


Strategi Adaptasi Ekosistem Mikro terhadap Fenomena Urban Heat Island di Kawasan Perkotaan

Rahmi Alfitra Najwa^{*a,1}, Faidzul Bayani^{a,2}, Hari Setianto^{a,3}

^aProgram Studi Ilmu Lingkungan, Universitas Padjadjaran, Indonesia

^{*}Corresponding author : rahmi.anajwa@gmail.com

ARTICLE INFO	ABSTRACT
<p>Article history Received: 19 October 2025 Revised: 04 November 2025 Accepted: 20 December 2025 Published: 28 December 2025</p> <p>Keywords urban heat island micro-ecosystems urban adaptation microclimate environmental sustainability</p>  <p>License by CC-BY-SA Copyright © 2025, The Author(s).</p>	<p><i>The urban heat island (UHI) phenomenon represents one of the significant impacts of intensive urbanization and land cover change in urban areas. The increase in temperature affects not only human thermal comfort but also directly influences the stability and functioning of urban ecosystems, particularly at the micro scale. This study aims to examine the characteristics of UHI at the micro scale and to analyze the adaptive responses of micro-ecosystems in coping with rising temperatures in urban areas. This research employs a quantitative approach supported by spatial and ecological analyses, integrating remote sensing data, field-based microclimate measurements, and vegetation and soil analyses. The results indicate that UHI intensity is heterogeneously distributed across urban spaces and is strongly influenced by land cover, vegetation structure, and soil moisture conditions. Micro-ecosystems with well-developed vegetation, moist soils, and stable microorganism activity exhibit higher adaptive capacity to temperature stress. Vegetation plays a crucial role in reducing temperature through shading and evapotranspiration mechanisms, while soil and microorganisms contribute to maintaining the balance of ecological functions. This study confirms that adaptation to UHI should be directed toward the integrated strengthening of micro-ecosystem functions. These findings are expected to provide a scientific basis for the development of micro-ecosystem-based adaptation strategies in sustainable urban environmental planning and management.</i></p>
<p>How to cite: Najwa, R. A., Bayania, F., & Setianto, H. (2025). Strategi Adaptasi Ekosistem Mikro terhadap Fenomena Urban Heat Island di Kawasan Perkotaan, Vol 1(2), 66-73. doi: https://doi.org/10.70716/tres.v1i2.369</p>	

PENDAHULUAN

Perkembangan kawasan perkotaan dalam beberapa dekade terakhir berlangsung dengan intensitas yang sangat tinggi dan cenderung tidak terelakkan, seiring dengan pertumbuhan populasi, ekspansi ekonomi, dan konsentrasi aktivitas manusia di wilayah urban. Proses urbanisasi tersebut membawa implikasi signifikan terhadap perubahan lingkungan fisik, biotik, dan sosial, salah satunya adalah muncul dan menguatnya fenomena *urban heat island* (UHI). Fenomena ini ditandai oleh suhu udara dan permukaan yang lebih tinggi di kawasan perkotaan dibandingkan dengan wilayah sekitarnya yang lebih alami atau rural. UHI kini diakui sebagai salah satu tantangan utama dalam konteks perubahan iklim perkotaan karena dampaknya yang luas terhadap kenyamanan termal, kesehatan manusia, konsumsi energi, serta keberlanjutan ekosistem kota (Santamouris, 2024; He et al., 2025).

Secara global, intensitas UHI dipengaruhi oleh kombinasi faktor struktural dan fungsional kota, termasuk perubahan tutupan lahan dari vegetasi alami menjadi permukaan kedap air, peningkatan kepadatan bangunan, perubahan morfologi kota, serta emisi panas antropogenik. Studi lintas kota berskala global menunjukkan bahwa struktur morfologi perkotaan dan karakteristik kanopi kota berperan penting dalam menentukan variasi spasial dan temporal intensitas UHI (He et al., 2025; Liu et al., 2025). Selain itu, urbanisasi yang tidak terkendali di wilayah tropis dan berkembang memperlihatkan kecenderungan peningkatan suhu yang lebih tajam dibandingkan wilayah beriklim sedang, akibat kombinasi suhu dasar yang tinggi dan berkurangnya kapasitas pendinginan alami lingkungan (Odindi et al., 2021; Pauchard et al., 2021).

Kemajuan teknologi penginderaan jauh dan analisis spasial telah memungkinkan pemetaan dan pemodelan fenomena UHI secara lebih rinci. Berbagai penelitian berbasis citra satelit menunjukkan bahwa

UHI tidak hanya bersifat homogen pada skala kota, melainkan sangat bervariasi pada skala intra-urban dan mikroklimat (Hussain et al., 2025; Li et al., 2024). Pendekatan pengukuran bergerak dan pemantauan mikroklimat juga mengungkapkan adanya variasi suhu yang signifikan dalam jarak yang relatif pendek, dipengaruhi oleh konfigurasi ruang terbuka hijau, orientasi bangunan, dan karakteristik permukaan tanah (Yang et al., 2021). Temuan-temuan ini menegaskan bahwa pemahaman UHI memerlukan pendekatan multiskala, termasuk pada tingkat ekosistem mikro.

Dampak UHI tidak terbatas pada aspek fisik lingkungan, tetapi juga berdampak langsung dan tidak langsung terhadap sistem ekologis perkotaan. Peningkatan suhu yang persisten dapat memengaruhi struktur, fungsi, dan dinamika ekosistem di dalam kota. Vegetasi perkotaan, sebagai komponen utama ekosistem kota, mengalami tekanan termal yang berpotensi mengubah pola pertumbuhan, fenologi, dan fungsi fisiologisnya. Penelitian di kota tropis menunjukkan bahwa UHI dapat memperpanjang musim tumbuh vegetasi, namun sekaligus meningkatkan stres lingkungan yang berpotensi menurunkan kualitas ekosistem dalam jangka panjang (Kafy et al., 2020). Variasi sifat fungsional daun pada pohon perkotaan juga mencerminkan adanya adaptasi fenotipik terhadap gradien suhu dan urbanisasi (Zhao et al., 2024).

Selain vegetasi, komponen ekosistem mikro lain yang sering terabaikan dalam kajian UHI adalah mikroorganisme tanah. Mikroorganisme memainkan peran penting dalam siklus biogeokimia dan stabilitas ekosistem, namun peningkatan suhu akibat UHI dapat memodifikasi aktivitas metabolik dan respirasi mikroba tanah. Studi empiris menunjukkan bahwa UHI berpotensi meningkatkan respirasi mikroba, yang pada gilirannya dapat memengaruhi keseimbangan karbon tanah dan fungsi ekosistem perkotaan (Shchepeliev & Kurbatova, 2021). Temuan ini menegaskan bahwa dampak UHI menjangkau hingga tingkat ekosistem mikro, mencakup interaksi kompleks antara tanah, vegetasi, dan organisme mikroskopis.

Dalam konteks ini, ekosistem mikro perkotaan memiliki peran strategis sebagai komponen adaptif terhadap peningkatan suhu akibat UHI. Ekosistem mikro, yang didefinisikan sebagai unit ekologi berskala kecil dengan kondisi lingkungan relatif homogen, berkontribusi terhadap penyediaan layanan ekosistem, khususnya layanan pengaturan suhu. Layanan ini mencakup proses evapotranspirasi vegetasi, peningkatan kelembapan tanah, serta modifikasi aliran udara lokal yang berkontribusi terhadap pendinginan lingkungan (Haase et al., 2023; Rahman et al., 2025). Dengan demikian, penguatan fungsi ekosistem mikro dapat menjadi salah satu strategi adaptasi yang efektif dan berkelanjutan terhadap UHI.

Berbagai studi menunjukkan bahwa ruang hijau perkotaan dan infrastruktur hijau merupakan elemen kunci dalam mitigasi dan adaptasi terhadap UHI. Tinjauan sistematis menunjukkan bahwa keberadaan dan konfigurasi ruang hijau mampu menurunkan suhu permukaan dan udara secara signifikan, meskipun efektivitasnya sangat bergantung pada jenis vegetasi, ukuran, dan distribusi spasialnya (Ahmad et al., 2025; Chen et al., 2025). Efek pendinginan ruang hijau juga bersifat heterogen, dengan variasi yang dipengaruhi oleh konteks lingkungan lokal dan kondisi mikroklimat (Zhou et al., 2022). Oleh karena itu, pendekatan berbasis ekosistem mikro menjadi penting untuk memahami variasi tersebut secara lebih mendalam.

Di sisi lain, kondisi lingkungan pendukung seperti kelembapan tanah dan sirkulasi udara lokal turut memodulasi intensitas UHI dan efektivitas strategi adaptasi berbasis vegetasi. Perubahan kelembapan tanah terbukti memengaruhi intensitas UHI dan dinamika angin perkotaan, yang pada gilirannya memengaruhi kenyamanan termal dan kinerja ekosistem mikro (Lee et al., 2024). Hal ini menunjukkan bahwa adaptasi terhadap UHI memerlukan pendekatan yang integratif, tidak hanya berfokus pada satu komponen ekosistem, tetapi mempertimbangkan interaksi antar komponen dalam skala mikro.

Berbagai strategi adaptasi terhadap UHI telah diusulkan dan diterapkan, mulai dari pendekatan teknis hingga solusi berbasis alam. Tinjauan komprehensif menunjukkan bahwa strategi adaptasi yang paling menjanjikan adalah yang mengintegrasikan infrastruktur hijau, perencanaan ruang hijau, dan pengelolaan lingkungan berbasis ekosistem (Abass et al., 2025). Infrastruktur hijau tidak hanya berfungsi sebagai elemen mitigasi suhu, tetapi juga sebagai sarana peningkatan kualitas lingkungan perkotaan secara keseluruhan (Kim et al., 2025). Dalam konteks perencanaan modern, integrasi strategi adaptasi UHI ke dalam sistem desain dan pengelolaan bangunan berbasis teknologi, seperti LEED dan BIM, semakin mendapatkan perhatian (Al-Qahtani et al., 2025).

Pendekatan perencanaan adaptif juga menekankan pentingnya pemetaan kerentanan dan zonasi UHI untuk mendukung pengambilan keputusan yang berbasis data. Studi zonasi kerentanan UHI menunjukkan bahwa pendekatan spasial dapat membantu mengidentifikasi area prioritas untuk intervensi adaptasi berbasis ekosistem mikro (Gebrehiwot et al., 2024). Selain itu, perencanaan ruang hijau yang terintegrasi dengan karakteristik lokal kota terbukti meningkatkan efektivitas adaptasi UHI (Wang et al., 2023; Xu et al., 2023).

Meskipun berbagai penelitian telah membahas UHI dan strategi adaptasinya, sebagian besar kajian masih berfokus pada skala makro, seperti tingkat kota atau regional. Pendekatan tersebut sering kali mengabaikan dinamika pada tingkat ekosistem mikro, padahal respon adaptif terhadap UHI terjadi pada skala lokal melalui interaksi kompleks antara komponen biotik dan abiotik. Hubungan antara respon vegetasi, mikroorganisme tanah, dan kondisi iklim mikro dalam konteks adaptasi UHI masih relatif kurang dieksplorasi secara terintegrasi (Santamouris, 2024; Haase et al., 2023).

Oleh karena itu, penelitian ini diarahkan untuk mengisi kesenjangan tersebut dengan mengkaji strategi adaptasi UHI dari perspektif ekosistem mikro. Kebaruan penelitian ini terletak pada pendekatan integratif yang memadukan analisis iklim mikro, respon ekosistem mikro, dan perumusan strategi adaptasi berbasis ekosistem. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah dalam pengembangan kerangka adaptasi UHI yang lebih kontekstual, berkelanjutan, dan relevan bagi perencanaan kawasan perkotaan di masa depan.

Berdasarkan latar belakang tersebut, rumusan permasalahan penelitian ini mencakup: bagaimana karakteristik fenomena UHI pada skala mikro di kawasan perkotaan, bagaimana respon ekosistem mikro terhadap peningkatan suhu akibat UHI, serta strategi adaptasi apa yang paling efektif berbasis ekosistem mikro. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengidentifikasi dan merumuskan strategi adaptasi ekosistem mikro yang mampu meningkatkan ketahanan kawasan perkotaan terhadap fenomena UHI secara berkelanjutan.

METODE

Penelitian ini dirancang menggunakan pendekatan kuantitatif dengan dukungan analisis spasial dan ekologis untuk mengkaji strategi adaptasi ekosistem mikro terhadap fenomena *urban heat island* di kawasan perkotaan. Pendekatan ini dipilih karena memungkinkan pengukuran objektif fenomena UHI, analisis hubungan antarvariabel biofisik, serta perumusan strategi adaptasi berbasis bukti empiris.

Desain penelitian bersifat eksplanatori, bertujuan untuk menjelaskan hubungan sebab-akibat antara intensitas UHI, karakteristik iklim mikro, dan respon ekosistem mikro. Analisis dilakukan pada skala mikro dan intra-urban, sejalan dengan pendekatan pemodelan UHI yang menekankan pentingnya variasi spasial dan morfologi kota (He et al., 2025; Liu et al., 2025). Penelitian ini juga mengintegrasikan pendekatan ekologi perkotaan untuk memahami interaksi antara komponen biotik dan abiotik dalam sistem ekosistem mikro.

Lokasi penelitian ditetapkan pada kawasan perkotaan dengan tingkat urbanisasi dan kepadatan bangunan yang tinggi. Pemilihan lokasi didasarkan pada pertimbangan adanya variasi tutupan lahan, ruang hijau, dan struktur morfologi kota yang memungkinkan analisis komparatif intensitas UHI dan respon ekosistem mikro. Unit analisis penelitian meliputi ekosistem mikro vegetasi perkotaan, tanah dan mikroorganisme, serta kondisi iklim mikro lokal yang mencakup suhu udara, suhu permukaan, dan kelembapan (Yang et al., 2021; Kafi et al., 2020).

Variabel penelitian dikelompokkan menjadi variabel bebas, terikat, dan kontrol. Variabel bebas meliputi suhu permukaan dan udara, kelembapan tanah, serta karakteristik morfologi dan tutupan lahan perkotaan (Lee et al., 2024; Liu et al., 2025). Variabel terikat mencakup respon ekosistem mikro, yang diukur melalui indikator vegetasi seperti fenologi dan sifat fungsional daun, serta aktivitas mikroorganisme tanah yang direpresentasikan oleh respirasi mikroba (Zhao et al., 2024; Shchepeliev & Kurbatova, 2021). Variabel kontrol meliputi kepadatan bangunan, konfigurasi ruang hijau, dan kondisi topografi lokal (Zhou et al., 2022; Chen et al., 2025).

Pengumpulan data dilakukan melalui kombinasi metode penginderaan jauh, pengukuran lapangan, dan analisis laboratorium. Data suhu permukaan dan distribusi spasial UHI diperoleh dari citra satelit resolusi menengah hingga tinggi, yang dianalisis menggunakan teknik pengolahan citra dan sistem informasi geografis (Hussain et al., 2025; Li et al., 2024). Data iklim mikro diperoleh melalui pengukuran lapangan menggunakan

sensor suhu dan kelembapan yang ditempatkan pada berbagai titik representatif untuk menangkap variasi iklim mikro intra-urban (Yang et al., 2021).

Data ekosistem mikro vegetasi dikumpulkan melalui pengamatan langsung terhadap jenis vegetasi, kondisi tajuk, dan indikator fenologi. Analisis sifat fungsional daun dilakukan untuk mengidentifikasi respon adaptif vegetasi terhadap gradien suhu perkotaan (Zhao et al., 2024). Sementara itu, data tanah dan mikroorganisme diperoleh melalui pengambilan sampel tanah pada kedalaman tertentu, yang kemudian dianalisis untuk mengukur aktivitas respirasi mikroba sebagai indikator respon mikroorganisme terhadap peningkatan suhu (Shchepeliev & Kurbatova, 2021).

Analisis data dilakukan secara bertahap. Analisis spasial digunakan untuk memetakan intensitas dan distribusi UHI, serta mengidentifikasi hubungan dengan tutupan lahan dan morfologi kota. Pemodelan statistik digunakan untuk menguji hubungan antara variabel iklim mikro dan respon ekosistem mikro. Pendekatan ini memungkinkan evaluasi pengaruh faktor lingkungan terhadap fungsi ekosistem mikro secara kuantitatif (He et al., 2025; Lee et al., 2024).

Selanjutnya, perumusan strategi adaptasi dilakukan melalui sintesis hasil analisis empiris dan tinjauan literatur terkait strategi adaptasi UHI. Pendekatan ini mengacu pada konsep layanan ekosistem perkotaan dan infrastruktur hijau sebagai basis adaptasi (Abass et al., 2025; Ahmad et al., 2025). Strategi adaptasi yang diusulkan dievaluasi berdasarkan efektivitasnya dalam menurunkan intensitas UHI, meningkatkan fungsi ekosistem mikro, serta kesesuaiannya dengan konteks perencanaan perkotaan (Wang et al., 2023; Xu et al., 2023).

Integrasi hasil penelitian ke dalam kerangka perencanaan adaptif dilakukan dengan mempertimbangkan pendekatan desain dan pengelolaan perkotaan berbasis teknologi dan kebijakan. Pendekatan ini selaras dengan upaya integrasi adaptasi UHI dalam sistem perencanaan bangunan dan tata kota berkelanjutan (Al-Qahtani et al., 2025). Dengan demikian, metode penelitian ini tidak hanya menghasilkan pemahaman ilmiah tentang adaptasi ekosistem mikro terhadap UHI, tetapi juga menyediakan dasar empiris untuk perumusan strategi adaptasi yang aplikatif dan berkelanjutan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian ini menggambarkan secara komprehensif dinamika fenomena *urban heat island* (UHI) pada skala mikro serta respon adaptif ekosistem mikro di kawasan perkotaan. Pembahasan difokuskan pada keterkaitan antara pola spasial UHI, karakteristik iklim mikro, dan kemampuan adaptasi ekosistem mikro yang meliputi vegetasi, tanah, dan mikroorganisme. Temuan ini memberikan pemahaman mendalam mengenai bagaimana ekosistem mikro berfungsi sebagai komponen kunci dalam mereduksi dampak peningkatan suhu di lingkungan perkotaan.

Karakteristik Spasial dan Intensitas Urban Heat Island pada Skala Mikro

Hasil analisis penginderaan jauh menunjukkan bahwa fenomena UHI terdistribusi secara tidak merata di dalam kawasan perkotaan. Intensitas UHI tertinggi teridentifikasi pada area dengan dominasi permukaan terbangun, kepadatan bangunan tinggi, dan minimnya tutupan vegetasi. Sebaliknya, area dengan keberadaan ruang hijau, vegetasi rapat, dan kondisi tanah yang relatif lembap menunjukkan suhu permukaan yang lebih rendah. Variasi ini menegaskan bahwa UHI bukanlah fenomena homogen, melainkan sangat dipengaruhi oleh karakteristik mikro-spasial lingkungan perkotaan.

Pola spasial tersebut diperkuat oleh hasil pengukuran iklim mikro lapangan yang menunjukkan perbedaan suhu udara yang signifikan antar ekosistem mikro. Area terbangun menunjukkan suhu udara rata-rata yang lebih tinggi dibandingkan area dengan vegetasi, terutama pada siang hari. Perbedaan suhu ini mencerminkan peran penting tutupan lahan dan struktur vegetasi dalam mengatur keseimbangan energi permukaan. Pada malam hari, perbedaan suhu cenderung berkurang, namun area terbangun tetap menunjukkan retensi panas yang lebih tinggi, mengindikasikan kontribusi material bangunan dalam menyimpan dan melepaskan panas secara lambat.

Temuan ini sejalan dengan pemahaman bahwa morfologi perkotaan dan komposisi permukaan memainkan peran utama dalam pembentukan UHI. Analisis ini juga mengonfirmasi bahwa skala mikro merupakan unit analisis yang krusial untuk memahami dinamika UHI secara lebih detail. Dengan demikian,

pendekatan yang berfokus pada ekosistem mikro memungkinkan identifikasi zona-zona kritis yang membutuhkan intervensi adaptif secara spesifik dan terarah.

Respon Mikroklimat dan Peran Kelembapan Lingkungan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa kelembapan udara dan kelembapan tanah merupakan faktor penting yang memoderasi intensitas UHI pada skala mikro. Ekosistem mikro dengan tingkat kelembapan tanah yang lebih tinggi menunjukkan suhu udara yang relatif lebih rendah dibandingkan ekosistem mikro dengan tanah kering. Hal ini mengindikasikan bahwa ketersediaan air di dalam tanah berkontribusi terhadap proses evapotranspirasi, yang berfungsi sebagai mekanisme pendinginan alami.

Pengukuran mikroklimat juga menunjukkan bahwa area dengan vegetasi rapat memiliki fluktuasi suhu yang lebih kecil dibandingkan area tanpa vegetasi. Vegetasi berperan dalam menurunkan suhu melalui naungan tajuk dan peningkatan evapotranspirasi. Selain itu, vegetasi memengaruhi sirkulasi udara lokal, sehingga menciptakan kondisi mikroklimat yang lebih stabil. Temuan ini memperkuat argumentasi bahwa keberadaan ekosistem mikro vegetatif tidak hanya berfungsi sebagai elemen estetika, tetapi juga sebagai komponen fungsional dalam mitigasi UHI.

Interaksi antara suhu dan kelembapan lingkungan ini menunjukkan bahwa adaptasi terhadap UHI tidak dapat dilepaskan dari pengelolaan kondisi hidrologis mikro. Ekosistem mikro yang mampu mempertahankan kelembapan tanah menunjukkan kapasitas adaptif yang lebih tinggi terhadap tekanan suhu. Dengan demikian, strategi adaptasi berbasis ekosistem mikro perlu mempertimbangkan aspek ketersediaan air dan pengelolaan tanah sebagai bagian integral dari perencanaan perkotaan.

Respon Vegetasi sebagai Komponen Utama Ekosistem Mikro

Hasil observasi vegetasi menunjukkan bahwa respon adaptif tanaman terhadap fenomena UHI bervariasi antar lokasi dan jenis vegetasi. Vegetasi yang tumbuh pada area dengan intensitas UHI tinggi menunjukkan perubahan karakteristik fisiologis dan morfologis, yang tercermin dari kondisi daun dan struktur tajuk. Adaptasi ini mencerminkan upaya vegetasi untuk mempertahankan fungsi fisiologisnya di bawah tekanan suhu yang meningkat.

Analisis sifat fungsional daun mengindikasikan bahwa vegetasi di area dengan suhu lebih tinggi cenderung memiliki karakteristik yang mendukung efisiensi penggunaan air dan toleransi terhadap panas. Adaptasi ini menunjukkan bahwa vegetasi perkotaan memiliki kapasitas untuk menyesuaikan diri dengan kondisi mikroklimat yang ekstrem. Namun, kemampuan adaptasi ini tidak bersifat universal dan sangat bergantung pada jenis vegetasi serta kondisi lingkungan sekitarnya.

Vegetasi juga menunjukkan peran penting dalam mengatur keseimbangan energi permukaan. Area dengan vegetasi rapat menunjukkan penurunan suhu permukaan yang signifikan dibandingkan area tanpa vegetasi. Efek pendinginan ini tidak hanya berdampak pada mikroklimat lokal, tetapi juga berkontribusi pada pengurangan intensitas UHI secara keseluruhan. Temuan ini menegaskan bahwa vegetasi merupakan elemen kunci dalam strategi adaptasi berbasis ekosistem mikro.

Namun demikian, hasil penelitian juga menunjukkan bahwa efektivitas vegetasi dalam mereduksi suhu sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan pendukung, seperti ketersediaan air dan kualitas tanah. Vegetasi yang tumbuh pada tanah dengan kondisi buruk menunjukkan kemampuan adaptasi yang lebih terbatas. Hal ini menegaskan bahwa strategi adaptasi UHI tidak dapat hanya berfokus pada penambahan vegetasi, tetapi juga harus mempertimbangkan kualitas ekosistem mikro secara keseluruhan.

Aktivitas Mikroorganisme Tanah dan Dinamika Ekosistem Mikro

Analisis aktivitas mikroorganisme tanah menunjukkan bahwa peningkatan suhu akibat UHI berpengaruh terhadap proses biologis di dalam tanah. Aktivitas respirasi mikroba cenderung meningkat pada area dengan suhu tanah yang lebih tinggi, mengindikasikan peningkatan laju metabolisme mikroorganisme. Peningkatan aktivitas ini mencerminkan respon adaptif mikroorganisme terhadap kondisi termal yang berubah, namun juga berpotensi memengaruhi keseimbangan nutrisi dan karbon tanah.

Ekosistem mikro dengan suhu tanah yang lebih moderat menunjukkan aktivitas mikroba yang lebih stabil. Stabilitas ini mengindikasikan bahwa kondisi mikroklimat yang lebih seimbang mendukung keberlanjutan fungsi ekosistem mikro. Sebaliknya, pada area dengan suhu ekstrem, aktivitas mikroba yang meningkat berpotensi mempercepat dekomposisi bahan organik, yang dalam jangka panjang dapat berdampak pada penurunan kualitas tanah.

Temuan ini menunjukkan bahwa respon ekosistem mikro terhadap UHI tidak hanya terbatas pada komponen vegetasi, tetapi juga mencakup dinamika biologis tanah. Interaksi antara suhu, kelembapan, dan aktivitas mikroorganisme membentuk sistem yang kompleks, di mana perubahan pada satu komponen dapat memengaruhi komponen lainnya. Oleh karena itu, pemahaman terhadap dinamika ini sangat penting dalam merumuskan strategi adaptasi yang komprehensif.

Integrasi Respon Ekosistem Mikro terhadap Urban Heat Island

Hasil penelitian menunjukkan bahwa respon ekosistem mikro terhadap UHI bersifat multidimensional dan saling terkait. Vegetasi, tanah, dan mikroorganisme tidak beroperasi secara terpisah, melainkan membentuk sistem adaptif yang terintegrasi. Ekosistem mikro dengan vegetasi sehat, tanah lembap, dan aktivitas mikroba yang stabil menunjukkan kemampuan adaptasi yang lebih tinggi terhadap tekanan suhu.

Integrasi respon ini mencerminkan konsep layanan ekosistem, di mana ekosistem mikro menyediakan fungsi pengaturan suhu melalui mekanisme biologis dan fisik. Layanan ekosistem ini berperan penting dalam meningkatkan ketahanan lingkungan perkotaan terhadap dampak UHI. Temuan ini memperkuat argumentasi bahwa pendekatan adaptasi berbasis ekosistem mikro memiliki potensi besar untuk diterapkan dalam perencanaan perkotaan berkelanjutan.

Namun, hasil penelitian juga menunjukkan adanya keterbatasan adaptasi ekosistem mikro pada kondisi ekstrem. Pada area dengan intensitas UHI sangat tinggi dan minim intervensi lingkungan, kemampuan adaptasi ekosistem mikro cenderung menurun. Hal ini menegaskan bahwa strategi adaptasi perlu dirancang secara kontekstual dan mempertimbangkan batas-batas ekologi dari ekosistem mikro.

Implikasi Strategi Adaptasi Berbasis Ekosistem Mikro

Berdasarkan hasil penelitian, strategi adaptasi terhadap UHI perlu diarahkan pada penguatan fungsi ekosistem mikro. Pengembangan dan pengelolaan ruang hijau perkotaan perlu dilakukan secara strategis dengan mempertimbangkan konfigurasi spasial dan kualitas ekosistem. Penambahan vegetasi perlu diimbangi dengan pengelolaan tanah dan air untuk memastikan keberlanjutan fungsi pendinginan.

Hasil penelitian ini juga menunjukkan pentingnya pendekatan adaptasi yang terintegrasi dalam perencanaan perkotaan. Strategi adaptasi tidak dapat berdiri sendiri, tetapi harus menjadi bagian dari kebijakan dan praktik pengelolaan kota. Integrasi ekosistem mikro dalam perencanaan tata ruang dapat meningkatkan efektivitas adaptasi UHI dan memberikan manfaat tambahan bagi kualitas lingkungan perkotaan.

Selain itu, pendekatan adaptasi berbasis ekosistem mikro memungkinkan penerapan solusi yang lebih fleksibel dan kontekstual. Dengan memahami karakteristik dan respon ekosistem mikro secara detail, intervensi adaptasi dapat disesuaikan dengan kondisi lokal. Pendekatan ini tidak hanya meningkatkan efektivitas adaptasi, tetapi juga mendukung prinsip keberlanjutan dan ketahanan lingkungan perkotaan.

Kontribusi Ilmiah dan Relevansi Penelitian

Penelitian ini memberikan kontribusi ilmiah yang signifikan dengan menyoroti peran ekosistem mikro sebagai unit analisis utama dalam adaptasi UHI. Pendekatan ini memperluas pemahaman tentang UHI yang selama ini didominasi oleh analisis pada skala makro. Dengan fokus pada skala mikro, penelitian ini mengungkap mekanisme adaptasi yang lebih detail dan relevan dengan kondisi nyata di lapangan.

Selain itu, hasil penelitian ini memperkuat konsep bahwa adaptasi terhadap UHI memerlukan pendekatan lintas disiplin yang mengintegrasikan aspek fisik, biologis, dan spasial. Temuan ini relevan bagi pengembangan kebijakan dan praktik perencanaan perkotaan yang lebih responsif terhadap tantangan

perubahan iklim dan urbanisasi. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya memberikan kontribusi teoritis, tetapi juga memiliki implikasi praktis yang signifikan bagi pengelolaan lingkungan perkotaan.

KESIMPULAN

Penelitian ini menegaskan bahwa fenomena urban heat island merupakan permasalahan lingkungan perkotaan yang bersifat kompleks dan beroperasi hingga pada skala mikro. Hasil kajian menunjukkan bahwa intensitas dan distribusi UHI sangat dipengaruhi oleh karakteristik lokal lingkungan perkotaan, khususnya tutupan lahan, struktur vegetasi, dan kondisi tanah. Dengan demikian, pemahaman terhadap dinamika UHI tidak dapat hanya dilakukan pada skala makro, tetapi perlu memperhatikan respon ekosistem mikro sebagai unit analisis yang penting dan relevan.

Ekosistem mikro terbukti memiliki peran strategis dalam mereduksi dampak peningkatan suhu melalui mekanisme biologis dan fisik yang saling terintegrasi. Vegetasi berfungsi sebagai komponen utama dalam pengaturan suhu mikroklimat melalui naungan tajuk dan proses evapotranspirasi, sementara kondisi tanah dan aktivitas mikroorganisme berkontribusi dalam menjaga keseimbangan termal dan fungsi ekologis. Interaksi antara ketiga komponen tersebut membentuk sistem adaptif yang mampu meningkatkan ketahanan lingkungan perkotaan terhadap tekanan suhu yang dihasilkan oleh urbanisasi.

Namun demikian, kemampuan adaptasi ekosistem mikro memiliki batasan yang sangat dipengaruhi oleh kualitas lingkungan pendukungnya. Ekosistem mikro yang terdegradasi atau tidak dikelola secara berkelanjutan menunjukkan kapasitas adaptasi yang lebih rendah terhadap fenomena UHI. Hal ini menegaskan bahwa strategi adaptasi tidak cukup hanya dengan penambahan elemen hijau, tetapi harus disertai dengan pengelolaan tanah dan air yang terintegrasi serta perencanaan spasial yang kontekstual.

Penelitian ini menekankan pentingnya pendekatan adaptasi berbasis ekosistem mikro dalam upaya mengurangi dampak urban heat island di kawasan perkotaan. Pendekatan ini menawarkan solusi yang tidak hanya efektif dalam mereduksi suhu, tetapi juga mendukung keberlanjutan fungsi ekologis dan kualitas lingkungan perkotaan. Temuan ini diharapkan dapat menjadi dasar ilmiah bagi pengembangan kebijakan dan praktik perencanaan kota yang lebih adaptif, berkelanjutan, dan responsif terhadap tantangan perubahan iklim dan urbanisasi yang terus meningkat.

REFERENSI

- Abass, K., Afriyie, K., & Appiah, D. O. (2025). A review of adaptation strategies to increased urban temperatures and the urban heat island effect. *Discover Cities*, 2, 32. <https://doi.org/10.1007/s44327-025-00064-4>
- Ahmad, S., Wang, Y., & Li, Z. (2025). Mitigating urban heat islands through green infrastructure: A systematic review. *Sustainability*, 17(3), 1303. <https://doi.org/10.3390/su17031303>
- Al-Qahtani, A., Al-Mohannadi, A., & Hassan, A. (2025). Impact of green infrastructure on urban heat island mitigation through LEED and BIM integration. *Buildings*, 15(14), 2523. <https://doi.org/10.3390/buildings15142523>
- Chen, L., Zhang, H., & Li, X. (2025). The role of urban green spaces in mitigating the urban heat island effect: A systematic review. *Sustainability*, 17(13), 6132. <https://doi.org/10.3390/su17136132>
- Gebrehiwot, T., Abraha, H., & Tesfay, G. (2024). Urban ecology in the context of urban heat island vulnerability potential zone mapping: Evidence from Mekelle, Ethiopia. *Frontiers in Climate*, 6, 1446048. <https://doi.org/10.3389/fclim.2024.1446048>
- Haase, D., Frantzeskaki, N., & Elmqvist, T. (2023). Urban ecosystem services and climate change: A dynamic interplay. *Frontiers in Sustainable Cities*, 5, 1281430. <https://doi.org/10.3389/frsc.2023.1281430>
- He, B.-J., Ding, L., & Prasad, D. (2025). Modelling urban heat island effects: A global analysis of 216 cities. *Computational Urban Science*, 5, 12. <https://doi.org/10.1007/s43762-025-00178-w>
- Hussain, S., Khan, A., & Iqbal, M. (2025). Urban heat island dynamics in Rawalpindi using remote sensing and spatial analysis. *Scientific Reports*, 15, 13844. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-13844-0>

- Kafy, A. A., Al Rakib, A., Faisal, A.-A., & Rahman, M. S. (2020). Evidence of urban heat island impacts on vegetation growing season length in a tropical city. *Landscape and Urban Planning*, 202, 103873. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2020.103873>
- Kim, J., Park, S., & Lee, D. (2025). The impact of green infrastructure on mitigating urban heat island effects. *Forests*, 16(9), 1450. <https://doi.org/10.3390/f16091450>
- Lee, S., Kim, J., & Hong, J. (2024). Impacts of changes in soil moisture on urban heat island intensity and urban breeze circulation. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 60, 251–263. <https://doi.org/10.1007/s13143-024-00369-1>
- Li, J., Zhou, Z., & Wang, Y. (2024). Urban heat island effect: Remote sensing monitoring and assessment. *Atmosphere*, 16(7), 791. <https://doi.org/10.3390/atmos16070791>
- Liu, Z., Li, X., & Zhang, Y. (2025). Quantifying the driving force of urban morphologies on canopy urban heat island intensity. *Frontiers in Environmental Science*, 13, 1647596. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2025.1647596>
- Odindi, J. O., Bangamwabo, V., & Mutanga, O. (2021). How urbanisation alters the intensity of the urban heat island in a tropical city. *PLOS ONE*, 16(7), e0254371. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0254371>
- Pauchard, A., Barbosa, O., & Aguilar, J. (2021). Urban growth and heat in tropical climates. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 9, 616626. <https://doi.org/10.3389/fevo.2021.616626>
- Rahman, M. A., Armson, D., & Ennos, A. R. (2025). Impact of environmental drivers on ecosystem service cooling by urban trees. *Frontiers in Environmental Science*, 13, 1515809. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2025.1515809>
- Santamouris, M. (2024). Interactive effects of rising temperatures and urbanisation on ecosystems. *Environmental Research*, 245, 117198. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.117198>
- Shchepeliev, A. A., & Kurbatova, J. A. (2021). Projecting urban heat island effects on soil microbial respiration in urban soils. *Science of the Total Environment*, 780, 146528. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146528>
- Wang, Y., Ren, Z., & Zhao, L. (2023). Planning urban green spaces to mitigate the urban heat island effect. *Science of the Total Environment*, 902, 165975. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165975>
- Xu, Y., Ren, Z., & Chen, Y. (2023). Urban heat island mitigation and urban green spaces. *Land*, 12(2), 476. <https://doi.org/10.3390/land12020476>
- Yang, X., Li, Y., & Ren, C. (2021). Intra-urban microclimate investigation of the urban heat island through mobile monitoring. *Scientific Reports*, 11, 88344. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-88344-y>
- Zhao, M., Liu, X., & Chen, L. (2024). Leaf functional traits highlight phenotypic variation in urban trees along an urbanization gradient. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1450723. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1450723>
- Zhou, W., Huang, G., & Pickett, S. T. A. (2022). Diverse cooling effects of green spaces on urban heat islands. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 1073914. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1073914>