

PEMANTAUAN KEKERINGAN MENGGUNAKAN TEMPERATURE VEGETATION DRYNESS INDEX (TVDI) DAN HUBUNGANNYA DENGAN TEKANAN ANTROPOGENIK DI KOTA MALANG

Muhammad Naufal Tamam Sartono^{1*}, Reinada Mutiara², Ighfirlah Hayya³, Radhwa Irsy⁴,
Andhika Putra Ilhami⁵, Muhammad Yazid Hidayatullah⁶, Sony Nugratama Hijrawadi⁷, Tri
Wandi Januar⁸

^{1,2,3,4,5,6,7,8}Geografi, Universitas Negeri Jakarta, humas@unj.ac.id
muhammad.naufal.tamam02@mhs.unj.ac.id^{1*} reinada.mutiara.rizkie@mhs.unj.ac.id²
ighfirlah.hayya@mhs.unj.ac.id³ radhwa.irsya.alifa@mhs.unj.ac.id⁴ andhika.putra.ilhami@mhs.unj.ac.id⁵
muhamad.yazid.hidayatullah@mhs.unj.ac.id⁶ sonynugratama@unj.ac.id⁷ januar.triwandi@g.ncu.edu.tw⁸

ABSTRAK

Abstrak: Fenomena kekeringan di wilayah perkotaan semakin diperparah oleh tekanan aktivitas manusia dan perubahan iklim. Penelitian ini bertujuan untuk memantau kekeringan dan hubungannya dengan tekanan antropogenik di Kota Malang periode 2015, 2020, dan 2025. Metode yang digunakan mengintegrasikan *Temperature Vegetation Dryness Index* (TVDI) yang dihitung dari *Land Surface Temperature* (LST) dan *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) menggunakan citra Landsat 8, serta *Anthropogenic Pressure Index* (API) yang memanfaatkan data cahaya malam (VIIRS-NTL) dan *Point of Interest* (POI). Hasil penelitian menunjukkan penurunan tutupan vegetasi secara signifikan di pusat kota yang diikuti oleh peningkatan suhu permukaan hingga melebihi 32°C pada tahun 2025. Analisis TVDI memperlihatkan perluasan area kekeringan dari pusat kota ke arah pinggiran, dengan dominasi nilai kekeringan sedang hingga tinggi pada tahun 2025 akibat hilangnya vegetasi dan kenaikan suhu. Sementara itu, tekanan antropogenik tertinggi berada di Kecamatan Klojen, berkorelasi positif dengan intensitas pembangunan. Penelitian ini merekomendasikan intervensi tata ruang berbasis data spasial untuk mendukung *Sustainable Development Goals* (SDGs) 13 dalam mitigasi perubahan iklim perkotaan.

Kata Kunci: *Kekeringan, Kota Malang, TVDI, Tekanan Antropogenik, Penginderaan Jauh*

Abstract: *The phenomenon of drought in urban areas is further exacerbated by the pressure of human activities and climate change. This study aims to monitor drought and its relationship to anthropogenic pressure in Malang City in the period 2015, 2020, and 2025. The method used integrates the Temperature Vegetation Dryness Index (TVDI) calculated from Land Surface Temperature (LST) and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) using Landsat 8 imagery, as well as the Anthropogenic Pressure Index (API) utilizing night light data (VIIRS-NTL) and Point of Interest (POI). The results show a significant decrease in vegetation cover in the city center followed by an increase in surface temperature to exceed 32°C in 2025. The TVDI analysis shows an expansion of the drought area from the city center towards the outskirts, with a dominance of moderate to high drought values in 2025 due to the strong sensitivity between vegetation loss and temperature increases. Meanwhile, the highest anthropogenic pressure is concentrated in Klojen District, positively correlated with development intensity. This study recommends*

spatial data-based spatial planning interventions to support Sustainable Development Goals (SDGs) 13 in mitigating urban climate change.

Keywords: Drought, Malang City, TVDI, Anthropogenic Pressure, Remote Sensing

Article History:

Received: 18-12-2025

Revised : 29-03-2026

Accepted: 30-03-2026

Online : 10-04-2026



This is an open access article under the
CC-BY-SA license

A. LATAR BELAKANG

Fenomena kekeringan secara mendasar dapat didefinisikan sebagai defisit ketersediaan air yang berkepanjangan pada suatu wilayah akibat penyimpangan kondisi iklim, yakni anomali pola cuaca jangka panjang seperti penurunan curah hujan dan anomali suhu ekstrem (Maulana & Bioresita, 2023; Sutran et al., 2023). Fenomena kekeringan merupakan salah satu bentuk bencana hidrometeorologi yang proses kejadiannya tidak selalu tampak secara langsung, namun berdampak signifikan terhadap berbagai aspek kehidupan manusia (Sanjaya et al., 2024; Yuan et al., 2023). Kekeringan dapat muncul dalam beberapa tipe, seperti kekeringan meteorologis akibat penurunan curah hujan ekstrem, kekeringan hidrologis karena menurunnya debit sungai dan muka air tanah, kekeringan pertanian ketika tanah kehilangan kelembapan yang diperlukan tanaman, serta kekeringan sosial-ekonomi saat berkurangnya pasokan air memengaruhi kegiatan masyarakat (Julianto & Ediyanto, 2021). Selain faktor alam, Indeks tekanan antropogenik pada konteks perkotaan merepresentasikan seberapa kuat aktivitas manusia memengaruhi kondisi suatu wilayah kota, biasanya Indeks tekanan antropogenik dihitung dari kepadatan pusat aktivitas, jaringan jalan, dan cahaya malam (CNLI) yang mewakili tingkat keramaian dan intensitas kegiatan dan mobilitas manusia (Januar, 2025). Tingginya aktivitas manusia seperti ekspansi lahan terbangun, deforestasi, dan eksploitasi sumber daya air juga memperkuat kerentanan suatu wilayah terhadap kekeringan (Ruuhulhaq et al., 2025; Wahyuni & Suranto, 2021). Perubahan kondisi hidrologi akibat pembangunan dan ketidakseimbangan *input-output* air menyebabkan banyak daerah menghadapi kekeringan hampir setiap musim kemarau (Achmad, 2018). Kombinasi antara faktor alam dan aktivitas antropogenik ini memperkuat korelasi antara dinamika tata lingkungan dan peningkatan kejadian kekeringan di berbagai wilayah (Inter-Agency Task Force on Climate Change and Disaster Risk Reduction, 2007).

Kejadian kekeringan juga terjadi pada wilayah penelitian di Kota Malang, terutama pada wilayah perkotaan di bagian tengah hingga selatan (Puspita et al., 2022). Peningkatan frekuensi, intensitas, dan durasi kekeringan juga tidak dapat dilepaskan dari pemanasan global. Laporan IPCC menunjukkan bahwa perubahan pola presipitasi, anomali suhu ekstrem, dan peningkatan evapotranspirasi merupakan faktor yang memperparah kondisi kekeringan global (IPCC, 2023; Sanjaya et al., 2024). Aktivitas manusia, terutama penggunaan bahan bakar fosil, telah meningkatkan konsentrasi gas rumah kaca yang menyebabkan kenaikan suhu rata-rata bumi setidaknya 1,1°C sejak 1880 (Arora & Mishra, 2023). Kondisi ini memperkuat kecenderungan kejadian kekeringan yang lebih panjang dan intens, seperti fenomena El Niño kuat 2015–2016 yang menimbulkan gangguan besar pada

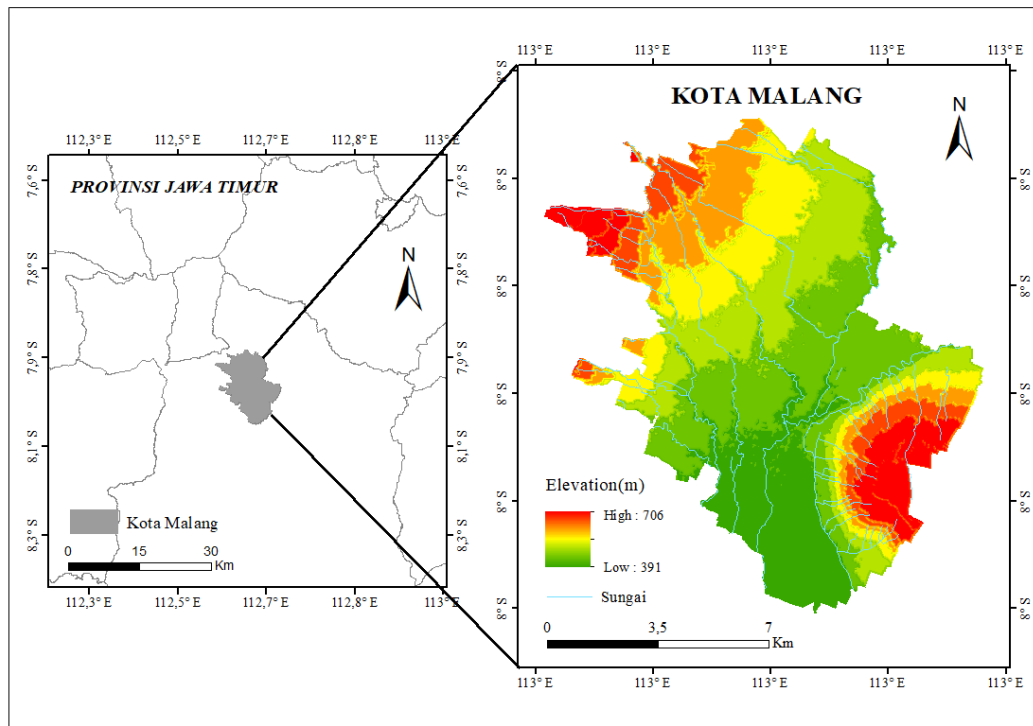
sektor pertanian dan kesejahteraan masyarakat Indonesia (IPCC, 2023). Fenomena tersebut menunjukkan bahwa perubahan iklim memiliki dampak yang saling terhubung lintas sektor, dari ekologi hingga sosial-ekonomi. Dengan meningkatnya anomali iklim, wilayah-wilayah yang sebelumnya memiliki ketahanan air yang baik kini ikut mengalami tekanan kekeringan yang lebih berat.

Kajian terdahulu pada wilayah administratif terdekat yakni Kabupaten Malang, menjadi salah satu wilayah yang memiliki kerentanan tinggi terhadap kekeringan. Beberapa kecamatan seperti Jabung dan Gedangan memperlihatkan kondisi kekeringan yang mengkhawatirkan, baik dari segi ketersediaan air tanah maupun dampaknya pada pertanian dan akses air bersih. Desa-desa seperti Umpak, Boro Jabung, dan Gunungjati memiliki potensi air tanah yang rendah sehingga berulang kali mengalami kekeringan (Puspita et al., 2022). Di sisi lain, wilayah Gedangan memiliki karakteristik fisik seperti lereng curam, tekstur tanah kasar, curah hujan rendah, dan tutupan vegetasi minim yang membuatnya masuk kategori rawan tinggi dengan luas 23,86% dari total wilayah (Gunawan et al., 2020). Selain itu, wilayah Sub-DAS *Upper* Brantas di Malang diproyeksikan semakin mengering di masa depan akibat meningkatnya evapotranspirasi di bawah skenario RCP 8.5 (Zakariyah et al., 2025). Kondisi-kondisi ini menegaskan bahwa Kabupaten Malang tidak hanya menjadi wilayah penting secara ekologis dan pertanian, tetapi juga representatif untuk menganalisis dinamika kekeringan di daerah beriklim monsun tropis yang dipengaruhi perubahan iklim (Narulita et al., 2020). Dengan latar belakang tersebut, integrasi arah pembangunan berkelanjutan menjadi sangat relevan untuk memastikan keberlanjutan pengelolaan sumber daya air dan kehidupan masyarakat Malang (Nugroho et al., 2020).

Peningkatan frekuensi dan intensitas kekeringan saat ini tidak dapat dilepaskan dari dampak pemanasan global dan perubahan iklim yang memicu anomali suhu ekstrem serta peningkatan evapotranspirasi. Dalam konteks perkotaan seperti Kota Malang, kerentanan wilayah terhadap bencana kekeringan semakin diperparah oleh tingginya aktivitas manusia, seperti ekspansi lahan terbangun dan eksploitasi sumber daya air, yang merusak keseimbangan *input-output* hidrologis kota. Oleh karena itu, penelitian mengenai kekeringan di wilayah urban memerlukan metode yang mampu memberikan gambaran kondisi vegetasi, suhu permukaan, curah hujan, dan tingkat kekeringan secara spasial. *Anthropogenic Pressure Index* (API) memberikan informasi terkait keseimbangan antara presipitasi dan kebutuhan air, sedangkan *Temperature Vegetation Dryness Index* (TVDI) merupakan salah satu indikator yang efektif untuk mendeteksi tingkat kekeringan dengan memanfaatkan hubungan antara NDVI dan LST (Guo et al., 2023). Kombinasi NDVI, LST, TVDI dan API memungkinkan analisis kekeringan yang dapat menjadi dasar pertimbangan dalam perencanaan mitigasi, adaptasi, serta penguatan tata kelola sumber daya air (Li et al., 2025). Penelitian ini difokuskan untuk mengkaji hubungan antara perubahan tutupan vegetasi dan suhu permukaan terhadap meluasnya tingkat kekeringan di Kota Malang, serta menganalisis sejauh mana tekanan antropogenik memengaruhi pola spasial kekeringan tersebut pada periode 2015, 2020, dan 2025.

B. METODE PELAKSANAAN

Penelitian ini dilakukan di Kota Malang dengan letak astronomis $112,06^{\circ}$ – $112,07^{\circ}$ Bujur Timur dan $7,06^{\circ}$ – $8,02^{\circ}$ Lintang Selatan, Provinsi Jawa Timur, dengan variasi topografi berkisar antara 391 hingga 706 meter di atas permukaan laut (mdpl).



Gambar 1. Peta Lokasi, Topografi dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini menganalisis beberapa faktor dalam kurun waktu temporal di tahun 2015, 2020, dan 2025 dengan mengintegrasikan data lingkungan fisik dan aktivitas manusia, menggunakan citra satelit Landsat 8 OLI/TIRS untuk memetakan parameter suhu permukaan (LST) dan vegetasi (NDVI), serta data VIIRS NTL untuk mengidentifikasi pola aktivitas antropogenik dan intensitas cahaya malam di lanskap perkotaan tersebut (Widyanti et al., 2025).

Tabel 1. Spesifikasi Data dan Instrumen Analisis

No.	Komponen Penelitian	Data yang Digunakan	Keterangan	Sumber
1	Data Indeks Cahaya Malam (CNLI)	VIIRS Boat Detection (VBD) & VIIRS Cloud Mask (VCM)	VBD digunakan untuk koreksi, dan VCM sebagai data utama intensitas cahaya di darat.	Google Earth Engine, NOAA VIIRS DNB Monthly
2	Data Indeks Tekanan Antropogenik (API)	Kepadatan Point of Interest (POI)	Menggunakan pendekatan <i>Euclidean Distance</i> untuk mengukur kedekatan area terhadap pusat aktivitas dan akses jalan.	<i>Random Points from Raster Value</i>
3	Pengukuran Keadaan Lingkungan (NDVI, LST, TVDI)	Landsat 8 OLI/TIRS	Digunakan untuk menurunkan data <i>Land Surface Temperature (LST)</i> dan indeks vegetasi (NDVI) sebagai pembanding lingkungan. Kedua data tersebut menjadi dasar penyusunan <i>TVDI</i> .	USGS (United States Geological Survey)
4	Metode Interpolasi	Inverse Distance Weighted (IDW)	Digunakan untuk mengubah data titik (POI) menjadi data raster permukaan yang kontinu agar bisa dianalisis secara spasial.	-

5	Unit Analisis & Normalisasi	Grid 30m x 30m & Min-Max <i>Normalizati on</i>	Pengambilan sampel dilakukan pada grid 30m. Data dinormalisasi ke skala 0-1 agar kedua variabel (API dan CNLI) dapat dibandingkan dalam peta bivariat.	ArcGIS 10.8 dan ArcGIS Pro 3.5
---	-----------------------------	---	--	--------------------------------

1. Teknik Analisis Data

Untuk mengidentifikasi *Temperature Vegetation Dryness Index* (TVDI), perlu dilakukan penentuan nilai *Land Surface Temperature* (LST). Pengolahan dilakukan dengan mengkalibrasi radiometrik dengan mengkonversi nilai piksel dari *digital number* (DN) menjadi *Brightness Temperature* (BT), lalu DN juga dikonversi menjadi radian dan reflektan. Dengan persamaan untuk kalibrasi radiometrik sebagai berikut (Yuan et al., 2023),

$$L_{\lambda} = M_L Q_{cal} + A_L \quad (1)$$

Dimana,

$$L_{\lambda} = \text{TOA spectral radiance} \left(\frac{w}{m^2 sr \mu m} \right)$$

$$P_{\lambda} = \text{TOA spectral reflectance}$$

$$M_L = \text{Band specific multiplicative rescaling factor}$$

$$A_L = \text{Band specific additive rescaling factor}$$

$$Q_{cal} = \text{Nilai Digital Number (DN) pada kanal yang dituju}$$

$$BT = \frac{K_2}{\ln \left(\frac{K_1}{L_{\lambda}} + 1 \right)} - 273,15 \quad (2)$$

Dimana,

$$BT = \text{Brightness temperature}$$

$$L_{\lambda} = \text{Spectral Radiance} \left(\frac{w}{m^2 sr \mu m} \right)$$

$$K_1 = \text{Konstanta thermal conversion untuk kanal 10}$$

$$K_2 = \text{Konstanta thermal conversion untuk kanal 10}$$

Selanjutnya diperlukan perhitungan NDVI yang dilakukan dengan pengolahan citra dengan mengombinasikan *band 4* dan *band 5*, dengan persamaan sebagai berikut,

$$NDVI = \frac{NIR-RED}{NIR+RED} \quad (3)$$

Dilakukan perhitungan *proportion of vegetation* untuk mengetahui parameter emisivitas dengan melihat nilai NDVI yang diolah, dihitung dengan persamaan,

$$Pv = \left(\frac{NDVI-NDVIS}{NDVIv+NDVIS} \right)^2 \quad (4)$$

Land Surface Emissivity (LSE) dibutuhkan untuk mendapatkan nilai emisivitas, dengan persamaan,

$$\varepsilon_{\lambda} = \varepsilon_{v\lambda} Pv + \varepsilon_{s\lambda} (1 - Pv) + C_{\lambda} \quad (5)$$

Dimana,

$$\varepsilon_{v\lambda} = 0,985$$

$$\varepsilon_{s\lambda} = 0,960$$

$$C_{\lambda} = 0,005$$

Nilai Land Surface Temperature (LST) didapatkan dari pengolahan citra, dengan mengetahui nilai *Brightness Temperature* (BT) dan nilai *Land Surface Emissivity* (LSE). Persamaan yang digunakan sebagai berikut (Yuan et al., 2023),

$$T_s = \frac{BT}{\{1 + [(\frac{\lambda BT}{\rho}) \ln \epsilon \lambda]\}} \quad (6)$$

Persamaan untuk mendapatkan estimasi nilai LST, sebagai berikut,

$$\rho = h \frac{c}{\sigma} = 1,438 \times 10^{-2} \quad (7)$$

Setelah perhitungan LST selesai dilanjutkan dengan menentukan nilai TVDI, persamaan untuk menghitung nilai TVDI ialah sebagai berikut,

$$TVDI = \frac{(LST - LST_{min})}{(LST_{max} - LST_{min})} \quad (8)$$

LSTmin = temperatur permukaan minimum pada segitiga, mendefinisikan sisi basah ($Y=aX+b$)

LSTmax = temperatur permukaan maksimum pada segitiga, mendefinisikan sisi kering ($Y=aX+b$)

LST = *Land Surface Temperature*

2. Teknik Validasi Data

Validasi data dilakukan dengan menentukan model *Anthropogenic Pressure Index* (API) menggunakan formulasi sebagai berikut (Yuan et al., 2023),

$$API = W_1 \times CNLI + W_2 \times L \quad (9)$$

CNLI = Indeks gabungan cahaya malam kota

L = Indeks komperhensif penggunaan lahan

W_1 & W_2 = Mewakili bobot CNLI dan L

$$L = 100 \times \sum(A_i \times C_i) \quad (10)$$

A_i = Klasifikasi indeks penggunaan lahan

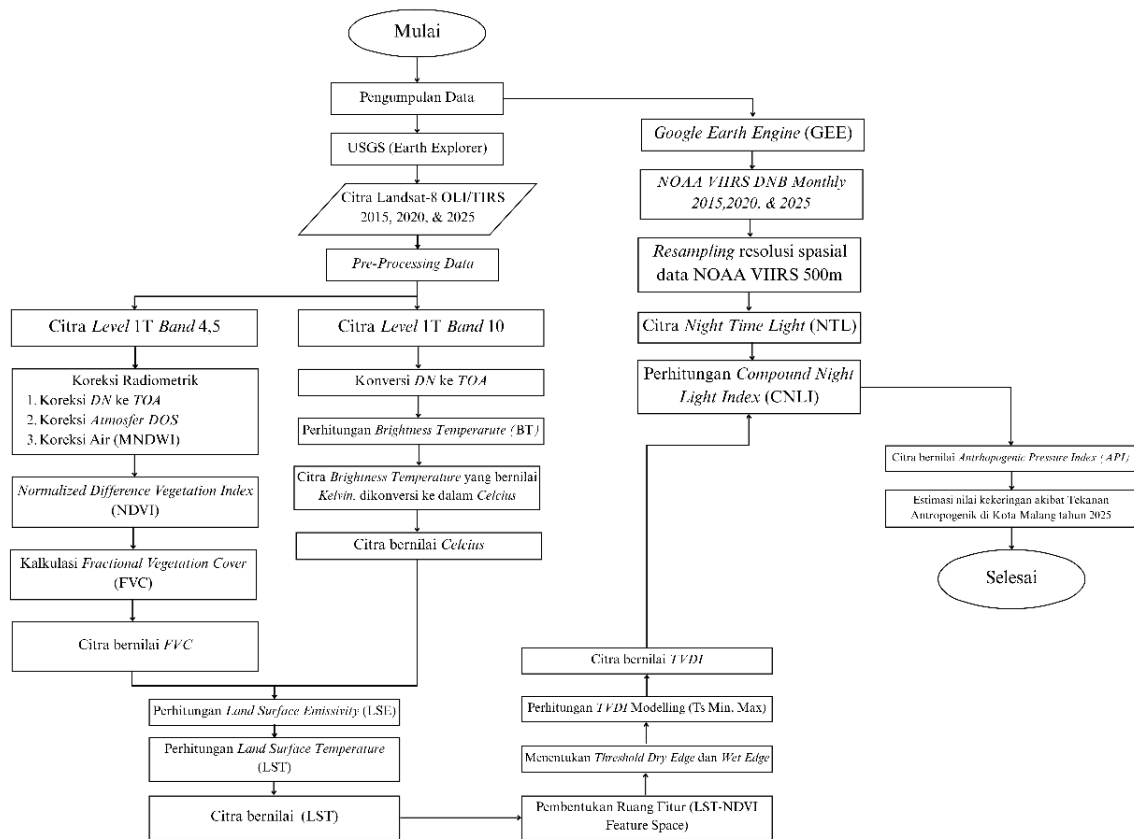
C_i = Rasio jenis penggunaan lahan

$$CNLI_j = P_1 \times I_1 + P_2 \times S_j \quad (11)$$

I_1 = Intensitas rata-rata Cahaya kota

S = Proporsi Cahaya perkotaan

P_1 dan P_2 = Mewakili bobot I dan S

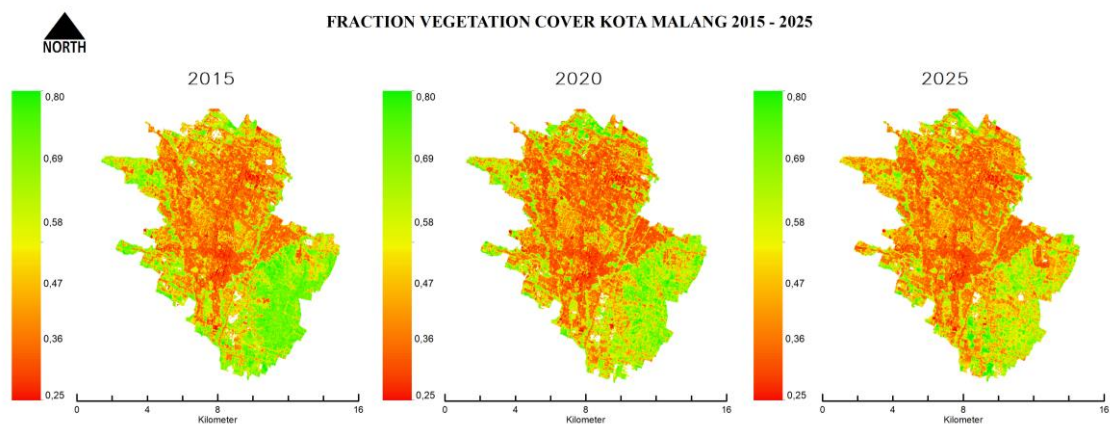


Gambar 2. Alur Penelitian

C. HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Fraction Vegetation Cover Kota Malang 2015-2025

Nilai *Fractional Vegetation Cover* (FVC) digunakan untuk merepresentasikan proporsi permukaan lahan yang tertutup oleh vegetasi hidup dan berperan dalam mengidentifikasi perbedaan karakteristik lingkungan antarwilayah dengan tingkat pembangunan yang berbeda. Penelitian sebelumnya di Jakarta Utara menunjukkan bahwa analisis kerapatan vegetasi berbasis citra Landsat dan NDVI relevan digunakan untuk menggambarkan kondisi vegetasi di wilayah perkotaan (Ruuhulhaq et al., 2025).



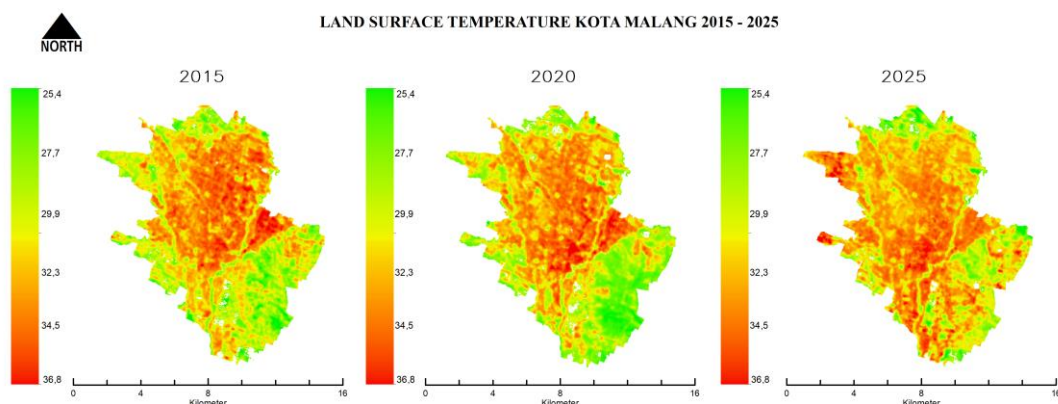
Gambar 3. Peta *Fraction Vegetation Cover* Kota Malang 2015-2025

Berdasarkan peta *Fraction Vegetation Cover* (FVC) Kota Malang tahun 2015, kondisi tutupan vegetasi secara umum berada pada kategori sedang hingga rendah, di mana nilai FVC rendah terkonsentrasi di bagian tengah kota sebagai pusat kegiatan dengan intensitas pembangunan tinggi, sementara wilayah

selatan dan pinggiran kota masih didominasi ruang terbuka hijau yang terjaga. Memasuki tahun 2020, terdapat sedikit perubahan berupa penurunan tutupan vegetasi di bagian selatan akibat ekspansi pembangunan yang mulai merambah lahan pertanian dan lahan terbuka. Tren penurunan tutupan vegetasi ini semakin meluas pada tahun 2025, khususnya di kawasan pusat kota dan sebagian wilayah utara seiring dengan meningkatnya dominasi lahan terbangun. Meskipun demikian, nilai FVC pada wilayah selatan relatif stabil pada kategori sedang tanpa menunjukkan lonjakan tajam jika dibandingkan dengan kondisi tahun 2020. Dinamika spasial ini secara keseluruhan mengindikasikan bahwa laju pertumbuhan penduduk dan ekspansi pembangunan jauh lebih masif terkonsentrasi di kawasan inti perkotaan dibandingkan dengan wilayah pinggiran.

2. *Land Surface Temperature (LST) Kota Malang 2015-2025*

Peningkatan suhu permukaan lahan (LST) di kawasan perkotaan pada umumnya mencerminkan adanya kombinasi faktor fisik yang berpengaruh terhadap peningkatan suhu seperti tutupan lahan, intensitas lahan terbangun, dan kerapatan vegetasi di wilayah kota. Daerah dengan penetrasi lahan terbangun yang tinggi cenderung menunjukkan nilai LST lebih tinggi karena terjadinya peningkatan penangkapan dan pemancaran panas permukaan serta didorong dengan berkurangnya area hijau. Hal ini didukung dengan temuan penelitian yang dilakukan oleh (Maulana & Bioresita, 2023) di Kota Surabaya, yakni peningkatan suhu di 20 kecamatan yang berkaitan erat dengan peningkatan dominasi tutupan lahan terbangun dan penurunan vegetasi.



Gambar 4. Peta *Land Surface Temperature* Kota Malang 2015-2025

Tren peningkatan LST semakin jelas pada peta tahun 2020 dan 2025 dengan area berwarna merah tampak meluas terutama di bagian tengah hingga timur kota, hal ini dapat diindikasikan dengan terjadinya intensifikasi pembangunan serta berkurangnya tutupan hijau sehingga menyebabkan area dengan suhu tinggi semakin dominan. Pada tahun 2025, hampir seluruh wilayah tengah kota memperlihatkan suhu di atas 32 °C, mengindikasikan bahwa urbanisasi dalam satu dekade terakhir berkontribusi kuat terhadap peningkatan suhu permukaan. Sebaliknya, wilayah dengan suhu relatif rendah semakin menyempit dan hanya tersisa di bagian barat daya dan utara kota.

Penurunan kerapatan vegetasi dan lonjakan suhu permukaan yang teramati di Kota Malang tidak murni disebabkan oleh faktor hidrometeorologis, melainkan juga dipengaruhi oleh alih fungsi lahan menjadi kawasan terbangun, terutama di wilayah pusat dan utara kota. Ekspansi infrastruktur perkotaan ini berkontribusi

kuat terhadap peningkatan suhu permukaan selama satu dekade terakhir. Secara ekologis, peralihan fungsi lahan menggantikan tutupan alami dengan material kedap air (impermeabel) seperti aspal dan beton, yang secara drastis mengganggu interaksi antara vegetasi dan atmosfer. Lebih lanjut, tingginya intensitas ekspansi lahan terbangun yang diiringi oleh eksploitasi sumber daya air secara masif telah merusak keseimbangan *input-output* hidrologis kota. Transformasi ekosistem perkotaan ini tidak hanya memicu fenomena pulau bahang perkotaan (*Urban Heat Island*), tetapi tingginya aktivitas manusia tersebut juga secara langsung memperkuat kerentanan wilayah terhadap bencana kekeringan akibat hilangnya daerah resapan air alami.

3. *Temperature Vegetation Dryness Index (TVDI)* Kota Malang 2015-2025

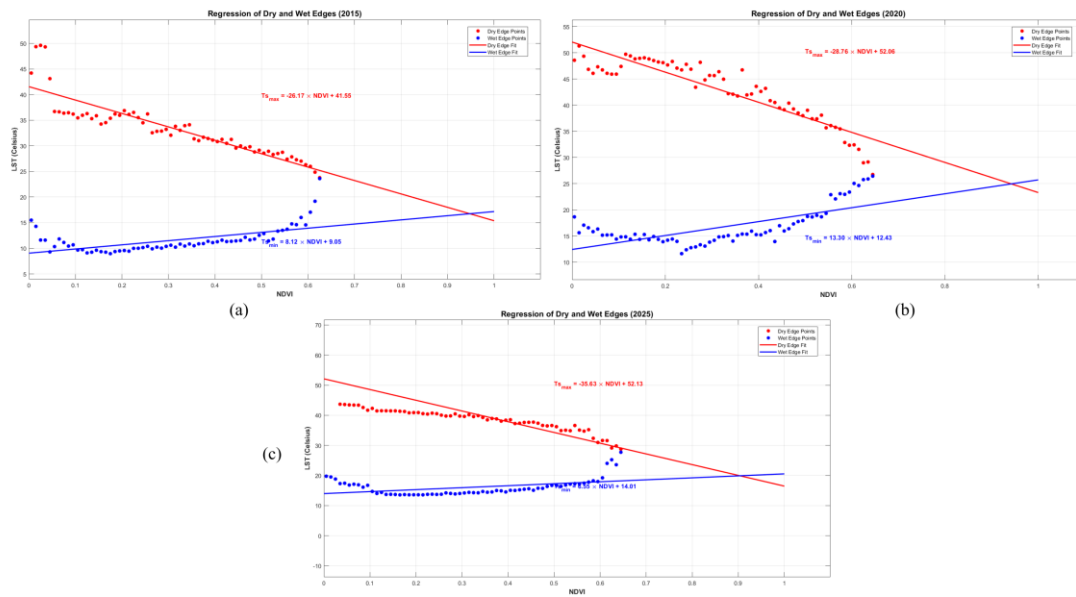
Wilayah Kota Malang selama periode 2015–2025 menunjukkan variasi tingkat kekeringan permukaan yang dihasilkan dari hubungan linier antara NDVI dan LST. Kedua variabel ini menghasilkan sebaran data yang membentuk pola segitiga atau trapezoidal untuk membuat batas kering (*dry edge*) dan basah (*wet edge*). *Dry edge* menunjukkan batas kondisi area dengan tingkat vegetasi rendah namun suhu permukaan tinggi. Nilai TVDI pada wilayah yang mendekati garis *dry edge* biasanya menunjukkan karakteristik seperti rendahnya kelembapan tanah, tingginya eksposur radiasi matahari, serta tingginya intensitas pembangunan yang mengurangi tutupan vegetasi. Sementara itu, *wet edge* merupakan batas kondisi paling basah, dengan karakteristik area yang memiliki vegetasi yang lebih rapat dan suhu permukaan yang rendah.

Tabel 2. Estimasi Persamaan Regresi *Dry Edge* dan *Wet Edge* Berdasarkan NDVI dan LST

No.	Tahun	Dry Edge (Batas Kering)	Wet Edge (Batas Basah)
1	2015	$T_{\text{max}} = -26.17 \times \text{NDVI} + 41.55$	$T_{\text{min}} = 8.12 \times \text{NDVI} + 9.05$
2	2020	$T_{\text{max}} = -28.76 \times \text{NDVI} + 52.06$	$T_{\text{min}} = 13.30 \times \text{NDVI} + 12.43$
3	2025	$T_{\text{max}} = -35.63 \times \text{NDVI} + 52.13$	$T_{\text{min}} = 6.55 \times \text{NDVI} + 14.01$

Estimasi persamaan regresi pada *dry edge* dan *wet edge* untuk Kota Malang selama periode 2015-2025 karakteristik hubungan NDVI–LST yang berbeda. Pada garis *dry edge*, seluruh model regresi memiliki *slope* negatif, yang berarti bahwa penurunan NDVI selalu diikuti oleh peningkatan suhu permukaan. Nilai *slope* yang meningkat dari -26.17 pada 2015 menjadi -35.63 pada 2025 menunjukkan sensitivitas kuat antara vegetasi rendah dan kondisi permukaan yang lebih panas, hal ini berkaitan dengan ekspansi lahan terbangun atau penurunan tutupan vegetasi.

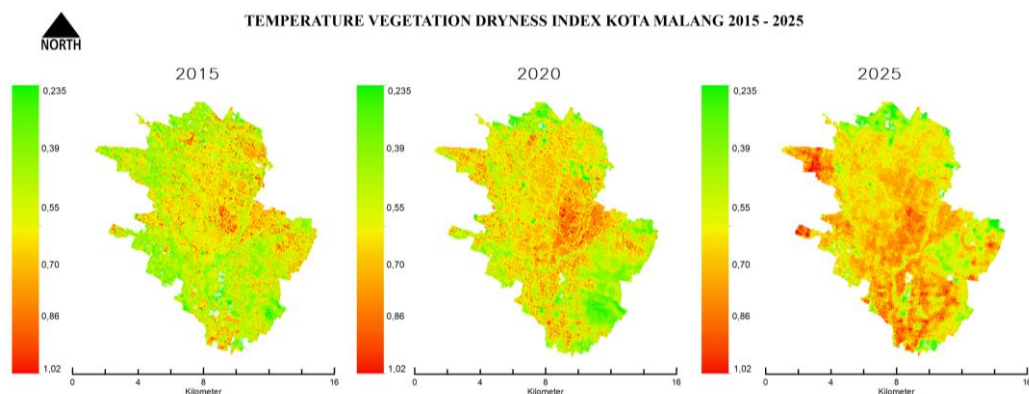
Hasil pemodelan TVDI dalam penelitian ini sejalan dengan temuan studi terdahulu di Kabupaten Sumedang, dengan mengekstraksi parameter LST & NDVI menentukan indeks kekeringan spasial (Fauzi et al., 2021). Penurunan kerapatan vegetasi secara konsisten berbanding lurus dengan peningkatan suhu permukaan maksimum yang membentuk garis batas kering (*dry edge*). Pada studi di Sumedang, dominasi luasan kekeringan sangat terlihat dengan 44,54% (68.881,94 Ha) wilayahnya masuk dalam kategori kering. Fenomena serupa secara kuat teridentifikasi di Kota Malang pada proyeksi tahun 2025, di mana nilai TVDI sedang hingga tinggi mendominasi pada area dengan sedikit vegetasi, yang menandakan meluasnya tingkat kekeringan permukaan.



Gambar 5. *Dry Edges* dan *Wet Edges*

Berdasarkan gambar 5, titik-titik *dry edge* berada di area dengan nilai NDVI rendah namun suhu permukaan tinggi, sedangkan *wet edge* menempati area dengan vegetasi lebih rapat dan suhu lebih rendah. Secara spasi temporal, tahun 2015 menunjukkan pola yang relatif stabil dengan hubungan linier yang jelas pada kedua garis batas. Kondisi ini berubah pada tahun 2020, ketika sebaran titik pada *dry edge* mulai melebar dan kemiringan garis regresinya bertambah curam, menandakan meningkatnya sensitivitas antara berkurangnya vegetasi dan naiknya suhu permukaan.

Peningkatan suhu permukaan tidak hanya terjadi pada area dengan tutupan vegetasi rendah, tetapi juga pada wilayah dengan tutupan vegetasi yang relatif baik, sehingga perubahan termal berlangsung secara merata. Pada garis *wet edge* nilai *slope* meningkat pada tahun 2020 dan kemudian menurun pada 2025, yang menunjukkan adanya variasi hubungan antara kelembapan dengan area bervegetasi rapat. Selain itu, peningkatan nilai intersep dari tahun 2015 hingga 2025 menunjukkan bahwa suhu permukaan pada area dengan nilai NDVI tinggi mengalami kenaikan, sehingga area yang sebelumnya memiliki kondisi termal lebih rendah juga mengalami peningkatan suhu permukaan.



Gambar 6. Peta *Temperature Vegetation Dryness Index* Kota Malang 2015-2025

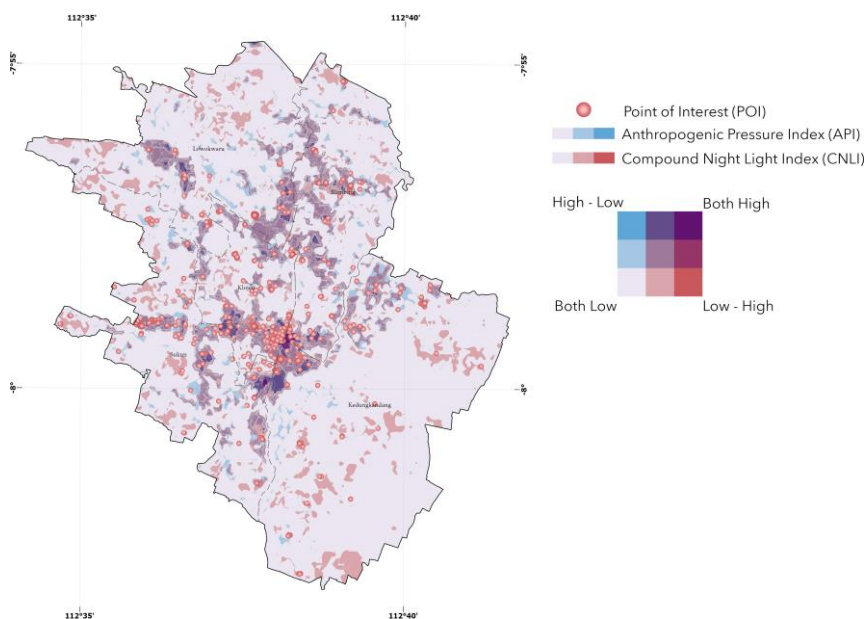
Berdasarkan gambar 6 nilai TVDI tahun 2015, nilai TVDI didominasi oleh kelas sedang hingga relatif rendah yang ditunjukkan oleh warna hijau hingga kuning yang sebagian besar berada di bagian selatan dan tenggara Kota Malang

yang umumnya memiliki tutupan vegetasi lebih baik. Sementara itu, nilai TVDI lebih tinggi mendominasi di bagian tengah kota serta sebagian wilayah utara. Pada tahun 2020, area dengan nilai TVDI sedang hingga tinggi semakin meluas, terutama di wilayah tengah, barat, dan barat laut Kota Malang. Wilayah timur dan tenggara masih menunjukkan keberadaan nilai TVDI yang relatif lebih rendah, meskipun dengan luasan yang mulai berkurang. Pola ini menunjukkan peningkatan kekeringan permukaan yang semakin merata, seiring dengan perubahan kondisi termal dan vegetasi.

Pada tahun 2025, nilai TVDI sedang hingga tinggi mendominasi hampir seluruh wilayah Kota Malang, khususnya di bagian tengah, utara, dan barat kota. Area dengan nilai TVDI rendah tersisa secara terbatas di bagian selatan dan sebagian kecil wilayah timur. Perubahan spasial TVDI selama periode 2015–2025 menunjukkan peningkatan kekeringan permukaan lahan yang semakin meluas dari pusat kota ke arah pinggiran, dengan variasi kondisi yang masih dipengaruhi oleh distribusi vegetasi dan intensitas pemanfaatan lahan.

4. *Anthropogenic Pressure Index (API) Kota Malang 2015-2025*

Secara konseptual, nilai API yang tinggi menandakan tekanan manusia yang besar pada sistem ruang dan infrastruktur kota, sementara nilai rendah biasanya berkaitan dengan area terbuka, vegetasi, atau zona permukiman berintensitas aktivitas lebih rendah (Sutran et al., 2023).



Gambar 7. Peta *Anthropogenic Pressure Index (API) Kota Malang 2015-2025*

Pola distribusi pada gambar 7 menunjukkan konsentrasi tekanan antropogenik tertinggi yang terletak di inti kota dan sekitar area inti berwarna ungu dan biru tua, sedangkan pinggiran kota menampilkan pola zona bertekanan lebih rendah. Titik-titik POI yang padat bertepatan dengan area ungu di pusat kota, hal ini menandakan interaksi tinggi antara fungsi komersial, pelayanan, dan transportasi, sementara tanda merah muda/merah yang merepresentasikan CNLI (cahaya malam) merupakan area dengan intensitas penerangan malam yang kuat tetapi tidak selalu identik dengan API tertinggi, hal ini dapat diindikasikan kepada area industri atau permukiman padat yang menerangi kawasan. Interpretasi spasial ini menandai adanya korelasi umum antara API, POI, dan CNLI namun sekaligus juga mengungkap bahwasanya ada perbedaan fungsi ruang. Seperti beberapa area memiliki tekanan kegiatan tinggi (API) tanpa

intensitas cahaya malam sebanding, dan sebaliknya beberapa area menunjukkan CNLI tinggi meski API relatif moderat atau tidak ekstrem.

Hasil penelitian ini membuktikan secara kuantitatif bahwa fenomena kekeringan di perkotaan tidak murni disebabkan oleh faktor hidrometeorologis, melainkan diperparah oleh intervensi manusia. Hal ini dibuktikan melalui integrasi *Anthropogenic Pressure Index* (API), di mana wilayah dengan intensitas kekeringan tertinggi beririsan langsung dengan zona tekanan antropogenik tinggi (zona ungu *Both High*) di pusat kota seperti Kecamatan Klojen.

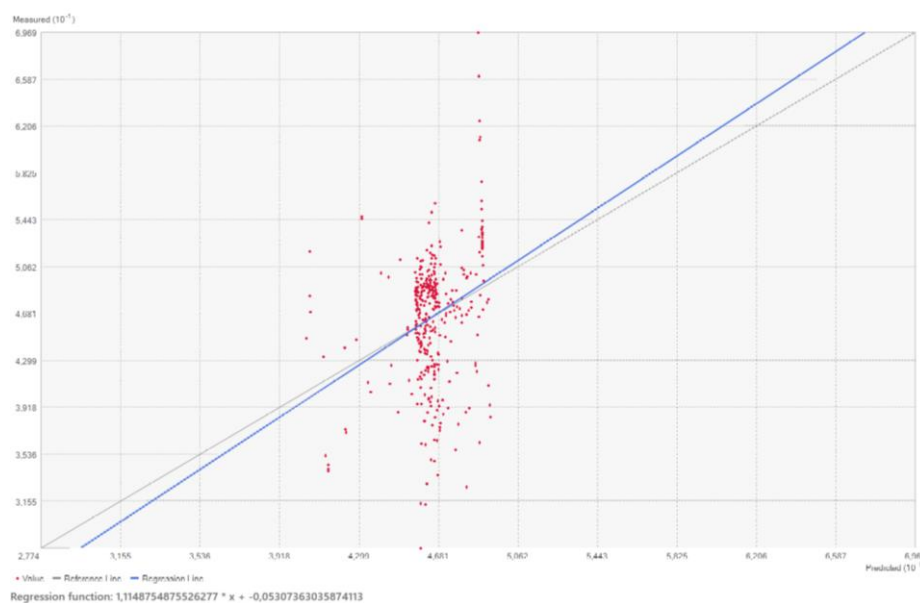
Tabel 5. Hubungan API & CNLI per Kecamatan

Kecamatan	Kategori Bivariat	Karakteristik Wilayah
Klojen	<i>Both High</i> (Zona Ungu)	Pusat aktivitas dan ekonomi kota dengan kepadatan <i>Point of Interest</i> (POI) tertinggi. Aktivitas manusia yang tinggi berbanding lurus dengan intensitas cahaya malam yang tinggi.
Blimbing & Lowokwaru	<i>High - Both Low</i> (Zona Biru Tua s.d. Ungu Muda)	Area dengan konsentrasi aktivitas pendidikan (kampus), bisnis, dan dilalui jalan arteri primer. Menunjukkan tekanan antropogenik dan CNLI yang cukup tinggi.
Sukun	<i>Both Low - High</i> (Dominan Zona Merah Muda)	Wilayah transisi dengan aktivitas yang tidak sepadat pusat kota. Terdapat area pemukiman dan kawasan industri di bagian selatan.
Kedungkandang	<i>Both Low - High</i> (Dominan Zona Merah Muda)	Wilayah pinggiran di sisi timur dengan tingkat aktivitas manusia (API) dan cahaya malam (CNLI) yang cenderung lebih rendah dibanding kecamatan lain. Masih banyak area terbuka/vegetasi.
Hubungan Umum	Korelasi Positif	Secara umum di Kota Malang, area dengan tekanan antropogenik tinggi berada di wilayah dengan banyak POI/jalan, dan cenderung memiliki intensitas cahaya malam yang tinggi.

Berdasarkan tabel 5, kecamatan-kecamatan di Kota Malang diklasifikasikan guna mengetahui hubungan antara API dan CNLI di Kota Malang. Kecamatan Klojen diklasifikasikan sebagai *Both High* (zona ungu) yang mengindikasikan bahwa daerah ini merupakan pusat aktivitas dan ekonomi dengan POI tertinggi dan CNLI tinggi sehingga menegaskan peran Klojen sebagai inti kota komersial. Lalu kecamatan Blimbing & Lowokwaru diklasifikasikan *High-Both Low* hingga Ungu Muda, yang sesuai dengan karakteristik wilayah yang terdapat kampus, bisnis dan koridor arteri primer. Sedangkan Sukun dan Kedungkandang dominan *Both Low-High* (zona merah muda) yang menggambarkan wilayah transisi dengan pola pemukiman dan aktivitas industri yang menghasilkan CNLI relatif tinggi tetapi tekanan antropogenik terdistribusi lebih tersebar atau lebih rendah dibanding inti kota. Dari hasil dapat disimpulkan bahwa pemetaan bivariat API-CNLI memberikan alat diagnosis yang tajam untuk prioritas intervensi tata ruang seperti penguatan ruang terbuka hijau di inti kota Klojen, pengaturan koridor transportasi dan layanan di Blimbing/Lowokwaru, serta pengendalian perluasan dan peningkatan infrastruktur ramah lingkungan pada Sukun/Kedungkandang sehingga tekanan antropogenik dapat dikelola tanpa mengorbankan fungsi sosial-ekonomi kota.

Temuan mengenai pola spasial peningkatan suhu permukaan dan perluasan zona kekeringan ini harus diintegrasikan ke dalam kebijakan perencanaan tata ruang kota yang lebih konkrit. Hasil pemetaan bivariat antara API-CNLI dapat digunakan untuk memprioritaskan intervensi tata ruang, seperti urgensi

penguatan Ruang Terbuka Hijau (RTH) di kawasan inti kota yang padat seperti Kecamatan Klojen. Pemerintah daerah dapat memanfaatkan distribusi spasial LST dan TVDI ini untuk merancang kebijakan pengelolaan sumber daya air perkotaan yang lebih adaptif, misalnya melalui implementasi infrastruktur hijau guna mengembalikan keseimbangan siklus hidrologis yang terdampak oleh ekspansi urban. Dengan memfokuskan revitalisasi vegetasi dan pembangunan infrastruktur ramah lingkungan pada area dengan indikasi suhu dan tekanan antropogenik tertinggi, perencanaan kota dapat secara efektif mereduksi iklim mikro perkotaan sekaligus menjamin ketahanan air Kota Malang di masa depan.



Gambar 8. Cross Validation - Diffusion Interpolation Kota Malang 2015-2025

Gambar 8 menunjukkan bahwa titik-titik merah terkonsentrasi di sekitar nilai prediksi 4,0–5,0, artinya model paling stabil berada pada rentang ini. Adanya titik-titik outlier yang jauh dari garis memperlihatkan bahwa pada nilai ekstrem, model belum mampu memproses variasi data dan berpotensi menghasilkan kesalahan dari total keseluruhan sampel data. Hasil validasi juga menunjukkan performa model yang cukup baik dan konsisten. Dengan 356 sampel uji, analisis memiliki dasar statistik yang kuat. Nilai RMS yang sangat kecil sebesar 0,051025 menunjukkan kesalahan prediksi berada pada tingkat yang rendah. *Mean Error* yang hampir nol menandakan model tidak memiliki kecenderungan bias yang hanya ke satu arah, tetapi saling menyeimbangkan kedua prediksi melalui rata-rata. Dengan nilai *slope* sebesar 1,1148 menunjukkan pola pada model yang cenderung memberikan prediksi sedikit lebih tinggi dari nilai aktual ketika nilai tersebut berada pada level tinggi.

D. SIMPULAN DAN SARAN

Dinamika lingkungan di Kota Malang selama periode 2015–2025 menunjukkan tren degradasi ekologis yang signifikan, ditandai dengan alih fungsi lahan masif yang memicu penurunan tutupan vegetasi dan perluasan zona suhu permukaan ekstrem (>32°C) dari inti kota hingga ke wilayah pinggiran. Tingginya tingkat kekeringan permukaan lahan (TVDI) ini terbukti tidak murni dipengaruhi oleh faktor alam, melainkan sangat didorong oleh tingginya tekanan antropogenik (API), khususnya di kawasan komersial dan pendidikan seperti Kecamatan Klojen, Blimbing, dan Lowokwaru. Secara praktis, temuan ini menegaskan bahwa daya dukung lingkungan Kota Malang semakin rentan terhadap krisis hidrometeorologis. Oleh

karena itu, hasil penelitian ini memberikan peringatan krusial bagi pemerintah daerah dan pengambil kebijakan untuk segera melakukan intervensi tata ruang yang tegas guna mengendalikan ekspansi infrastruktur yang tidak ramah lingkungan, serta mencegah defisit cadangan air tanah perkotaan di masa depan.

Sebagai upaya mitigasi, Pemerintah Kota Malang direkomendasikan untuk segera menetapkan kawasan pusat kota, khususnya Kecamatan Klojen, sebagai zona prioritas perubahan iklim melalui penegakan aturan Ruang Terbuka Hijau (RTH) serta kewajiban pembangunan infrastruktur hijau (seperti sumur resapan, *rain garden*, dan paving berpori) pada area dengan nilai kekeringan (TVDI) tinggi. Sementara itu, guna menyempurnakan presisi analisis pada studi mendatang, disarankan penggunaan Citra Satelit Resolusi Tinggi (CSRT) seperti Sentinel atau WorldView yang disertai dengan validasi pengukuran lapangan (*ground truth*) terkait kelembapan dan suhu aktual. Pada akhirnya, integrasi antara pengembangan studi berbasis spasial ini dengan penyusunan Rencana Detail Tata Ruang (RDTR) ke depannya sangat krusial untuk menghasilkan rumusan kebijakan tingkat persil yang lebih adaptif terhadap iklim perkotaan.

UCAPAN TERIMAKASIH

Pertama, penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih kepada Allah Subhanahu Wa Ta'ala, karena kehendak dan ridho-Nya penelitian ini dapat terselesaikan dengan baik. Kami juga sangat menghargai dukungan dan saran dari berbagai pihak yang membantu dalam penyusunan artikel ini. Semoga artikel ini dapat memberikan manfaat dan positif bagi perkembangan ilmu pengetahuan.

DAFTAR RUJUKAN

- Achmad, H. (2018). Penanggulangan Kekeringan dan Kekurangan Air Bersih di Jawa Timur. *Cakrawala*, 1(1), 59–75. <https://doi.org/https://doi.org/10.32781/cakrawala.v1i1.64>
- Arora, N. K., & Mishra, I. (2023). Sustainable development goal 13: recent progress and challenges to climate action. *Environmental Sustainability*, 6(3), 297–301. <https://doi.org/10.1007/s42398-023-00287-4>
- Fauzi, S., Noorlaila, H., & Filsa, B. (2021). Identifikasi Daerah Kekeringan dengan Menggunakan Temperature Vegetation Dryness Index (TVDI) dan Landsat 8. *Journal Teknik ITS*, 10(1).
- Gunawan, A. H., Anita Rahmawati, & Gilang Ramadan Kololikiye. (2020). Kabupaten Malang. *Wikipedia*, 3(1), 29–41.
- Guo, Y., Han, L., Zhang, D., Sun, G., Fan, J., & Ren, X. (2023). The Factors Affecting the Quality of the Temperature Vegetation Dryness Index (TVDI) and the Spatial–Temporal Variations in Drought from 2011 to 2020 in Regions Affected by Climate Change. *Sustainability (Switzerland)*, 15(14). <https://doi.org/10.3390/su151411350>
- Inter-Agency Task Force on Climate Change and Disaster Risk Reduction. (2007). *Disaster Risk Reduction Tools and Methods for Climate Change Adaptation*. www.unisdr.org
- IPCC. (2023). Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis* (pp. 3–32). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.001>
- Januar, W. (2025). Spatial Analysis of Vegetation Health and Land Surface Temperature During Dry Season to Support Food Security Januar Wijaya. *Jurnal Semarak Kabumian*, 3(1), 26–37. <https://doi.org/https://jurnal.kebumenkab.go.id/index.php/jsk/article/view/335/52>

- Julianto, F. D., & Ediyanto. (2021). Analisis Sebaran Potensi Kekeringan Dengan Cloud Computing Platform di Kabupaten Grobogan. *Jurnal Ilmiah Geomatika*, 1(1). <https://doi.org/10.31315/imagi.v1i1.4730>
- Li, L., Yuan, Y., & Wang, X. (2025). Deciphering Spatiotemporal Dynamics of Vegetation Drought Resilience in China. *Forests*, 16(5). <https://doi.org/10.3390/f16050843>
- Maulana, J., & Bioresita, F. (2023). Monitoring of Land Surface Temperature in Surabaya, Indonesia from 2013-2021 Using Landsat-8 Imagery and Google Earth Engine. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1127(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1127/1/012027>
- Narulita, I., Rahayu, R., Kusratmoko, E., Supriatna, S., & Djuwansah, M. (2020). Ancaman Kekeringan Meteorologis di Pulau Kecil Tropis akibat Pengaruh El-Nino dan Indian Ocean Dipole (IOD) Positif, studi kasus: Pulau Bintang. *Jurnal Lingkungan Dan Bencana Geologi*, 10(3), 127. <https://doi.org/10.34126/jlbg.v10i3.252>
- Nugroho, J., Zid, M., & Miarsyah, M. (2020). Potensi sumber air dan kearifan masyarakat dalam menghadapi risiko kekeringan di wilayah karst (Kabupaten Gunung Kidul, Provinsi Yogyakarta). *Jurnal Pengelolaan Lingkungan Berkelanjutan (Journal of Environmental Sustainability Management)*, 4(1), 438-447. <https://doi.org/10.36813/jplb.4.1.438-447>
- Puspita, M. B., Aprilia, F., Sunaryo, S., Putro, T., Anggraeni, D., & Latifa, R. (2022). Sosialisasi Potensi Air Bawah Tanah (ABT) sebagai Upaya Pencegahan Kekeringan di Desa Jabung, Kabupaten Malang. *Jurnal Abdi Masyarakat Indonesia*, 2(5), 1417-1422. <https://doi.org/10.54082/jamsi.440>
- Ruuhulhaq, M. S., Algifahri, F., Redana Pitaloka, G., & Fyndiani, S. S. (2025). Comparison of Shoreline Extraction using Google Earth Engine and ArcGIS A Case Study in Jakarta Utara. *Geomatika*, 31(1), 9-20. <https://doi.org/https://share.google/6qjCvx5bWPBYnuSiI>
- Sanjaya, S., Cantik, B. K. P., & Wardaningrum, A. S. (2024). Analisis Derajat Bencana Kekeringan di Pulau Jawa Akibat Fenomena El-Nino 2023. *Jurnal Teknik Sumber Daya Air*, 4(2), 115-126. <https://doi.org/10.56860/jtsda.v4i2.124>
- Sutran, S., Suryanti, A., & Zulfikar, A. (2023). Indeks Antropogenik Mangrove di Kota Tanjungpinang, Provinsi Kepulauan Riau. *Jurnal Akuatiklestari*, 7(1), 44-51. <https://doi.org/10.31629/akuatiklestari.v7i1.6236>
- Wahyuni, H., & Suranto. (2021). Dampak Deforestasi Hutan Skala Besar terhadap Pemanasan Global di Indonesia. *JIIP: Jurnal Ilmiah Ilmu Pemerintahan*, 6(1), 148-162. <https://doi.org/10.14710/jiip.v6i1.10083>
- Widyanti, R., Nasrullah, N., & Sulistyantara, B. (2025). Analisis Pengaruh Ruang Terbuka Hijau Terhadap Fenomena Urban Heat Island di Kota Depok, Jawa Barat. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 23(2), 371-381. <https://doi.org/10.14710/jil.23.2.371-381>
- Yuan, Y., Ye, X., Liu, T., & Li, X. (2023). Drought monitoring based on temperature vegetation dryness index and its relationship with anthropogenic pressure in a subtropical humid watershed in China. *Ecological Indicators*, 154. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110584>
- Zakariyah, M., Novi Silvia, & Evi Fitriana. (2025). Dinamika Indeks Kekeringan Terhadap Perubahan Iklim Di Sub-DAS Upper Brantas, Jawa Timur. *Jurnal Geografi, Edukasi Dan Lingkungan (JGEL)*, 9(1), 1-14. <https://doi.org/10.22236/jgel.v9i1.15074>