

Analisis Dampak Perubahan Tingkat Vegetasi dan Estimasi Land Surface Temperature Terhadap Kenyamanan dan Konsentrasi CO₂ di Kototabang

Andi Sulistiyono^{1,2*}, Nofi Yendri Sudiar², Riri Jonuarti², dan Mona Berlian Sari²

¹Stasiun Pemantau Atmosfer Global Bukit Kototabang, Medan, Indonesia; e-mail: sulist.klim@yahoo.com

²Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Padang, Indonesia

ABSTRAK

Perubahan kerapatan vegetasi dapat mengurangi peran hutan sebagai penyerap gas CO₂, yang dapat menyebabkan peningkatan konsentrasi gas CO₂ dan efek sinar matahari secara langsung pada permukaan tanah dan udara. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui perubahan kerapatan vegetasi dan suhu permukaan tanah yang selanjutnya menganalisis terhadap konsentrasi CO₂ dan suhu udara melalui penghitungan Temperature Humidity Index (THI). Penelitian ini menggunakan data citra Landsat 8 untuk mengetahui sebaran *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) dan *Land Surface Temperature* (LST) pada area radius 2.27 km dari lokasi Stasiun Pemantau Atmosfer Global Bukit Kototabang. Hasil penelitian pada periode bulan Juni-juli selama tahun 2019-2023 pada sebaran kerapatan vegetasi menunjukkan bahwa secara umum kerapatan vegetasi pada area penelitian berada pada kategori Sedang dengan luas antara 86 % – 95 % dari luas area luasan penelitian. Pemanfaatan hutan menjadi perkebunan menjadikan perubahan tingkat kerapatan vegetasi Tinggi menjadi Sedang pada bagian tengah area penelitian. Luas terbesar NDVI dan aktifitas perkebunan berpengaruh terhadap nilai rata-rata konsentrasi CO₂ pada H-5 dari data pengambilan citra Landsat. Nilai LST cukup berkesesuaian dengan rata-rata H-5 nilai THI harian tetapi belum bisa mempresentasikan perubahan NDVI. Namun demikian menggunakan data yang lebih panjang akan lebih baik dalam menjelaskan hubungan ini. Penanaman vegetasi berkayu dapat membantu mengurangi kenaikan CO₂ dan meningkatkan penyerapan CO₂ dari efek penggunaan lahan.

Kata kunci: Vegetasi, Kenyamanan, CO₂, Kerapatan, Antropogenik, Bukit Kototabang

ABSTRACT

Changes in vegetation density can reduce the role of forests as CO₂ sinks, which can lead to an increase in CO₂ gas concentrations and the effects of direct sunlight on the ground and air surface. This study aims to determine changes in vegetation density and land surface temperature which then analyse the CO₂ concentration and air temperature through the calculation of Temperature Humidity Index (THI). This research uses Landsat 8 image data to determine the distribution of Normalised Difference Vegetation Index (NDVI) and Land Surface Temperature (LST) in a 2.27 km radius area from the Bukit Kototabang Global Atmospheric Monitoring Station location. The results of research in the June-July period during 2019-2023 on the distribution of vegetation density indicate that in general the vegetation density in the study area is in the medium category with an area between 86% - 95% of the study area. The conversion of forests into plantations has resulted in a change in the vegetation density level from High to Medium in the central part of the research area. The largest area of NDVI and plantation activity affect the average value of CO₂ concentration at H-5 from Landsat image capture data. The LST values agree reasonably with the average H-5 daily THI values but have not yet been able to represent changes in NDVI. However, using longer data would better explain this relationship. Planting woody vegetation can help reduce CO₂ rise and increase CO₂ sinks from land use effects.

Keywords: Vegetation, Comfort, CO₂, Density, Anthropogenic, Bukit Kototabang

Citation: Sulistiyono, A., Sudiar, N. Y., Jonuarti, R., dan Sari, M. B. (2025). Analisis Dampak Perubahan Tingkat Vegetasi dan Estimasi Land Surface Temperature Terhadap Kenyamanan dan Konsentrasi CO₂ di Kototabang. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 23(3), 867-878, doi:10.14710/jil.23.3.867-878

1. PENDAHULUAN

Hutan merupakan bentuk berupa tutupan lahan yang berisi kumpulan berbagai macam vegetasi memiliki fungsi penting bagi kehidupan makhluk

hidup. Seiring berjalannya waktu untuk usaha pemenuhan kebutuhan hidup manusia baik itu perumahan ataupun usaha pertanian dan perkebunan, mendorong terjadinya perubahan

tutupan lahan dan merubah fungsi hutan. Pratiwi dikutip dari Fahmi et al (2023) menyebutkan bahwa penggunaan lahan secara sembarangan yang tidak diatur cenderung akan merubah kondisi fisik lahan dan berdampak melebihi kemampuan lahan untuk daya dukung lingkungan. Untuk kerusakan dalam waktu yang panjang akan menyebabkan kerusakan pada faktor lainnya seperti suhu lingkungan, kenyamanan lingkungan, serapan CO₂ oleh vegetasi, dan perubahan tipe iklim.

Putrajaya (2021) melihat hubungan tingkat kenyamanan terhadap vegetasi didapatkan bahwa secara tidak langsung perubahan vegetasi akan mempengaruhi dinamika iklim khususnya suhu dan indeks kelembaban yang akhirnya mempengaruhi kenyamanan masyarakat di kawasan tersebut. Selanjutnya Djatnika et al dalam Maria (2022) menyebutkan bahwa terjadinya peningkatan dari perubahan suhu akan mempengaruhi tingkat kenyamanan masyarakat, hal ini karena manusia akan bertukar panas dengan lingkungannya. Ini karena lingkungan dalam hal ini keberadaan kanopi pada vegetasi berupa pohon yang besar berkontribusi untuk keadaan iklim mikro yakni dapat mengurangi suhu udara siang hari ketika panas terik sehingga pengurangan suhu ini akan meningkatkan kenyamanan termal manusia pada siang hari (Coutts dalam Sudiar, 2020). Lebih jauh lagi, keberadaan hutan akan mengurangi potensi kenaikan suhu udara permukaan yang disebabkan karena kenaikan konsentrasi gas CO₂ di udara, hal ini karena penyerapan karbon dioksida (CO₂) dari udara oleh vegetasi hutan melalui proses fotosintesis dan menyimpan CO₂ dalam bentuk biomassa hutan (Kurniawati, 2021). Hutan yang semakin rusak, akan meningkatkan konsentrasi gas rumah kaca, mengingat fungsi hutan sebagai penahan perubahan iklim dengan mampu menyerap CO₂ yang melepaskan ke atmosfer (Fadhli et al., 2021).

Pengamatan fungsi hutan (vegetasi) dan suhu permukaan tanah bisa dilakukan dengan penginderaan jauh dengan menggunakan kombinasi beberapa pita spektral tertentu dari metode penginderaan jauh. Teknik *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) merupakan teknik transformasi Gambar yang dipertajam secara spectral untuk menganalisis karakteristik terkait dengan vegetasi (Putra, 2021). Suhu permukaan tanah atau *Land Surface Temperature* (LST) merupakan sebuah metode penginderaan jauh untuk menentukan dan memetakan sebaran suhu permukaan sebuah tutupan lahan (Pramitha et al, 2023). Di sini diketahui bahwa tutupan lahan dengan mempertimbangkan emisivitas vegetasi dan emisivitas tanah bisa didapatkan distribusi *Land Surface Temperature* (Divia, 2023). Metode ini dihasilkan melalui suatu algoritma atau persamaan matematis dari beberapa band (saluran) yang terdapat pada data penginderaan jauh (Icaza dalam Putrajaya, 2021).

Hasil perbandingan indeks vegetasi berbasis spektral terhadap kerapatan kanopi mempunyai tingkat keakuratan sebesar >70% (Arnanto dalam Sari, 2019). Selanjutnya Balas et al (2023) melalui hasil penelitian diketahui bahwa data suhu permukaan lahan hasil citra landsat dan pengukuran insitu didapatkan koefisien determinasi yang baik sehingga ini dapat dijadikan dasar penggunaan data citra landsat untuk mendeskripsikan keadaan suhu permukaan tanah. Untuk studi tentang pengaruh NDVI dan LST terhadap suhu, dalam hal ini dengan tingkat kenyamanan menunjukkan bahwa ada hubungan antara penutupan lahan dengan tingkat kenyamanan termal. Semakin besar perubahan luasan menjadi lahan terbangunan semakin sedikit jumlah vegetasi, makin besar nilai tingkat kenyamanan termal (Andini, 2018; Sari, 2019; Al Mukmin, 2016).

Sejumlah penelitian yang dilakukan tentang tingkat vegetasi NDVI dan LST (Al Mukmin, 2016; Ningrum, 2018; Assidio, 2018; Sari, 2019; Janah, 2023) telah diaplikasikan dengan baik terhadap indeks kenyamanan termal, namun untuk wilayah berupa vegetasi rapat masih belum banyak dilakukan. Sejumlah penelitian telah menggambarkan estimasi penyerapan CO₂ ditinjau dari tingkat vegetasi NDVI tapi belum ada yang menggambarkan perubahan tingkat vegetasi NDVI tersebut terhadap konsentrasi gas CO₂ terukur.

Kototabang yang berada di Kabupaten Agam Propinsi Sumatera Barat terdapat stasiun dengan lingkungan berupa vegetasi rapat tempat melakukan pengukuran dan pengamatan parameter kualitas udara termasuk pengukuran konsentrasi CO₂ satu-satunya yang ada di pulau Sumatera. Stasiun ini bernama Stasiun Pemantau Atmosfer Global Bukit Kototabang yang merupakan bagian dari program *Global Atmosfer Watch* (GAW) sebagai standar referensi udara bersih di Indonesia (Hardiyanto & Zulistyawan, 2023; Pujiastuti, 2010). Dipilih untuk mengukur referensi udara bersih karena berada jauh dari sumber pencemar udara antropogenik (Kurniawan, 2017) dan aktifitas manusia agar udara benar-benar alami dalam lingkup nasional maupun internasional (Pujiastuti, 2010).

Seiring dengan waktu dan adanya aktifitas masyarakat menggunakan lahan, maka tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui perubahan kerapatan vegetasi NDVI dan LST pada area lingkungan vegetasi rapat disekitar Stasiun Pemantau Atmosfer Global Bukit Kototabang. Perubahan kerapatan vegetasi ini selanjutnya akan dilihat pengaruh terhadap nilai konsentrasi CO₂ yang terukur secara insitu di Stasiun Pemantau Atmosfer Global Bukit Kototabang. Sedangkan profil nilai LST akan disandingkan dengan tingkat kenyamanan *Temperature Humidity Index* (THI) sehingga dari sini akan diketahui seberapa besar LST dapat mencerminkan nilai THI.

Memperhatikan pentingnya fungsi hutan bagi kehidupan makhluk maupun status Stasiun Pemantau

Atmosfera Global Bukit Kototabang sebagai referensi udara bersih, maka informasi tentang besarnya perubahan tingkat vegetasi menjadi sangat penting. Informasi ini bisa sebagai dasar dilakukan mitigasi potensi efek yang akan ditimbulkan seperti kenaikan suhu permukaan, perubahan kenyamanan dan peningkatan konsentrasi gas CO₂.

2. METODE PENELITIAN

2.1. Area Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada luasan area vegetasi rapat radius 2.27 km dari Stasiun Pemantau Atmosfer Global Bukit Kototabang. Radius 2,27 km merupakan jarak terdekat secara garis lurus Stasiun Pemantau Atmosfer Global Bukit Kototabang dengan jalan raya lintas propinsi dan perkampungan warga. Perkampungan warga dan jalan raya jalur lintas antara Sumatera Barat - Medan merupakan salah satu sumber antropogenik yang diperkirakan bisa mempengaruhi CO₂ terukur di Stasiun Pemantau Atmosfer Global Bukit Kototabang. Maksud dari penentuan radius 2,7 km ini adalah untuk meminimalisir pengaruh antropogenik CO₂ dan menjaga kemurnian konsentrasi CO₂ sebagai objek yang berhubungan dengan vegetasi yang mana nilai konsentrasi CO₂ ini diukur di Stasiun Pemantau Atmosfer Global Bukit Kototabang. Stasiun ini sendiri berada di daerah Kototabang dengan topografi perbukitan dan memiliki lingkungan utama berupa vegetasi rapat berada di hutan tropis wilayah Bukit Barisan (Nugroho et al., 2019).

Miles et al (2012) menemukan dari penelitian terhadap stasiun-stasiun lokasi cukup rapat yang pengukur CO₂ didapatkan bahwa variasi musiman CO₂ di atmosfer sangat bergantung pada jenis ekosistem yang ada di area tempat sensor berada. Selanjutnya Saito et al (2015) menggambarkan pengukuran konsentrasi CO₂ di sepanjang lintasan 5.1 km di troposfer bawah menggunakan cahaya inframerah dekat, memperlihatkan kelayakan pengukuran CO₂ secara tidak langsung di satu lokasi berdasarkan pengukuran yang diambil di tempat lain. Atas dasar ini maka radius area 2,7 km masih berada pada jarak yang representatif terhadap nilai CO₂ yang mana lingkungan Stasiun Pemantau Atmosfer Global ini merupakan ekosistem homogen berupa vegetasi rapat berupa hutan alam dan perkebunan.

2.2. Data Penelitian

Data yang digunakan pada penelitian ini adalah data periode tahun 2019 - 2023. Selanjutnya untuk meminimalisir pengaruh variabelitas iklim dalam hal ini keadaan jumlah awan terhadap data citra, keadaan suhu dan kelembaban, maka dipilih periode data bulan Juni-Juli yang mana pada saat itu merupakan periode monsoon Australia sehingga potensi jumlah awan pada saat itu relatif sedikit.

Data utama penelitian ini adalah Citra Landsat yang diunduh melalui website *United States Geological*

Survey (USGS). Citra Landsat merupakan salah satu hasil pengambilan data dengan metode remote sensing atau penginderaan jauh. Penginderaan jauh itu sendiri merupakan proses perolehan informasi tentang suatu obyek tanpa adanya kontak fisik secara langsung dengan obyek tersebut (Elachi, 2006; Budiyo, 2014; Muslim, 2021). Deteksi dan pemisahan obyek atau rupa bumi oleh sensor satelit dilakukan dengan cara perekaman energi radiasi elektromagnetik yang dipantulkan atau dipancarkan oleh obyek atau material permukaan sehingga obyek yang berbeda akan memberikan nilai dan jenis energi yang berbeda pada spektrum elektromagnetik. Satelit Landsat 8 memiliki 11 buah band (spektrum panjang gelombang) (Fawzi, 2021). Untuk penghitungan indeks kerapatan vegetasi (NDVI) akan digunakan band 4 dan 5 sedangkan estimasi suhu permukaan tanah (LST) menggunakan band 10 citra Landsat 8.

Kualitas data citra penginderaan jauh sangat dipengaruhi oleh adanya tutupan awan (Dyatmika, 2015). Hal ini karena tutupan awan dapat mempengaruhi nilai digital dari piksel sebagai informasi objek permukaan bumi yang terletak di bawah awan (Trisakti dkk dalam Ziliwu, 2018). Dari hal tersebut di atas, maka citra Landsat 8 yang akan digunakan untuk penghitungan NDVI dan LST akan dipilih citra satelit yang mempunyai tutupan awan < 15%.

Data harian suhu dan kelembaban udara digunakan untuk menghitung indeks kenyamanan THI diambil dari hasil pengukuran AAWS sedangkan data CO₂ akan digunakan data hasil pengukuran Piccaro. AAWS dan Piccaro mengukur secara insitu di Stasiun Pemantau Atmosfer Global Bukit Kototabang. Untuk mendapatkan keadaan umum konsentrasi CO₂ dan suhu tingkat kenyamanan terhadap data citra Landsat maka akan diambil data CO₂ dan THI harian pada H-5 dari waktu perolehan data citra seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1.

2.3. Penghitungan Indeks Vegetasi dan Perubahan Tutupan Lahan

Setiap jenis permukaan akan merefleksikan gelombang elektromagnetik yang berbeda-beda yang merupakan dasar indeks vegetasi NDVI (Andini, 2018). Indeks ini berasal dari gabungan band inframerah dekat (NIR) dan band pita merah (Red) (Rouse et al dalam Morsy & Hadi, 2022) yang ditulis sebagai berikut:

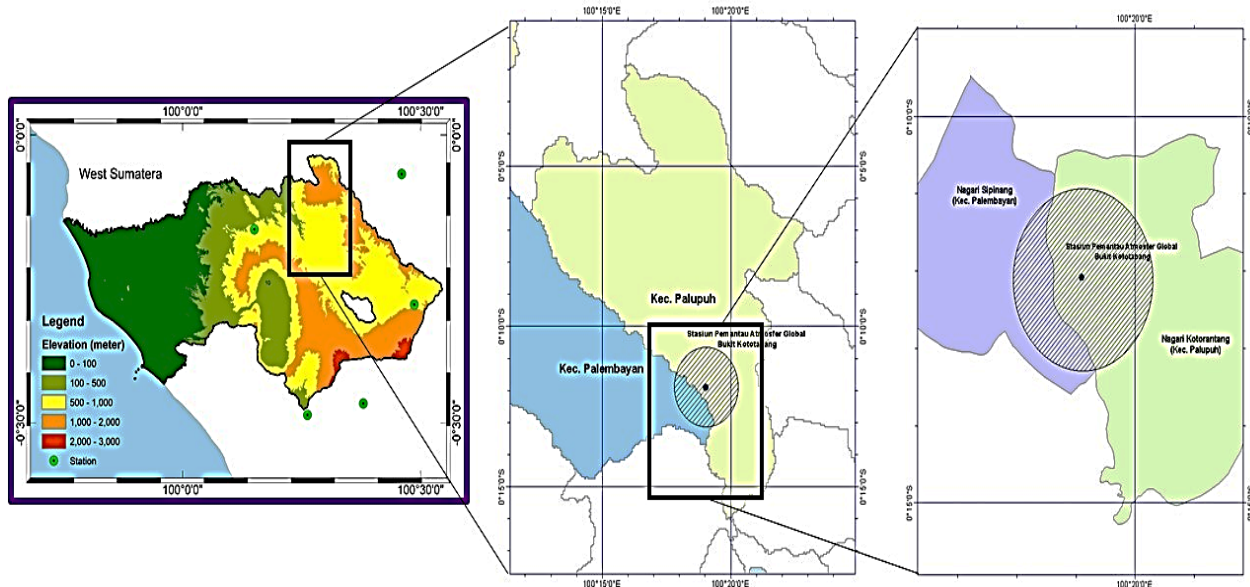
$$NDVI = \frac{Band\ NIR - Band\ R}{Band\ NIR + Band\ R} \dots \dots \dots (1)$$

dengan:

NDVI = *Normalized Difference Vegetation Index*

NIR = Band Near Infrared (Band 4)

Red = Band Red (Band 3)



Gambar 1. Wilayah Penelitian

Tabel 1. Data Citra Landsat 8

Waktu Perolehan Citra	Jam	Id Produk Landsat
12 Juli 2019	10.29 WIB	LC08_L1TP_127060_20190712_20200827_02_T1
28 Juni 2020	10.29 WIB	LC08_L1TP_127060_20200628_20200823_02_T1
15 Juni 2021	10.29 WIB	LC08_L1TP_127060_20210612_20210622_02_T1
4 Juli 2022	10.29 WIB	LC08_L1TP_127060_20220722_20220707_02_T1
21 Juni 2023	10.29 WIB	LC08_L1TP_127060_20230621_20230630_02_T1

Tabel 2. Interval NDVI dan Kategori Kerapatan Vegetasi

Kelas	Nilai NDVI	Kategori Kerapatan Vegetasi
1.	-1 - 0,12	Tanpa Vegetasi
2.	0,12 - 0,22	Vegetasi Sangat Rendah
3.	0,22 - 0,42	Vegetasi Rendah
4.	0,42 - 0,72	Vegetasi Sedang
5.	0,72 - 1	Vegetasi Tinggi

Sumber: Vito, 2017; Awaliyan, 2018 dalam Marlina, 2022

Tabel 3. Interval Kelas THI

Rentang Nilai THI (°C)	Kategori THI
<20	Tidak Nyaman (Terlalu Sejuk)
20 - 24	Nyaman
24 - 26	Cukup Nyaman
>26	Tidak Nyaman (Terlalu Panas)

Sumber: Emmanuel R (2005) dan Tursilowati L (2015) dalam Andani, 2018

Sebelum masuk penghitungan NDVI, dilakukan koreksi radiometric pada Digital Number (DN) pada masing-masing band 4 dan 5. Koreksi radiometrik dilakukan dengan mengkonversi citra mentah Digital Number (DN) ke nilai TOA (*Top of Atmospheric Spectral Radiance*) menggunakan *radiance rescaling factors* dalam file metadata Landsat 8. TOA (*Top of Atmospheric Spectral Radiance*) adalah radiasi yang diterima sensor yang dipancarkan oleh bagian atas atmosfer pada panjang gelombang tertentu. Koreksi radiometric ini dimaksudkan untuk menghilangkan pengaruh atmosfer pada sensor satelit karena yang dipantau sebenarnya ada bumi (Rumengan dalam Insan, 2021).

$$L\lambda = ML \times Qcal + AL \dots \dots \dots (2)$$

di mana;

$L\lambda$ = TOA *spectral radiance* (Watts/(m² * srad * μm))

ML = Band-specific *multiplicative rescaling factor* dari metadata (Radiance_Mult_Band_X)

AL = Band-specific *additive rescaling factor* dari the metadata (Radiance_Add_Band_X)

$Qcal$ = Nilai digital number (DN)

Selanjutnya dilakukan penghitungan nilai NDVI seperti pada persamaan 1 dan hasil nilai ini dikelompokkan menjadi 5 tingkat kerapatan vegetasi mengikuti pembagian nilai NDVI seperti pada Tabel 2.

Perubahan tutupan lahan akan dianalisis dengan menggunakan persamaan (Sari., 2019).

$$TV = \frac{LTH}{LW} \times 100 \dots \dots \dots (3)$$

Dengan:

TV : persentase hutan(km²)/luas wilayah (km²)

LTH : luas tutupan vegetasi (km²)

LW : luas wilayah diamati (km²)

LTH merupakan luasan dari nilai NDVI kategori keparapatan vegetasi (Tabel 2) dan LW merupakan luas wilayah penelitian sebesar 15.72 km². Dengan menggunakan persentase perubahan kategori tutupan lahan akan diketahui pengurangan atau penambahan suatu kategori tutupan lahan yang terjadi di wilayah penelitian.

2.4. Penghitungan Land Surface Temperature (LST)

Land Surface Temperature (LST) dihitung dari band 10 Citra Landsat 8. Algoritma LST menggunakan algoritma Seperti di bawah ini (Darettamarlan, Hidayat, dan Darminto dalam Gusmiarti, 2022), dengan terlebih dahulu mengkonversi *Digital Number* (DN) ke nilai *Spectral Radiance* seperti yang ditunjukkan pada persamaan:

$$L\lambda = M_L Q_{cal} + A_L \dots \dots \dots (4)$$

Setelah itu, spectral radiance (L_λ) dirubah menjadi *Brightness Temperature* (TB) dengan menggunakan konstanta K1 dan K2 dengan nilai K1 dan K2 (Avdan and Jovanovska dalam Morsy & Hadi, 2022) yang ada pada metadata citra Landsat yang diunduh dan ditulis sebagai:

$$BT = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{K_2 + 1}\right)} - 273 \dots \dots \dots (5)$$

Menghitung proporsi vegetasi (PV) dari hasil penghitungan nilai NDVI

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

Selanjutnya menghitung faktor emisivitas permukaan tanah (ε) yangmana emisivitas permukaan tanah adalah proporsionalitas radiasi benda hitam dan memprediksi radiasi yang dipancarkan (Salih dkk dalam Morsy & Hadi, 2022) dihitung mengikuti persamaan:

$$\varepsilon = 0.004 * P_v + 0.986 \dots \dots \dots (7)$$

Terakhir mencari nilai estimasi LST dalam Celcius (°C) menggunakan algoritma persamaan *Single Chanel* (Gusmiarti, 2022; Balas et al., 2023):

$$LST = \frac{BT}{\left\{ 1 + \left[\left(\frac{\lambda BT}{c^2} \right) \ln(\varepsilon) \right] \right\}} \dots \dots \dots (8)$$

2.5. Penghitungan Perubahan Tingkat Kenyamanan

Untuk mengetahui perubahan tingkat kenyamanan, indeks suhu dan kelembaban (THI) akan digunakan pada penelitian ini. Menurut Effendy S dalam Andini (2018), bahwa indeks kenyamanan THI dapat dihitung dengan menggunakan data suhu udara (°C) dan kelembaban udara relatif (RH) yang bisa ditulis dengan:

$$THI = 0.8Ta + \frac{(Rh \times Ta)}{500} \dots \dots \dots (9)$$

Keterangan:

THI = *Temperature Humidity Index*

Ta = Suhu Udara (°C)

RH = Kelembaban Udara Relatif (%)

Kenaikan suhu udara akan didekati dengan penghitungan indek kenyamanan THI sehingga perubahan nilai THI akan menjelaskan perubahan suhu yang terjadi dari adanya perubahan tingkat vegetasi.

2.6. Analisis Perubahan Konsentrasi CO2 terukur

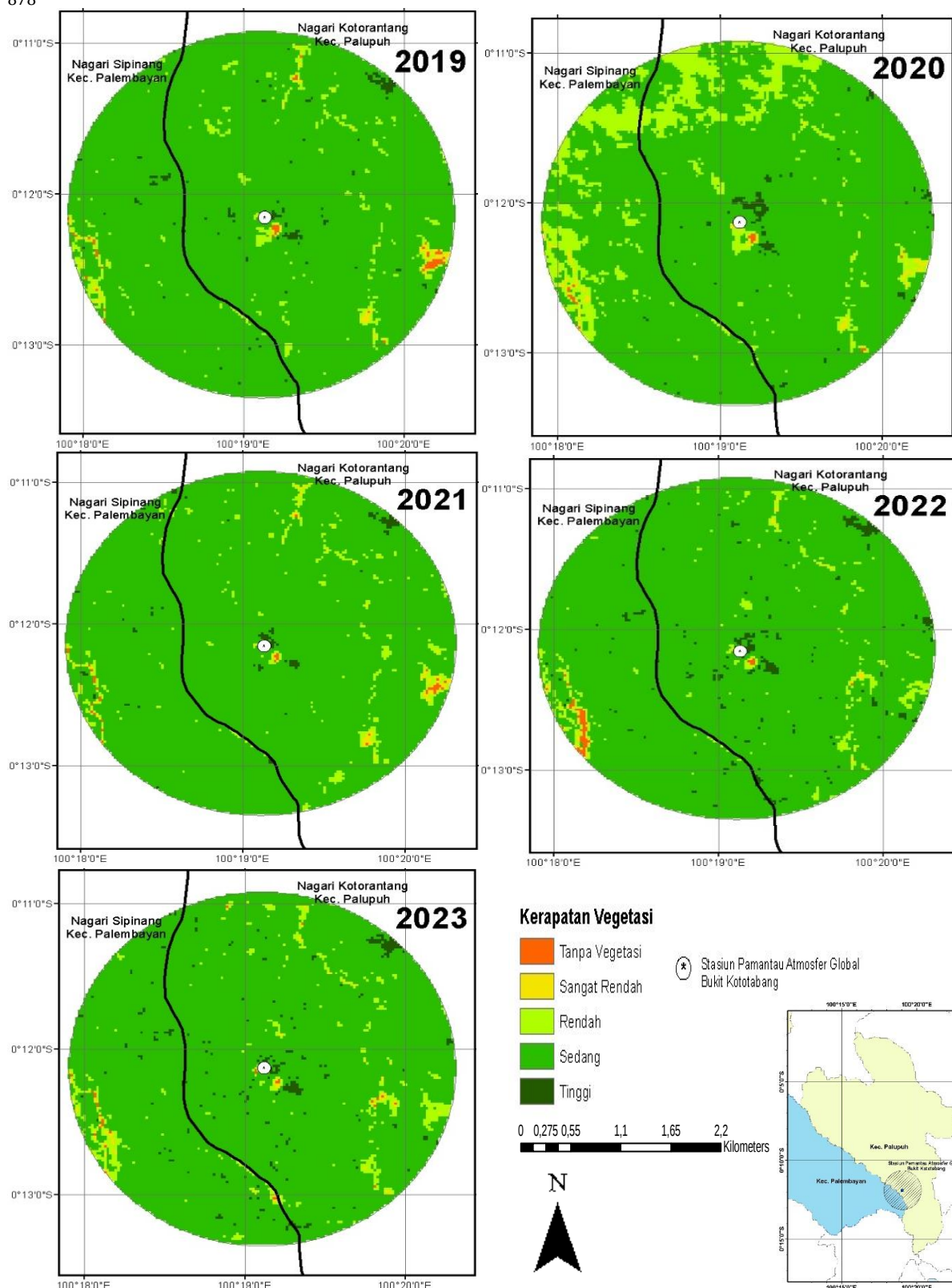
Analisis konsentrasi CO2 dilakukan secara diskripsi perubahan CO2 terhadap profil NDVI. Nilai hasil pengukuran H-5 dipresentasikan dalam bentuk grafik dan nilai rata-rata pada periode tersebut. Dari sini akan diketahui kecenderungan konsentrasi CO2 dan hubungan secara diskripsi terhadap luas tingkat NDVI.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Sebaran dan luas kategori Kerapatan Vegetasi

Penghitungan NDVI citra Landsat 8 dengan perolehan data tahun 2019-2023 untuk wilayah area radius 2.27 km dari Stasiun Pemantau Atmosfer Global Bukit kototabang terlihat pada Gambar 2 didapatkan kategori kerapatan vegetasi berkisar antara Tanpa Vegetasi hingga Vegetasi Tinggi dengan nilai indek NDVI berkisar antara -0,0424 s/d 0,7641. Rata-rata nilai NDVI tertinggi terjadi pada sample data tahun 2020 dengan rata-rata nilai NDVI sebesar 0,3577. Area penelitian didominasi oleh kerapatan vegetasi pada kriteria Sedang. Luas kategori Sedang pada periode tahun 2019 – 2023 berkisar antara 86 – 96 % dengan luasan terbesar pada bulan Juni 2021 sebesar 15,13 km² dari total luas 15.73 km².

Perubahan kerapatan vegetasi secara nyata terjadi pada perolehan data tahun 2019 dan 2020 dengan peningkatan luasan kerapatan vegetasi Sedang dan pengurangan kerapatan vegetasi Rendah. Pada hasil tersebut diketahui perubahan kategori selama periode tahun 2019 - 2023 hanya berkisar pada kategori Rendah, Sedang dan Tinggi sedangkan pada kategori Sangat Rendah dan Tanpa Vegetasi dengan perubahan relatif kecil.



Gambar 2. Hasil Pengolahan NDVI Periode Tahun 2019 – 2023 Wilayah Radius 2,27 km Stasiun Pemantau Atmosfer Global Bukit Kototabang

Derajat perubahan luasan tertinggi terjadi pada periode tahun 2019-2021 pada kategori Rendah. Peningkatan luasan pada kategori Rendah pada tahun 2020 sebesar 9,0 % dari tahun sebelumnya terjadi karena adanya pengurangan luasan kategori Sedang seluas 1,2 km² atau perubahan sebesar 8,9% dari

kategori Sedang tahun 2019. Selanjutnya kenaikan kembali luasan kategori Sedang tahun 2021 sebesar 9.6 % dari tahun sebelumnya terjadi karena adanya pengurangan luasan pada kategori Rendah tahun sebelumnya sebesar 1.5 km². Untuk tahun 2023 derajat perubahan berupa pengurangan luasan terjadi

pada kerapatan vegetasi Tinggi dan Sedang dengan nilai masing-masing 0,61 % dan 0,19 %.

Sebaran kerapatan vegetasi tahun 2019 – 2023 didapatkan bahwa keadaan tingkat kerapatan vegetasi area penelitian berfluktuatif pada setiap tahun pengamatan. Secara umum area penelitian bagian tengah (terdekat dari Stasiun Pemantau Atmosfer Global Bukit Kototabang) terjadi pengurangan kepadatan vegetasi kerapatan Tinggi hingga tahun 2023. Perubahan menjadi kerapatan vegetasi Sedang lebih meluas hingga tahun 2023 pada area tersebut. Area ini cenderung mempunyai kerentanan yang cukup tinggi terhadap kehilangan kerapatan vegetasi Tinggi karena berada pada topografi rata dan wilayah yang cukup luas sehingga akan mudah untuk dialih fungsikan menjadi kebun warga.

Tahun 2019- 2023 di area sebelah timur hingga tenggara Stasiun Pemantau Atmosfer Global Bukit Kototabang terjadi perubahan vegetasi berupa pengurangan kerapatan vegetasi Sedang dan perluasan kerapatan Rendah. Kenaikan tingkat vegetasi Rendah menjadi Sedang juga mewarnai perubahan kerapatan selama tahun 2019 hingga 2023 secara fluktuatif pada wilayah yang relatif sama. Bagian tengah area adalah kantor Stasiun Pemantau Atmosfer Global Bukit Kototabang dan BRIN (Lapan) yang disana terdapat area terbuka tempat penempatan alat operasional kedua kantor tersebut sehingga area tersebut berada pada kerapatan vegetasi Rendah hingga kategori Tidak Ada Vegetasi.

Kondisi cuaca dan iklim equatorial di wilayah penelitian menyebabkan tanah lembab dan jumlah hujan yang tinggi sepanjang tahun menjadikan vegetasi mudah hidup dan tumbuh. Dengan kondisi iklim dan keadaan tanah tersebut menjadikan vegetasi pada area penelitian selalu pada keadaan rapat dan cenderung pada tingkat kerapatan vegetasi Sedang.

3.2. Pengaruh Kerapatan Vegetasi terhadap Konsentrasi CO₂

Data rata-rata H-5 konsentrasi gas CO₂ terhadap waktu perolehan citra Landsat 8, diketahui bahwa secara umum konsentrasi gas CO₂ menunjukkan pola kenaikan dari tahun ketahun selama tahun 2019-2023. Penurunan nilai rata-rata terjadi pada periode data tahun 2021 dan menunjukkan terjadi kenaikan konsentrasi kembali pada tahun berikutnya. Kenaikan dan penurunan signifikan konsentrasi harian CO₂ bisa disebabkan karena adanya sumber CO₂ antropogenik sekitar Stasiun Pemantau Atmosfer Global Bukit Kototabang. Faktor antropogenik yang berasal dari aktifitas warga menyebabkan kenaikan rata-rata harian konsentrasi gas CO₂. Sedangkan penurunan konsentrasi rata-rata harian mengindikasikan bahwa aktifitas antropogenik saat itu relatif kecil.

Faktor cuaca dan iklim juga mempengaruhi jumlah konsentrasi CO₂. Kondisi cuaca dan iklim ini menjadi

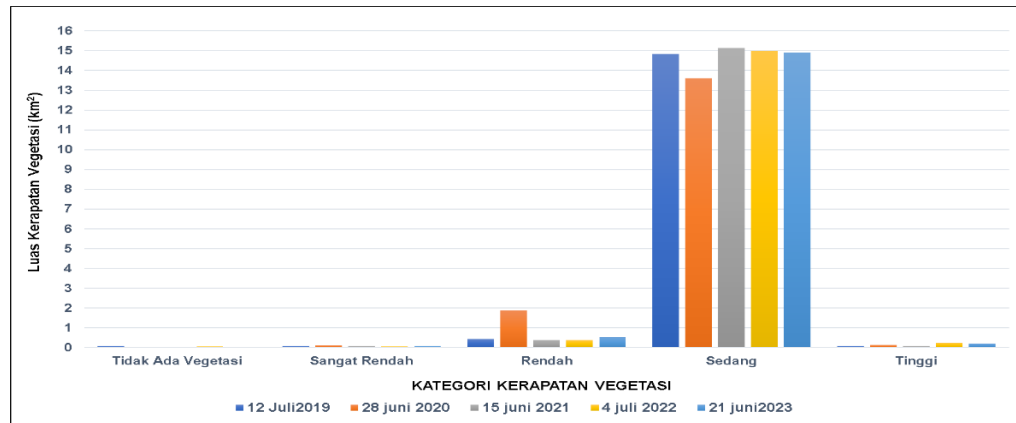
faktor pembatas aktifitas antropogenik di sekitar area Stasiun Pemantau Atmosfer Global Bukit Kototabang. Pada saat hujan tidak ada aktifitas berkebun sehingga CO₂ sumber antropogenik relatif rendah. Kegiatan berkebun warga ini sejalan dengan peningkatan konsentrasi gas CO₂ yang terukur di Stasiun Pemantau Atmosfer Global Bukit Kototabang.

Adanya kenaikan dan penurunan secara signifikan terhadap data CO₂ menandakan aktifitas antropogenik penyumbang CO₂ secara langsung mempengaruhi hasil ukur nilai konsentrasi CO₂ yang terukur di Stasiun Pemantau Atmosfer Global Bukit Kototabang. Seperti pada Gambar 4, perubahan kategori dan luasan NDVI mempunyai keterkaitan terhadap hasil ukur gas CO₂. Adanya pengaruh luasan kategori NDVI Sedang dan Tinggi dipresentasikan dengan kenaikan rata-rata konsentrasi gas CO₂.

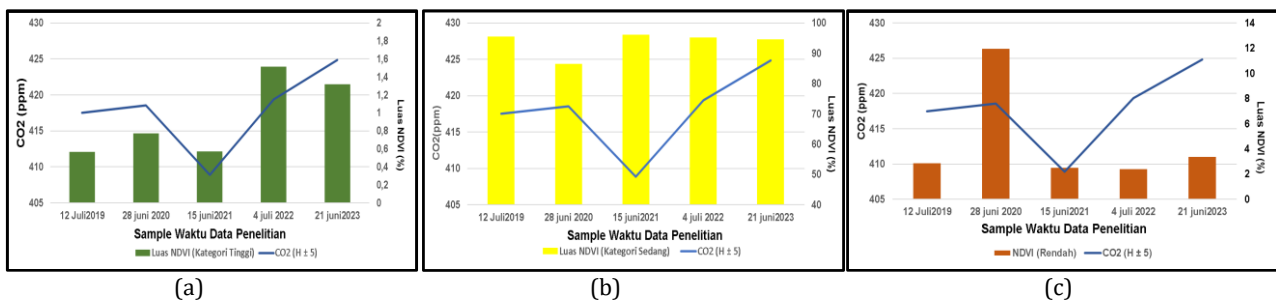
Pada data tahun 2022 dan 2023 terlihat bahwa tingginya persentase luasan kerapatan vegetasi Sedang dan Tinggi tetapi konsentrasi CO₂ yang terukur juga meningkat. Hal ini dijelaskan bahwa kerapatan vegetasi kategori Sedang berasal dari jenis vegetasi tanaman perkebunan warga. Tingginya aktifitas berkebun warga sejalan dengan kerapatan vegetasi Sedang di area penelitian. Aktifitas ini mendorong peningkatan sumber CO₂ antropogenik sehingga menjadikan peningkatan konsentrasi CO₂. Sebaliknya pada tahun 2019-2020, pemanfaatan lahan pada kerapatan vegetasi Rendah menjadi kriteria Sedang berkontribusi pada penurunan konsentrasi CO₂ dan karena saat itu aktifitas warga belum setinggi pada periode tahun 2022-2023.

3.3. Sebaran Suhu Permukaan dan Tingkat Kenyamanan

Variasi LST pada area penelitian periode tahun 2019 – 2023 berkisar 18,3 °C - 28,2 °C. Rata-rata suhu permukaan tertinggi terjadi pada sample data tahun 2019 sebesar 24,3 °C dan kemudian disusul tahun 2021 sebesar 23,1 °C. Profil suhu permukaan tahun 2019 sebagian besar pada kisaran suhu 22 s/d 24 °C dengan luas interval suhu 12,6 km². Terjadi penurunan luas karena meluasnya area suhu 20 °C - 22 °C menjadi 10,7 km² pada tahun 2020. Interval suhu 20 °C - 22 °C tahun 2020 adalah luasan terbesar dari interval nilai suhu tahun 2020 atau 68% dari luas area penelitian. Pada tahun 2021 pada secara umum suhu berkisar 20 - 24 °C dengan total luasan 15,224 km² atau sebesar 96% area penelitian. Selanjutnya pada tahun 2022 dan 2023 secara umum suhu saat itu berada pada kisaran 20 °C - 22 °C. Fluktuatif profil suhu permukaan terjadi pada periode tahun 2022 – 2023 tidak lepas dari pengaruh keadaan iklim harian pada saat perolehan data citra satelit. Dari profil LST yang disajikan pada Gambar 7 tidak ditemukan sebab yang akan menjadikan suatu area berpotensi mempunyai kecenderungan peningkatan suhu.



Gambar 3. Luasan kategori Kerapatan Vegetasi (NDVI) Periode Tahun 2019 - 2023 Wilayah Radius 2,27 km Stasiun Pemantau Atmosfer Global Bukit Kototabang



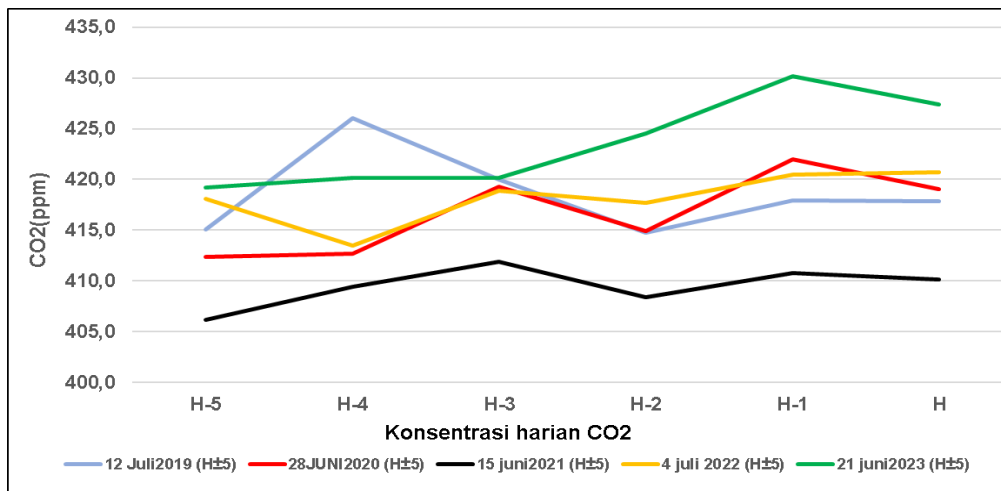
Gambar 4. Luasan Kategori Kerapatan Vegetasi (NDVI) Terhadap Rata-Rata dari H-5 CO₂

Keadaan tingkat kenyamanan periode tahun 2019 – 2023 ditunjukkan Gambar 6. Suhu rata-rata THI H-5 berkisar antara 19,5 °C - 22,7 °C. Kategori tingkat kenyamanan secara umum berada pada kategori Nyaman, kecuali pada sample data tahun 2022 berada pada kategori Tidak Nyaman (terlalu dingin). Periode data bulan Juni-Juli tahun 2019-2023 merupakan periode musim kemarau dengan gradien suhu dan kelembaban yang tinggi antara siang dan malam. Rendahnya suhu THI terutama pada Juli 2022 disebabkan karena rendahnya suhu diurnal pada periode malam sampai dini hari sehingga kondisi nilai ini berkontribusi terhadap hasil hitung THI menjadi rendah.

Tabel 4 berupa luasan interval LST dari profil suhu LST yang ada pada Gambar 7 dan Tabel tersebut terhadap pola diskripsi grafik THI pada Gambar 6 adalah cukup saling berkesesuaian. LST interval 22 °C - 24 °C yang merupakan luasan terbesar dari LST tahun 2019 sejalan dengan besaran nilai rata-rata THI H-5. Luasan terbesar interval nilai LST dipresentasikan dengan nilai THI yang mana kenaikan

dan penurunan nilai dari LST tersebut sejalan dengan kenaikan dan penurunan pada nilai THI. Seperti pada tahun 2021 dengan nilai LST lebih rendah dari tahun sebelumnya yaitu berkisar antara pada suhu 16-18 °C sebanding dengan penurunan nilai THI dari tahun sebelumnya. Luasan nilai LST yang sama tahun 2022 dan 2023 digambarkan dengan nilai THI yang relatif sama. Pengambilan nilai rata-rata THI H-5 dari waktu perolehan citra sejalan dengan profil luasan nilai LST pada wilayah penelitian.

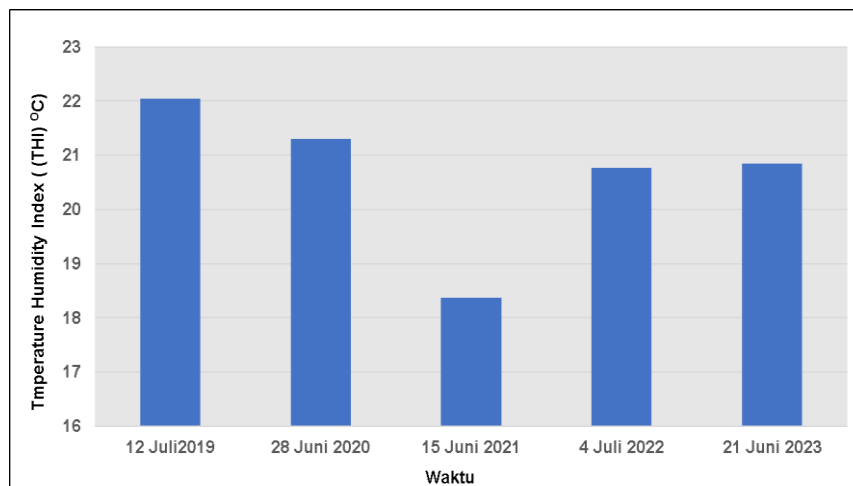
Memperhatikan keadaan iklim lokal wilayah penelitian dengan potensi hujan yang tinggi dan berada pada kawasan hutan (vegetasi rapat) menjadikan suhu yang dipresentasikan melalui tingkat kenyamanan THI cenderung pada kisaran nyaman. Tingkat kenyamanan ini merupakan keadaan yang kompleks dari kondisi lingkungan dari parameter penyusunnya dan didapatkan bahwa profil luasan nilai LST ini dapat mempresentasikan keadaan nilai THI di wilayah penelitian.



Gambar 5. Konsentrasi Harian Gas CO₂ pada Periode H-5 Stasiun Pemantau Atmosfer Global Bukit Kototabang

Tabel 4. Luas LST (km²)

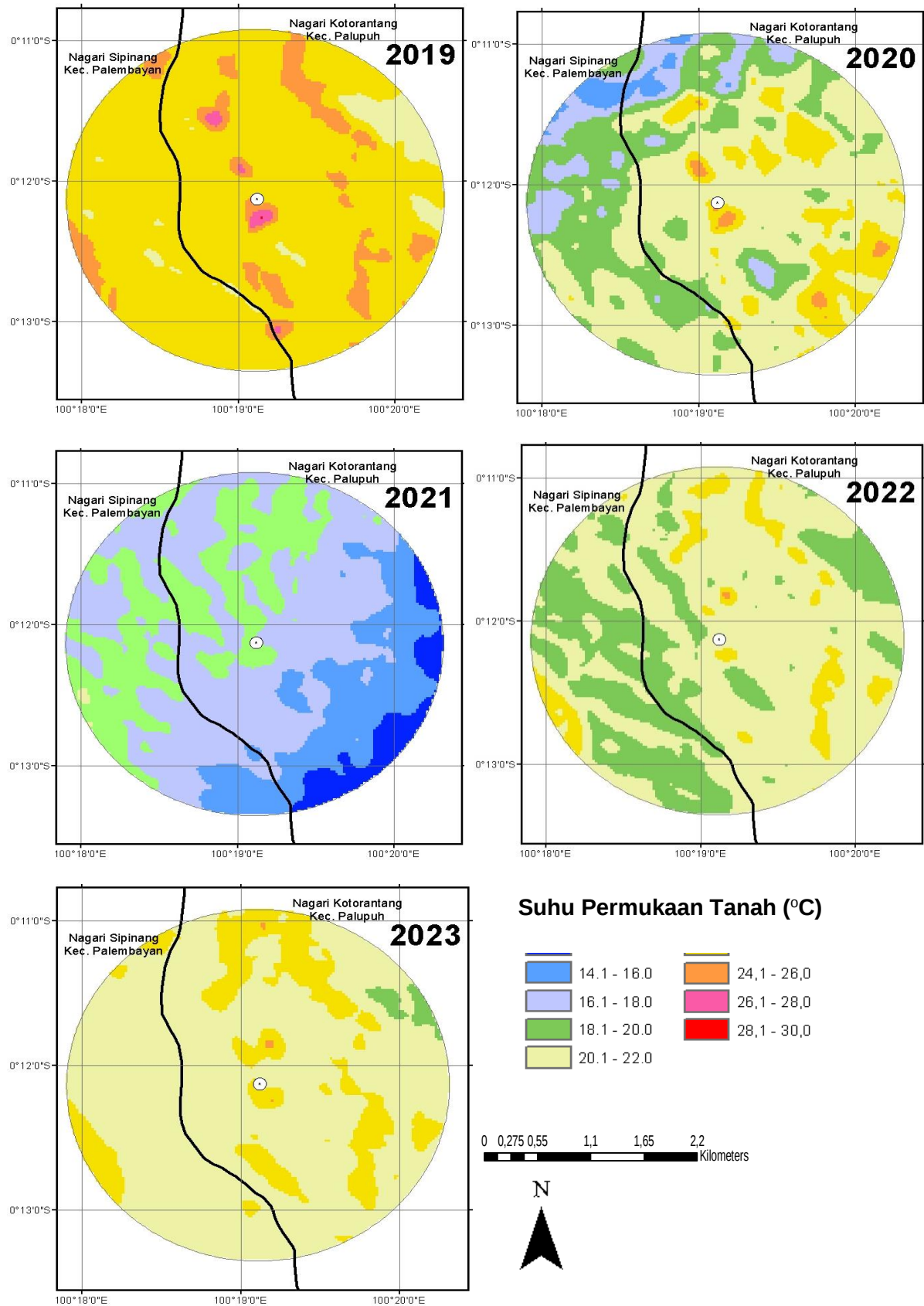
Kelas	LST (°C)	12 Juli 2019	28 Juni 2020	15 Juni 2021	4 Juli 2022	21 Juni 2023
1	12,0-14,0	-	-	0,933893	-	-
2	14,1-16,0	-	0,358105	3,102929	-	-
3	16,1-18,0	-	1,36833	7,635541	-	-
4	18,1-20,0	-	4,1697	4,0342	4,4567	0,2091
5	20,1-22,0	0,75477	7,8503	0,0268	10,1023	12,7037
6	22,1-24,0	13,355517	1,8491	-	1,1631	2,8102
7	24,1-26,0	1,532155	0,130083	-	0,0060	0,0119
8	26,1-28,0	0,092097	-	-	-	-
9	28,1-30,0	0,000616	-	-	-	-



Gambar 6. Indeks Kenyamanan (THI) (H- 5) Periode Tahun 2019 - 2023

Penelitian terkait dengan konsentrasi gas CO₂ di Bukit Kototabang oleh Pujiastuti (2010) dengan menghitung keterkaitan *radative forcing* CO₂ metode IPCC (*Intergovernmental on Panel Climate Change*) dengan temperatur hasil pengukuran AWS selama tahun 2005-2009. Hasil penelitian tersebut didapatkan bahwa temperatur yang diukur dengan AWS yang ada di bukit kototabang bukan nilai temperatur yang dipengaruhi oleh konsentrasi CO₂ di

atmosfer saja tapi banyak faktor yang mempengaruhi hasil pencatatan temperatur yang terkalkulasi dan tercatat di AWS. Hal ini didapatkan karena korelasi *radiasi forcing* CO₂ dengan selisih temperatur AWS di Bukit Kototabang tahun 2005-2009 menunjukkan nilai yang rendah yang berarti bahwa *radiative forcing* CO₂ bukan merupakan faktor utama yang mempengaruhi temperatur di Bukit Kototabang.



Gambar 7. Hasil Pengolahan LST Periode Tahun 2019 – 2023 Wilayah Radius 2,27 km Stasiun Pemantau Atmosfer Global Bukit Kototabang

4. KESIMPULAN

Selama bulan Juni-Juli tahun 2019-2023 tingkat kerapatan vegetasi secara umum berada pada kategori Sedang. Perubahan luasan kerapatan vegetasi terjadi pada kategori Sedang dan Tinggi. Luasan NDVI terbesar pada kerapatan vegetasi Sedang tidak lepas dari pemanfaatan lahan untuk kegiatan berkebun warga. Perubahan lahan kerapatan vegetasi Tinggi menjadi Sedang terutama pada bagian tengah atau sekitar Stasiun Pemantau Atmosfer Global Bukit Kototabang. Selanjutnya dominasi kerapatan Sedang ini didukung oleh lingkungan hutan alam yang lembab menjadikan vegetasi mudah hidup sehingga secara umum kecenderungan vegetasi dalam keadaan rapat. Untuk mendapatkan gambaran yang lebih jelas tentang tingkat kerapatan vegetasi terutama pada ekosistem hutan yang rapat maka perlunya membagi kelas dan nilai NDVI menjadi kategori lebih rapat sehingga perubahan keragaman vegetasi akan lebih mudah diketahui.

Peningkatan aktifitas pemanfaatan lahan dan perubahan luasan nilai NDVI (kategori Sedang dan Tinggi) berpengaruh pada konsentrasi CO₂. Variasi harian konsentrasi CO₂ dari faktor antropogenik ini mempengaruhi hasil pengukuran gas CO₂ Stasiun Pemantau Atmosfer Global Bukit Kototabang. Kegiatan mitigasi untuk mengimbangi laju kenaikan konsentrasi CO₂ karena tingginya aktifitas warga berkebun, bisa dilakukan dengan penanaman tanaman tahunan(berkayu) di antara tanaman kebun sehingga akan menaikkan potensi penyerapan CO₂ dan kerapatan vegetasi bisa terjaga menjadikan vegetasi juga semakin rapat.

Dari sample data yang digunakan pada penelitian ini didapatkan bahwa perubahan luasan nilai LST sejalan dan cukup berkesesuaian dengan perubahan indek kenyamanan THI H-5 dari waktu pengambilan data citra Landsat 8. Namun demikian perlunya penggunaan data yang lebih panjang pada beberapa kondisi cuaca dan iklim mengingat LST merupakan representasi data citra satelit untuk suhu permukaan tanah dan THI merupakan keadaan atmosfer dari parameter cuaca yang kompleks sehingga diharapkan akan mendapatkan hasil hubungan LST dan THI ini menjadi lebih jelas.

DAFTAR PUSTAKA

- Al Mukmin, S., A. Wijaya, A. P., & Sukmono, A. (2016). Analisis pengaruh perubahan tutupan lahan terhadap distribusi suhu permukaan dan keterkaitannya dengan fenomena urban heat island. *Jurnal Geodesi Undip*, 5(1), 224–233.
- Andani, N.D., Sasmito, B., & Hani'ah. (2018). Kenyamanan termal (temperature humidity index) di kota Semarang. *Jurnal Geodesi Undip*, 7(3), 53–65.
- Andini, S.W., Prasetyo, Y., & Sukmono, A. (2018). Analisis sebaran vegetasi dengan citra satelit sentinel menggunakan metode ndvi dan segmentasi. *Jurnal Geodesi Undip*, 7(1), 14–24.
- Assidiq, H. F. (2018). Analisis dinamika suhu permukaan berbasis spasio temporal di kabupaten Klaten.

- Publikasi Ilmiah, Fakultas Geografi. Surakarta: Universitas Muhammadiyah.
- Balas, D. B., Tiwari, M. K., Trivedi, M., & Patel, G. R. (2023). Impact of land surface temperature (lst) and ground air temperature (tair) on land use land cover (lulc): an investigative study. *international Journal of Environment and Climate Change*, 13(10), 3117–3130.
<https://doi.org/10.9734/ijecc/2023/v13i102980>
- Budiyanto, E. (2014). Evaluasi Laju Desertifikasi Batuan Pada Bentang Lahan Karst Gunungsewu melalui Penginderaan Jauh. *Prosiding Pertemuan Ilmiah Tahunan (PIT). Ikatan Geografi Indonesia*
- Divia, F., Fajrin, Armi, I., Fikri, S., & Arini, D. (2023). Analisis perbandingan suhu permukaan di kota Padang dan kota Pekanbaru menggunakan citra Landsat. *Jurnal Teknik, Komputer, Agroteknologi Dan Sains*, 2(1), 47–55. <https://doi.org/10.56248/Marostek.V2i1.85>
- Dyatmika, H.S. (2015). Deteksi awan dalam citra SPOT-5(Cloud detection in SPOT-5 image). *Majalah Sains dan Teknologi Dirgantara*, 10(1), 13–22.
- Elachi, C., & Zyl, J.V. (2006). *Introduction to the physics and techniques of remote sensing (2nd)*. New Jersey: John Wiley & Sons.
- Fahmi, N., Tjahjono, B., & Rusdiana, O. (2023). Dampak perubahan tutupan lahan terhadap daya dukung air studi kasus di kota Bogor dan kabupaten Bogor (the impact of land cover change on water carrying capacity case study in Bogor city & Bogor regency). *Globè*, 25(2), 121–130.
- Fadhli, R., Sugianto, S., & Syakur, S. (2021). Analisis perubahan penutupan lahan dan potensi karbon di taman hutan raya pocut meurah intan, aceh indonesia. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 19(2), 450–458.
<https://doi.org/10.14710/jil.19.2.450-458>
- Fawzi, N. I., & Husna, V. N. (2021). *Landsat 8-Sebuah Teori dan Teknik Pemrosesan Tingkat Dasar*. Bengkulu: El Markazi.
- Gunawan., & Ananda, F. (2017). Aspek kenyamanan termal ruang belajar gedung sekolah menengah umum di wilayah kec. Mandau. *Jurnal Inovtek Polbeng*, 7(2), 98–103.
- Gusmiarti, N.I., Prasetyo, Y., & Bashit, N. (2022). Analisis korelasi land surface temperature (lst) dengan penerapan pembatasan kegiatan masyarakat (pkm) (studi kasus: kawasan sentra pengasapan ikan, bandarharjo, Semarang). *Jurnal Geodesi Dan Geomatika*, 5(2). 61–68.
- Harahap, W. N., Yuniasih, B., & Gunawan, S. (2023). Dampak la nina 2021-2022 terhadap peningkatan curah hujan. *AGROISTA: Jurnal Agroteknologi*, 7(1), 26–32.
<https://doi.org/10.55180/agi.v7i1.364>
- Hardiyani, I.A., & Zulistyawan, K. A. (2023). Identifikasi konsentrasi CO, CO₂, NO₂, SO₂, dan PM₁₀ yang terukur di stasiun GAW Bukit Kototabang selama mudik lebaran tahun 2019-2023. *Megasains*, 14(2), 39–47.
- Insan, A. F.N., & Prasetya, F.A.S. (2021). Sebaran land surface temperature dan indeks vegetasi di wilayah kota Semarang pada bulan Oktober 2019. *Buletin Poltanesa*, 22(1), 45–52.
<https://doi.org/10.51967/Tanasa.V22i1.471>
- Janah, G.S., & Biorestia, F. (2023). Pemantauan land surface temperature (LST) dan kaitannya dengan tutupan lahan (studi kasus: kota Surabaya tahun 2014-2022). *Jurnal Teknik ITS*, 12(2), 119–124.

- Sulistiyono, A., Sudiar, N. Y., Jonuarti, R., dan Sari, M. B. (2025). Analisis Dampak Perubahan Tingkat Vegetasi dan Estimasi Land Surface Temperature Terhadap Kenyamanan dan Konsentrasi CO₂ di Kototabang. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 23(3), 867-878. doi:10.14710/jil.23.3.867-878
- Kurniawati, F. U. (2021). Dampak perubahan penggunaan lahan terhadap besaran stok karbon di kota Surabaya. *Jurnal Penataan Ruang*, 16(1), 54-58.
- Maria, M., Najib, N. N., & Anugrah, A. (2022). Kenyamanan termal dan visual ruang terbuka hijau (RTH) di kota Palopo. *EnviroScientee*, 18(1), 158-167.
- Miles, N. L., Richardson, S. J., Davis, K. J., Lauvaux, T., Andrews, A. E., West, T. O., Bandaru, V., & Crosson, E. R. (2012). Large amplitude spatial and temporal gradients in atmospheric boundary layer CO₂ mole fractions detected with a tower-based network in the U.S. upper Midwest. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 117(1). <https://doi.org/10.1029/2011JG001781>
- Morsy, S., & Hadi, M. (2022). Impact of land use/land cover on land surface temperature and its relationship with spectral indices in Dakahlia Governorate, Egypt. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 7(3), 272-282. <https://doi.org/10.26833/ijeg.978961>
- Muslim, S. (2021). Analisis Anomali Suhu dan Kerapatan Vegetasi Berdasarkan Citra Satelit Landsat 8 untuk Pemetaan Potensi Panas Bumi di Wilayah Kerja Panas Bumi Rantau Dedap Provinsi Sumatera Selatan. Skripsi, Fakultas Teknik. Palembang: Universitas Sriwijaya.
- Ningrum, W., & Narulita, I. (2018). Deteksi perubahan suhu permukaan menggunakan data satelit Landsat multi-waktu. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 19(2), 145-154.
- Nugroho, S., Febriamansyah, R., Ekaputra, E.G., & Gunawan, D. (2019). Analisis iklim ekstrim untuk deteksi perubahan iklim di Sumatera Barat. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 17(1), 7-14. <https://doi.org/10.14710/jil.17.1.7-14>
- Pramitha, A. F., Andri, A. N. A., & Bahar, S. (2023). Analisis hubungan perubahan penggunaan lahan (land use) terhadap perubahan land surface temperature (lst) di kota tangerang selatan tahun 2011-2021. *Buletin Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika*, 3(5), 10-21.
- Pratama, F.E., Irwan, S. N. R., & Rogomulyo, R. (2021). Fungsi vegetasi sebagai pengendali iklim mikro dan pereduksi suara di tiga taman kota DKI Jakarta. *Vegetalika*, 10(3), 214-222. <https://doi.org/10.22146/Veg.39112>
- Pujiastuti, D. (2010). Analisis efek karbon dioksida (CO₂) terhadap kenaikan temperatur di bukit kototabang tahun 2005-2009. *Jurnal Ilmu Fisika*, 2(2), 56-67.
- Putra, G. F. (2021). Studi evaluasi tingkat paparan panas lingkungan kerja terhadap pekerja di PT. X berdasarkan iso 7243:2017 (studi kasus: divisi tempa dan Cor I). Skripsi, Jurusan Teknik Lingkungan. Bandung: Institut Teknologi Nasional.
- Putrajaya, I. K., & Martayana, I. P. H. M. (2021). The Relationship between availability of green space and comfort index based on remote sensing data analysis. *ICLSSE 2021: Proceedings of the 3rd International Conference on Law, Social Sciences, and Education*, ICLSSE 2021, 09 September 2021, Singaraja, Bali, Indonesia (p.259). European Alliance for Innovation. <https://doi.org/10.4108/Eai.9-9-2021.2313640>
- Rizaini, M. A. (2023). Analisis kenyamanan thermal di ruang kuliah fakultas tarbiyah dan keguruan UIN Raden Intan Lampung. Skripsi, Fakultas Tarbiyah dan Keguruan. Lampung: Universitas Islam Negeri Raden Intan.
- Sari, C. P., Wiryanto, & Setyono, P. (2019). A remote sensing study of vegetation cover on the Surakarta urban Area 2017 using sentinel 2a image. *Jurnal Pengelolaan Sumberdaya Alam Dan Lingkungan*, 9(1), 152-158. <https://doi.org/10.29244/jpsl.9.1.152-158>
- Saito, H., Manago, N., Kuriyama, K., & Kuze, H. (2015). Near-infrared open-path measurement of CO₂ concentration in the urban atmosphere. *Optics Letters*, 40(11), 2568-2571. <https://doi.org/10.1364/ol.40.002568>
- Sasmito, B., & Suprayogi, A. (2017). Model kekritisian indeks lingkungan dengan algoritma urban heat island di kota Semarang (model of environmental criticality index with urban heat island algorithm in Semarang city). *Majalah Ilmiah Globè*, 19(1), 45-52. <http://Glovis.USGS.Gov/>
- Sudiar, N. Y. (2020). Kenyamanan Klimatologis Kawasan Wisata Alam Di Indonesia. Disertasi, Sekolah Pasca Sarjana. Bogor: Institut Pertanian Bogor.
- Ziliwu, M. S. (2018). Analisis pengolahan citra data landsat dengan metode optimum indeks faktor dan removal. Tesis, Fakultas Ilmu Komputer dan Teknologi Informasi. Medan: Universitas Sumatera Utara.