

Dinamika Spasio-Temporal NDVI, NDWI, NDBI, dan Land Surface Temperature dalam Kaitannya dengan Intensitas Urban Heat Island di Wilayah Barat Kabupaten Maros Periode 2017–2025

La Ode Ashamad Nusriah^{a*}, Syahrajad Al Syarqiyah^a, Gerald Heaston Junior Mbatu^b

^aProgram Studi Meteorologi, Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, Jalan Meteorologi No. 5, Tangerang 15119, Indonesia

^bProgram Studi Klimatologi, Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, Jalan Meteorologi No. 5, Tangerang 15119, Indonesia

* Korespondensi Penulis: ashamadnusriah@gmail.com



Dikirim: 29 Juni 2026

Diterima: 6 Juli 2026

Diterbitkan: 6 Juli 2026

Abstrak. Fenomena *Urban Heat Island* (UHI) menjadi persoalan lingkungan yang semakin kritis seiring meningkatnya tekanan urbanisasi di kawasan perkotaan dan periurban Indonesia. Penelitian ini bertujuan menganalisis dinamika spasio-temporal NDVI, NDWI, NDBI, *Land Surface Temperature* (LST), dan distribusi UHI di wilayah barat Kabupaten Maros, Sulawesi Selatan, pada periode 2017, 2021, dan 2025. Data yang digunakan berupa citra Landsat-8 OLI/TIRS Collection 2 Level-1 yang diolah menggunakan Google Earth Engine dan Python, serta data tutupan lahan ESRI Land Cover. LST dihitung menggunakan pendekatan proporsi vegetasi berbasis NDVI untuk estimasi emisivitas dan inversi Planck, sedangkan UHI diidentifikasi berdasarkan selisih LST terhadap nilai rata-rata dan standar deviasinya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai LST maksimum meningkat dari 35,93°C pada 2017 menjadi 43,97°C pada 2025, disertai penurunan area Non-UHI dari 28.065,31 Ha menjadi 24.755,75 Ha. Analisis korelasi Pearson menunjukkan bahwa NDBI

memiliki korelasi positif sedang hingga kuat terhadap LST ($r = +0,525$ hingga $+0,725$), sedangkan NDWI menunjukkan korelasi negatif lemah hingga sedang ($r = -0,281$ hingga $-0,459$). Sementara itu, NDVI memiliki korelasi positif yang lemah terhadap LST ($r = +0,144$ hingga $+0,304$), yang diduga dipengaruhi oleh dominasi lahan pertanian di wilayah penelitian. Temuan ini menunjukkan bahwa ekspansi kawasan terbangun merupakan faktor yang paling dominan dalam meningkatkan suhu permukaan, sedangkan keberadaan badan air berperan dalam menekan peningkatan LST sehingga keduanya menjadi komponen penting dalam mitigasi fenomena UHI di wilayah barat Kabupaten Maros.

Kata kunci: Kabupaten Maros; land surface temperature; Landsat-8; NDBI; NDVI; NDWI; urban heat island.

Abstract. The *Urban Heat Island* (UHI) phenomenon has become an increasingly critical environmental issue due to accelerating urbanization in urban and peri-urban areas of Indonesia. This study analyzes the spatio-temporal dynamics of NDVI, NDWI, NDBI, *Land Surface Temperature* (LST), and UHI distribution in western Maros Regency, South Sulawesi, during 2017, 2021, and 2025. The primary data consisted of Landsat-8 OLI/TIRS Collection 2 Level-1 imagery processed using Google Earth Engine and Python, complemented by ESRI Land Cover data. LST was derived using an NDVI-based vegetation proportion approach for emissivity estimation followed by Planck inversion, while UHI was identified based on the deviation of LST from its mean and standard deviation. The results indicate that the maximum LST increased from 35.93°C in 2017 to 43.97°C in 2025, accompanied by a decrease in the Non-UHI area from 28,065.31 ha to 24,755.75 ha. Pearson correlation analysis shows that NDBI exhibits a moderate to strong positive correlation with LST ($r = +0.525$ to $+0.725$), whereas NDWI demonstrates a weak to moderate negative correlation ($r = -0.281$ to -0.459). In contrast, NDVI has a weak positive correlation with LST ($r = +0.144$ to $+0.304$), which is likely associated with the dominance of agricultural land within the study area. These findings indicate that the expansion of built-up areas is the dominant factor driving increases in land surface temperature, while the presence of water bodies contributes to suppressing LST, highlighting the importance of both factors in mitigating the Urban Heat Island phenomenon in western Maros Regency.

Keywords: land surface temperature; Landsat-8; Maros Regency; NDBI; NDVI; NDWI; urban heat island

I. PENDAHULUAN

Urbanisasi merupakan salah satu proses transformasi paling masif yang melanda kawasan perkotaan di seluruh dunia, termasuk Indonesia. Perpindahan penduduk dari wilayah perdesaan menuju pusat-pusat kota berjalan seiring dengan konversi lahan yang ekstensif, di mana lahan bervegetasi dan lahan terbuka secara bertahap digantikan oleh permukaan kedap air, bangunan, dan infrastruktur perkotaan [1]. Perubahan komposisi tutupan lahan ini mengubah sifat termal permukaan secara fundamental: permukaan buatan manusia cenderung menyerap dan menyimpan radiasi gelombang pendek lebih besar, sekaligus mereduksi pendinginan evapotranspiratif yang sebelumnya disediakan oleh vegetasi [2]. Konsekuensinya adalah terbentuknya fenomena Urban Heat Island (UHI), yakni kondisi di mana suhu permukaan dan udara di kawasan perkotaan secara konsisten lebih tinggi daripada daerah periurban dan perdesaan di sekitarnya ([3][4].

Fenomena UHI bukan semata persoalan meteorologis, melainkan membawa implikasi multidimensi yang mencakup dimensi kesehatan, energi, dan lingkungan. Peningkatan suhu lingkungan perkotaan memperbesar risiko heat stress, terutama bagi kelompok rentan seperti lansia dan balita, serta mendorong peningkatan konsumsi energi untuk pendinginan ruangan yang pada gilirannya memperparah emisi gas rumah kaca ([5][6]. Lebih jauh, intensitas UHI yang tinggi dapat memperburuk kualitas udara melalui percepatan pembentukan ozon troposfer dan partikulat halus, yang semuanya berdampak pada kualitas hidup masyarakat perkotaan [7].

Kabupaten Maros, yang berbatasan langsung dengan Kota Makassar di sisi selatan dan barat, mengalami tekanan perkotaan yang semakin intensif dalam satu dekade terakhir. Wilayah bagian barat Kabupaten Maros merupakan zona yang paling terdampak ekspansi Kota Makassar, ditandai dengan peningkatan kawasan permukiman, perdagangan, dan jasa yang masif. Dinamika ini diperkirakan telah mengubah karakteristik termal wilayah secara signifikan, namun kajian spasio-temporal yang komprehensif mengenai intensitas UHI di wilayah ini masih sangat terbatas. Studi yang ada umumnya berfokus pada kota-kota besar seperti Jakarta ([8][9], sementara kota-kota sekunder dan wilayah periurban di Sulawesi Selatan belum mendapat perhatian yang memadai.

Pemantauan UHI secara spasial dan temporal memerlukan pendekatan yang mampu menjangkau area luas dengan konsistensi dan presisi tinggi. Penginderaan jauh berbasis satelit menawarkan solusi ideal untuk kebutuhan tersebut. Citra Landsat-8 OLI/TIRS, dengan resolusi spasial 30 meter dan kanal termal beresolusi 100 meter (di-resample menjadi 30 meter), telah terbukti andal untuk derivasi Land Surface Temperature (LST), Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Normalized Difference Water Index (NDWI), dan Normalized Difference Built-Up Index (NDBI) pada skala

perkotaan [10][11]. Kombinasi indeks-indeks ini memungkinkan analisis integratif antara perubahan tutupan lahan, kondisi vegetasi, ketersediaan air permukaan, kepadatan bangunan, dan distribusi suhu permukaan dalam satu kerangka analitik yang koheren.

Sejumlah penelitian terdahulu telah mendemonstrasikan keterkaitan erat antara perubahan tutupan lahan dan intensitas UHI di kota-kota Indonesia. [8] mengkaji dinamika spasio-temporal UHI di Jakarta pada periode sebelum, selama, dan setelah pandemi COVID-19 menggunakan citra Landsat-8, dan menemukan bahwa area UHI intensitas tinggi (UHI 2) mengalami penurunan signifikan pada 2020 seiring meningkatnya tutupan vegetasi, namun kembali meningkat pada 2023 ketika lahan terbangun ekspansi ulang. Studi tersebut juga mengungkap hubungan negatif antara NDVI dan LST pada seluruh periode pengamatan. Sementara itu, [9] yang meneliti Jakarta Selatan periode 2015-2018 mendapati bahwa NDBI secara konsisten merupakan variabel paling berpengaruh terhadap LST ($r = 0,55$), diikuti NDWI ($r = 0,21$) dan NDVI ($r = 0,18$), menggarisbawahi dominasi kawasan terbangun dalam mendorong intensifikasi UHI. Kedua studi tersebut menegaskan bahwa pengendalian ekspansi lahan terbangun dan optimalisasi ruang terbuka hijau merupakan strategi kunci dalam mitigasi UHI di kawasan metropolitan Indonesia.

Meskipun demikian, terdapat kesenjangan pengetahuan yang nyata terkait dinamika UHI di wilayah periurban Sulawesi Selatan, khususnya Kabupaten Maros, yang sedang mengalami transisi dari karakter perdesaan menuju kawasan perkotaan terpadu bersama Makassar. Belum ada kajian yang secara spesifik menganalisis bagaimana perubahan NDVI, NDBI, dan NDWI selama rentang waktu hampir satu dekade (2017–2025) berdampak terhadap fluktuasi LST dan distribusi UHI di wilayah barat Kabupaten Maros. Pemahaman mengenai hal ini krusial tidak hanya untuk keperluan akademis, tetapi juga untuk mendukung perencanaan tata ruang berbasis bukti di wilayah yang sedang berkembang pesat tersebut.

Beranjak dari kesenjangan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk: (1) menganalisis perubahan spasio-temporal NDVI, NDWI, NDBI, dan LST di wilayah barat Kabupaten Maros pada tahun 2017, 2021, dan 2025; (2) memetakan distribusi dan intensitas UHI pada masing-masing periode pengamatan; serta (3) mengkaji kekuatan dan arah korelasi antara NDVI, NDWI, NDBI, dan LST guna mengidentifikasi faktor tutupan lahan yang paling berpengaruh terhadap fluktuasi suhu permukaan di kawasan perkotaan dibandingkan dengan wilayah sekitarnya. Dengan menggunakan citra Landsat-8 OLI/TIRS yang diproses secara konsisten menggunakan Python dan ArcMap, penelitian ini diharapkan menghasilkan temuan yang dapat menjadi landasan empiris bagi pengembangan strategi mitigasi UHI yang responsif terhadap kondisi lokal Kabupaten Maros.

II. METODOLOGI

2.1 Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di wilayah bagian barat Kabupaten Maros, Provinsi Sulawesi Selatan, Indonesia. Wilayah penelitian mencakup delapan kecamatan, yaitu Kecamatan Bontoa, Lau, Maros Baru, Marusu, Mandai, Moncongloe, Turikale, dan Tanralili, yang secara spasial berada pada kisaran koordinat sekitar 4°52'–5°10' Lintang Selatan dan 119°27'–119°44' Bujur Timur. Kawasan ini merupakan bagian dari wilayah perkotaan dan peri-urban Kabupaten Maros yang terintegrasi dalam Kawasan Metropolitan Mamminasata (Makassar–Maros–Sungguminasa–Takalar). Sebagian wilayahnya berbatasan langsung dengan Kota Makassar dan mengalami perkembangan kawasan terbangun, konversi lahan, serta pembangunan infrastruktur yang pesat dalam satu dekade terakhir sehingga menjadi kawasan yang rentan terhadap peningkatan fenomena *Urban Heat Island* (UHI).

Pemilihan wilayah barat Kabupaten Maros didasarkan pada pertimbangan bahwa kawasan ini merepresentasikan zona transisi antara karakter perdesaan dengan ekosistem pertanian dan kehutanan di timur, serta karakter perkotaan yang semakin dominan di sisi barat akibat berbatasan langsung dengan aglomerasi urban Kota Makassar. Zona transisi semacam ini menyediakan gradien spasial yang ideal untuk mengamati bagaimana perubahan tutupan lahan berkorelasi dengan perubahan suhu permukaan dan intensitas UHI.

Analisis dilakukan pada tiga periode pengamatan, yaitu tahun 2017, 2021, dan 2025. Pemilihan ketiga periode ini didasarkan pada pertimbangan ketersediaan citra Landsat-8 berkualitas baik (tutupan awan < 10%) serta relevansi temporal untuk menangkap perubahan lingkungan sebelum, selama, dan setelah pandemi COVID-19 yang terjadi pada rentang 2020–2022. Selain itu, rentang delapan tahun (2017–2025) dipandang memadai untuk mengamati tren perubahan spasio-temporal yang bermakna pada indikator tutupan lahan dan suhu permukaan. Seluruh citra yang digunakan dipilih dari bulan dan musim yang seragam untuk meminimalkan pengaruh variasi musiman terhadap nilai-nilai indeks yang dihitung.

2.2 Data Penelitian

Data utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah citra satelit Landsat-8 Operational Land Imager/Thermal Infrared Sensor (OLI/TIRS) Collection 2 Level-1 yang diunduh dari portal United States Geological Survey (USGS) EarthExplorer (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). Landsat-8 dipilih karena ketersediaan kanal optik resolusi tinggi (30 m) dan kanal termal (Band 10 dan Band 11, di-resample menjadi 30 m), serta arsip temporal yang mencukupi untuk analisis multitemporal. Untuk setiap periode pengamatan dipilih satu scene Landsat-8 dengan kriteria tutupan awan di bawah 10% pada area penelitian

dan diperoleh pada bulan yang sebanding antar tahun untuk meminimalkan bias musiman.

Kanal-kanal yang dimanfaatkan dalam penelitian ini meliputi: Band 3 (Green, 0,533–0,590 μm), Band 4 (Red, 0,636–0,673 μm), Band 5 (Near-Infrared/NIR, 0,851–0,879 μm), Band 6 (Short-Wave Infrared-1/SWIR-1, 1,566–1,651 μm), Band 7 (Short-Wave Infrared-2/SWIR-2, 2,107–2,294 μm), dan Band 10 (Thermal Infrared/TIR, 10,60–11,19 μm). Data pendukung berupa batas administrasi Kabupaten Maros diperoleh dari Badan Informasi Geospasial (BIG) dan digunakan sebagai acuan delineasi area penelitian dalam sistem informasi geografis.

Selain data citra Landsat-8, penelitian ini juga memanfaatkan data tutupan lahan (land cover) yang bersumber dari produk ESRI Land Cover dengan resolusi spasial 50 meter. Produk ini merupakan hasil klasifikasi tutupan lahan berbasis pembelajaran mesin yang dikembangkan oleh Esri, Impact Observatory, dan Microsoft, dan tersedia secara tahunan melalui platform Google Earth Engine. Data ESRI Land Cover digunakan sebagai acuan untuk menginterpretasikan distribusi spasial UHI dalam kaitannya dengan kategori tutupan lahan aktual di wilayah penelitian, sehingga memperkuat analisis integratif antara perubahan fisik lahan dan dinamika termal permukaan. Penggunaan data ini dipilih karena ketersediaannya yang konsisten pada setiap tahun pengamatan dan kesesuaiannya dengan skala analisis perkotaan yang dikaji.

2.3 Pengolahan Data

Seluruh proses pengolahan data dalam penelitian ini dilakukan menggunakan tiga platform utama yang saling melengkapi, yaitu Google Earth Engine (GEE), bahasa pemrograman Python, dan perangkat lunak ArcMap 10.8. Google Earth Engine dimanfaatkan pada tahap awal untuk mengekstraksi dan memproses data citra Landsat-8 OLI/TIRS serta mengakses produk ESRI Land Cover langsung dari repositori cloud, memanfaatkan kemampuan komputasi geospasial berbasis server yang memungkinkan pengolahan data raster skala besar secara efisien tanpa perlu mengunduh citra berukuran besar secara lokal. Selanjutnya, Python (dengan pustaka rasterio, numpy, scipy, dan matplotlib) digunakan untuk perhitungan indeks dan analisis statistik lanjutan, sementara ArcMap 10.8 digunakan untuk visualisasi kartografi dan analisis spasial final. Alur pengolahan secara umum mencakup: (1) ekstraksi dan prapemrosesan citra via GEE; (2) perhitungan indeks tutupan lahan (NDVI, NDWI, NDBI); (3) derivasi Land Surface Temperature (LST); (4) perhitungan nilai dan distribusi UHI; (5) pengolahan data tutupan lahan berbasis ESRI Land Cover; serta (6) analisis korelasi statistik antara indeks tutupan lahan dan LST. Prapemrosesan mencakup konversi nilai Digital Number (DN) ke nilai reflektansi Top of Atmosphere (TOA) menggunakan koefisien radiometrik yang tersedia dalam file metadata (MTL) masing-masing scene citra.

2.3.1 Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

NDVI merupakan indeks vegetasi yang paling umum digunakan dalam analisis penginderaan jauh untuk menggambarkan kepadatan dan kondisi tutupan vegetasi suatu wilayah [12]. Indeks ini memanfaatkan perbedaan respons spektral vegetasi pada kanal merah (Red) dan inframerah dekat (NIR): vegetasi berfotosintesis aktif menyerap radiasi merah untuk proses klorofil namun memantulkan NIR secara kuat, sehingga menghasilkan nilai NDVI positif yang tinggi. Sebaliknya, permukaan tidak bervegetasi seperti lahan terbangun dan tanah gundul memiliki nilai NDVI mendekati nol atau negatif [11]. Dalam konteks kajian UHI, NDVI berfungsi sebagai proksi kondisi vegetasi yang secara langsung berhubungan dengan kemampuan permukaan dalam melakukan pendinginan evapotranspiratif. Formula NDVI adalah sebagai berikut [12][13]:

$$NDVI = \frac{(NIR - Red)}{(NIR + Red)} = \frac{(Band\ 5 - Band\ 4)}{(Band\ 5 + Band\ 4)} \quad (1)$$

Nilai NDVI berkisar antara -1 hingga +1, di mana nilai semakin tinggi menandakan kepadatan vegetasi yang semakin besar.

2.3.2 Normalized Difference Water Index (NDWI)

NDWI dikembangkan oleh McFeeters (1996) dan dirancang untuk mendelineasi fitur badan air terbuka serta meningkatkan ketampakan air dalam citra penginderaan jauh. Indeks ini memanfaatkan perbedaan respons spektral antara kanal hijau (Green) dan inframerah dekat (NIR): badan air memiliki reflektansi yang relatif tinggi pada panjang gelombang hijau namun sangat rendah pada NIR, sehingga menghasilkan nilai NDWI positif untuk piksel air, sementara vegetasi dan lahan terbangun menghasilkan nilai negatif atau mendekati nol [14]. Dalam kajian UHI, NDWI berperan penting karena ketersediaan dan distribusi badan air di kawasan perkotaan memengaruhi stabilitas termal secara langsung: permukaan berair cenderung menekan suhu permukaan melalui efek evaporasi dan kapasitas panas yang tinggi. Pada citra Landsat-8 OLI/TIRS, NDWI dihitung menggunakan Band 3 (Green) dan Band 5 (NIR). Formula NDWI adalah sebagai berikut [14]:

$$NDWI = \frac{(Green - NIR)}{(Green + NIR)} = \frac{(Band\ 3 - Band\ 5)}{(Band\ 3 + Band\ 5)} \quad \dots(2)$$

Nilai NDWI berkisar antara -1 hingga +1. Nilai positif mengindikasikan kehadiran badan air terbuka, sementara nilai negatif mencerminkan lahan terbangun, vegetasi, atau tanah kering. [14] menyatakan bahwa nilai ambang batas 0 dapat digunakan untuk memisahkan piksel air dari non-air, meskipun dalam praktiknya ambang batas ini dapat bervariasi tergantung pada karakteristik lokal.

2.3.3 Normalized Difference Built-Up Index (NDBI)

NDBI dikembangkan oleh [15] khusus untuk mengidentifikasi dan memetakan kawasan terbangun secara otomatis dari citra satelit. Indeks ini memanfaatkan perbedaan reflektansi antara kanal SWIR-2 dan NIR: kawasan terbangun umumnya memiliki reflektansi SWIR yang lebih tinggi dibandingkan NIR, sehingga menghasilkan nilai NDBI positif, sementara vegetasi dan badan air menghasilkan nilai negatif. Kepadatan kawasan terbangun, yang tercermin dalam nilai NDBI tinggi, berkorelasi erat dengan akumulasi panas antropogenik dan intensifikasi UHI ([1][9]). Formula NDBI adalah sebagai berikut [15]:

$$NDBI = \frac{SWIR1 - NIR}{SWIR1 + NIR} = \frac{Band\ 6 - Band\ 5}{Band\ 6 + Band\ 5} \quad \dots(3)$$

Nilai NDBI berkisar antara -1 hingga +1, dengan nilai positif yang lebih tinggi menandakan kepadatan bangunan yang lebih besar.

2.3.4 Land Surface Temperature (LST)

LST merupakan parameter termal utama yang digunakan untuk menggambarkan distribusi suhu permukaan kawasan penelitian dan menjadi basis analisis UHI. Estimasi LST dari citra Landsat-8 OLI/TIRS dilakukan melalui serangkaian tahapan konversi yang mengikuti prosedur standar USGS (Department of the Interior U.S. Geological Survey, 2019) dengan modifikasi koreksi emisivitas berbasis NDVI.

Tahap pertama adalah konversi nilai Digital Number (DN) pada Band 10 menjadi nilai spectral radiance Top of Atmosphere (TOA) menggunakan koefisien radiometrik dari file metadata citra:

$$L\lambda = (ML \times Qcal) + AL \quad \dots(4)$$

di mana $L\lambda$ adalah TOA spectral radiance ($W\ m^{-2}\ sr^{-1}\ \mu m^{-1}$), ML dan AL adalah faktor pengali dan penambah radiance dari metadata (Radiance_Mult_Band dan Radiance_Add_Band), serta Qcal adalah nilai DN piksel.

Tahap kedua, nilai spectral radiance dikonversi menjadi Brightness Temperature (BT) dalam derajat Celsius menggunakan konstanta Planck termal Band 10 Landsat-8 ($K1 = 774,8853\ W\ m^{-2}\ sr^{-1}\ \mu m^{-1}$; $K2 = 1321,0789\ K$):

$$BT = \frac{K2}{\ln(\frac{K1}{L\lambda + 1})} - 273,15 \quad \dots(5)$$

Tahap ketiga adalah estimasi emisivitas permukaan (ϵ) menggunakan pendekatan proporsi vegetasi (Pv) berbasis NDVI [16]. Nilai Pv dihitung terlebih dahulu dengan persamaan:

$$Pv = \left(\frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right)^2 \quad \dots(6)$$

di mana NDVImin dan NDVImax adalah nilai minimum dan maksimum NDVI pada seluruh area kajian. Emisivitas permukaan kemudian dihitung sebagai :

$$E = 0,004 Pv + 0,986 \quad \dots(7)$$

Akhirnya, nilai LST diperoleh dengan mengoreksi BT menggunakan emisivitas permukaan melalui persamaan [8][10] :

$$LST = \frac{BT}{(1 + \lambda \times \frac{BT}{C_2} \times \ln E)} \quad \dots(8)$$

di mana λ adalah panjang gelombang efektif Band 10 Landsat-8 (10,9 μm), dan C_2 adalah konstanta radiasi sekunder ($1,4338 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$). Nilai LST yang dihasilkan merepresentasikan suhu permukaan dalam derajat Celsius.

2.3.5 Urban Heat Island (UHI)

Identifikasi dan klasifikasi UHI dilakukan menggunakan pendekatan statistik berbasis distribusi LST, sebagaimana dikembangkan oleh [17] dan diterapkan oleh [8]. Pendekatan ini mengidentifikasi area dengan suhu permukaan yang melampaui ambang batas tertentu relatif terhadap rata-rata (μ) dan standar deviasi (α) LST pada seluruh wilayah kajian. Nilai intensitas UHI dihitung sebagai:

$$UHI = LST - (\mu + 0,5\alpha) \quad \dots(9)$$

di mana μ adalah rata-rata nilai LST dan α adalah standar deviasi LST pada keseluruhan area penelitian. Nilai UHI positif menandakan piksel yang mengalami kondisi UHI, sementara nilai negatif menandakan area non-UHI. Semakin besar nilai UHI, semakin tinggi intensitas panas perkotaan pada area tersebut. Berdasarkan nilai intensitasnya, UHI diklasifikasikan ke dalam empat kategori sebagaimana disajikan pada Tabel 4.

TABEL 1. KLASIFIKASI INTENSITAS URBAN HEAT ISLAND (UHI)

Nilai UHI	Interpretasi
< 0	Non-UHI
0 – 3	UHI 1 (Rendah)
3 – 6	UHI 2 (Sedang)
> 6	UHI 3 (Ekstrem)

Sumber:[8][17].

2.3.6 Analisis Korelasi

Untuk mengidentifikasi variabel tutupan lahan yang paling berpengaruh terhadap fluktuasi LST, dilakukan analisis korelasi Pearson antara nilai NDVI, NDWI, NDBI, dan LST pada masing-masing periode pengamatan. Analisis korelasi Pearson dipilih karena seluruh variabel bersifat kontinu dan berskala interval, serta hubungan yang

dikaji bersifat linier [18][9]. Koefisien korelasi Pearson (r) dihitung menggunakan persamaan :

$$r = \frac{\sum (xi - \bar{x})(yi - \bar{y})}{\sqrt{\sum (xi - \bar{x})^2 \times \sum (yi - \bar{y})^2}} \quad \dots(10)$$

di mana X_i dan Y_i adalah nilai observasi ke- i dari dua variabel, serta $\bar{X}$ dan $\bar{Y}$ adalah nilai rata-rata masing-masing variabel. Kekuatan korelasi diinterpretasikan menggunakan klasifikasi sebagaimana disajikan pada Tabel 5.

TABEL 2. KLASIFIKASI KEKUATAN KOEFISIEN KORELASI PEARSON

Interval Koefisien Korelasi (r)	Interpretasi
0,80 – 1,00	Sangat Kuat (Very Strong)
0,60 – 0,79	Kuat (Strong)
0,40 – 0,59	Sedang (Moderate)
0,20 – 0,39	Lemah (Weak)
0,00 – 0,19	Sangat Lemah (Very Weak)

Sumber:[18].

Sampel data untuk analisis korelasi diambil secara acak sistematis dari piksel-piksel yang tersebar merata di seluruh area kajian untuk setiap periode pengamatan. Uji signifikansi statistik dilakukan pada taraf kepercayaan 95% ($p < 0,05$) dan 99% ($p < 0,01$). Seluruh perhitungan statistik dilakukan menggunakan Python dengan pustaka scipy dan pandas, sementara visualisasi scatter plot dan peta distribusi dikerjakan menggunakan matplotlib dan ArcMap.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

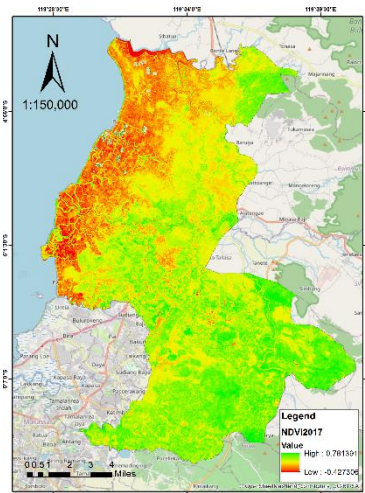
Analisis kerapatan vegetasi di wilayah studi dilakukan menggunakan indeks NDVI untuk memetakan transformasi spasio-temporal tutupan hijau selama periode pengamatan (2017, 2021, dan 2025). Berdasarkan hasil ekstraksi nilai piksel citra satelit multi-temporal, sebaran nilai NDVI menunjukkan fluktuasi yang dinamis. Pada Gambar 1(a) tahun 2017, nilai NDVI berkisar antara -0,43 hingga 0,78. Nilai ini mengalami peningkatan ambang atas pada Gambar 1 (b) tahun 2021 menjadi -0,87 hingga 0,86, sebelum akhirnya sedikit terkoreksi pada Gambar 1c) tahun 2025 dengan rentang nilai -0,70 hingga 0,85. Secara kuantitatif, klasifikasi luasan tiap tingkat kerapatan vegetasi di wilayah studi selama periode pengamatan dirangkum dalam Tabel 3.

TABEL 3. LUAS KELAS KERAPATAN VEGETASI (NDVI) TAHUN 2017, 2021, DAN 2025

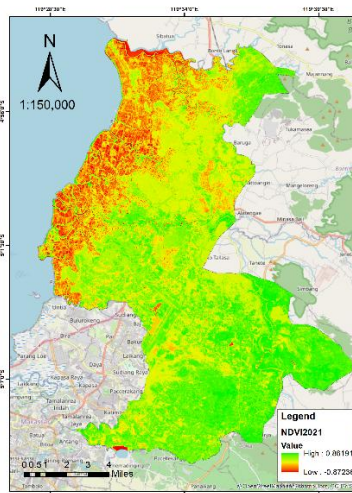
Kelas NDVI	2017 (Ha)	2021 (Ha)	2025 (Ha)
Awan/Air (< 0)	2,994.69	5,115.40	4,542.86
Non-Vegetasi (0–0.21)	6,811.26	4,514.09	5,039.08
Vegetasi Tidak Rapat (0.21–0.42)	14,307.18	10,542.50	12,831.18
Vegetasi Cukup Rapat (0.42–0.63)	12,085.47	8,594.86	9,557.68
Vegetasi Rapat (> 0.63)	1,854.32	9,554.38	6,381.88

infrastruktur dan permukiman berjalan secara intensif pada koridor utama, sehingga membatasi luasan kelas Vegetasi Rapat pada angka terendah, yakni hanya 1.854,32 Ha.

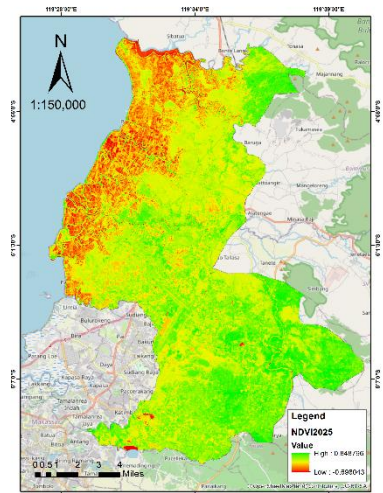
Perubahan signifikan terjadi pada tahun 2021, di mana kelas Vegetasi Rapat mengalami lonjakan ekspansif yang sangat masif menjadi 9.554,38 Ha, atau bertambah seluas 7.700,06 Ha dari tahun 2017. Peningkatan ini diiringi dengan penyusutan kelas Non-Vegetasi menjadi 4.514,09 Ha dan Vegetasi Tidak Rapat menjadi 10.542,50 Ha. Secara spasial, Gambar 1 (b) menunjukkan dominasi warna hijau tua yang meluas hingga ke kawasan peri-urban. Fenomena pertumbuhan vegetasi ini merupakan implikasi dari dinamika pemanfaatan lahan sekunder, di mana terdapat fase jeda konstruksi atau pembiaran lahan tidur (*land banking*) oleh pemilik komersial. Lahan-lahan kosong yang belum dibangun tersebut mengalami suksesi alami berupa pertumbuhan semak belukar dan vegetasi perintis secara cepat, sehingga meningkatkan kerapatan klorofil yang terekam oleh sensor satelit.



(a)



(b)

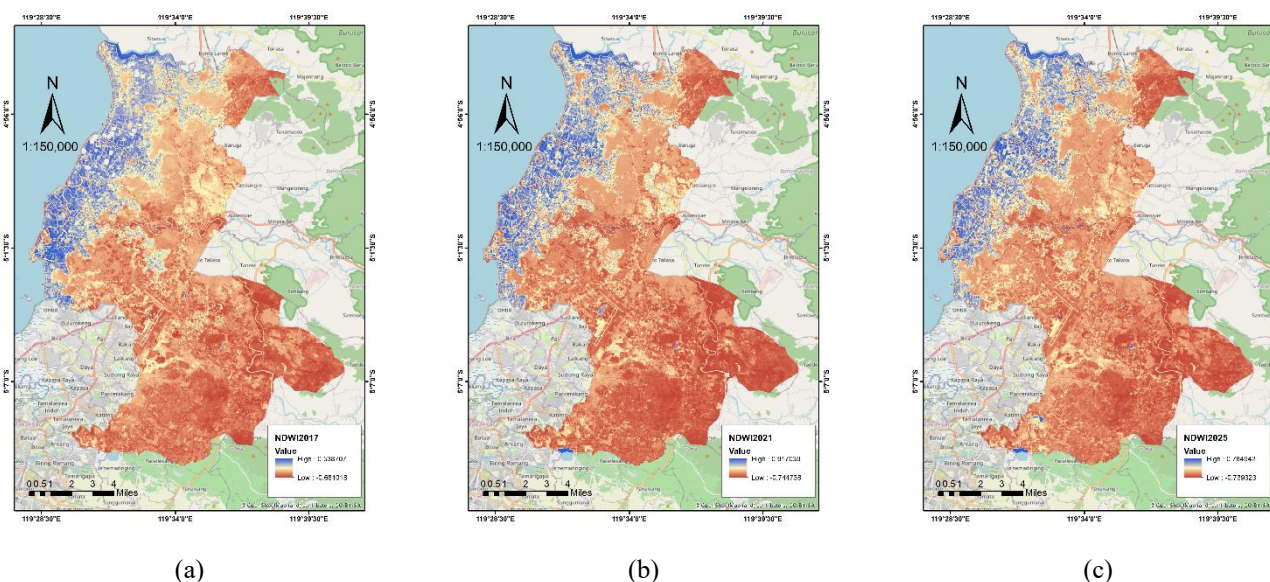


(c)

Gambar 1. Peta Distribusi Spasial NDVI Tahun (a) 2017, (b) 2021, dan (c) 2025

Berdasarkan Tabel 3, pada tahun 2017 wilayah studi secara kualitatif didominasi oleh kelas Vegetasi Tidak Rapat dengan luasan mencapai 14.307,18 Ha dan Vegetasi Cukup Rapat sebesar 12.085,47 Ha. Pada visualisasi peta Gambar 1 (a), zona non-vegetasi dan vegetasi tingkat rendah yang diwakili oleh rona warna merah hingga kuning mendominasi kawasan perkotaan sisi barat serta sepanjang jalur pergerakan utama. Kondisi ini mencerminkan fase awal ekspansi di mana konversi lahan untuk pembangunan

Pada tahun 2025, tren kerapatan vegetasi kembali berbalik seiring dengan percepatan pembangunan fisik secara struktural. Data Tabel 3 menunjukkan kelas Vegetasi Rapat menyusut kembali menjadi 6.381,88 Ha, sementara kelas Non-Vegetasi naik menjadi 5.039,08 Ha dan Vegetasi Tidak Rapat meningkat ke angka 12.831,18 Ha. Berdasarkan peta Gambar 1(c), degradasi kualitas vegetasi dicirikan oleh munculnya kembali penetrasi warna merah dan jingga secara acak yang mengfragmentasi koridor hijau tahun 2021. Hal ini disebabkan oleh optimalisasi lahan-lahan tidur tersebut, di mana proyek



Gambar 2. Peta Distribusi Spasial NDWI Tahun (a) 2017, (b) 2021, dan (c) 2025)

permukiman komersial, kawasan industri, dan perluasan jaringan jalan lingkaran luar mulai direalisasikan secara masif.

Secara keseluruhan, dinamika NDVI dari tahun 2017 hingga 2025 di wilayah studi mengonfirmasi pola konformitas antropogenik perkotaan, di mana pertumbuhan fisik kota selalu berkorelasi negatif terhadap keberadaan ruang hijau. Merujuk pada analisis serupa oleh [19], fluktuasi penurunan vegetasi yang terjadi pada tahun 2025 secara langsung akan mengurangi kapasitas transpirasi permukaan tanah. Hilangnya fungsi kendali termal alami dari vegetasi ini berpotensi besar memicu peningkatan suhu permukaan lokal (*Land Surface Temperature*) dan mempercepat intensifikasi fenomena *Urban Heat Island* (UHI) di koridor-koridor terbangun baru [19].

3.2 Normalized Difference Water Index (NDWI)

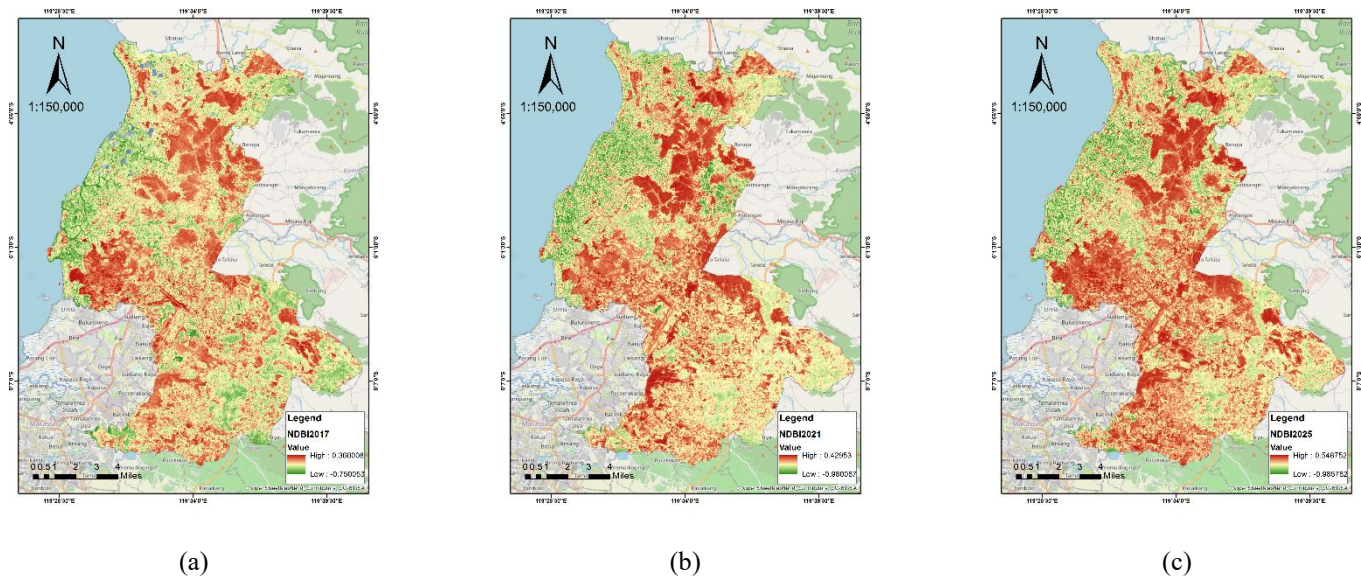
Analisis kelembapan permukaan dan sebaran elemen air di wilayah studi diidentifikasi menggunakan indeks spasial NDWI untuk melihat transformasi kondisi hidrologis permukaan pada tahun 2017, 2021, dan 2025. Berdasarkan hasil ekstraksi nilai piksel citra satelit multi-temporal, indeks NDWI menunjukkan fluktuasi nilai yang dinamis. Pada tahun 2017, nilai NDWI pada Gamb. 2(a) berkisar antara -0,68 hingga 0,54. Rentang nilai ini mengalami perluasan ambang batas atas pada Gamb. 2(b) tahun 2021 menjadi -0,74 hingga 0,92, sebelum akhirnya sedikit mengalami penyusutan pada Gamb. 2(c) tahun 2025 dengan kisaran nilai -0,74 hingga 0,78.

Secara spasial, karakteristik kelembapan permukaan pada tahun 2017 didominasi oleh nilai NDWI negatif yang

ditunjukkan oleh sebaran warna merah tua hingga jingga di hampir seluruh sektor barat dan tengah wilayah studi (Gamb. 2(a)). Pola ini berhimpitan langsung dengan kawasan bertipologi padat bangunan dan lahan terbuka. Material kedap air (*impervious surface*) pada kawasan terbangun tersebut membatasi retensi air tanah, sehingga nilai NDWI positif (warna biru) hanya terkonsentrasi pada badan air permanen seperti aliran hilir sungai dan perairan pesisir di sisi barat laut. Kondisi awal ini sejalan dengan karakteristik lingkungan urban padat di mana laju limpasan permukaan jauh lebih tinggi dibandingkan laju infiltrasi air ke dalam tanah [20].

Pada tahun 2021, visualisasi spasial pada Gamb. 2(b) menunjukkan perubahan gradasi warna yang cukup kontras, di mana dominasi warna merah tua mulai terfragmentasi oleh perluasan rona hijau muda hingga biru muda ke arah daratan perkotaan dan area peri-urban. Peningkatan nilai ambang atas NDWI hingga mencapai nilai tertinggi 0,92 mengindikasikan adanya retensi kelembapan permukaan tanah yang jauh lebih kuat. Jeda pematangan lahan (*land clearing*) memberikan fase akumulasi air tanah yang tidak terganggu (*undisturbed soil*). Kondisi ini, berpadu dengan munculnya tutupan vegetasi perintis bawah, secara efektif menekan laju penguapan langsung (*evaporative cooling*) dan menjaga kelembapan mikro tanah dari paparan radiasi matahari langsung secara kontinu [21].

Namun, tren kelembapan permukaan tersebut kembali mengalami degradasi pada tahun 2025. Berdasarkan peta Gamb. 2(c), wilayah tengah hingga sektor timur dan peri-urban kini didominasi oleh lingkungan urban yang kering, ditandai dengan kembalinya dominasi rona warna merah



Gambar 3. Peta Distribusi Spasial NDBI Tahun (a) 2017, (b) 2021, dan (c) 2025)

pekat dan jingga. Penurunan nilai maksimum NDWI dari 0,92 menjadi 0,78 mencerminkan hilangnya area-area lembap akibat akselerasi pembangunan fisik wilayah. Konversi lahan skala besar untuk perumahan, industri, dan pengerasan jaringan jalan baru menggunakan material semen serta aspal secara mekanis mengeliminasi kapasitas infiltrasi air hujan, sehingga permukaan tanah kehilangan kemampuan retensi air.

Secara keseluruhan, dinamika spasio-temporal NDWI ini membuktikan bahwa intensitas pembangunan fisik kota berbanding terbalik dengan stabilitas hidrologi permukaan. Selaras dengan argumen Whidayanti dkk.[19], pergeseran nilai NDWI yang semakin condong ke arah negatif pekat merupakan indikator runtuhnya fungsi pendinginan permukaan (*surface cooling capacity*) akibat ekspansi area kedap air. Ketiadaan cadangan air permukaan ini memicu konversi energi matahari langsung menjadi panas sensibel, yang secara simultan mempercepat pembentukan kantung panas perkotaan (*micro-Urban Heat Island*) di kawasan pertumbuhan baru [19].

3.3 Normalized Difference Built-up Index (NDBI)

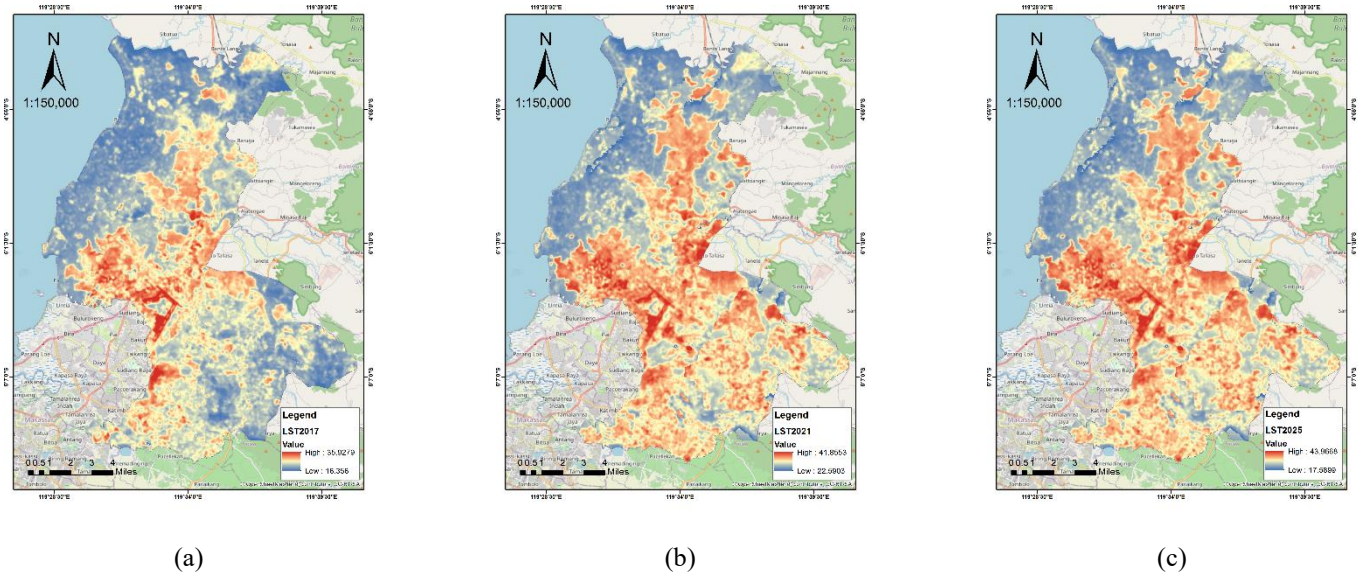
Analisis perluasan lahan terbangun dan intensitas artifisial di wilayah studi diidentifikasi menggunakan indeks spasial NDBI untuk memetakan dinamika perkembangan fisik perkotaan pada tahun 2017, 2021, dan 2025. Berdasarkan hasil ekstraksi nilai piksel citra satelit multi-temporal, indeks NDBI menunjukkan tren ekspansi ambang batas yang signifikan. Pada Gambar 3(a) tahun 2017, nilai NDBI berkisar antara -0,75 hingga 0,36. Rentang nilai ini bergeser pada Gamb. 3(b) tahun 2021 menjadi -0,98 hingga 0,43, dan terus meningkat secara

linear hingga mencapai rentang -0,99 hingga 0,55 pada tahun 2025 yang tertera pada Gambar 3(c).

Secara spasial, karakteristik sebaran lahan terbangun pada Gambar 3(a) tahun 2017 menunjukkan dominasi nilai positif (warna merah tua) yang mengelompok di kawasan barat perkotaan serta membentuk pola memanjang (*ribbon development*) sepanjang koridor transportasi regional. Konsentrasi spasial ini berhimpitan dengan zona non-vegetasi dan area berkadar NDWI rendah, yang merepresentasikan tingginya tarikan ekonomi dan konversi lahan untuk sektor perumahan serta komersial pada fase awal pengamatan.

Pada tahun 2021, visualisasi spasial pada Gambar 3(b) menunjukkan fenomena perkembangan kota yang khas, di mana meskipun nilai ambang atas NDBI meningkat menjadi 0,43, sebaran warna merah tua di beberapa kantung peri-urban tampak mengalami fragmentasi oleh rona hijau (nilai NDBI negatif). Pola spasial ini mengonfirmasi perkembangan tipe mosaik, di mana aktivitas konstruksi horizontal menyebar secara tidak merata (*urban sprawl*). Jeda waktu antara pematangan lahan dan pembangunan fisik bangunan memicu tumbuhnya vegetasi liar temporer yang menurunkan nilai reflektansi indeks bangunan efektif pada permukaan tanah secara spasial.

Namun, pada tahun 2025, pertumbuhan lahan terbangun mengalami eskalasi agresif dan konsolidasi penuh. Berdasarkan Gambar 3(c), area padat bangunan berwarna merah tua meluas secara masif di wilayah tengah, sektor timur, hingga peri-urban. Peningkatan nilai maksimum NDBI hingga 0,55 menjadi bukti fisik penyelesaian pembangunan infrastruktur, di mana lahan transisi yang sebelumnya terfragmentasi telah dikonversi



Gambar 4. Peta Distribusi Land Surface Temperature (LST) di Wilayah Barat Kabupaten Maros pada Periode (a) 2017, (b) 2021, dan (c) 2025

sepenuhnya menjadi permukiman permanen, kawasan pergudangan, dan jaringan jalan.

Secara keseluruhan, dinamika spasio-temporal NDBI 2017–2025 menegaskan indeks urban ini bertindak sebagai pendorong utama (*driving factor*) kerusakan ekologis lokal. Konformitas ini sejalan dengan tesis Whidayanti dkk. [1], di mana peningkatan indeks bangunan berkorelasi kuat dengan penurunan kerapatan vegetasi (NDVI) dan kelembapan permukaan (NDWI). Peningkatan NDBI mengindikasikan penggantian material alami menjadi permukaan artifisial kedap air [22]. Akibatnya, pelepasan radiasi panas sensibel dari bangunan mempercepat retensi suhu tinggi permukaan, yang memicu eskalasi fenomena *Urban Heat Island* (UHI) mikro di area pertumbuhan tersebut [19].

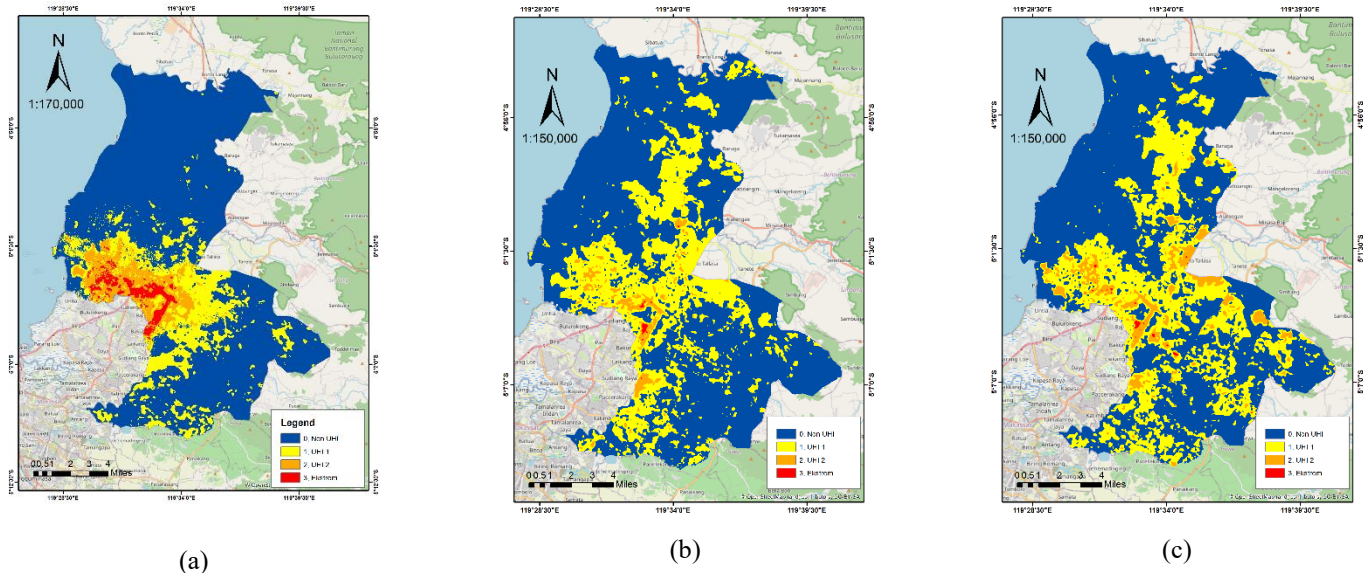
3.4 Land Surface Temperature (LST)

Distribusi LST di wilayah barat Kabupaten Maros pada ketiga periode pengamatan menunjukkan pola spasial yang cukup jelas, di mana kawasan dengan dominasi lahan terbangun memperlihatkan suhu permukaan yang lebih tinggi dibandingkan kawasan perairan dan vegetasi. Pola ini konsisten dengan berbagai penelitian UHI di kota-kota besar Indonesia yang menunjukkan bahwa ekspansi kawasan terbangun secara langsung berkontribusi pada peningkatan LST di wilayah perkotaan ([23][24][25]. Hasil pengolahan citra Landsat-8 untuk ketiga periode disajikan pada Gambar 4.

Pada tahun 2017 (Gambar 4a), nilai LST di wilayah penelitian berkisar antara 16,36°C hingga 35,93°C. Suhu rendah terdistribusi di bagian barat laut yang merupakan kawasan perairan Selat Makassar, serta di kawasan vegetasi

di bagian timur. Sebaliknya, suhu tinggi terkonsentrasi di bagian tengah dan selatan wilayah penelitian, khususnya di sekitar kawasan permukiman dan koridor infrastruktur di Kecamatan Mandai, Moncongloe, dan sebagian Marusu. Pola konsentrasi suhu tinggi di kawasan permukiman dan infrastruktur ini sesuai dengan temuan [26] yang menganalisis fenomena UHI di Kota Makassar periode 1993 sampai 2021 dan menemukan bahwa kawasan dengan kepadatan bangunan tinggi secara konsisten menghasilkan suhu permukaan lebih tinggi dibandingkan kawasan sekitarnya. Kondisi ini juga sesuai dengan prinsip bahwa permukaan terbangun meningkatkan penyerapan dan penyimpanan panas secara signifikan [2].

Pada tahun 2021 (Gambar 4b), nilai LST meningkat dengan rentang antara 22,59°C hingga 41,86°C. Peningkatan nilai minimum dan maksimum LST dibandingkan 2017 mengindikasikan pemanasan termal permukaan yang lebih merata di seluruh wilayah penelitian. Secara spasial, area dengan suhu tinggi mengalami perluasan dibandingkan 2017, tidak lagi terpusat di koridor permukiman saja, tetapi mulai merambah ke wilayah pertanian di bagian timur dan selatan. Ramadhan dkk. (2023) dalam penelitiannya tentang pengaruh perubahan penggunaan lahan terhadap suhu permukaan kawasan sub-urban Kota Makassar menemukan pola serupa, di mana konversi lahan pertanian dan vegetasi menjadi kawasan terbangun di wilayah pinggiran kota berkorelasi positif dengan peningkatan suhu permukaan yang cukup signifikan. Kondisi di wilayah barat Kabupaten Maros yang berbatasan langsung dengan Kota Makassar menunjukkan dinamika yang sebanding dengan temuan tersebut. Selain itu, perbedaan periode komposit citra yang digunakan yaitu Agustus sampai September 2021 yang merupakan bulan



Gambar 5. Peta Distribusi Urban Heat Island (UHI) di Wilayah Barat Kabupaten Maros pada Periode (a) 2017, (b) 2021, dan (c) 2025

kemarau dengan intensitas radiasi matahari lebih tinggi turut berkontribusi pada nilai LST yang lebih tinggi dibandingkan 2017 [8].

Pada tahun 2025 (Gambar 4c), nilai LST mencapai rentang tertinggi sepanjang periode penelitian, yaitu antara 17,59°C hingga 43,97°C. Nilai maksimum 43,97°C merupakan yang tertinggi dari seluruh periode dan menggambarkan intensifikasi panas permukaan yang cukup signifikan. Secara spasial, pola distribusi suhu tinggi pada 2025 menunjukkan perluasan area panas yang lebih luas dibandingkan 2021, terutama di kawasan selatan dan barat daya wilayah penelitian. Meskipun demikian, kawasan perairan di bagian barat laut tetap mempertahankan karakteristik suhu rendah yang konsisten pada ketiga periode, yang menegaskan peran badan air sebagai penstabil termal permukaan [27].

Secara keseluruhan, tren kenaikan nilai maksimum LST dari 35,93°C pada 2017 menjadi 41,86°C pada 2021 dan 43,97°C pada 2025 menunjukkan adanya peningkatan tekanan termal yang progresif di wilayah barat Kabupaten Maros selama periode penelitian. Tren ini sebanding dengan yang dilaporkan oleh [24] di Kota Surabaya yang juga mencatat kenaikan LST secara konsisten sejalan dengan pertumbuhan kawasan terbangun dalam rentang waktu multi-temporal.

3.5 Urban Heat Island (UHI)

Distribusi UHI di wilayah barat Kabupaten Maros pada periode 2017, 2021, dan 2025 menunjukkan dinamika spasio-temporal yang bervariasi antar periode, mencerminkan perubahan kondisi termal permukaan dan tutupan lahan yang terjadi selama kurun waktu penelitian. Fenomena UHI di kawasan yang mengalami tekanan urbanisasi tinggi seperti wilayah barat Kabupaten Maros ini

umum dijumpai di berbagai kota besar Indonesia, sebagaimana dilaporkan oleh [28] di Kota Semarang dan [23] di Kota Surakarta yang keduanya menunjukkan intensifikasi UHI seiring dengan bertambahnya luas kawasan terbangun. Peta distribusi UHI pada ketiga periode disajikan pada Gambar 5.

Pada tahun 2017 (Gambar 5a), area Non-UHI mendominasi seluruh bagian utara dan barat wilayah penelitian yang merupakan kawasan perairan, serta sebagian wilayah timur yang masih memiliki tutupan vegetasi lebih rapat. Area UHI kelas 1 tersebar di kawasan transisi antara lahan pertanian dan permukiman, terutama di bagian tengah dan selatan wilayah. Area UHI kelas 2 teridentifikasi di kawasan permukiman yang lebih padat, sedangkan area UHI Ekstrem terkonsentrasi pada titik-titik tertentu di kawasan Mandai dan sekitar koridor Sudiang yang merupakan kawasan permukiman dan infrastruktur berkepadatan tinggi. Pola ini konsisten dengan temuan [8] yang menunjukkan bahwa intensitas UHI tertinggi umumnya berasosiasi dengan kawasan terbangun berkepadatan tinggi, serta sejalan dengan [26] yang melaporkan bahwa kecamatan-kecamatan dengan kepadatan bangunan dan aktivitas perkotaan tertinggi di Kota Makassar secara konsisten menjadi pusat intensitas UHI tertinggi.

Pada tahun 2021 (Gambar 5b), distribusi UHI mengalami perubahan yang cukup mencolok. Area Non-UHI masih mendominasi wilayah perairan di bagian utara, namun areanya tampak lebih sempit dibandingkan 2017. Yang paling terlihat adalah perluasan area UHI kelas 1 yang sangat luas, mencakup hampir seluruh wilayah daratan bagian tengah dan selatan. Di sisi lain, area UHI Ekstrem pada tahun 2021 tampak lebih terbatas dibandingkan 2017, dengan hotspot yang lebih terlokalisasi. Perluasan UHI kelas

1 yang masif pada 2021 mengindikasikan bahwa tekanan panas perkotaan tidak hanya menguat di pusat permukiman, tetapi mulai menyebar ke wilayah yang sebelumnya masih berkarakter rural, seiring proses suburbanisasi yang berlangsung di pinggiran Kota Makassar [29].

Pada tahun 2025 (Gambar 5c), distribusi UHI menunjukkan intensifikasi yang lebih jelas dibandingkan dua periode sebelumnya. Area UHI kelas 1 tetap mendominasi wilayah daratan, sementara area UHI kelas 2 mengalami perluasan yang lebih nyata dibandingkan 2021, terutama di kawasan barat daya yang berbatasan dengan Kota Makassar. Area UHI Ekstrem kembali teridentifikasi di beberapa titik hotspot yang umumnya berimpit dengan kawasan permukiman dan infrastruktur berkepadatan tinggi. Tren peningkatan luas area UHI intensitas lebih tinggi pada 2025 ini sejalan dengan peningkatan LST maksimum yang dibahas pada subbab sebelumnya. [25] dalam penelitiannya di Kota Palembang melaporkan pola serupa di mana ekspansi kawasan terbangun yang berlangsung secara masif dalam satu dekade terakhir menghasilkan perluasan area UHI intensitas sedang hingga tinggi secara progresif, serta mengonfirmasi bahwa ekspansi kawasan terbangun berperan sebagai pendorong utama intensifikasi UHI [1][30].

Secara spasial, variasi intensitas UHI antar kecamatan dalam AOI juga terlihat konsisten selama ketiga periode. Kecamatan Mandai dan Moncongloe secara konsisten menunjukkan intensitas UHI yang lebih tinggi dibandingkan kecamatan lainnya, yang sesuai dengan karakteristiknya sebagai kawasan yang paling terintegrasi dengan sistem perkotaan Makassar. Sebaliknya, bagian timur wilayah penelitian yang masih memiliki tutupan vegetasi relatif lebih rapat cenderung menunjukkan intensitas UHI yang lebih rendah. Pola perbedaan intensitas UHI antara kawasan urban inti dan kawasan pinggiran dengan tutupan vegetasi lebih tinggi ini juga dilaporkan oleh [23]) di Surakarta dan [28] di Semarang, yang menguatkan argumen bahwa vegetasi berperan sebagai peredam panas perkotaan melalui proses evapotranspirasi [2].

TABEL 4. TABEL LUAS AREA URBAN HEAT ISLAND (UHI) TAHUN 2017, 2021, DAN 2025

Kelas UHI	2017 (Ha)	2021 (Ha)	2025 (Ha)
Non-UHI (< 0)	28,065.31	26,405.52	24,755.75
UHI 1 (0–3)	6,556.52	11,014.39	11,612.67
UHI 2 (3–6)	2,564.96	861.26	1,940.17
UHI Ekstrem (> 6)	866.12	40.05	44.08

Berdasarkan Tabel 4, luas area Non-UHI mengalami penurunan secara bertahap selama periode penelitian. Pada tahun 2017, luas area Non-UHI tercatat sebesar 28.065,31 Ha, kemudian berkurang menjadi 26.405,52 Ha pada 2021, dan kembali menurun menjadi 24.755,75 Ha pada 2025. Secara keseluruhan, terjadi pengurangan luas sebesar 3.309,56 Ha dalam kurun waktu delapan tahun. Penurunan ini menunjukkan bahwa sebagian wilayah yang sebelumnya tidak termasuk kategori Urban Heat Island (UHI) mulai mengalami peningkatan suhu permukaan, yang diduga berkaitan dengan bertambahnya kawasan terbangun sebagaimana terlihat pada hasil analisis perubahan tutupan lahan.

Luas area UHI kelas 1 mengalami peningkatan yang paling besar dibandingkan kelas lainnya. Pada tahun 2017, luasnya mencapai 6.556,52 Ha, kemudian meningkat menjadi 11.014,39 Ha pada 2021 atau sekitar 67,98% lebih luas dibandingkan tahun 2017. Pada tahun 2025, luas area ini kembali bertambah menjadi 11.612,67 Ha. Peningkatan yang cukup besar tersebut menunjukkan bahwa wilayah dengan tingkat UHI ringan hingga sedang semakin meluas dan menggantikan area yang sebelumnya masih tergolong Non-UHI.

Berbeda dengan kelas 1, luas area UHI kelas 2 memperlihatkan pola perubahan yang tidak tetap. Pada tahun 2017 luasnya mencapai 2.564,96 Ha, kemudian menurun menjadi 861,26 Ha pada 2021, sebelum kembali meningkat menjadi 1.940,17 Ha pada 2025. Perubahan yang bersifat fluktuatif ini mengindikasikan bahwa perkembangan UHI kelas 2 tidak hanya dipengaruhi oleh perubahan penggunaan lahan, tetapi juga kemungkinan dipengaruhi oleh variasi kondisi meteorologis pada masing-masing tahun pengamatan [8].

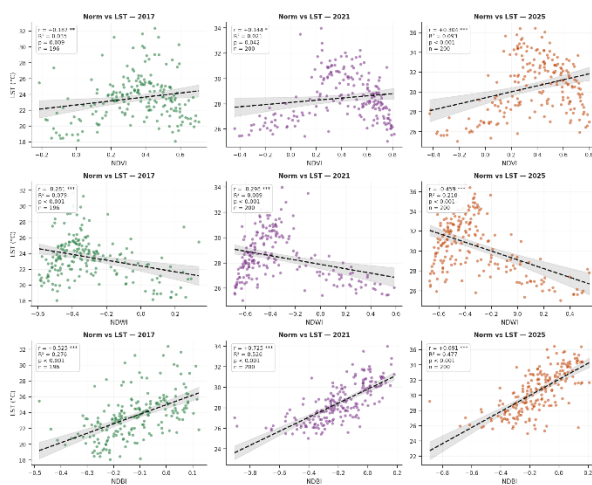
Sementara itu, luas area UHI Ekstrem mengalami penurunan yang sangat besar dari 866,12 Ha pada tahun 2017 menjadi 40,05 Ha pada 2021, kemudian sedikit meningkat menjadi 44,08 Ha pada 2025. Penurunan tersebut kemungkinan berkaitan dengan perbedaan data citra yang digunakan. Citra tahun 2017 disusun menggunakan komposit median selama satu tahun penuh sehingga berpotensi merepresentasikan kondisi suhu tinggi yang lebih luas. Sebaliknya, citra tahun 2021 hanya menggunakan komposit pada periode Agustus–September sehingga cakupan area bersuhu sangat tinggi menjadi lebih terbatas. Kondisi ini menunjukkan bahwa perbedaan waktu akuisisi citra dapat memengaruhi hasil estimasi suhu permukaan dan klasifikasi UHI, sebagaimana dijelaskan oleh [8].

Secara umum, hasil analisis menunjukkan adanya kecenderungan berkurangnya area Non-UHI yang diikuti oleh bertambahnya luas area UHI kelas 1 selama periode 2017–2025. Pola tersebut mengindikasikan bahwa fenomena Urban Heat Island di wilayah barat Kabupaten Maros semakin berkembang dari waktu ke waktu. Hasil ini juga mendukung berbagai penelitian sebelumnya yang

menyebutkan bahwa perluasan kawasan terbangun merupakan salah satu faktor utama yang mendorong peningkatan suhu permukaan serta memperluas sebaran UHI di wilayah perkotaan yang terus berkembang ([23][24].

3.6 Korelasi NDVI, NDWI, dan NDBI terhadap LST

Analisis korelasi Pearson antara indeks spektral (NDVI, NDWI, NDBI) dan LST dilakukan menggunakan titik sampel acak sebanyak 196 titik untuk tahun 2017, 200 titik untuk tahun 2021, dan 200 titik untuk tahun 2025 yang diekstraksi dari dalam batas AOI. Hasil analisis disajikan dalam bentuk scatter plot pada Gambar 6.



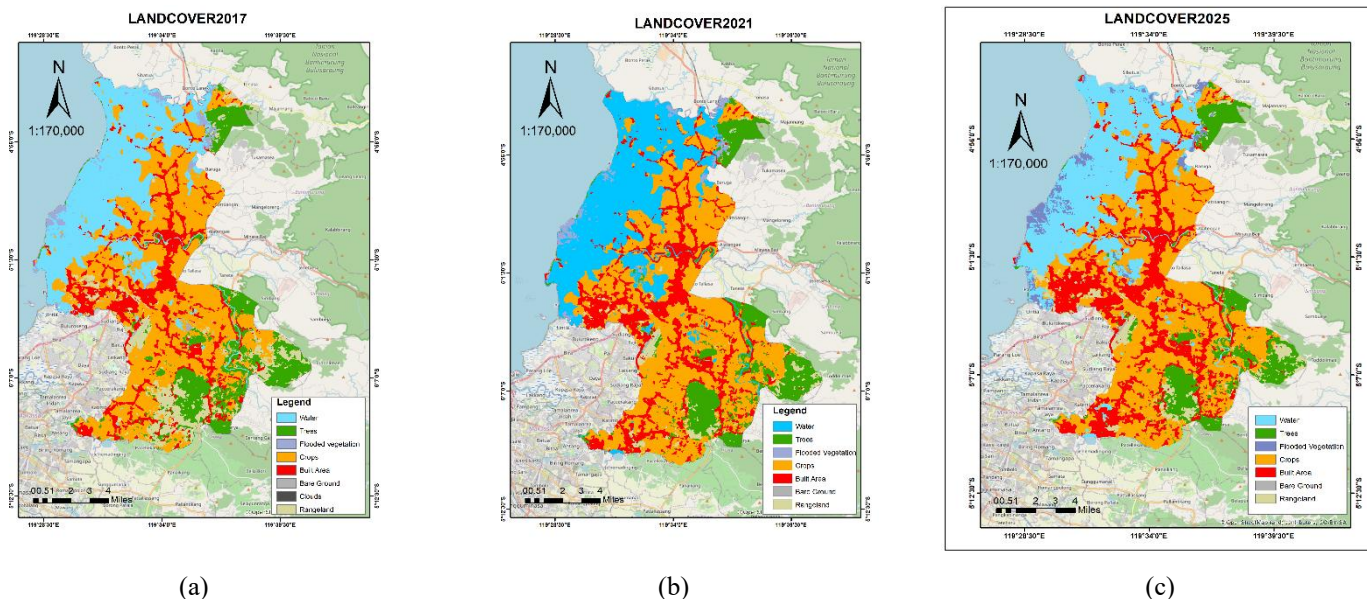
Gambar 6. Scatter Plot Korelasi NDVI, NDWI, dan NDBI terhadap Land Surface Temperature (LST) di Wilayah Barat Kabupaten Maros Periode 2017, 2021, dan 2025

Korelasi NDVI dengan LST (Gambar 6, baris pertama) menunjukkan arah positif pada seluruh periode pengamatan, dengan nilai $r = +0,187$ ($p = 0,009$) pada 2017, $r = +0,144$ ($p = 0,042$) pada 2021, dan $r = +0,304$ ($p < 0,001$) pada 2025. Hasil ini signifikan secara statistik namun dengan kekuatan korelasi yang tergolong sangat lemah hingga lemah (Mukaka, 2012). Arah hubungan positif antara NDVI dan LST pada penelitian ini berbeda dari temuan beberapa studi yang umumnya melaporkan korelasi negatif [8][11]. Pola ini dapat dijelaskan oleh beberapa faktor. Pertama, wilayah penelitian didominasi oleh lahan pertanian di mana vegetasi pertanian, terutama sawah pada fase pertumbuhan aktif, dapat menghasilkan nilai NDVI yang tinggi namun secara bersamaan memiliki LST yang relatif tinggi akibat emisivitas permukaan tanah basah yang terpapar langsung. Kedua, sebagaimana dilaporkan oleh [31], hubungan antara vegetasi dan LST di kawasan dengan komposisi tutupan lahan yang heterogen tidak selalu bersifat linear dan dapat dipengaruhi oleh jenis

vegetasi, kelembapan tanah, dan kondisi atmosfer saat akuisisi citra.

Korelasi NDWI dengan LST (Gambar 6, baris kedua) menunjukkan arah negatif yang konsisten pada seluruh periode pengamatan, dengan nilai $r = -0,281$ ($p < 0,001$) pada 2017, $r = -0,298$ ($p < 0,001$) pada 2021, dan $r = -0,459$ ($p < 0,001$) pada 2025. NDWI dihitung menggunakan formula McFeeters (1996) berbasis band Green dan NIR, yang dirancang untuk mendeteksi keberadaan badan air terbuka. Kekuatan korelasi NDWI terhadap LST tergolong lemah hingga sedang berdasarkan klasifikasi [18], dan menunjukkan tren penguatan dari 2017 ke 2025 yang mengindikasikan semakin besarnya peran kontras antara badan air dan lahan kering dalam memengaruhi distribusi suhu permukaan di wilayah penelitian. Kawasan pesisir dan perairan di bagian barat laut AOI yang memiliki nilai NDWI tinggi secara konsisten menunjukkan LST yang rendah, sejalan dengan prinsip bahwa badan air memiliki kapasitas panas yang tinggi sehingga tidak menghasilkan panas permukaan yang berlebihan [27] [14]. [9] dalam penelitiannya di Jakarta Selatan juga melaporkan bahwa NDWI menunjukkan korelasi negatif yang konsisten terhadap LST, meskipun kekuatannya bervariasi antar tahun tergantung pada kondisi kelembapan permukaan dan ketersediaan badan air.

Korelasi NDBI dengan LST (Gambar 6, baris ketiga) menunjukkan arah positif yang kuat dan konsisten, dengan nilai $r = +0,525$ ($p < 0,001$) pada 2017, $r = +0,725$ ($p < 0,001$) pada 2021, dan $r = +0,691$ ($p < 0,001$) pada 2025. Kekuatan korelasi NDBI terhadap LST ini tergolong sedang hingga kuat berdasarkan klasifikasi [18], dan merupakan korelasi terkuat di antara ketiga indeks yang diuji pada seluruh periode pengamatan. Hasil ini mengonfirmasi bahwa kepadatan kawasan terbangun merupakan faktor yang paling konsisten dalam meningkatkan LST di wilayah penelitian. [9] melaporkan bahwa NDBI secara konsisten menunjukkan korelasi positif terkuat terhadap LST di Jakarta Selatan dengan nilai $r = 0,55$, dan menyimpulkan bahwa ekspansi kawasan terbangun merupakan variabel dominan yang mendorong intensifikasi UHI di kawasan perkotaan. Temuan di wilayah barat Kabupaten Maros menunjukkan pola yang sebanding, bahkan dengan nilai korelasi yang lebih tinggi pada 2021 dan 2025, yang mengindikasikan semakin kuatnya pengaruh kawasan terbangun terhadap dinamika termal permukaan seiring bertambahnya luas area terbangun di wilayah penelitian. Pola ini juga konsisten dengan [23] di Surakarta dan [25] di Palembang yang keduanya melaporkan korelasi positif signifikan antara indeks kawasan terbangun dan LST.



Gambar 7. Peta Tutupan Lahan (Land Cover) di Wilayah Barat Kabupaten Maros pada Periode (a) 2017, (b) 2021, dan (c) 2025

Secara keseluruhan, hasil analisis korelasi menunjukkan bahwa NDBI merupakan variabel yang paling dominan dalam menjelaskan variasi LST di wilayah barat Kabupaten Maros dengan kekuatan korelasi tertinggi di antara ketiga indeks, diikuti oleh NDWI yang menunjukkan korelasi negatif konsisten meski dengan kekuatan yang lebih lemah, sementara pengaruh NDVI terhadap LST relatif lemah dan menunjukkan pola positif yang berbeda dari ekspektasi teoritis umum akibat dominasi lahan pertanian di wilayah penelitian. Temuan ini menunjukkan bahwa pengendalian ekspansi kawasan terbangun dan pelestarian badan air serta ekosistem pesisir menjadi prioritas penting dalam upaya mitigasi UHI di wilayah penelitian [6].

3.7 Tutupan Lahan (Land Cover)

Analisis tutupan lahan menggunakan data ESRI Land Cover berbasis klasifikasi citra Sentinel-2 resolusi 50 meter digunakan sebagai referensi kontekstual untuk memahami perubahan penggunaan lahan di wilayah barat Kabupaten Maros pada periode 2017, 2021, dan 2025. Data ini merupakan produk klasifikasi tervalidasi secara global [32] dan tidak diturunkan dari perhitungan indeks spektral, sehingga berfungsi sebagai pelengkap dan penguat interpretasi terhadap hasil analisis LST, UHI, dan korelasi indeks spektral yang telah dibahas sebelumnya. Peta tutupan lahan ketiga periode disajikan pada Gambar 7.

Berdasarkan hasil visualisasi pada Gambar 7a, 7b, dan 7c, wilayah penelitian secara konsisten didominasi oleh kelas lahan pertanian yang tersebar di bagian tengah hingga selatan AOI, serta badan air yang mendominasi bagian barat laut. Kelas pohon ditemukan di bagian timur dan tenggara

wilayah, berasosiasi dengan kawasan perbukitan di sekitar Kecamatan Tanralili dan Moncongloe.

Perubahan yang paling terlihat terjadi pada kelas kawasan terbangun yang ditunjukkan dengan warna merah. Pada tahun 2017 (Gambar 7a), kawasan terbangun terkonsentrasi di bagian barat daya wilayah penelitian, khususnya di sekitar Kecamatan Mandai dan Moncongloe yang berbatasan langsung dengan Kota Makassar. Pada tahun 2021 (Gambar 7b), kawasan terbangun mengalami perluasan ke arah utara dan timur, melingkupi wilayah Kecamatan Marusu dan sebagian Lau. Kondisi ini sesuai dengan temuan penelitian perubahan tutupan lahan kawasan terbangun Kota Makassar dengan citra Sentinel-2 periode 2017 sampai 2021 yang menunjukkan ekspansi kawasan terbangun ke arah pinggiran kota secara masif selama periode tersebut [29]. Pada tahun 2025 (Gambar 7c), perluasan kawasan terbangun semakin masif dengan kenampakan yang jauh lebih luas dibandingkan dua periode sebelumnya, terutama di wilayah Mandai, Moncongloe, dan Turikale.

Pola ekspansi kawasan terbangun yang konsisten selama tiga periode ini memperkuat interpretasi terhadap hasil analisis LST dan UHI yang menunjukkan tren peningkatan suhu permukaan dan intensifikasi panas perkotaan di wilayah yang sama. Perubahan tutupan lahan dari pertanian dan vegetasi menjadi kawasan terbangun di wilayah pinggiran Kota Makassar ini merupakan bagian dari proses pertumbuhan kawasan Metropolitan Mamminasata yang berlangsung secara masif dalam satu dekade terakhir [33], dan menjadi faktor struktural yang mendasari dinamika termal perkotaan yang teridentifikasi dalam penelitian ini.

IV. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa wilayah barat Kabupaten Maros mengalami intensifikasi fenomena Urban Heat Island yang progresif selama periode 2017 hingga 2025, yang ditandai dengan peningkatan nilai LST maksimum dari 35,93°C menjadi 43,97°C, penurunan area Non-UHI dari 28.065,31 Ha menjadi 24.755,75 Ha, serta perluasan area UHI kelas 1 yang signifikan dari 6.556,52 Ha menjadi 11.612,67 Ha. Analisis korelasi Pearson mengonfirmasi bahwa NDWI dan NDBI merupakan variabel yang paling dominan dalam menjelaskan variasi LST, dengan korelasi masing-masing yang kuat dan konsisten pada seluruh periode pengamatan, sementara NDVI menunjukkan korelasi positif lemah yang berbeda dari ekspektasi teoritis akibat karakteristik dominasi lahan pertanian di wilayah penelitian. Secara keseluruhan, ekspansi kawasan terbangun yang pesat seiring pertumbuhan kawasan Metropolitan Mamminasata, disertai dengan berkurangnya tutupan vegetasi dan degradasi badan air, menjadi faktor struktural utama yang mendorong intensifikasi UHI di wilayah barat Kabupaten Maros, sehingga pengendalian alih fungsi lahan dan peningkatan ruang terbuka hijau menjadi rekomendasi prioritas dalam upaya mitigasi panas perkotaan di wilayah ini.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada United States Geological Survey (USGS) atas penyediaan data citra satelit Landsat-8 OLI/TIRS Collection 2 Level-1 yang dapat diakses secara terbuka melalui portal Earth Explorer (earthexplorer.usgs.gov), kepada Google LLC atas penyediaan platform Google Earth Engine yang digunakan dalam seluruh proses pengolahan data spasial, serta kepada Esri Inc. atas penyediaan produk ESRI Land Cover berbasis Sentinel-2 yang digunakan sebagai data tutupan lahan referensi dalam penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Q. Weng, "A remote sensing/GIS evaluation of urban expansion and its impact on surface temperature in the Zhujiang Delta, China," *Int. J. Remote Sens.*, vol. 22, no. 10, pp. 1999–2014, Jan. 2001, doi: 10.1080/713860788.
- [2] 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: [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00079-8](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00079-8).
- [3] T. Oke, "The energetic basis of urban heat island," *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 108, pp. 1–24, Jan. 1982, doi: 10.1002/qj.49710845502.
- [4] K. Deilami, Md. Kamruzzaman, and Y. Liu, "Urban heat island effect: A systematic review of spatio-temporal factors, data, methods, and mitigation measures," *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 67, pp. 30–42, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.12.009>.
- [5] M. L. Imhoff, P. Zhang, R. E. Wolfe, and L. Bounoua, "Remote sensing of the urban heat island effect across biomes in the continental USA," *Remote Sens. Environ.*, vol. 114, no. 3, pp. 504–513, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.10.008>.
- [6] M. Santamouris, "Regulating the damaged thermostat of the cities—Status, impacts and mitigation challenges," *Energy Build.*, vol. 91, pp. 43–56, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.01.027>.
- [7] M. A. Lasaiba, "Perkotaan dalam Perspektif Kemiskinan, Permukiman Kumuh dan Urban Heat Island (Suatu Telaah Literatur)," *GEOFORUM*, vol. 1, no. 2, pp. 63–72, Dec. 2022, doi: 10.30598/geoforumvol1iss2pp63-72.
- [8] M. S. An-Nizami, N. F. Rahmadani, A. I. Alfarossi, and I. R. Nugraheni, "Analisis Spasio-Temporal Hubungan Vegetasi, Land Surface Temperature, dan Urban Heat Island di Jakarta Sebelum, Saat, dan Setelah Pandemi COVID-19," *Jurnal Geosains dan Remote Sensing*, vol. 7, no. 1, May 2026, doi: 10.23960/jgrs.ft.unila.436.
- [9] E. Whidayanti, M. Syauqi Labib, N. Rizki Novani, S. Nuzla Hazani, and M. Akyas, "Analysis of Land Cover Change in Relation to the Urban Heat Island Phenomenon using Remote Sensing and GIS Technology in South Jakarta, Indonesia," *Journal of Geographical Sciences and Education*, vol. 03, no. 3, 2025, doi: 10.69606/geography.v3i3.291.
- [10] S. Sultana and A. N. V. Satyanarayana, "Urban heat island intensity during winter over metropolitan cities of India using remote-sensing techniques: impact of urbanization," *Int. J. Remote Sens.*, vol. 39, no. 20, pp. 6692–6730, Oct. 2018, doi: 10.1080/01431161.2018.1466072.
- [11] Q. Weng, D. Lu, and J. Schubring, "Estimation of land surface temperature–vegetation abundance relationship for urban heat island studies," *Remote Sens. Environ.*, vol. 89, no. 4, pp. 467–483, 2004, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.11.005>.
- [12] C. J. Tucker, "Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation," *Remote Sens. Environ.*, vol. 8, no. 2, pp. 127–150, 1979, doi: [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0).
- [13] "Landsat 8 (L8) Data Users Handbook," 2019.
- [14] S. K. McFEETERS, "The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features," *Int. J. Remote Sens.*, vol. 17, no. 7, pp. 1425–1432, May 1996, doi: 10.1080/01431169608948714.

- [15] Y. Zha, J. Gao, and S. Ni, "Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery," *Int. J. Remote Sens.*, vol. 24, no. 3, pp. 583–594, Jan. 2003, doi: 10.1080/01431160304987.
- [16] A. Ngie, K. Abutaleb, F. Ahmed, A. Darwish, and M. Ahmed, "Assessment of urban heat island using satellite remotely sensed imagery: A review," *S. Afr. Geogr. J.*, vol. 96, pp. 198–214, Jul. 2014, doi: 10.1080/03736245.2014.924864.
- [17] J. Tsou, J. Zhuang, Y. Li, and Y. Zhang, "Urban Heat Island Assessment Using the Landsat 8 Data: A Case Study in Shenzhen and Hong Kong," *Urban Science*, vol. 1, no. 1, p. 10, Mar. 2017, doi: 10.3390/urbansci1010010.
- [18] M. Mukaka, "Statistics Corner: A guide to appropriate use of Correlation coefficient in medical research," *Malawi Med. J.*, vol. 24, pp. 69–71, Sep. 2012.
- [19] E. Whidayanti, M. Syauqi Labib, N. Rizki Novani, S. Nuzla Hazani, and M. Akyas, "Analysis of Land Cover Change in Relation to the Urban Heat Island Phenomenon using Remote Sensing and GIS Technology in South Jakarta, Indonesia," *Journal of Geographical Sciences and Education*, vol. 03, no. 3, 2025, doi: 10.69606/geography.v3i3.291.
- [20] B.-C. Gao, "Naval Research Laborator. 4555 Overlook Ae," SW, 1996.
- [21] S. Safdar, I. Younes, A. Ahmad, and S. Sastry, "A comprehensive review of spatial distribution modeling of plant species in mountainous environments: Implications for biodiversity conservation and climate change assessment," Jan. 01, 2025, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.kjs.2024.100337.
- [22] Y. Zha, J. Gao, and S. Ni, "Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery," *Int. J. Remote Sens.*, vol. 24, pp. 583–594, 2003, doi: 10.1080/01431160210144570.
- [23] A. K. Putra, A. Sukmono, and B. Sasmito, "Analisis Hubungan Perubahan Tutupan Lahan terhadap Suhu Permukaan Terkait Fenomena Urban Heat Island Menggunakan Citra Landsat (Studi Kasus: Kota Surakarta)," 2018.
- [24] A. Pratiwi and L. Jaelani, "Analisis Perubahan Distribusi Urban Heat Island (UHI) di Kota Surabaya Menggunakan Citra Satelit Landsat Multitemporal," *Jurnal Teknik ITS*, vol. 9, Jan. 2021, doi: 10.12962/j23373539.v9i2.53982.
- [25] R. Agusman, A. Maulana, R. Hutagaol, C. Vieri, and R. Toha, "Fenomena Urban Heat Island di Kota Palembang Berdasarkan Land Surface Temperature (LST) dan Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)," *Jurnal Pembangunan Wilayah dan Kota*, vol. 21, Jun. 2025, doi: 10.14710/pwk.v21i2.61269.
- [26] S. Aldiansyah and F. Wardani, "Analisis Spasio-Temporal Fenomena Urban Heat Island dan Hubungannya terhadap Aspek Fisik di Kota Makassar (1993–2021)," 2023.
- [27] C. Wu *et al.*, "Understanding the relationship between urban blue infrastructure and land surface temperature," *Science of The Total Environment*, vol. 694, p. 133742, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133742>.
- [28] A. Delarizka and B. Sasmito, "Analisis Fenomena Pulau Bahang (Urban Heat Island) di Kota Semarang Berdasarkan Hubungan antara Perubahan Tutupan Lahan dengan Suhu Permukaan Menggunakan Citra Multi Temporal Landsat," 2016. Accessed: Jun. 28, 2026. [Online]. Available: <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/geodesi/article/view/13935>
- [29] M. Ramadhan, R. Rahman, and E. Rasyidi, "Analisis Pengaruh Perubahan Penggunaan Lahan Terhadap Perubahan Suhu Permukaan pada Kawasan Sub Urban Kota Makassar: (Studi Kasus : Kecamatan Biringkanaya dan Kecamatan Tamalanrea)," *Journal of Urban Planning Studies*, vol. 3, pp. 236–245, Jul. 2023, doi: 10.35965/jups.v3i3.401.
- [30] C. D. Putra, A. Ramadhani, and E. Fatimah, "Increasing Urban Heat Island area in Jakarta and it's relation to land use changes," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Institute of Physics, Apr. 2021. doi: 10.1088/1755-1315/737/1/012002.
- [31] T. C. Chakraborty, C. Sarangi, and X. Lee, "Reduction in human activity can enhance the urban heat island: Insights from the COVID-19 lockdown," *Environmental Research Letters*, vol. 16, no. 5, May 2021, doi: 10.1088/1748-9326/abef8e.
- [32] K. Karra, C. Kontgis, Z. Statman-Weil, J. C. Mazzariello, M. M. Mathis, and S. P. Brumby, "Global land use / land cover with Sentinel 2 and deep learning," *2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS*, pp. 4704–4707, 2021, [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:238751652>
- [33] D. Danniswari, T. Honjo, and K. Furuya, "Land Cover Change Impacts on Land Surface Temperature in Jakarta and Its Satellite Cities," in

*IOP Conference Series: Earth and Environmental
Science*, Institute of Physics Publishing, Jun.
2020. doi: 10.1088/1755-1315/501/1/012031.



**Creative Commons Attribution-NonCommercial-
ShareAlike 4.0 International ([CC BY-NC-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/))**