Jurnal Bumi Lestari, Volume 26, Nomor 2, Tahun 2026, Halaman 53-76

Dinamika Spasiotemporal NDVI, NDBI, dan LST Kota Denpasar 2013–2025: Tren Robust Piksel dan Hubungan Spasial-Temporal Berbasis Landsat 8

I Gede Agus Novanda [ab]*, I Gusti Ayu Istri Pradnyandari Dewi [b], Anak Agung Eka Andiani [b], Ni Made Diwyanita Soka Wijaya [b], Ruby Valentinesyah [a], I Made Mahendra Wicaksana Karang [a], Wahyudin [a], Putu Intan Agustini [a]

[a] *Program Studi Magister Ilmu Kelautan, Fakultas Kelautan dan Perikanan, Universitas Udayana, Kampus UNUD Bukit Jimbaran, Bali 80361, Bali-Indonesia*

[b] *Pusat Penelitian Lingkungan Hidup, Universitas Udayana Jl. PB Sudirman, Denpasar, Bali 80232, Bali- Indonesia*

*Email: gedeagusnovanda@student.unud.ac.id

Diterima (received) 29 Juli 2026; disetujui (accepted) 23 Agustus 2026; tersedia secara online (available online) 9 September 2026

Abstract

Annual remote-sensing trends can be distorted by seasonal differences, missing observations, and spatial dependence among neighboring pixels. This study re-evaluated the 2013–2025 dynamics of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Normalized Difference Built-up Index (NDBI), and Land Surface Temperature (LST) across the full administrative mosaic of Denpasar City using 249 Landsat 8 Collection 2 Tier 1 Level-2 scenes acquired within a standardized 1 June–30 November window. Quality-screened observations were summarized using annual pixel-wise medians without spatial or temporal gap filling, followed by an annual common validity mask. Pixels with at least eight valid years covered 99.93% of the ROI, while 97.24% w ere valid in all 13 years. City-scale trends were estimated using Sen's slope and Mann–Kendall tests, while pixel-level significance was controlled using the Benjamini–Hochberg false discovery rate (FDR). NDVI showed a non-significant decreasing tendency (−0.00460 yr−1; p=0.100), NDBI a non-significant increasing tendency (+0.00329 yr−1; p=0.161), and LST a significant decrease (−0.290 °C yr−1; p=0.012). After FDR correction, 8.04% of analyzed pixels showed significant NDVI decreases, 15.01% significant NDBI increases, and 2.48% significant LST decreases; no significant LST increases were detected. Between-pixel associations were strong for NDVI–NDBI (r = −0.791) and NDBI–LST (r = 0.788), but within-pixel associations with LST were much weaker (NDVI–LST r = −0.090; NDBI–LST r = 0.115). Thus, spatial contrasts among surface types should not be interpreted as equivalent year-to-year changes at the same location. NDBI is treated as a built-up/dry-surface spectral response rather than direct land-cover change, and LST as a surface thermal indicator rather than human heat risk.

Keywords: *landsat 8; NDVI; NDBI; land surface temperature; spatiotemporal trend*

Abstrak

Analisis tren penginderaan jauh tahunan dapat dipengaruhi oleh perbedaan musim, kekosongan observasi, dan ketergantungan spasial antarpiksel. Penelitian ini mengevaluasi ulang dinamika Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Normalized Difference Built-up Index (NDBI), dan Land Surface Temperature (LST) Kota Denpasar selama 2013–2025 menggunakan 249 citra Landsat 8 Collection 2 Tier 1 Level-2 pada jendela waktu terstandar 1 Juni–30 November. Observasi yang lolos kontrol kualitas disintesis menjadi median tahunan per piksel tanpa pengisian celah spasial maupun temporal, kemudian diseragamkan dengan common mask tahunan. Piksel dengan sedikitnya delapan tahun valid mencakup 99,93% ROI, sedangkan 97,24% ROI memiliki data lengkap selama 13 tahun. Tren skala kota diestimasi menggunakan Sen's slope dan uji Mann-Kendall, sedangkan signifikansi tren piksel dikoreksi menggunakan false discovery rate (FDR) Benjamini-Hochberg. NDVI menunjukkan kecenderungan menurun yang tidak signifikan (-0,00460 tahun-1; p=0,100), NDBI kecenderungan

doi: https://doi.org/10.24843/blje.2026.v26.i02.p05

© 2019 by the authors; Content from this work may be used under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 licence. Any further distribution of this work must maintain attribution to the author(s) and the title of the work, journal citation and DOI. Published under licence by Udayana University, Indonesia.

meningkat yang tidak signifikan (+0,00329 tahun-1; p=0,161), dan LST penurunan yang signifikan (-0,290 °C tahun-1; p=0,012). Setelah koreksi FDR, 8,04% piksel analisis mengalami penurunan NDVI yang signifikan, 15,01% peningkatan NDBI yang signifikan, dan 2,48% penurunan LST yang signifikan; tidak ditemukan peningkatan LST yang signifikan. Hubungan between-pixel kuat untuk NDVI–NDBI (r=-0,791) dan NDBI–LST (r=0,788), tetapi hubungan within-pixel dengan LST jauh lebih lemah (NDVI–LST r=-0,090; NDBI–LST r=0,115). Hasil tersebut menunjukkan bahwa kontras spasial antarpermukaan tidak dapat langsung disamakan dengan perubahan tahunan pada lokasi yang sama. NDBI ditafsirkan sebagai respons spektral permukaan terbangun/kering, bukan perubahan tutupan lahan secara langsung, sedangkan LST ditafsirkan sebagai indikator kondisi termal permukaan dan bukan risiko panas manusia.

Kata Kunci: *landsat 8; NDVI; NDBI; suhu permukaan; tren spasiotemporal*

1. Pendahuluan

Perkembangan kawasan perkotaan mengubah struktur biofisik permukaan melalui perubahan proporsi vegetasi, lahan pertanian, tanah terbuka, badan air, permukaan kedap, dan material buatan, yang selanjutnya memengaruhi albedo, kelembapan, evapotranspirasi, emisivitas, penyimpanan panas, dan pertukaran energi permukaan–atmosfer (Faisal *et al*., 2021; Hu *et al*., 2023; Vohra *et al*., 2024; Voogt & Oke, 2003; Weng, 2009; Zaitunah *et al*., 2022). Vegetasi umumnya berasosiasi dengan kondisi termal permukaan yang lebih rendah melalui peneduhan dan evapotranspirasi, sedangkan permukaan terbangun dan material kedap memiliki karakter termal yang berbeda (Zaitunah *et al*., 2022; Zhou *et al*., 2018). Kondisi tersebut dapat diamati melalui *Land Surface Temperature* (LST), tetapi LST satelit harus dipahami sebagai suhu radiometrik permukaan pada saat lintasan sensor dan tidak identik dengan suhu udara, kenyamanan termal, ataupun risiko panas manusia (Jimenez-Munoz *et al*., 2014; Voogt & Oke, 2003; Zhou *et al*., 2018). Penginderaan jauh juga memungkinkan evaluasi karakter permukaan melalui *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), yang menggambarkan tingkat kehijauan relatif berdasarkan kanal merah dan *near-infrared* (NIR) (Moravec *et al*., 2021; Tucker, 1979), serta *Normalized Difference Built-up Index* (NDBI), yang menggunakan respons SWIR1 dan NIR untuk menonjolkan karakter spektral yang sering berkaitan dengan permukaan terbangun atau kering (Zha *et al*., 2003). Namun, NDBI bukan klasifikasi LULC karena tanah terbuka, pasir, permukaan kering, badan air, dan piksel campuran dapat menghasilkan respons yang tumpang tindih (As-syakur *et al*., 2012); demikian pula NDVI tidak secara langsung menunjukkan perubahan luas atau jenis vegetasi.

Integrasi NDVI, NDBI, dan LST telah banyak digunakan untuk mengevaluasi hubungan antara kehijauan, respons spektral permukaan terbangun/kering, dan kondisi termal perkotaan. Secara umum, NDVI yang lebih tinggi cenderung berasosiasi dengan LST yang lebih rendah, sedangkan NDBI yang lebih tinggi sering berasosiasi dengan LST yang lebih tinggi, meskipun kekuatan dan arah hubungannya dipengaruhi oleh musim, kondisi iklim, kelembapan, struktur kota, dan karakter permukaan lokal (Abir & Saha, 2021; Altıner & Bingöl, 2025; Cetin *et al*., 2024; Faisal *et al*., 2021). Interpretasi NDVI–NDBI juga memerlukan kehati-hatian karena keduanya menggunakan band NIR, sehingga sebagian hubungan negatif dapat dipengaruhi oleh struktur matematis indeks dan tidak dapat langsung ditafsirkan sebagai konversi vegetasi menjadi kawasan terbangun. Landsat 8 melalui kombinasi OLI dan TIRS menyediakan arsip *surface reflectance* dan *surface temperature* yang konsisten untuk analisis multitemporal, sementara *Google Earth Engine* (GEE) memungkinkan pengolahan koleksi citra dalam skala besar menggunakan prosedur seleksi, masking, komposit, dan ekstraksi yang seragam (Gorelick *et al*., 2017; Rahmi *et al*., 2024). Akan tetapi, deret waktu satelit tetap dipengaruhi oleh perbedaan musim, tanggal observasi, kondisi atmosfer, curah hujan, kelembapan, awan, kualitas piksel, dan jumlah observasi valid antartahun (Asmiwyati *et al*., 2020; Diara *et al*., 2024; Quan *et al*., 2016; Wirayuda *et al*., 2023), sementara tren vegetasi sendiri sensitif terhadap variabilitas antar tahun dan pilihan metodologi deret waktu (Forkel *et al*., 2013).

Tantangan metodologis menjadi lebih penting ketika analisis dilakukan pada tingkat piksel. Piksel yang berdekatan tidak dapat dianggap sebagai replikasi statistik yang sepenuhnya independen karena adanya dependensi spasial, sementara pengujian tren secara simultan pada ribuan piksel meningkatkan

peluang munculnya signifikansi semu apabila *multiple testing* tidak dikendalikan (Dormann *et al*., 2007; Ives *et al*., 2021; Wilks & Wilks, 2016). Selain itu, korelasi yang menggabungkan seluruh pasangan piksel-tahun dapat mencampurkan variasi antar-lokasi dengan perubahan antar-waktu pada lokasi yang sama. Oleh karena itu, standardisasi jendela temporal antar tahun, pelaporan *missingness* dan jumlah observasi valid, penggunaan estimator tren yang *robust*, pengendalian *false discovery rate*, serta pemisahan hubungan *between-pixel* dan *within-pixel* diperlukan agar pola spasial tidak keliru ditafsirkan sebagai mekanisme perubahan temporal (Ives *et al*., 2021).

Konteks tersebut relevan bagi Kota Denpasar sebagai pusat pemerintahan, ekonomi, jasa, permukiman, dan pariwisata Bali sekaligus kota pesisir dengan mosaik permukaan yang heterogen, mencakup kawasan terbangun, sawah, vegetasi perkotaan, mangrove, tanah terbuka, badan air/perairan, dan piksel campuran. Perubahan penggunaan ruang di Denpasar dan kawasan urban-pariwisata sekitarnya telah didokumentasikan, termasuk konversi sekitar 20,23 km² lahan bervegetasi menjadi kawasan urban di Denpasar–Kuta selama 2013–2021 (Andyana *et al*., 2023), dinamika kawasan tanaman pangan di Denpasar (Alina *et al*., 2025), serta perubahan lahan sawah di kawasan metropolitan Sarbagita (Ramadhan & Murti, 2024). Wirayuda *et al*., 2023)memperkirakan ruang hijau Denpasar sekitar 28,22 km² atau 22,1% wilayah kota, sementara kajian lokal menunjukkan bahwa permukaan terbangun dan tanah terbuka cenderung memiliki LST lebih tinggi dibandingkan mangrove, sawah, badan air, dan vegetasi yang lebih rapat (Asmiwyati *et al*., 2020; Diara *et al*., 2024; Hadibasyir & Firdaus, 2022). Meskipun kajian tersebut memberikan dasar penting, penelitian lokal umumnya berfokus pada klasifikasi LULC, ruang hijau, atau karakter termal pada periode tertentu, sedangkan analisis tahunan kontinu NDVI, NDBI, dan LST selama keseluruhan periode Landsat 8 2013–2025 dengan pengendalian *seasonality*, *missingness*, ketidakpastian tren piksel, *multiple* testing, dan pemisahan variasi spasial–temporal masih terbatas. Dengan demikian, gap penelitian ini tidak hanya bersifat geografis, tetapi terutama metodologis (Dormann *et al*., 2007; Forkel *et al*., 2013; Ives *et al*., 2021; Quan *et al*., 2016; Wilks & Wilks, 2016).

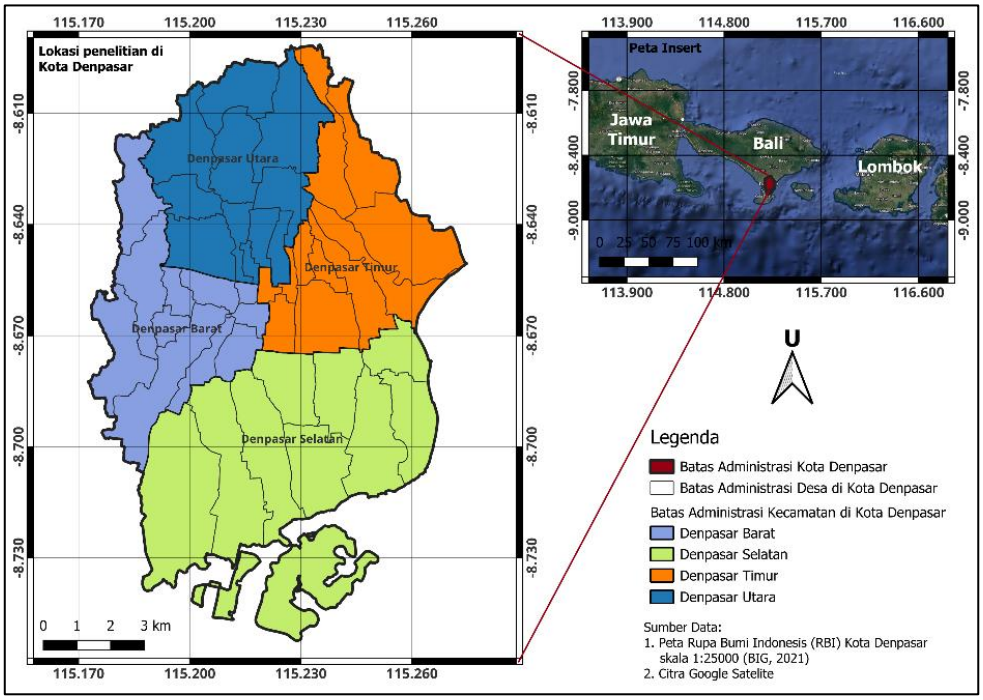
Berdasarkan gap tersebut, penelitian ini bertujuan untuk (1) menggambarkan distribusi dan dinamika tahunan NDVI, NDBI, dan LST Kota Denpasar selama 2013–2025 menggunakan komposit median dalam jendela observasi yang seragam; (2) mengestimasi arah, magnitudo, dan signifikansi tren pada skala kota dan piksel menggunakan pendekatan *robust* disertai pengendalian *false discovery rate*; dan (3) mengevaluasi hubungan NDVI–NDBI, NDVI–LST, dan NDBI–LST dengan memisahkan komponen *between-pixel* dan *within-pixel*. Kebaruan penelitian terletak pada integrasi standardisasi temporal, pengelolaan dan pelaporan *missing* data secara eksplisit, inferensi tren piksel yang mempertimbangkan *multiple testing*, serta pemisahan dimensi spasial dan temporal hubungan antar indeks dalam satu kerangka Landsat 8 untuk Kota Denpasar. Penelitian tidak dimaksudkan untuk mengklasifikasikan atau memvalidasi perubahan LULC; seluruh wilayah administratif dipertahankan sebagai ROI heterogen yang mencakup daratan dan perairan. Oleh karena itu, NDVI dan NDBI diperlakukan sebagai indikator spektral kontinu dan LST sebagai indikator kondisi termal permukaan, sedangkan stratifikasi berdasarkan LULC, pemisahan daratan–perairan, dan validasi independen ditempatkan sebagai arah pengembangan penelitian selanjutnya.

2. Metode Penelitian

2.1. Lokasi Penelitian

Penelitian mencakup seluruh wilayah administratif Kota Denpasar, Provinsi Bali, yang terdiri atas Kecamatan Denpasar Utara, Denpasar Timur, Denpasar Selatan, dan Denpasar Barat. *Region of interest* (ROI) dipertahankan sebagai satu kesatuan spasial yang heterogen dan mencakup daratan, vegetasi perkotaan, sawah, mangrove, badan air/perairan, permukaan terbangun atau kering, serta piksel campuran. Pendekatan ini dipilih karena penelitian berfokus pada dinamika kontinu NDVI, NDBI, dan LST pada skala administratif, bukan pada perubahan luas masing-masing kelas penggunaan/tutupan lahan. Batas administratif Kota Denpasar yang digunakan sebagai *region of interest* (ROI) mengacu pada Peta Rupa Bumi Indonesia (RBI) Kota Denpasar skala 1:25.000 yang diterbitkan oleh Badan Informasi Geospasial (BIG) tahun 2021 dan diakses melalui Portal Tanah Air Indonesia pada 1 Januari 2026 (https://tanahair.indonesia.go.id/portal-web/). Data batas administrasi desa selanjutnya digabungkan

(*dissolve*) menjadi satu geometri batas Kota Denpasar untuk membentuk ROI dan menentukan denominator luas dalam analisis spasial. Berdasarkan rasterisasi pada grid analisis, ROI terdiri atas 139.864 piksel dengan luas 12.587,76 ha.



Gambar 1. Lokasi penelitian

2.2. Data

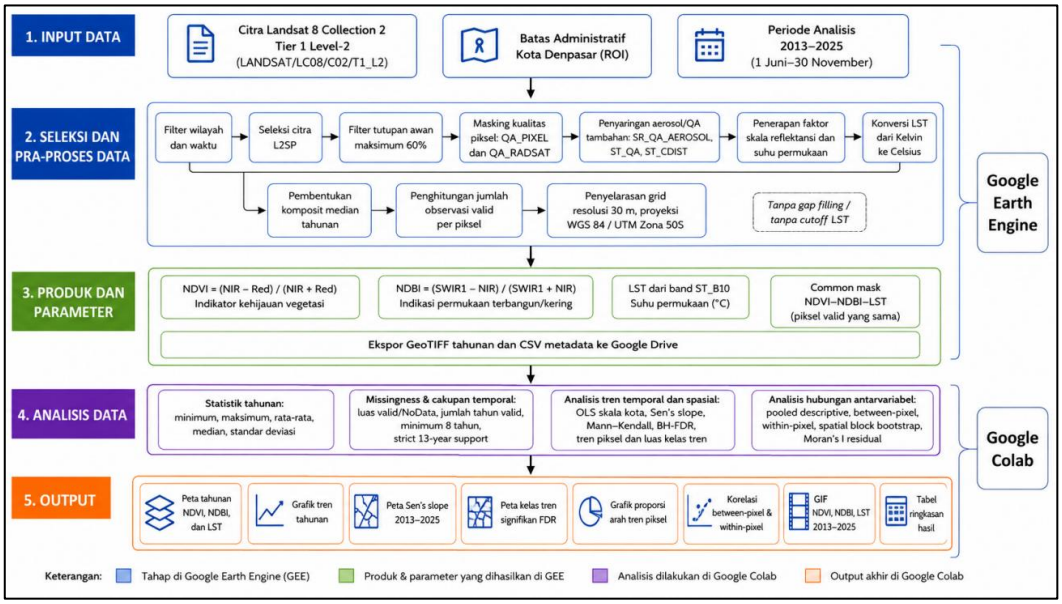
Data utama adalah Landsat 8 Operational Land Imager/Thermal Infrared Sensor (OLI/TIRS) Collection 2 Tier 1 Level-2 dengan kode dataset LANDSAT/LC08/C02/T1_L2. Analisis hanya menggunakan produk dengan PROCESSING_LEVEL=L2SP agar surface reflectance (SR) dan surface temperature (ST) tersedia. Jendela pengamatan ditetapkan seragam pada 1 Juni–30 November setiap tahun selama 2013–2025 untuk mengurangi perbedaan komposisi musim antar-tahun. Periode perekaman 1 Juni–30 November dipilih untuk mencakup fase JJA (Juni–Agustus) sebagai periode kemarau dan SON (September–November) sebagai periode transisi menuju musim hujan, sejalan dengan pola monsunal Bali yang menunjukkan curah hujan terendah terutama pada periode tersebut di Kota Denpasar (Novanda *et al*., 2026). Perekam dengan tutupan awan lebih dari 60% dikeluarkan pada tahap seleksi awal; penyaringan awan utama tetap dilakukan pada tingkat piksel melalui band QA.

Sebanyak 249 *scene* memenuhi kriteria tersebut, dengan 15–22 *scene* per tahun. Band SR_B4, SR_B5, dan SR_B6 digunakan untuk perhitungan NDVI dan NDBI, sedangkan ST_B10 digunakan untuk LST. *Output* optik dan termal diselaraskan pada grid 30 m dan proyeksi WGS 84/UTM Zona 50S (EPSG:32750). Grid 30 m pada produk ST tidak diartikan sebagai informasi termal independen beresolusi native 30 m, karena informasi TIRS Band 10 Landsat 8 berasal dari resolusi native sekitar 100 m dan disajikan pada grid 30 m melalui *resampling* produk. Rincian dataset, band, dan fungsi masing-masing data disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Data utama dan fungsi band Landsat 8 yang digunakan

Komponen	Dataset/Band	Penanganan/Perlakuan	Fungsi
Citra utama	LANDSAT/LC08/C02/T1_L2	L2SP; 1 Juni-30 November; *cloud scene* <=60%	Menyediakan data *surface reflectance* dan *surface temperature*
Merah (Red)	SR_B4	DN x 0,0000275 - 0,2	Digunakan dalam perhitungan NDVI
Near-infrared (NIR)	SR_B5	DN x 0,0000275 - 0,2	Digunakan dalam perhitungan NDVI dan NDBI
Short-wave infrared 1 (SWIR1)	SR_B6	DN x 0,0000275 - 0,2	Digunakan dalam perhitungan NDBI
Suhu permukaan	ST_B10	DN x 0,00341802 + 149 K; lalu -273,15	Produk LST (deg C) Landsat Collection 2 Level-2
Kualitas piksel	QA_PIXEL	*mask bit 0-5: fill, dilated cloud, cirrus, cloud, cloud shadow, snow*	Mask piksel utama
Saturasi	QA_RADSAT	QA_RADSAT = 0	Mengeluarkan saturasi radiometrik
Aerosol	SR_QA_AEROSOL	dicatat sebagai diagnostik; tidak menjadi hard mask utama	QC reflektansi
Kualitas termal	ST_QA; ST_CDIST	layer diagnostik ketat: ST_QA <=2 K; ST_CDIST >=1 km	QC/sensitivitas termal internal

Sumber: USGS Landsat Collection 2 Level-2 dan rancangan pengolahan penelitian



Gambar 2. Alur penelitian

Penelitian ini dilakukan melalui dua tahapan utama pengolahan data, yaitu menggunakan *Google Earth Engine* (GEE) dan *Google Colab*, dengan batas wilayah kajian mengacu pada Peta Rupa Bumi Indonesia (RBI) Kota Denpasar skala 1:25.000 yang diterbitkan oleh Badan Informasi Geospasial (BIG) tahun 2021 sebagai dasar penetapan *region of interest* (ROI) dan referensi spasial dalam penyusunan peta penelitian. Pada tahap GEE, data utama berupa citra Landsat 8 Collection 2 Tier 1 Level-2 periode 2013–2025 diseleksi secara spasial berdasarkan ROI dan secara temporal menggunakan jendela observasi yang seragam, yaitu 1 Juni–30 November pada setiap tahun, dengan batas tutupan awan maksimum 60%. Selanjutnya dilakukan pra-pengolahan yang meliputi seleksi produk L2SP, *quality masking* menggunakan QA_PIXEL dan QA_RADSAT, pemeriksaan kualitas tambahan menggunakan SR_QA_AEROSOL, ST_QA, dan ST_CDIST, penerapan faktor skala reflektansi permukaan dan suhu, serta konversi *surface temperature* dari Kelvin ke Celsius. Seluruh observasi valid pada setiap tahun kemudian digabungkan menggunakan komposit median per piksel, tanpa gap *filling* maupun pembatasan nilai LST, sehingga nilai tahunan merepresentasikan median dari seluruh pengamatan valid pada lokasi piksel yang sama dalam periode tersebut. Komposit tahunan selanjutnya digunakan untuk menghitung *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) dari kanal NIR dan merah, *Normalized Difference Built-up Index* (NDBI) dari kanal SWIR1 dan NIR, serta *Land Surface Temperature* (LST) dari band ST_B10; selain itu dibentuk *common mask* NDVI–NDBI–LST dan dihitung jumlah observasi valid per piksel untuk mengevaluasi konsistensi dukungan spasial dan temporal. Seluruh hasil tahunan kemudian diekspor dalam format *.GeoTIFF* beserta metadata perekaman ke *Google Drive* dan dianalisis lebih lanjut pada Google Colab, yang mencakup statistik tahunan, evaluasi *missingness* dan cakupan temporal, analisis tren temporal dan spasial menggunakan *Sen's slope* dan Mann–Kendall, pengendalian *multiple testing* menggunakan *Benjamini–Hochberg False Discovery Rate* (BH-FDR) pada analisis piksel, serta analisis hubungan antarindeks yang dibedakan menjadi hubungan *between-pixel* dan *within-pixel* dengan mempertimbangkan ketergantungan spasial melalui *spatial block bootstrap*. Tahap akhir menghasilkan peta tahunan NDVI, NDBI, dan LST untuk periode 2013–2025, grafik tren temporal, peta Sen's slope, peta kelas tren yang signifikan, proporsi arah tren, visualisasi hubungan antar indeks, peta cakupan data, serta animasi perubahan tahunan sebagai dasar interpretasi dinamika biofisik dan termal permukaan Kota Denpasar.

2.3. Pengolah Citra

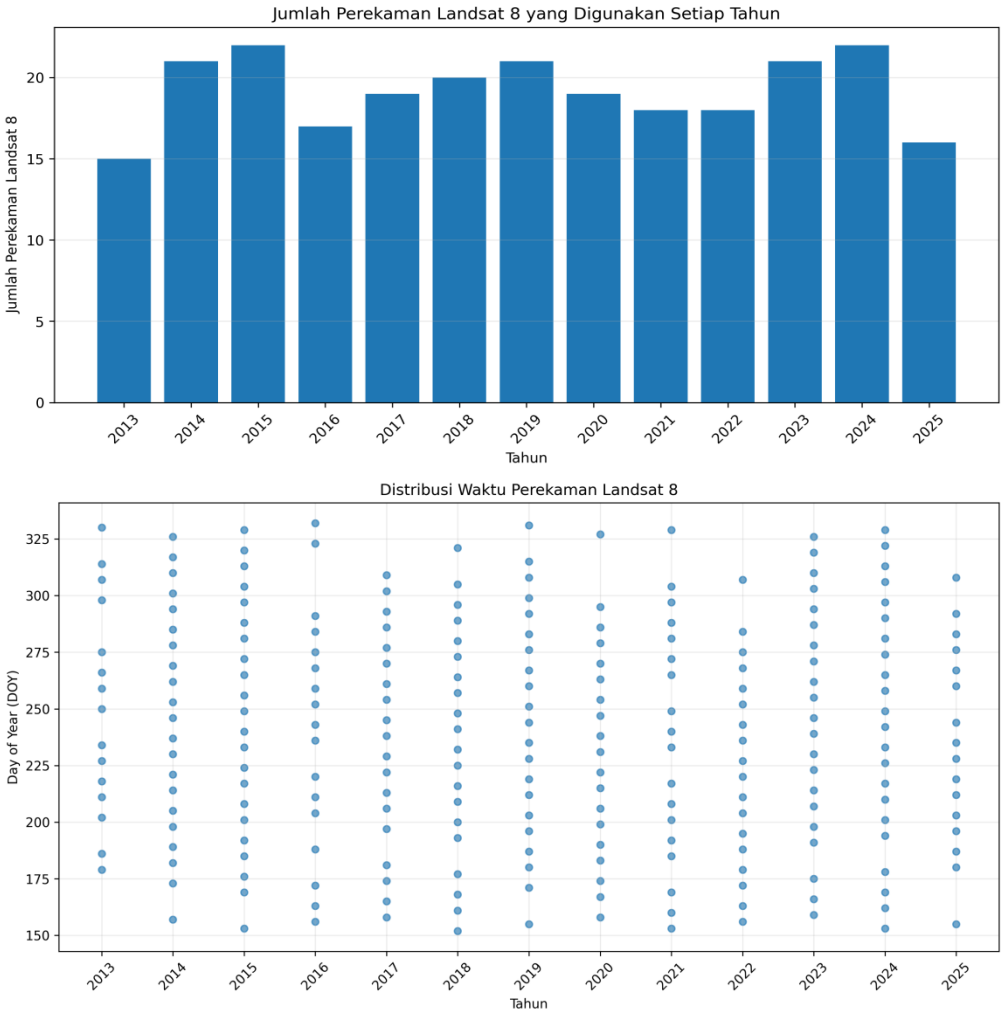
Pengolahan dilakukan di *Google Earth Engine*. Setelah filter wilayah, tahun, jendela 1 Juni-30 November, level L2SP, dan *cloud scene* <=60%, piksel disaring menggunakan QA_PIXEL dan QA_RADSAT. *Mask* QA_PIXEL mencakup bit 0 (*fill*), bit 1 (*dilated cloud*), bit 2 (*cirrus*), bit 3 (*cloud*), bit 4 (*cloud shadow*), dan bit 5 (*snow*), sedangkan QA_RADSAT harus bernilai 0. SR_QA_AEROSOL dipertahankan sebagai informasi diagnostik dan tidak digunakan sebagai *hard mask* pada analisis utama. Untuk LST disediakan pula layer QC ketat menggunakan ST_QA <=2 K dan ST_CDIST >=1 km dari awan sebagai pemeriksaan internal; analisis utama mempertahankan QA_PIXEL dan QA_RADSAT agar kehilangan cakupan termal tidak bertambah secara berlebihan. Pentingnya kontrol kualitas LST satelit telah ditekankan oleh Lai *et al*., (2018).

Nilai SR dikonversi dengan faktor skala 0,0000275 dan *offset* -0,2. ST_B10 dikonversi menjadi Kelvin dengan faktor 0,00341802 dan *offset* 149,0, kemudian diubah ke derajat Celsius dengan mengurangi 273,15, sesuai spesifikasi Landsat Collection 2 Level-2 (Malakar *et al*., 2018; U.S. Geological Survey, 2024). Nilai di luar rentang tersebut tidak otomatis dianggap salah selama lolos QA produk.

Untuk setiap tahun, seluruh observasi valid pada posisi piksel yang sama disintesis menggunakan median. Median optik tahunan dibentuk terlebih dahulu dari band merah, NIR, dan SWIR1; NDVI dan NDBI kemudian dihitung dari band median tahunan tersebut. LST tahunan adalah median ST_B10 yang telah diskalakan. Tidak dilakukan *focal mean, neighborhood filling*, interpolasi spasial, interpolasi temporal, atau gap *filling* lain. Piksel tanpa observasi valid tetap *No*. Data. Jumlah observasi valid per piksel dan area No. Data dihitung sebagai bagian dari *quality control*. Seluruh citra valid kemudian dikelompokkan berdasarkan tahun perekaman dan disintesis menjadi komposit tahunan menggunakan nilai median pada setiap posisi piksel. Secara matematis, komposit dinyatakan sebagai berikut:

$$C_{i,t} = median\left(X_{i,t,j1}, X_{i,t,j2}, \dots, X_{i,t,jn}\right) \quad (1)$$

dimana *Ci,t* merupakan nilai komposit median pada piksel ke-i dan tahun ke-t; *Xi,t,j* merupakan nilai band pada piksel ke-i, tahun ke-t, dan observasi ke-j; serta *n* merupakan jumlah observasi valid yang tersedia pada piksel tersebut dalam tahun ke-t. Metode median dipilih karena relatif tahan terhadap nilai ekstrem dan dapat mengurangi pengaruh awan tipis, bayangan awan, serta gangguan atmosfer yang masih tersisa setelah penyaringan kualitas. *Common mask* tahunan didefinisikan sebagai irisan piksel valid NDVI, NDBI, dan LST pada tahun yang sama. Untuk analisis tren, piksel harus memiliki setidaknya delapan tahun valid dari 13 tahun pengamatan. Sebagai pemeriksaan sensitivitas dukungan spasial, hasil skala kota juga dihitung pada strict temporal mask yang hanya mempertahankan piksel valid pada seluruh 13 tahun. Rincian jumlah citra pada setiap tahun disajikan pada Gambar 3.



Gambar 3. (a) Jumlah scene Landsat 8 yang digunakan setiap tahun dan (b) distribusi *day-of-year* (DOY) perekaman pada jendela 1 Juni-30 November

2.4. Perhitungan NDVI, NDBI, dan LST

Berdasarkan alur pengolahan pada Gambar 2 dan fungsi band pada Tabel 1, komposit median tahunan yang telah melalui penyaringan kualitas digunakan untuk menghitung *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), *Normalized Difference Built-up Index* (NDBI), dan *Land Surface Temperature* (LST). NDVI dan NDBI dihitung dari band *surface reflectance* atau reflektansi permukaan yang telah dikonversi menggunakan faktor skala, sedangkan LST diperoleh dari produk surface temperature Landsat 8 *Collection* 2 Level-2. Penggunaan komposit dan susunan *grid* yang sama memastikan bahwa ketiga parameter pada setiap tahun merepresentasikan lokasi piksel yang konsisten sehingga dapat digunakan dalam analisis tren dan hubungan antar parameter.

2.4.1. *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI)

Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) merupakan indeks spektral yang digunakan untuk menggambarkan tingkat kehijauan dan kondisi relatif vegetasi berdasarkan perbedaan respons antara band near-infrared (NIR), yaitu spektrum inframerah dekat yang dipantulkan kuat oleh struktur daun, dan band

merah (Red), yaitu spektrum yang banyak diserap oleh klorofil. Pada Landsat 8, band NIR direpresentasikan oleh SR_B5, sedangkan band merah direpresentasikan oleh SR_B4. NDVI dihitung menggunakan persamaan berikut (Moravec *et al*., 2021; Tucker, 1979):

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{Red}}{\text{NIR} + \text{Red}} \quad (2)$$

Nilai NDVI secara teoritis berada pada rentang −1 sampai 1. Nilai yang semakin positif menunjukkan tingkat kehijauan relatif yang semakin tinggi, sedangkan nilai rendah atau negatif umumnya berkaitan dengan permukaan non vegetasi, tanah terbuka, kawasan terbangun, atau badan air. Dalam penelitian ini, NDVI digunakan sebagai indikator kontinu dan tidak diklasifikasikan ke dalam kelas kerapatan tertentu. Oleh karena itu, perubahan NDVI diinterpretasikan sebagai perubahan kondisi kehijauan relatif pada setiap piksel, bukan sebagai pengukuran langsung jenis vegetasi, biomassa, atau luas tutupan vegetasi (Altıner & Bingöl, 2025).

2.4.2. *Normalized Difference Built-p Index* (NDBI)

Normalized Difference Built-up Index (NDBI) merupakan indeks spektral yang digunakan untuk menonjolkan kecenderungan respons permukaan terbangun berdasarkan perbedaan reflektansi antara band *short-wave infrared* 1 (SWIR1), yaitu inframerah gelombang pendek, dan band *near-infrared* (NIR). Permukaan terbangun dan permukaan kering umumnya menunjukkan reflektansi SWIR1 yang relatif lebih tinggi dibandingkan NIR. Pada Landsat 8, SWIR1 direpresentasikan oleh SR_B6, sedangkan NIR direpresentasikan oleh SR_B5. NDBI dihitung menggunakan persamaan berikut (Zha *et al*., 2003).

$$\text{NDBI} = \frac{\text{SWIR1} - \text{NIR}}{\text{SWIR1} + \text{NIR}} \quad (3)$$

Nilai NDBI dibatasi pada rentang −1 sampai 1. Nilai yang semakin positif menunjukkan kecenderungan respons spektral permukaan terbangun atau permukaan non vegetasi yang semakin kuat, sedangkan nilai negatif umumnya berasosiasi dengan vegetasi dan badan air (Altıner & Bingöl, 2025; Zha *et al*., 2003). Namun, NDBI tidak digunakan sebagai ukuran langsung luas bangunan karena tanah terbuka, lahan kering, pasir, serta piksel campuran dapat menghasilkan respons spektral yang menyerupai kawasan terbangun. Dengan demikian, NDBI dalam penelitian ini diinterpretasikan sebagai indikasi kawasan terbangun, bukan sebagai hasil klasifikasi penggunaan lahan atau inventarisasi bangunan (Zha *et al*., 2003).

2.4.3. *Land Surface Temperature* (LST)

Land Surface Temperature (LST) merupakan suhu radiometrik permukaan daratan yang diperoleh dari energi termal yang direkam oleh sensor satelit. LST pada penelitian ini diperoleh dari band ST_B10 produk Landsat 8 Collection 2 Level-2. Band tersebut telah diproses sebagai produk *surface temperature*, sehingga nilai digital atau *digital number* (DN) dikonversi menjadi suhu Kelvin menggunakan faktor skala 0,00341802 dan offset 149,0. Konversi dilakukan menggunakan persamaan.

$$T_K = (DN_{ST} \times 0{,}00341802) + 149{,}0 \quad (4)$$

Selanjutnya, suhu Kelvin dikonversi menjadi derajat Celsius:

$$\text{LST} = T_K - 273{,}15 \quad (5)$$

Dengan demikian, persamaan lengkap LST adalah:

$$\text{LST} = [(DN_{ST} \times 0{,}00341802) + 149{,}0] - 273{,}15 \quad (6)$$

Dengan LST = *Land Surface Temperature* dalam derajat Celsius; T_K = suhu permukaan dalam Kelvin; DN_{ST} = nilai digital pada band ST_B10; 0.00341802 = faktor skala produk surface temperature; 149.0 = offset produk *surface temperature*; 273.15 = konstanta konversi Kelvin menjadi Celsius. Seluruh observasi LST valid dalam satu tahun selanjutnya disintesis menggunakan median pada setiap piksel untuk menghasilkan satu komposit LST tahunan. LST yang dihasilkan merepresentasikan kondisi termal permukaan, bukan suhu udara, karena sensor termal merekam energi yang dipancarkan oleh objek permukaan seperti tanah, vegetasi, air, jalan, dan material bangunan (Jimenez-Munoz *et al*., 2014).

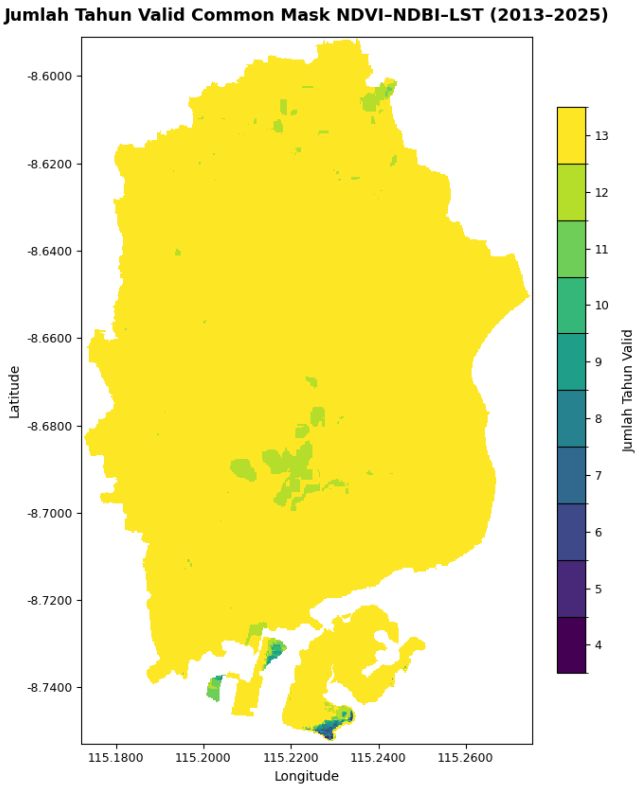
2.4. Analisis Tren

Analisis tren dilakukan pada Google Colab menggunakan komposit tahunan NDVI, NDBI, dan LST periode 2013–2025. Median tahunan digunakan sebagai statistik utama pada skala kota karena lebih *robust* terhadap nilai ekstrem. Nilai No. Data tidak diinterpolasi atau diisi; apabila suatu piksel tidak memiliki data valid pada tahun tertentu, analisis hanya menggunakan tahun yang tersedia dengan tetap mempertahankan selang waktu aktual antar observasi. Besarnya perubahan diestimasi menggunakan Sen's slope (Sen, 1968), yaitu median dari seluruh slope pasangan observasi:

$$\beta = median[(X_tj - X_ti)/(t_j - t_i)], t_j > t_i \quad (7)$$

dengan β merupakan laju perubahan per tahun, X_ti dan X_tj merupakan nilai NDVI, NDBI, atau LST pada tahun t_i dan t_j, sedangkan $t_j - t_i$ merupakan selang waktu antara kedua observasi. Nilai $\beta > 0$ menunjukkan kecenderungan meningkat, sedangkan $\beta < 0$ menunjukkan kecenderungan menurun. Signifikansi tren selanjutnya diuji menggunakan Mann–Kendall test (Mann, 1945) pada tingkat signifikansi $\alpha = 0{,}05$.

Pada analisis spasial, tren dihitung secara *pixel-wise* menggunakan piksel yang memiliki sedikitnya 8 dari 13 tahun data valid. Karena pengujian dilakukan secara simultan pada banyak piksel, p-*value* Mann–Kendall dikoreksi menggunakan Benjamini–Hochberg *False Discovery Rate* (BH-FDR) pada $\alpha = 0{,}05$ untuk mengendalikan temuan positif palsu akibat *multiple* testing (Benjamini & Hochberg, 1995; Wilks & Wilks, 2016). Berdasarkan Sen's *slope* dan nilai q_FDR, piksel diklasifikasikan menjadi menurun signifikan apabila $\beta < 0$ dan q_FDR $< 0{,}05$; meningkat signifikan apabila $\beta > 0$ dan q_FDR $< 0{,}05$; tidak menunjukkan tren signifikan apabila q_FDR $\geq 0{,}05$; dan data tidak cukup apabila jumlah tahun valid < 8. Sebagai pemeriksaan sensitivitas, hasil utama juga dibandingkan dengan *strict temporal mask*, yaitu piksel yang memiliki data valid lengkap selama seluruh 13 tahun pengamatan.



Gambar 4. Jumlah tahun valid pada *common mask* NDVI-NDBI-LST selama 2013–2025

2.6. Analisis Hubungan Antar Variabel

Hubungan antara NDVI, NDBI, dan LST dianalisis di *Google Colab* untuk tiga pasangan variabel, yaitu NDVI–NDBI, NDVI–LST, dan NDBI–LST. Analisis hanya menggunakan piksel pada *common mask* yang memenuhi sedikitnya 8 tahun data valid. Korelasi *pooled pixel-year* tetap dihitung sebagai statistik deskriptif, tetapi tidak digunakan untuk inferensi konvensional karena piksel yang berdekatan dan pengamatan berulang pada lokasi yang sama tidak dapat dianggap sebagai observasi independen (Dormann *et al*., 2007; Ives *et al*., 2021). Untuk mengurangi *pseudo-replication* dan membedakan variasi spasial dari perubahan temporal, hubungan antar variabel dipisahkan menjadi komponen *between-pixel* dan *within-pixel*. Pendekatan ini merupakan perbaikan terhadap analisis awal yang menggabungkan seluruh pasangan piksel-tahun dalam satu korelasi.

Hubungan *between-pixel* dihitung menggunakan rata-rata temporal masing-masing parameter pada setiap piksel, sehingga menunjukkan keterkaitan antar lokasi berdasarkan kondisi rata-rata selama periode penelitian. Sebaliknya, hubungan *within-pixel* dihitung dari anomali tahunan setelah nilai setiap tahun dikurangi rata-rata temporal piksel yang sama, sehingga merepresentasikan kovariasi perubahan dari tahun ke tahun pada lokasi yang sama. Koefisien korelasi Pearson dihitung dengan persamaan (Pearson, 1896):

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2}} \quad (8)$$

dengan r merupakan koefisien korelasi Pearson, x_i dan y_i merupakan nilai pasangan variabel pada observasi ke-i, sedangkan $\bar{x}$ dan $\bar{y}$ merupakan nilai rata-rata masing-masing variabel. Nilai r berkisar antara −1 hingga +1; tanda positif menunjukkan hubungan searah dan tanda negatif menunjukkan hubungan berlawanan. Kekuatan hubungan berdasarkan nilai absolut r diinterpretasikan sebagai *negligible* (0,00–0,10), *weak* (0,10–0,39), *moderate* (0,40–0,69), *strong* (0,70–0,89), dan *very strong* (0,90–1,00) (Schober & Schwarte, 2018).

Ketidakpastian koefisien korelasi *between-pixel* dan *within-pixe*l diestimasi menggunakan *spatial block bootstrap* dengan ukuran blok 1,5 km, sebanyak 500 replikasi, untuk memperoleh 95% *confidence* interval. Dependensi spasial yang masih tersisa selanjutnya dievaluasi melalui Moran's I pada residual hubungan *between-pixel* menggunakan 499 permutasi. Hasil hubungan antar variabel divisualisasikan menggunakan *hexbin* plot untuk memperlihatkan kepadatan dan pola distribusi data. Seluruh koefisien ditafsirkan sebagai asosiasi statistik, bukan hubungan sebab-akibat; khusus korelasi NDVI–NDBI juga diinterpretasikan secara hati-hati karena kedua indeks menggunakan band NIR sehingga sebagian hubungan negatif dapat dipengaruhi oleh struktur matematis indeks itu sendiri.

3. Hasil dan Pembahasan

Sebanyak 249 *scene* Landsat 8 digunakan untuk membentuk 13 komposit tahunan. Jumlah *scene* berkisar 15 pada 2013 hingga 22 pada 2015 dan 2024. Area valid tahunan yang umum berada pada 98,21–100,00% ROI; kondisi terendah terjadi pada 2013 dengan 224,91 ha (1,79% ROI) No. Data. Sebanyak 139.772 piksel atau 12.579,48 ha (99,93% ROI) memiliki setidaknya delapan tahun valid, sedangkan 136.000 piksel atau 12.240,00 ha (97,24% ROI) valid pada seluruh 13 tahun (Tabel 2). Hanya 8,28 ha (0,066% ROI) yang tidak memenuhi minimum delapan tahun. Dengan demikian, denominator luas, *missingness*, dan dukungan temporal dapat dinyatakan secara eksplisit, bukan diasumsikan dari *bounding box raster*.

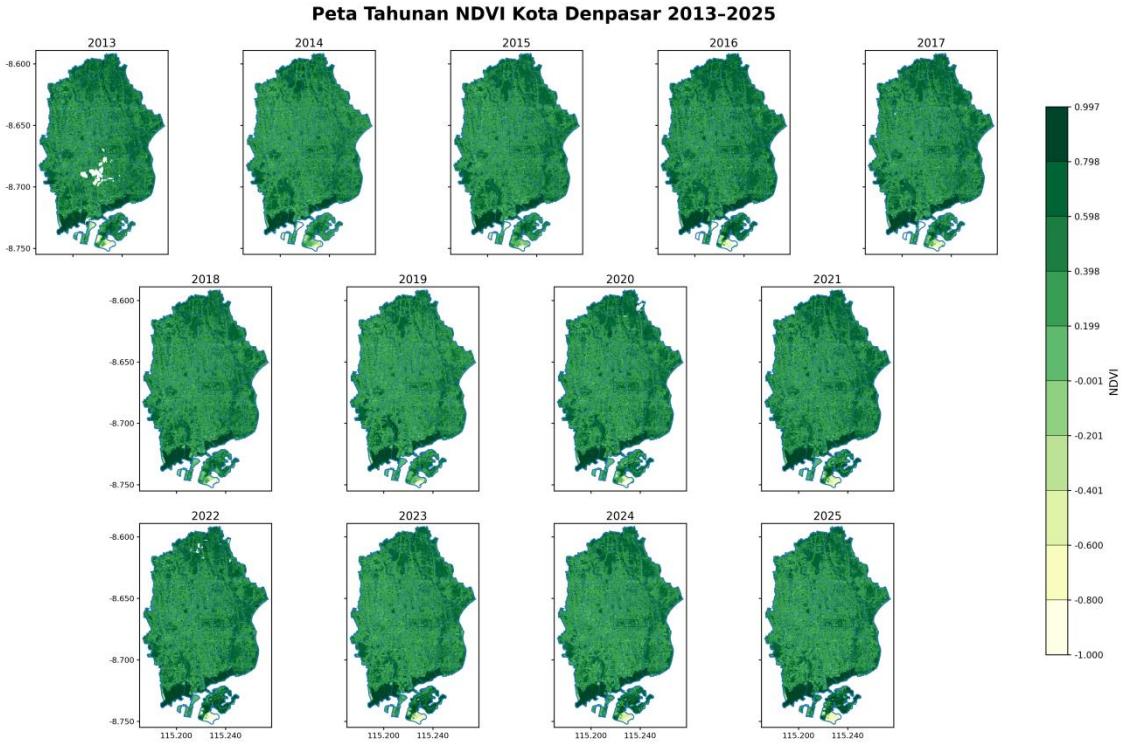
Tabel 2. Ringkasan perekaman, median tahunan, dan cakupan *common mask*.

Tahun	*Scene*	Median NDVI	Median NDBI	Median LST (deg C)	*Common* valid (%)	*Common* NoData (ha)
2013	15	0,458	-0,069	39,64	98,21	224,91
2014	21	0,399	-0,023	41,71	99,86	18,09

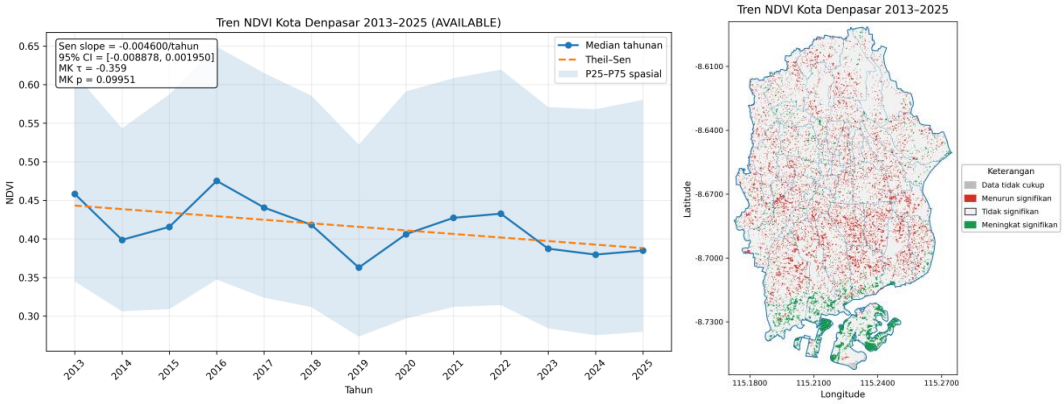
Tahun	*Scene*	Median NDVI	Median NDBI	Median LST (deg C)	*Common* valid (%)	*Common* NoData (ha)
2015	22	0,416	-0,035	39,52	99,86	17,55
2016	17	0,475	-0,096	41,12	99,59	51,84
2017	19	0,441	-0,046	38,58	99,60	50,13
2018	20	0,418	-0,036	38,21	99,83	21,96
2019	21	0,363	0,000	40,23	99,90	11,97
2020	19	0,406	-0,041	36,96	99,62	47,79
2021	18	0,427	-0,037	38,17	100,00	0,36
2022	18	0,433	-0,040	37,11	99,61	48,51
2023	21	0,387	-0,005	38,61	99,99	1,44
2024	22	0,380	-0,027	37,04	100,00	0,36
2025	16	0,385	-0,013	38,01	99,99	1,26

3.1. Tren NDVI di Kota Denpasar

Dinamika NDVI Kota Denpasar selama 2013–2025 menunjukkan variasi antar tahun yang cukup kuat. Berdasarkan Tabel 2, median NDVI berubah dari 0,458 pada 2013 menjadi 0,385 pada 2025, dengan nilai tertinggi 0,475 pada 2016 dan terendah 0,363 pada 2019. Namun, analisis *robust* pada Tabel 3 dan Gambar 6 menghasilkan Sen's slope sebesar −0,00460 tahun^{-1} dengan 95% *confidence* interval −0,00888 hingga +0,00195 dan Mann–Kendall p=0,100, sehingga kecenderungan penurunan tersebut belum dapat dinyatakan sebagai tren monoton yang signifikan pada skala kota. Hasil ini tetap konsisten ketika analisis dibatasi pada piksel dengan data lengkap selama 13 tahun (*strict* temporal *support*), dengan Sen's *slope* −0,00456 tahun^{-1} dan p=0,100. Pada tingkat piksel, setelah koreksi BH-FDR, 8,04% area analisis (1.011,15 ha) mengalami penurunan NDVI signifikan, 4,46% (561,33 ha) meningkat signifikan, sedangkan 87,50% (11.007,00 ha) tidak menunjukkan tren signifikan. Distribusi spasial tahunan pada Gambar 5 selanjutnya memperlihatkan bahwa respons kehijauan tidak tersebar homogen di seluruh wilayah Kota Denpasar.



Gambar 5. Peta spasio-temporal NDVI Kota Denpasar tahun 2013-2025



Gambar 6. Tren median NDVI skala kota dan klasifikasi tren piksel berdasarkan Sen's *slope*, Mann-Kendall, dan BH-FDR (q<0,05)

Fluktuasi median NDVI tersebut menunjukkan bahwa dinamika kehijauan permukaan Kota Denpasar tidak berlangsung secara linear dari tahun ke tahun. Kondisi ini relevan dengan penelitian terdahulu, yang menunjukkan bahwa estimasi tren NDVI dapat dipengaruhi oleh variabilitas antar tahun dan pilihan metodologi deret waktu, sehingga perbedaan antara nilai awal dan akhir periode tidak cukup untuk menyimpulkan adanya tren jangka panjang (Forkel *et al*., 2013). Dalam konteks Denpasar, penelitian sebelumnya juga menunjukkan berlangsungnya dinamika penggunaan ruang yang berpotensi memengaruhi karakter vegetasi. Terjadi perubahan sekitar 20,23 km² lahan bervegetasi menjadi kawasan urban di wilayah

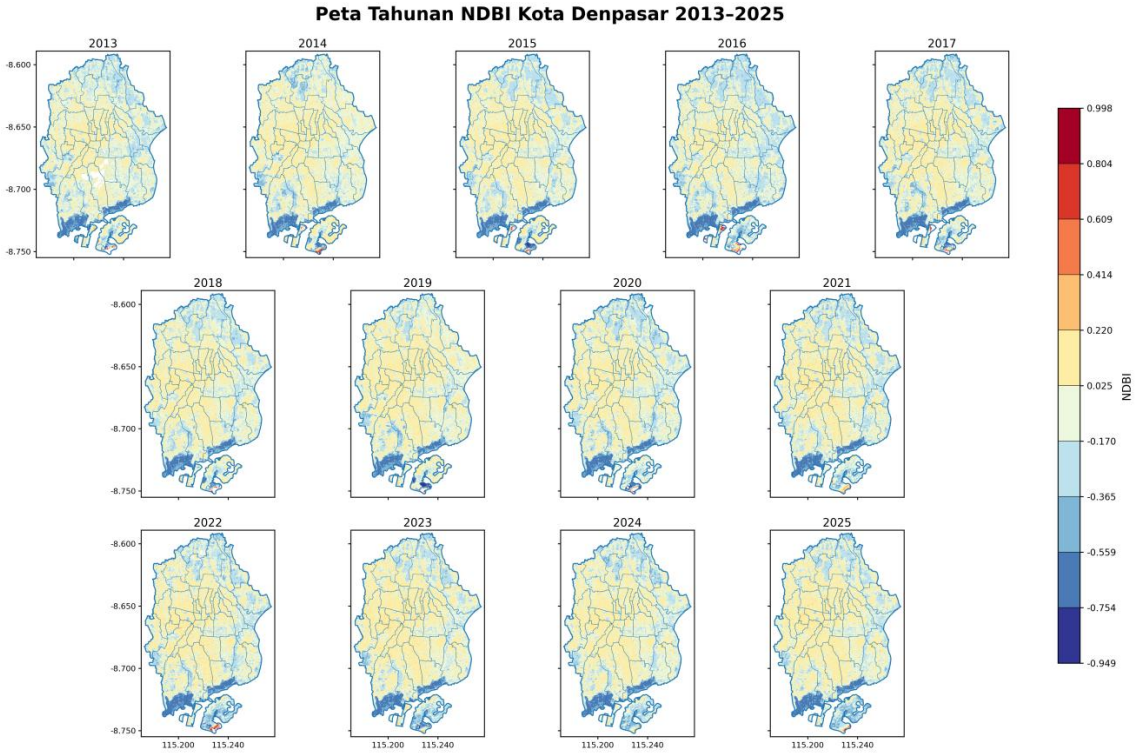
Denpasar–Kuta selama 2013–2021 (Andyana *et al*., 2023), adanya tekanan terhadap kawasan tanaman pangan dan lahan sawah di Denpasar serta kawasan Metropolitan Sarbagita (Alina *et al*., 2025; Ramadhan & Murti, 2024). Temuan-temuan tersebut memberikan konteks yang masuk akal bagi kecenderungan penurunan respons kehijauan, tetapi tidak dapat digunakan untuk menyatakan bahwa piksel NDVI yang menurun pada penelitian ini secara langsung mengalami konversi penggunaan lahan karena klasifikasi dan validasi LULC tidak dilakukan.

Heterogenitas spasial tren NDVI juga menunjukkan bahwa perubahan kehijauan Kota Denpasar berlangsung secara lokal, bukan sebagai penurunan seragam pada seluruh wilayah. Keberadaan area dengan NDVI relatif tinggi maupun peningkatan signifikan pada beberapa lokasi dapat berkaitan dengan mosaik vegetasi perkotaan, sawah, serta vegetasi pesisir yang masih terdapat di wilayah kota. Ruang hijau Denpasar mencapai sekitar 28,22 km² atau 22,1% wilayah kota dan terkonsentrasi terutama di Denpasar Selatan karena keberadaan mangrove dan vegetasi pesisir (Wirayuda *et al*., 2023). Kota Denpasar juga memiliki beberapa daerah yang bervegetasi yang relatif rapat pada beberapa bagian Denpasar Utara, Denpasar Timur, dan Denpasar Selatan (Hadibasyir & Firdaus, 2022). Hal tersebut mendukung interpretasi bahwa struktur vegetasi Kota Denpasar bersifat spasial heterogen, sehingga respons NDVI dapat berbeda antarwilayah dan tidak semata-mata mengikuti satu arah perubahan pada skala kota.

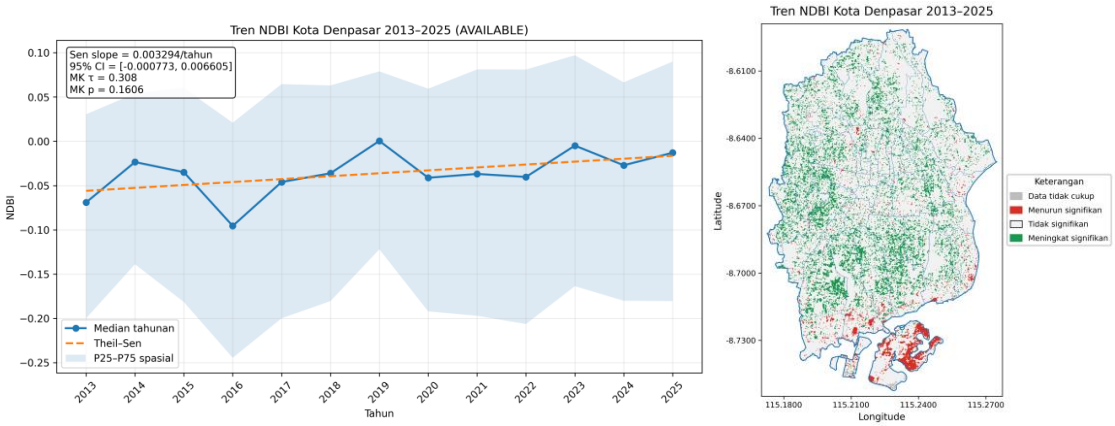
Proporsi area yang tidak menunjukkan tren signifikan sebesar 87,50% setelah koreksi FDR juga menegaskan pentingnya membedakan arah *slope* dari perubahan yang memiliki dukungan statistik. Penggunaan BH-FDR menghasilkan interpretasi yang lebih konservatif dibandingkan klasifikasi berdasarkan ambang *slope* semata, karena mengurangi kemungkinan *false positive* akibat banyaknya pengujian pada tingkat piksel. Oleh karena itu, area dengan penurunan atau peningkatan NDVI yang signifikan lebih tepat diperlakukan sebagai lokasi perubahan respons kehijauan yang terdeteksi secara statistik, bukan sebagai bukti langsung kehilangan atau penambahan vegetasi. Area tersebut dapat menjadi kandidat untuk verifikasi lebih lanjut menggunakan klasifikasi LULC, data vegetasi, atau observasi lapangan pada penelitian berikutnya, sementara hasil penelitian ini tetap dibatasi pada interpretasi NDVI sebagai indikator kontinu kehijauan relatif.

3.2. Tren NDVI di Kota Denpasar

Perubahan karakter spektral permukaan Kota Denpasar selama 2013–2025 memperlihatkan kecenderungan NDBI menuju nilai yang lebih tinggi, meskipun dengan fluktuasi yang nyata antar tahun. Berdasarkan Tabel 2, median NDBI berubah dari −0,069 pada 2013 menjadi −0,013 pada 2025, dengan nilai terendah −0,096 pada 2016 dan nilai tertinggi 0,000 pada 2019. Analisis *robust* pada Tabel 3 dan Gambar 8 menghasilkan Sen's *slope* sebesar +0,00329 tahun^{-1} dengan 95% *confidence* interval −0,00077 hingga +0,00661 dan Mann–Kendall p=0,161. Dengan demikian, terdapat kecenderungan peningkatan respons SWIR1 relatif terhadap NIR, tetapi tren tersebut belum signifikan secara statistik pada skala kota. Hasil *strict* 13-year *support* menunjukkan arah yang serupa (Sen's *slope* +0,00346 tahun^{-1}; p=0,200), sehingga kecenderungan tersebut relatif tidak berubah ketika hanya piksel dengan data lengkap selama 13 tahun yang digunakan. Pada tingkat piksel, setelah koreksi BH-FDR, 15,01% area analisis (1.887,75 ha) menunjukkan peningkatan NDBI signifikan, 3,41% (429,39 ha) mengalami penurunan signifikan, dan 81,58% (10.262,34 ha) tidak menunjukkan tren signifikan. Distribusi tahunan pada Gambar 7 menunjukkan bahwa respons NDBI tetap bersifat spasial heterogen dan tidak berubah secara seragam di seluruh wilayah kota.



Gambar 7. Peta spatio-temporal NDBI Kota Denpasar tahun 2013–2025



Gambar 8. Tren median NDBI skala kota dan klasifikasi tren piksel berdasarkan Sen's *slope*, Mann-Kendall, dan BH-FDR (q<0,05)

Kecenderungan peningkatan NDBI tersebut sejalan dengan dinamika perkembangan kawasan perkotaan yang telah dilaporkan di Denpasar dan wilayah urban-pariwisata di sekitarnya. Andyana *et al*., (2023), melalui klasifikasi tutupan lahan yang tervalidasi, menemukan perubahan sekitar 20,23 km² lahan bervegetasi menjadi kawasan urban di wilayah Denpasar–Kuta selama 2013–2021, sedangkan Alina *et al*., (2025) menunjukkan adanya konversi kawasan tanaman pangan menjadi lahan terbangun di Kota Denpasar. Pada konteks perkotaan lain, juga dilaporkan peningkatan distribusi respons NDBI yang berkaitan dengan perkembangan (Nahdhiyatul *et al*., 2022)kawasan terbangun di Surakarta. Kesamaan arah tersebut

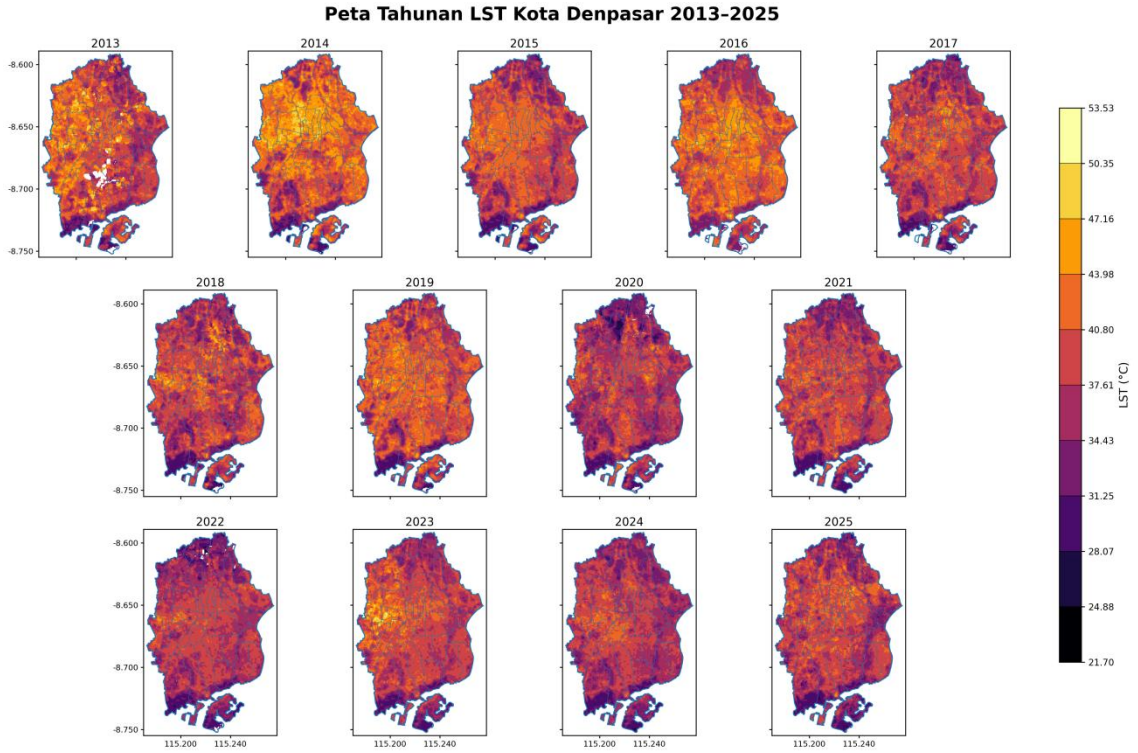
memberikan konteks terhadap peningkatan respons spektral yang ditemukan dalam penelitian ini, tetapi hasil tersebut tidak dapat disamakan secara langsung karena penelitian terdahulu menggunakan pendekatan klasifikasi atau interpretasi penggunaan lahan yang berbeda dengan analisis indeks kontinu yang diterapkan dalam penelitian ini.

Dominannya area yang tidak menunjukkan tren signifikan setelah koreksi FDR menunjukkan bahwa perubahan NDBI di Denpasar lebih tepat dipahami sebagai perubahan spasial yang terlokalisasi, bukan sebagai penguatan karakter permukaan terbangun/kering secara seragam pada seluruh wilayah. Keberadaan 15,01% area dengan peningkatan signifikan menunjukkan adanya sejumlah lokasi yang mengalami perubahan respons spektral secara konsisten, sementara area dengan penurunan signifikan menunjukkan bahwa arah perubahan permukaan juga tidak bersifat tunggal. Pola mosaik ini relevan dengan karakter Kota Denpasar yang tersusun atas kawasan terbangun, sawah, vegetasi perkotaan, mangrove, tanah terbuka, badan air, dan piksel campuran. Dengan demikian, perbedaan respons NDBI antarwilayah dapat mencerminkan kombinasi perubahan kondisi permukaan yang berbeda, bukan satu proses penggunaan lahan yang sama.

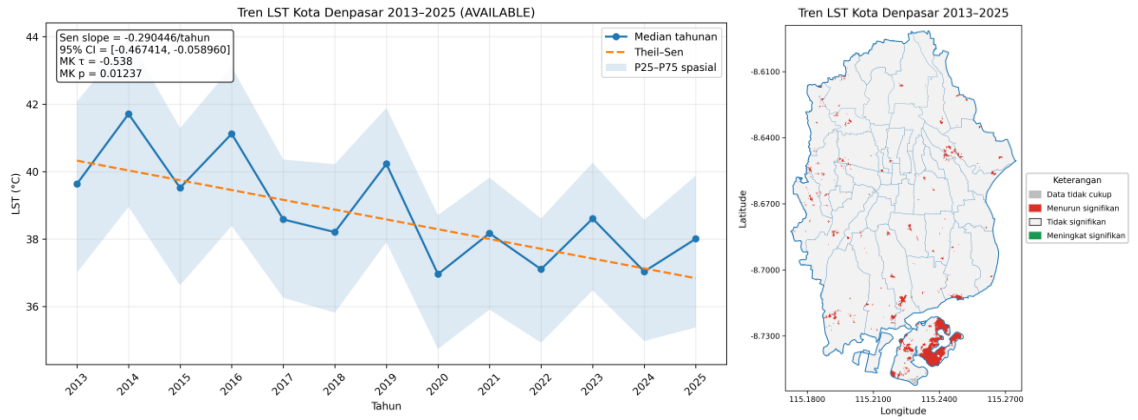
Interpretasi NDBI tetap memerlukan kehati-hatian karena indeks ini tidak secara unik mengidentifikasi permukaan terbangun. Nilai NDBI yang lebih tinggi dapat muncul pada bangunan dan permukaan kering, tetapi juga dapat dipengaruhi oleh tanah terbuka, pasir, kelembapan permukaan, badan air tertentu, maupun komposisi piksel campuran (As-syakur *et al*., 2012; Zha *et al*., 2003). Oleh karena itu, 15,01% area dengan peningkatan NDBI signifikan tidak dapat ditafsirkan sebagai 15,01% pertambahan luas kawasan terbangun. Temuan tersebut lebih tepat menunjukkan lokasi yang mengalami penguatan respons spektral SWIR1–NIR secara signifikan selama periode penelitian. Penetapan apakah perubahan tersebut benar-benar berkaitan dengan pembangunan, pembukaan lahan, perubahan pertanian, atau perubahan kelas LULC lainnya memerlukan klasifikasi tutupan lahan yang tervalidasi pada penelitian lanjutan.

3.3. Tren LST di Kota Denpasar

Dinamika termal permukaan Kota Denpasar selama 2013–2025 memperlihatkan fluktuasi antar tahun yang cukup kuat, tetapi secara keseluruhan bergerak menuju nilai yang lebih rendah. Berdasarkan Tabel 2, median LST tercatat sebesar 39,64 °C pada 2013, meningkat menjadi 41,71 °C pada 2014 dan 41,12 °C pada 2016, kemudian berfluktuasi hingga mencapai 36,96 °C pada 2020, 37,04 °C pada 2024, dan 38,01 °C pada 2025. Analisis *robust* pada Tabel 3 dan Gambar 10 menunjukkan Sen's *slope* sebesar −0,290 °C tahun^{-1} dengan 95% *confidence* interval −0,467 hingga −0,059 °C tahun^{-1} dan Mann–Kendall p=0,012, yang menunjukkan adanya penurunan median LST skala kota yang signifikan. Hasil tersebut tetap konsisten pada strict 13-year temporal *support* dengan *slope* sekitar −0,290 °C tahun^{-1} dan p=0,012. Namun, pada tingkat piksel hanya 2,48% area analisis (312,21 ha) yang mengalami penurunan LST signifikan setelah koreksi BH-FDR, sedangkan 97,52% (12.267,27 ha) tidak menunjukkan tren signifikan dan tidak ditemukan piksel dengan peningkatan LST signifikan. Distribusi spasial pada Gambar 9 memperlihatkan bahwa kondisi termal permukaan tetap heterogen antar bagian wilayah selama periode penelitian.



Gambar 9. Peta spasiotemporal LST Kota Denpasar tahun 2013–2025



Gambar 10. Tren median LST skala kota dan klasifikasi tren piksel berdasarkan Sen's *slope*, Mann-Kendall, dan BH-FDR (q<0,05)

Fluktuasi LST antar tahun menunjukkan bahwa kondisi termal permukaan tidak hanya dikontrol oleh perubahan karakter permukaan jangka panjang, tetapi juga dipengaruhi oleh variasi lingkungan pada waktu observasi deret waktu LST satelit mengandung komponen tren, musiman, dan variabilitas jangka pendek yang dapat dipengaruhi kondisi atmosfer dan karakter permukaan (Quan *et al*., 2016). Pada konteks Denpasar, penelitian lain juga menunjukkan bahwa pola panas permukaan tidak seragam karena dipengaruhi oleh kelembapan, material permukaan, kepadatan bangunan, kondisi cuaca, dan karakter geografis (Wirayuda *et al*., 2023). Hal tersebut membantu menjelaskan mengapa nilai median LST pada

penelitian ini mengalami kenaikan dan penurunan antar periode meskipun analisis jangka panjang menghasilkan tren negatif yang signifikan. Dengan demikian, *slope* negatif tidak menunjukkan bahwa suhu permukaan menurun dengan besaran yang sama pada setiap tahun, tetapi merepresentasikan arah perubahan monoton keseluruhan selama periode 2013–2025.

Heterogenitas termal yang terlihat selama periode penelitian juga konsisten dengan hasil studi sebelumnya di Denpasar dan kawasan pesisir Bali. (Asmiwyati *et al*., 2020) melaporkan bahwa mangrove, badan air, dan sawah di Kota Denpasar memiliki LST lebih rendah dibandingkan kawasan terbangun, sedangkan (Diara *et al*., 2024) menunjukkan bahwa perbedaan penggunaan dan tutupan lahan pada kawasan wisata pesisir Bali menghasilkan respons LST yang berbeda. Hal tersebut relevan dengan karakter ROI penelitian ini yang mencakup mosaik kawasan terbangun, sawah, vegetasi perkotaan, mangrove, badan air/perairan, tanah terbuka, dan piksel campuran. Temuan penelitian ini juga sejalan secara konseptual dengan (Cetin *et al*., 2024), yang menunjukkan bahwa urbanisasi tidak selalu diikuti peningkatan LST secara monoton dan bahwa kondisi lingkungan lokal dapat menghasilkan dinamika termal yang lebih kompleks. Karena penelitian ini tidak melakukan stratifikasi berdasarkan LULC, variasi pada Gambar 9 harus dipahami sebagai respons termal keseluruhan mosaik Kota Denpasar dan tidak dapat langsung distribusikan kepada satu jenis permukaan tertentu.

Perbedaan antara penurunan median LST yang signifikan pada skala kota dan hanya 2,48% area dengan penurunan signifikan pada tingkat piksel menunjukkan pentingnya membedakan perubahan agregat dari signifikansi lokal. Pergeseran distribusi termal yang kecil tetapi terjadi pada banyak lokasi dapat menghasilkan tren median kota, sedangkan masing-masing piksel belum tentu memiliki perubahan yang cukup konsisten untuk melewati kriteria Mann–Kendall dan BH-FDR. Oleh karena itu, hasil penelitian tidak mendukung generalisasi bahwa seluruh Kota Denpasar mengalami pendinginan permukaan secara seragam, melainkan menunjukkan penurunan signifikan pada statistik agregat kota yang disertai respon spasial lokal yang sebagian besar tidak signifikan. Selain itu, LST yang digunakan merupakan suhu radiometrik permukaan dari Landsat dan bukan suhu udara maupun ukuran langsung paparan atau risiko panas manusia, sehingga hasil ini sebaiknya dibatasi pada interpretasi perubahan kondisi termal permukaan.

Tabel 3. Ringkasan tren robust skala kota dan proporsi kelas tren piksel setelah FDR.

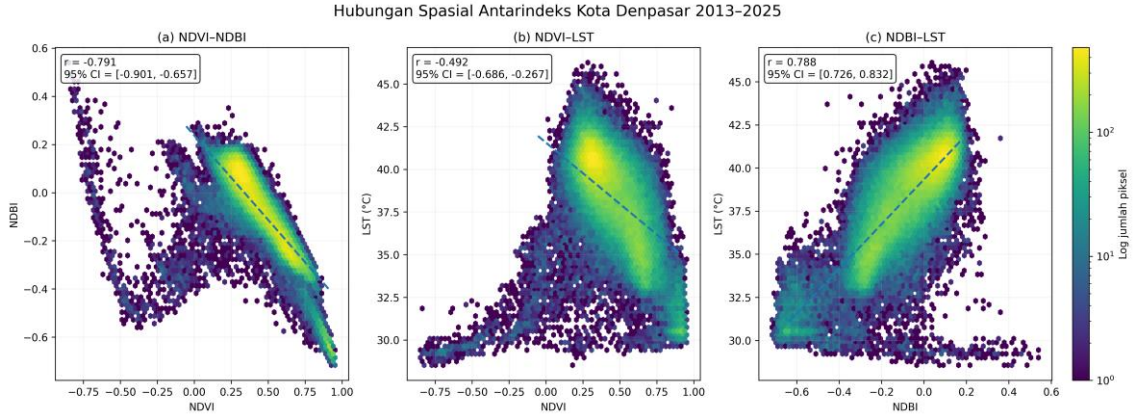
Parameter	Sen slope	95% CI	MK p	Menurun sig. (%)	Tidak sig. (%)	Meningkat sig. (%)	Interpretasi kota
NDVI	-0,00460/th	-0,00888 s.d. 0,00195	0,100	8,04	87,50	4,46	Kecenderungan menurun, tidak signifikan
NDBI	0,00329/th	-0,00077 s.d. 0,00661	0,161	3,41	81,58	15,01	Kecenderungan meningkat, tidak signifikan
LST	-0,290 °C/th	-0,467 s.d. -0,059	0,012	2,48	97,52	0,00	Menurun signifikan

3.4. Hubungan NDVI, NDBI, dan LST

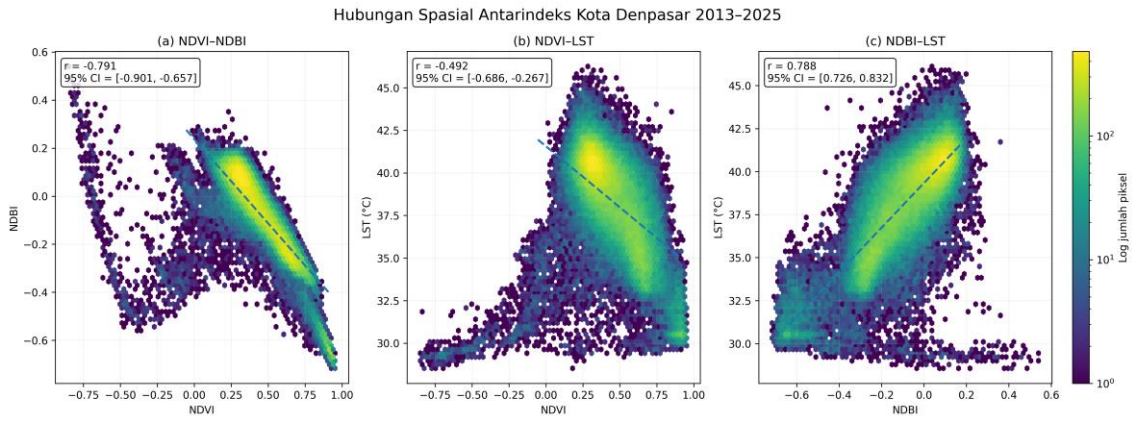
Analisis hubungan NDVI, NDBI, dan LST digunakan untuk menangkap tiga dimensi permukaan yang saling melengkapi, yaitu kehijauan relatif melalui NDVI, respons spektral permukaan terbangun/kering melalui NDBI, dan kondisi termal permukaan melalui LST. Namun, hubungan ketiganya perlu dibedakan antara perbedaan karakter antar-lokasi dan perubahan dari tahun ke tahun pada lokasi yang sama. Berdasarkan Gambar 11 dan Tabel 4, hubungan *between-pixel* menunjukkan korelasi negatif kuat antara NDVI–NDBI (r = −0,791; 95% CI: −0,901 hingga −0,657), korelasi negatif sedang antara NDVI–LST (r = −0,492; 95% CI: −0,686 hingga −0,267), serta korelasi positif kuat antara NDBI–LST (r = 0,788; 95% CI: 0,726–0,832). Dengan demikian, pada mosaik permukaan Kota Denpasar, lokasi yang secara rata-rata mempunyai tingkat kehijauan lebih tinggi cenderung memiliki NDBI dan LST lebih rendah, sedangkan

lokasi dengan respons NDBI lebih tinggi cenderung mempunyai kondisi termal permukaan yang lebih tinggi. Pemisahan ini memberikan informasi yang lebih spesifik dibanding korelasi *pooled pixel-year*, yang dalam Tabel 4 hanya dipertahankan sebagai statistik deskriptif karena pengamatan piksel dan tahun tidak bersifat independen.

Pola *between-pixel* tersebut secara umum konsisten dengan penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa vegetasi cenderung berasosiasi dengan kondisi termal permukaan yang lebih rendah, sedangkan permukaan terbangun atau kering cenderung berkaitan dengan LST yang lebih tinggi (Abir & Saha, 2021; Altıner & Bingöl, 2025; Cetin *et al*., 2024; Faisal *et al*., 2021). Dalam konteks lokal, vegetasi rapat, sawah, mangrove, dan badan air di Denpasar dan kawasan pesisir Bali umumnya memiliki suhu permukaan relatif lebih rendah dibandingkan tanah terbuka dan permukaan terbangun (Asmiwyati *et al*., 2020; Diara *et al*., 2024; Hadibasyir & Firdaus, 2022). Temuan Gambar 11, khususnya korelasi NDBI–LST yang lebih kuat dibanding NDVI–LST, menunjukkan bahwa kontras termal antar-lokasi pada ROI lebih erat mengikuti perbedaan respons spektral permukaan terbangun/kering daripada variasi kehijauan semata. Meskipun demikian, hubungan tersebut merepresentasikan kontras spasial seluruh ROI yang heterogen dan tidak dapat secara langsung diterjemahkan sebagai pengaruh kausal suatu jenis tutupan lahan terhadap LST.



Gambar 11. Hexbin hubungan antar-pixel NDVI-NDBI, NDVI-LST, dan NDBI-LST. Nilai r dilengkapi dengan 95% *confidence* interval dari *spatial block*



Gambar 12. Hexbin hubungan dalam-*pixel* berdasarkan anomali tahunan terhadap *mean* temporal masing-masing piksel

Interpretasi menjadi berbeda ketika hubungan dianalisis pada lokasi yang sama dari tahun ke tahun. Berdasarkan Gambar 12 dan Tabel 4, korelasi *within-pixel* NDVI–NDBI tetap negatif kuat (r = −0,737;

95% CI: −0,776 hingga −0,690), tetapi hubungan NDVI–LST melemah menjadi r = −0,090 (95% CI: −0,145 hingga −0,047), sedangkan NDBI–LST hanya r = 0,115 (95% CI: 0,053–0,171). Perbedaan yang tajam antara hasil *between-pixel* dan *within-pixel* menunjukkan bahwa kontras spasial antar-lokasi jauh lebih kuat dibanding kovariasi tahunan LST pada piksel yang sama. Dengan kata lain, lokasi yang secara rata-rata lebih hijau memang cenderung lebih sejuk dan lokasi dengan respons NDBI lebih tinggi cenderung lebih hangat, tetapi kenaikan atau penurunan NDVI maupun NDBI dari satu tahun ke tahun berikutnya pada suatu piksel tidak selalu disertai perubahan LST dengan kekuatan yang sama. Hal ini relevan dengan penelitian terdahulu yang menekankan bahwa LST tahunan tidak hanya dipengaruhi karakter permukaan, tetapi juga kelembapan, curah hujan sebelumnya, kondisi atmosfer, musim, dan kondisi cuaca saat observasi (Asmiwyati *et al*., 2020; Diara *et al*., 2024; Wirayuda *et al*., 2023).

Interpretasi hubungan tersebut tetap memerlukan kehati-hatian. Korelasi negatif NDVI–NDBI tidak sepenuhnya dapat dianggap sebagai bukti bahwa peningkatan permukaan terbangun menyebabkan penurunan vegetasi, karena kedua indeks menggunakan kanal NIR dengan struktur matematis yang berbeda arah sehingga sebagian korelasi dapat bersifat struktural; selain itu, NDBI juga dapat merespons tanah terbuka, pasir, permukaan kering, dan piksel campuran (As-syakur *et al*., 2012). Pada sisi statistik, residual hubungan antar-piksel masih menunjukkan auto korelasi spasial yang signifikan, dengan Moran's I = 0,523 untuk NDVI–NDBI, 0,616 untuk NDVI–LST, dan 0,589 untuk NDBI–LST; seluruhnya memiliki *permutation* p = 0,002. Oleh karena itu, 95% *confidence* interval pada Gambar 11 diestimasi melalui *spatial block bootstrap* untuk mengurangi asumsi *independensi* antar piksel, tetapi struktur spasial yang tersisa menunjukkan bahwa koefisien pada Tabel 4 tetap harus diperlakukan sebagai asosiasi pada skala penelitian, bukan parameter kausal yang bersifat universal (Dormann *et al*., 2007; Ives *et al*., 2021).

Tabel 4. Hubungan *between-pixel* dan *within-pixel* antar indeks

Pasangan	Pooled r (deskriptif)	Between r	95% CI between	Within r	95% CI within
NDVI-NDBI	-0,785	-0,791	-0,901 s.d. -0,657	-0,737	-0,776 s.d. -0,690
NDVI-LST	-0,385	-0,492	-0,686 s.d. -0,267	-0,090	-0,145 s.d. -0,047
NDBI-LST	0,609	0,788	0,726 s.d. 0,832	0,115	0,053 s.d. 0,171

4. Simpulan

Analisis multitemporal Landsat 8 periode 2013–2025 menunjukkan bahwa dinamika biofisik dan termal Kota Denpasar tidak berlangsung secara seragam, baik secara temporal maupun spasial. Dengan jendela observasi yang distandarkan pada 1 Juni–30 November dan *common mask* tahunan, cakupan data sangat tinggi, yaitu 99,93% ROI memiliki sedikitnya delapan tahun valid dan 97,24% memiliki data lengkap selama 13 tahun. Pada skala kota, NDVI menunjukkan kecenderungan menurun yang tidak signifikan dengan Sen's *slope* −0,00460 tahun^{-1} (p=0,100), NDBI menunjukkan kecenderungan meningkat yang tidak signifikan sebesar +0,00329 tahun^{-1} (p=0,161), sedangkan LST menunjukkan penurunan yang signifikan sebesar −0,290 °C tahun^{-1} (p=0,012). Setelah koreksi BH-FDR pada tingkat piksel, penurunan NDVI signifikan ditemukan pada 8,04% area analisis, peningkatan NDBI signifikan pada 15,01%, dan penurunan LST signifikan pada 2,48%, sementara tidak ditemukan peningkatan LST yang signifikan. Temuan tersebut menunjukkan bahwa perubahan yang terdeteksi secara statistik cenderung bersifat lokal dan heterogen, sehingga kecenderungan pada skala kota tidak dapat dianggap mewakili perubahan seragam pada seluruh wilayah.

Analisis hubungan antar variabel memperkuat pentingnya membedakan variasi spasial antar-lokasi dari perubahan temporal pada lokasi yang sama. Hubungan *between-pixel* menunjukkan korelasi negatif kuat antara NDVI–NDBI (r=−0,791), negatif sedang antara NDVI–LST (r=−0,492), dan positif kuat antara NDBI–LST (r=0,788). Sebaliknya, hubungan *within-pixel* dengan LST jauh lebih lemah, yaitu NDVI–LST

r=−0,090 dan NDBI–LST r=0,115, sedangkan NDVI–NDBI tetap menunjukkan hubungan negatif kuat (r=−0,737). Dengan demikian, lokasi yang secara rata-rata lebih hijau cenderung memiliki kondisi termal permukaan lebih rendah, sedangkan lokasi dengan respons NDBI lebih tinggi cenderung memiliki LST lebih tinggi, tetapi pola spasial tersebut tidak berarti bahwa perubahan NDVI atau NDBI dari tahun ke tahun pada suatu piksel akan diikuti perubahan LST dengan kekuatan yang sama. Hasil ini juga menegaskan bahwa NDBI harus diperlakukan sebagai respons spektral permukaan terbangun/kering, bukan bukti langsung ekspansi bangunan, dan LST sebagai indikator kondisi termal permukaan, bukan suhu udara maupun ukuran langsung risiko panas manusia.

Penelitian ini masih memiliki keterbatasan karena seluruh wilayah administratif dianalisis sebagai satu ROI heterogen tanpa stratifikasi darat–perairan atau kelas LULC, tidak dilakukan validasi independen terhadap perubahan tutupan lahan maupun LST, dan ketergantungan spasial masih tersisa meskipun ketidakpastian hubungan telah dievaluasi melalui *spatial block bootstrap*. Oleh karena itu, penelitian berikutnya disarankan mengintegrasikan klasifikasi LULC atau *impervious surface* yang tervalidasi, memisahkan analisis berdasarkan tipe permukaan, serta menggunakan data termal atau meteorologis independen untuk mengevaluasi konsistensi LST. Analisis lanjutan juga dapat memasukkan faktor pengontrol seperti curah hujan, kelembapan, ENSO–IOD, atau variabilitas musiman untuk menjelaskan penyebab perubahan temporal, serta menambahkan data paparan dan kerentanan apabila hasil termal akan dikembangkan untuk kajian risiko panas perkotaan. Dengan demikian, peta tren signifikan yang dihasilkan oleh penelitian ini lebih tepat digunakan sebagai kandidat lokasi untuk verifikasi dan analisis lanjutan, bukan sebagai dasar tunggal penetapan prioritas intervensi.

Daftar Pustaka

Abir, F. A., & Saha, R. (2021). Assessment of land surface temperature and land cover variability during winter: A spatio-temporal analysis of Pabna municipality in Bangladesh. *Environmental Challenges*, *4*, 100167. https://doi.org/10.1016/J.ENVC.2021.100167

Alina, A., Pradana, G. W., Sencaki, D. B., Hariyanto, B., Mahardiani, I. W., & Khatimah, A. R. (2025). Spatial Analysis and Policy Study of Food Crop Areas Realization in Denpasar City. *Journal of Social Dynamics and Governance*, *2*(2), 73–94. https://doi.org/10.26740/JSDG.V2I2.41043

Altıner, F., & Bingöl, F. (2025). Spatio-Temporal Assessment of Land Surface Temperature, Vegetation Cover, and Built-Up Areas Using LST, NDVI, and NDBI in Balıkesir, Türkiye (1985–2025). *Sustainability*, *17*(20), 9245. https://doi.org/10.3390/SU17209245

Andyana, I., As-syakur, A., Sunarta, I., Suyarto, R., Diara, I., Susila, K., Saifulloh, M., Kusmiyarti, T., & Wiyanti, W. (2023). Urban tourism expansion monitoring by remote sensing and random forest. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *1180*(1), 012046. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1180/1/012046

Asmiwyati, I. G. A. A. R., Sugianthara, A. A. G., & Wardi, I. N. (2020). Identifikasi suhu permukaan terhadap penutupan lahan dari Landsat 8: studi kasus Kota Denpasar. *Arsitektur Lansekap*, *6*(2), 240–246. http://ojs.unud.ac.id/index.php/lanskap

As-syakur, A. R., Adnyana, I. W. S., Arthana, I. W., & Nuarsa, I. W. (2012). Enhanced Built-Up and Bareness Index (EBBI) for Mapping Built-Up and Bare Land in an Urban Area. *Remote Sensing, 4*(10), 2957–2970. https://doi.org/10.3390/RS4102957

Benjamini, Y., & Hochberg, Y. (1995). Controlling the False Discovery Rate: A Practical and Powerful Approach to Multiple Testing. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, *57*(1), 289–300. https://doi.org/10.1111/J.2517-6161.1995.TB02031.X

Cetin, M., Ozenen Kavlak, M., Senyel Kurkcuoglu, M. A., Bilge Ozturk, G., Cabuk, S. N., & Cabuk, A. (2024). Determination of land surface temperature and urban heat island effects with remote sensing capabilities: the case of Kayseri, Türkiye. *Natural Hazards 2024 120:6*, *120*(6), 5509–5536. https://doi.org/10.1007/S11069-024-06431-5

Diara, I. W., Susila, K. D., Wiyanti, Sunarta, I. N., Kusmiyarti, T. B., & Saifulloh, M. (2024). Exploring the Influence of Various Land Use Land Cover on Land Surface Temperature of Coastal Tourism Areas in Bali Using Landsat 9. *Environmental Research, Engineering and Management* , *80*(2), 118–132. https://doi.org/10.5755/J01.EREM.80.2.34693

Dormann, C. F., McPherson, J. M., Araújo, M. B., Bivand, R., Bolliger, J., Carl, G., Davies, R. G., Hirzel, A., Jetz, W., Daniel Kissling, W., Kühn, I., Ohlemüller, R., Peres-Neto, P. R., Reineking, B., Schröder, B., Schurr, F. M., & Wilson, R. (2007). Methods to account for spatial autocorrelation in the analysis of species distributional data: A review. *Ecography*, *30*(5), 609–628. https://doi.org/10.1111/J.2007.0906-7590.05171.X;REQUESTEDJOURNAL:JOURNAL:16000587;PAGEGROUP:STRING:PUBLICATION

Faisal, A. Al, Kafy, A. A., Al Rakib, A., Akter, K. S., Jahir, D. M. A., Sikdar, M. S., Ashrafi, T. J., Mallik, S., & Rahman, M. M. (2021). Assessing and predicting land use/land cover, land surface temperature and urban thermal field variance index using Landsat imagery for Dhaka Metropolitan area. *Environmental Challenges*, *4*, 100192. https://doi.org/10.1016/J.ENVC.2021.100192

Forkel, M., Carvalhais, N., Verbesselt, J., Mahecha, M. D., Neigh, C. S. R., & Reichstein, M. (2013). Trend Change Detection in NDVI Time Series: Effects of Inter-Annual Variability and Methodology. *Remote Sensing*, *5*(5), 2113–2144. https://doi.org/10.3390/RS5052113

Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, *202*, 18–27. https://doi.org/10.1016/J.RSE.2017.06.031

Hadibasyir, H. Z., & Firdaus, N. S. (2022). Effect of Vegetation and Building Densities to Urban Thermal Comfort (Case Study of Denpasar City). *Jurnal Purifikasi*, *21*(1), 11–19. https://doi.org/10.12962/J25983806.V21.I1.430

Hu, Y., Li, H., Amir Siddique, M., & Liu, D. (2023). Assessing the Impact of Spatiotemporal Land Cover Changes on the Urban Heat Islands in Developing Cities with Landsat Data: A Case Study in Zhanjiang. *Atmosphere, 14*(12), 1716. https://doi.org/10.3390/ATMOS14121716

Ives, A. R., Zhu, L., Wang, F., Zhu, J., Morrow, C. J., & Radeloff, V. C. (2021). Statistical inference for trends in spatiotemporal data. *Remote Sensing of Environment*, *266*, 112678. https://doi.org/10.1016/J.RSE.2021.112678

Jimenez-Munoz, J. C., Sobrino, J. A., Skokovic, D., Mattar, C., & Cristobal, J. (2014). Land Surface Temperature Retrieval Methods from Landsat-8 Thermal Infrared Sensor Data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, *11*(10), 1840–1843. https://doi.org/10.1109/LGRS.2014.2312032

Lai, J., Zhan, W., Huang, F., Quan, J., Hu, L., Gao, L., & Ju, W. (2018). Does quality control matter? Surface urban heat island intensity variations estimated by satellite-derived land surface temperature products. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *139*, 212–227. https://doi.org/10.1016/J.ISPRSJPRS.2018.03.012

Malakar, N. K., Hulley, G. C., Hook, S. J., Laraby, K., Cook, M., & Schott, J. R. (2018). An Operational Land Surface Temperature Product for Landsat Thermal Data: Methodology and Validation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *56*(10), 5717–5735. https://doi.org/10.1109/TGRS.2018.2824828

Mann, H. B. (1945). Nonparametric Tests Against Trend. *Econometrica*, *13*(3), 245. https://doi.org/10.2307/1907187

Moravec, D., Komárek, J., Medina, S. L. C., & Molina, I. (2021). Effect of Atmospheric Corrections on NDVI: Intercomparability of Landsat 8, Sentinel-2, and UAV Sensors. *Remote Sensing, 13*(18), 3550. https://doi.org/10.3390/RS13183550

Nahdhiyatul, V., Danardono, F., Iqbal, M., Sunariya, T., Cholil, M., Hafid, A., & Islam, M. I. (2022). Spatio-temporal analysis of built-up area and land surface temperature in Surakarta using Landsat

imageries. *Sustinere Journal of Environment and Sustainability*, *6*, 92–101. https://doi.org/10.22515/sustinere.jes.v6i2.187

Novanda, I. G. A., Wahyudin, Andiani, A. A. E., & Dewi, G. A. I. P. (2026). Analisis Variabilitas Curah Hujan, Suhu Udara, Dan Suhu Permukaan Tanah Selama Periode 2000-2022 Di Pulau Bali Dengan Memanfaatkan Data Penginderaan Jauh. *Jurnal Geografi, Edukasi Dan Lingkungan (JGEL)*, *10*(2), 249–271. https://doi.org/10.22236/JGEL.V10I2.20738

Pearson, K. (1896). VII. Mathematical contributions to the theory of evolution.—III. Regression, heredity, and panmixia. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A: Containing Papers of a Mathematical or Physical Character*, (187), 253–318. https://doi.org/10.1098/RSTA.1896.0007

Quan, J., Zhan, W., Chen, Y., Wang, M., & Wang, J. (2016). Time series decomposition of remotely sensed land surface temperature and investigation of trends and seasonal variations in surface urban heat islands. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *121*(6), 2638–2657. https://doi.org/10.1002/2015JD024354

Rahmi, K. I. N., Pane, M. R., Adella, T. R., Nugroho, J. T., Febrianti, N., & Ulfa, K. (2024). The use of Landsat-8 in Google Earth Engine to analyze Urban Heat Island in Bogor City. *Jurnal Pendidikan Geografi: Kajian, Teori, Dan Praktek Dalam Bidang Pendidikan Dan Ilmu Geografi*, *29*(2), 121–134. https://doi.org/10.17977/um017v29i22024p121-134

Ramadhan, S., & Murti, R. P. W. (2024). Dinamika Alih Fungsi Lahan Sawah dan Upaya Perlindungan Lahan Pertanian Pangan Berkelanjutan di Wilayah Metropolitan Sarbagita. *Tunas Agraria*, *7*(3), 303–325. https://doi.org/10.31292/JTA.V7I3.357

Schober, P., & Schwarte, L. A. (2018). Correlation coefficients: Appropriate use and interpretation. *Anesthesia and Analgesia*, *126*(5), 1763–1768. https://doi.org/10.1213/ANE.0000000000002864

Sen, P. K. (1968). Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. *Journal of the American Statistical Association*, *63*(324), 1379–1389. https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934

Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, *8*(2), 127–150. https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0

U.S. Geological Survey. (2024). *Landsat 8-9 Collection 2 (C2) Level 2 Science Product (L2SP) Guide*.

Vohra, R., Kumar, A., Jain, R., & Hemanth, D. J. (2024). Analysis and prediction of land surface temperature with increasing urbanisation using satellite imagery. *Heliyon*, *10*(22). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40378

Voogt, J. A., & Oke, T. R. (2003). Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment*, *86*(3), 370–384. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00079-8

Weng, Q. (2009). Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: Methods, applications, and trends. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *64*(4), 335–344. https://doi.org/10.1016/J.ISPRSJPRS.2009.03.007

Wilks, D. S. (2016). "The Stippling Shows Statistically Significant Grid Points": How Research Results are Routinely Overstated and Overinterpreted, and What to Do about It. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *97*(12), 2263–2273. https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00267.1

Wirayuda, I. K. A. K., Widayani, P., & Sekaranom, A. B. (2023). Urban Green Space Analysis and its Effect on the Surface Urban Heat Island Phenomenon in Denpasar City, Bali. *Forest and Society*, *7*(1), 150–168. https://doi.org/10.24259/fs.v7i1.24526

Zaitunah, A., Samsuri, Silitonga, A. F., & Syaufina, L. (2022). Urban Greening Effect on Land Surface Temperature. *Sensors 2022*, *22*(11), 4168. https://doi.org/10.3390/S22114168

Zha, Y., Gao, J., & Ni, S. (2003). Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. *International Journal of Remote Sensing*, *24*(3), 583–594. https://doi.org/10.1080/01431160304987

Zhou, D., Xiao, J., Bonafoni, S., Berger, C., Deilami, K., Zhou, Y., Frolking, S., Yao, R., Qiao, Z., & Sobrino, J. A. (2018). Satellite Remote Sensing of Surface Urban Heat Islands: Progress, Challenges, and Perspectives. *Remote Sensing, 11*(1), 48. https://doi.org/10.3390/RS11010048