menguantifikasi kenyamanan termal.

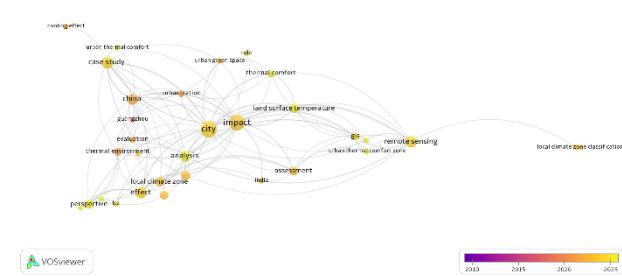
Penginderaan jauh memainkan peran vital dalam semua klaster, terutama dalam menyediakan data untuk kuantifikasi TCZ. Pengukuran spasio-temporal melalui satelit seperti Landsat atau MODIS memungkinkan pengukuran LST secara luas dan berulang. Data ini esensial untuk memetakan distribusi spasial suhu dan memantau perubahan musiman atau tahunan. Teknologi ini juga memungkinkan untuk mendalamai karakteristik lanskap perkotaan. Indeks seperti NDVI dari data satelit dapat mengukur kepadatan vegetasi, yang secara langsung berkorelasi dengan efek pendinginan dan *thermal comfort*. Selanjutnya, ada integrasi data multi-sensor yang

mencakup klasifikasi LCZ dan data *nighttime light* yang dapat digunakan untuk memetakan tingkat urbanisasi dan aktivitas ekonomi, dan kerap berkorelasi dengan area yang mengalami UHI.

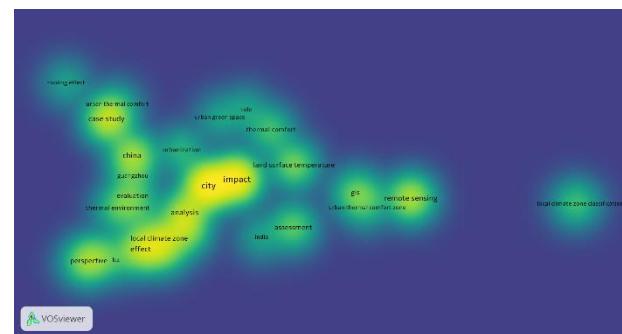
4.2 Visualisasi Perkembangan Penelitian TCZ



Gambar 1. Network visualization



Gambar 2. Overlay visualization



Gambar 3. Density visualization

Analisis simpul utama dan tema TCZ tergambar jelas melalui *network visualization* pada Gambar 1. Visualisasi ini secara jelas mengelompokkan kata kunci menjadi beberapa klaster utama, dan merefleksikan fokus penelitian yang berbeda namun saling terhubung. Ukuran

setiap simpul menunjukkan frekuensi kata kunci tersebut, sementara garis yang menghubungkannya menunjukkan tingkat kemunculan bersama. Metodologi dan parameter disimpulkan merah berpusat pada kata kunci *remote sensing*, *GIS*, *impact*, dan *urban thermal comfort zone*. Ini adalah klaster yang paling sentral dan besar, menunjukkan bahwa metodologi adalah inti dari penelitian ini. Kata kunci *remote sensing* dan *GIS* berperan sebagai konsep berpikir sekaligus alat utama untuk mengukur dan memetakan fenomena lingkungan termal perkotaan, sementara *impact* yang besar menandakan bahwa sebagian besar penelitian bertujuan untuk menganalisis dampak dari fenomena yang terjadi di perkotaan. Kehadiran *urban thermal comfort zone* di klaster ini menunjukkan bahwa tujuan akhir dari analisis dampak adalah untuk mengevaluasi kenyamanan termal perkotaan.

Simpul kuning fokus pada konteks kewilayahan dan dampaknya, menyoroti kata kunci *city*, *LST*, dan *urbanization*. Ukuran simpul *city* yang besar menandakan bahwa sebagian besar penelitian terfokus pada termal di area perkotaan yang memiliki tingkat permasalahan lingkungan yang kompleks. *LST* muncul sebagai parameter fisik yang diukur secara langsung dari citra satelit untuk melihat sejauh mana distribusi panas yang terjadi. Simpul kuning ini secara fundamental membahas bagaimana proses urbanisasi dan karakteristik wilayah perkotaan mempengaruhi kondisi TCZ dan lingkungan sekitarnya juga merepresentasikan masalah atau fenomena yang ingin dijawab oleh peneliti.

Simpul biru menitikberatkan pada analisis dan fenomena termal, kata kunci seperti *analysis*, *evaluation*, dan *thermal environment* mencerminkan langkah-langkah analitis yang dilakukan dalam penelitian. Setelah data diperoleh melalui metode pada simpul merah, langkah selanjutnya adalah menganalisis dan mengevaluasi lingkungan termal untuk detail TCZ. Simpul hijau adalah konsep dan klasifikasi mencakup *LCZ*, *effect*, dan *perspective*. Kerangka konseptual jelas pada simpul ini, seperti konsep *LCZ* yang digunakan untuk mengklasifikasikan area perkotaan berdasarkan karakteristik fisik dan tata guna lahan. Hal ini memungkinkan perbandingan ilmiah yang lebih terstruktur dan spesifik antar berbagai jenis area. Simpul abu-abu mensimpulkan studi kasus geografis dan ini relatif terpisah serta sudah spesifik menyebutkan wilayah kajian. Secara keseluruhan, *network visualization* menggambarkan lanskap penelitian yang berpusat pada penggunaan metodologi penginderaan jauh dan *GIS* dalam menganalisis dan mengevaluasi dampak urbanisasi terhadap lingkungan termal perkotaan. Studi kasus dari berbagai wilayah di Asia menjadi *trend* yang dominan, mencerminkan relevansi topik ini dalam konteks pertumbuhan kota yang pesat.

Secara temporal dari topik-topik penelitian terkait TCZ terskala dalam *overlay visualization* pada Gambar 2. Topik awal sekitar 2010-2015 untuk kata kunci seperti *remote sensing*, *GIS*, dan *urban thermal comfort zone* sebagian besar berwarna biru hingga ungu. Visualisasi tersebut menunjukkan bahwa awal periode tahun 2010-an penelitian berfokus pada dasar-dasar metodologis. Kerangka kerja dengan menggunakan data penginderaan jauh dibangun guna mengidentifikasi dan memetakan TCZ. Transisi dan pengembangan riset terkait topik baru masif di tahun 2015-2020 yang ditandai dengan warna kuning hingga jingga. Pergeseran dalam rentang tersebut fokus dari sekadar metodologi ke analisis dampak dan aplikasinya. Sedangkan penelitian saat ini sudah mulai menjawab pertanyaan yang lebih kompleks seperti bagaimana urbanisasi mempengaruhi *LST* dan lingkungan termal secara keseluruhan? Hal ini menunjukkan masa di mana penelitian beralih dari "bagaimana kita mengukur?" menjadi "apa yang kita temukan dari pengukuran itu?". Topik terkini dan *trend* masa depan di antaranya adalah *LCZ* dengan pendekatan analisis makro dan mikro untuk pendetailan TCZ, *urban green space*, dan *cooling effect* yang memfokuskan pada solusi mitigasi dan adaptasi. *Overlay visualization* juga menjelaskan bahwa penelitian mengenai TCZ yang dikuantifikasi melalui data penginderaan jauh telah berkembang secara signifikan dalam kurun waktu 15 tahun terakhir. *Trend* yang terbentuk mencerminkan kematangan bidang ilmu, di mana pertanyaan penelitian beralih dari masalah mendasar ke solusi praktis.

Sedangkan Gambar 3 menunjukkan *density visualization* yang berkaitan dengan *urban thermal environment*. Area yang berwarna kuning hingga hijau terang merepresentasikan kepadatan atau frekuensi kemunculan kata kunci yang sangat tinggi, sementara area berwarna biru gelap menunjukkan kepadatan yang rendah. Kepadatan sangat tinggi adalah pada dampak yang dikaji melalui pengukuran *LST*. Penelitian ini sangat terkonsentrasi pada penggunaan data penginderaan jauh untuk menganalisis dampak urbanisasi terhadap suhu di perkotaan secara spasio-temporal.

V. KESIMPULAN

Tinjauan pustaka bibliometrik menunjukkan bahwa kuantifikasi kenyamanan termal di area perkotaan tropis menggunakan penginderaan jauh telah mengalami perkembangan menjadi bidang yang matang dan canggih. Perjalanan dari pemetaan UHI awal ke penerapan bernuansa indeks biometeorologi dan kerangka kerja *LCZ* mencerminkan kematangan metodologi dan konsep dasar. Penginderaan jauh telah terbukti menjadi alat yang sangat diperlukan, memungkinkan analisis spasio-temporal yang komprehensif yang tidak mungkin dilakukan dengan

metode konvensional berbasis pengamatan darat, terutama di wilayah yang datanya terbatas.

Hasil analisis bibliometrik juga mengungkapkan bahwa signifikansi tantangan intelektual dan kesenjangan kritis masih ada. Korelasi yang tidak cukup kuat antara LST dan *thermal comfort* menggarisbawahi kebutuhan akan model yang lebih kompleks dan multivarian. Validasi indeks global untuk populasi di wilayah tropis menyoroti perlunya memasukkan adaptasi fisiologis dan psikologis manusia ke dalam model. Selanjutnya, hambatan terkait validasi model karena kurangnya pengukuran di lapangan tetap menjadi sorotan hingga kini.

Di masa depan, penelitian terkait lingkungan termal perkotaan terletak pada pendekatan holistik dan interdisipliner. Rekomendasi yang juga muncul yaitu pada proses fusi data penginderaan jauh multisensor, komputasi model, dan integrasi faktor-faktor non-fisik yang mempengaruhi kenyamanan termal. Penggunaan *machine learning*, *digital twins*, dan teknologi lain yang muncul memegang kunci untuk mentransisikan bidang ini dari ilmu deskriptif menjadi ilmu prediktif dan instruksional yang mampu menghasilkan strategi dan kebijakan yang dapat ditindaklanjuti dan didorong oleh data untuk menciptakan kota-kota yang lebih sehat, adaptif dan lebih layak huni. Asu

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis berterima kasih kepada Pusat Pembiayaan dan Asesmen Pendidikan Tinggi (PPAPT) Kementerian Pendidikan Tinggi, Sains, dan Teknologi sebagai penyelenggara Beasiswa Program Doktor untuk Dosen Indonesia (PDDI) tahun 2025.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. A. Voogt and T. R. Oke, "Thermal remote sensing of urban climates," *Remote Sens. Environ.*, vol. 86, no. 3, pp. 370–384, 2003, doi: 10.1016/S0034-4257(03)00079-8.
- [2] M. A. Lombardo, "Ilha de Calor nas Metrópoles: O exemplo de São Paulo," São Paulo, 1985, p. 244.
- [3] R. L. Costa, G. M. M. Baptista, and F. D. S. Silva, "Use of remote sensing in the identification of Urban Heat Islands and in the evaluation of Human Thermal Comfort," *J. Hyperspectral Remote Sens.*, v, vol. 7, no. 7, pp. 408–422, 2017, [Online]. Available: www.periodicos.ufpe.br/revistas/jhrs
- [4] V. M. Jayasooriya, A. P. Sirimanne, R. M. Silva, and S. Muthukumaran, "Role of Urban Trees in Enhancing the Thermal Comfort of Rapidly Urbanizing Cities: An Analysis of Tropical Asian Tree Species Based on Physiological Equivalent Temperature (PET)," *Arboric. Urban For.*, vol. 50, no. 5, pp. 326–345, 2024, doi: 10.48044/jauf.2024.014.
- [5] Y. M. Su and J. Antoni, "Outdoor Thermal Comfort Study on Urban Areas with Various Densities in Taipei †," *Eng. Proc.*, vol. 38, no. 1, 2023, doi: 10.3390/engproc2023038077.
- [6] T. Wati and R. I. Nasution, "Analysis of Climatological Thermal Comfort in Dki Jakarta Using Heat Index (Humidex)," *Widyariset*, vol. 4, no. 1, p. 89, 2018, doi: 10.14203/widyariset.4.1.2018.89-102.
- [7] N. Faridatussafura and Y. Yulfiah, "Analysis of the Relationship between Thermal Comfort Levels and Green Open Space in Semarang City, Using the Humidex Method," *J. Earth Mar. Technol.*, vol. 5, no. 1, pp. 91–100, 2025, doi: 10.31284/j.jemt.2024.v5i1.7005.
- [8] R. R. Gyimah, "The hot zones are cities: Methodological outcomes and synthesis of surface urban heat island effect in Africa," *Cogent Soc. Sci.*, vol. 9, no. 1, 2023, doi: 10.1080/23311886.2023.2165651.
- [9] A. W. Harzing, *Book review - The publish or perish book: Your guide to effective and responsible citation analysis*, vol. 13, no. 3. 2012. doi: 10.19173/irrodl.v13i3.1273.
- [10] N. Van Eck and L. Waltman, "Bibliometric Mapping of the Computational Intelligence Field ERIM Report Series reference number," *Int. J. Uncertain.*, vol. 15, no. 5, pp. 1–24, 2008, [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/1765/11811>
- [11] N. J. van Eck and L. Waltman, "Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping," *Scientometrics*, vol. 84, no. 2, pp. 523–538, 2010, doi: 10.1007/s11192-009-0146-3.
- [12] M. H. Elnabawi and N. Hamza, "Review on Gaps and Challenges in Prediction Outdoor Thermal Comfort Indices: Leveraging Industry 4.0 and 'Knowledge Translation,'" *Buildings*, vol. 14, no. 4, 2024, doi: 10.3390/buildings14040879.
- [13] N. M. Sari *et al.*, "A Bibliometric Analysis of Urban Environment Quality Studies Based on Satellite Remote Sensing Data," *AIP Conf. Proc.*, vol. 2941, no. 1, 2023, doi: 10.1063/5.0183687.
- [14] Y. Kara and V. Yavuz, "Urban Microclimates in a Warming World: Land Surface Temperature (LST) Trends Across Ten Major Cities on Seven Continents," *Urban Sci.*, vol. 9, no. 4, 2025, doi: 10.3390/urbansci9040115.
- [15] A. A. Farag, S. Badawi, and R. M. Doheim, "Digital Simulation for the Outdoor Thermal Comfort Assessment," no. January 2021, pp. 33–46, 2019, doi: 10.4018/978-1-5225-9238-9.ch003.
- [16] Z. Zhang and G. He, "Generation of Landsat surface temperature product for China, 2000–2010," *Int. J. Remote Sens.*, vol. 34, no. 20, pp. 7369–7375, 2013, doi: 10.1080/01431161.2013.820368.

- [17] T. D. Mushore, J. Odindi, R. Slotow, and O. Mutanga, “Remote sensing-based outdoor thermal comfort assessment in local climate zones in the rural–urban continuum of eThekwin municipality, South Africa,” 2023, *mdpi.com*. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2072-4292/15/23/5461>
- [18] X. Chen, Y. Xu, J. Yang, Z. Wu, and H. Zhu, “Remote sensing of urban thermal environments within local climate zones: A case study of two high-density subtropical Chinese cities,” *Urban Clim.*, vol. 31, no. October 2019, p. 100568, 2020, doi: 10.1016/j.ulim.2019.100568.
- [19] X. Xu, W. Qiu, W. Li, D. Huang, X. Li, and S. Yang, “Comparing satellite image and GIS data classified local climate zones to assess urban heat island: A case study of Guangzhou,” *Front. Environ. Sci.*, vol. 10, no. November, pp. 1–18, 2022, doi: 10.3389/fenvs.2022.1029445.
- [20] N. A. H. Hanapiah, “Urban Heat Island Phenomenon in Penang Island, Malaysia,” *J. Adv. Res. Appl. Sci. (ISSN 2208-2352)*, vol. 6, no. 7, pp. 01–13, 2019, doi: 10.53555/nnas.v6i7.764.
- [21] M. T. Abebe and T. L. Megento, “The city of addis ababa from ‘forest city’ to ‘urban heat island’: Assessment of urban green space dynamics,” *J. Urban Environ. Eng.*, vol. 10, no. 2, pp. 254–262, 2016, doi: 10.4090/juee.2016.v10n2.254262.
- [22] M. I. Stathopoulou, C. Cartalis, I. Keramitsoglou, and M. Santamouris, “Thermal remote sensing of Thom’s discomfort index (DI): comparison with in-situ measurements,” *Remote Sens. Environ. Monit. GIS Appl. Geol. V*, vol. 5983, no. October, p. 59830K, 2005, doi: 10.1111/12.627541.
- [23] J. C. Fahy, “Beyond land surface temperature: Identifying areas of daytime thermal discomfort in cities by combining remote sensing and field measurements,” *Urban Clim.*, vol. 61, 2025, doi: 10.1016/j.ulim.2025.102460.
- [24] Y. Al Horr, M. Arif, A. K. Kaushik, H. Arsalan, A. Mazroei, and M. Q. Rana, “Thermal Comfort in Buildings: Scientometric Analysis and Systematic Review,” *J. Archit. Eng.*, vol. 29, no. 2, 2023, doi: 10.1061/jaeied.aeeng-1490.