

Dinamika Tutupan Lahan dan Respons Termal Arsitektur Lingkungan di Kota Pesisir Tropis Parigi Moutong

*Iwan Setiawan Basri¹, Mega Wulandari¹, Yan Radhinal¹, Abdul Gani Akhmad¹, Rosmiaty Arifin²

¹Perencanaan Wilayah dan Kota, Universitas Tadulako, Palu, Indonesia;

²Arsitektur, Universitas Tadulako, Palu, Indonesia

Email: iwan.setiawan@untad.ac.id

*Penulis korespondensi, Masuk: 26 Okt. 2025, Direvisi: 17 Jan. 2026, Diterima: 15 Mar. 2026

ABSTRAK: Parigi mengalami tekanan termal perkotaan. Penelitian ini bertujuan menganalisis hubungan perubahan tutupan lahan, kerapatan vegetasi, intensitas keterbangunan, dan suhu permukaan lahan di Kota Parigi sebagai kota pesisir tropis kecil. Metode yang digunakan adalah analisis citra Landsat 8 OLI/TIRS tahun 2014 dan 2021 melalui Google Earth Engine. Klasifikasi tutupan lahan dilakukan dengan algoritma *Supervised Random Forest*, sedangkan NDVI, NDBI, dan LST dihitung untuk membaca perubahan vegetasi, permukaan terbangun, dan respons termal. Analisis statistik dilakukan melalui korelasi Pearson, regresi linier berganda, serta analisis delta berbasis sampel spasial hasil *thinning* 150 m. Hasil penelitian menunjukkan bahwa permukiman meningkat 12,18%, area terbangun berbasis NDBI bertambah 2,77 km², vegetasi tinggi menurun 7,43%, dan rata-rata LST naik 2,57°C. Kenaikan suhu terutama terkonsentrasi di inti kota dan koridor pesisir. NDVI berasosiasi negatif dengan LST, sedangkan NDBI berasosiasi positif dengan peningkatan suhu permukaan. Kesimpulannya, intensifikasi permukaan keras dan penurunan vegetasi memperkuat tekanan panas permukaan di Parigi. Implikasinya, perencanaan kota pesisir tropis perlu mengintegrasikan strategi adaptif skala bangunan dan kawasan melalui vegetasi, koridor hijau-biru, material reflektif, ventilasi alami, serta instrumen RDTR, RTBL, dan perizinan bangunan.

Kata kunci: tutupan lahan; NDVI; NDBI; LST; arsitektur tropis adaptif

ABSTRACT: Parigi is experiencing urban thermal pressure. This study aims to analyze the relationship between land cover change, vegetation density, built-up intensity, and land surface temperature in Parigi as a small tropical coastal city. Landsat 8 OLI/TIRS images from 2014 and 2021 were processed using Google Earth Engine. Land cover classification was performed using a *Supervised Random Forest* algorithm, while NDVI, NDBI, and LST were calculated to identify changes in vegetation, built-up surfaces, and thermal response. Statistical analysis was conducted using Pearson correlation, multiple linear regression, and delta analysis based on spatially thinned samples at 150 m intervals. The results show that settlement areas increased by 12.18%, NDBI-based built-up areas expanded by 2.77 km², high-density vegetation decreased by 7.43%, and mean LST rose by 2.57°C. The highest temperature increases were concentrated in the urban core and coastal corridor. NDVI was negatively associated with LST, whereas NDBI was positively associated with surface temperature increase. The study concludes that the intensification of impervious surfaces and the decline of vegetation have strengthened surface heat pressure in Parigi. These findings imply that tropical coastal urban planning should integrate adaptive strategies at building and district scales through vegetation, green-blue corridors, reflective materials, natural ventilation, and regulatory instruments such as detailed spatial plans, urban design guidelines, and building permits.

Keywords: land cover change; NDVI; NDBI; LST; adaptive tropical architecture

1. PENDAHULUAN

Kota adalah sistem sosial, ekologis dan teknis yang terus berubah. Keseimbangan ruang terbangun dan ruang alami membentuk morfologi dan fungsi kota yang mana dalam perspektif morfologi ekologi perkotaan, menentukan kapasitas lingkungan perkotaan mempengaruhi tekanan ekologis. Dalam kerangka ini, morfologi, material, vegetasi, dan orientasi ruang menjadi unsur penting yang mempengaruhi kinerja termal lingkungan binaan [1].

Suhu Permukaan Tanah (LST) digunakan untuk membaca kinerja tersebut diatas. Perubahan tutupan lahan, terutama konversi vegetasi menjadi kawasan terbangun, diikuti kenaikan suhu permukaan dan tekanan panas perkotaan [2]. Di Bangkok, intensitas suhu naik dari 4,40°C pada 2000 menjadi 5,76°C pada 2020 ketika 71,97% lahan pertanian berubah menjadi kawasan terbangun, dengan kenaikan suhu rata-rata 6,20°C [3].

Gejala serupa tampak di Indonesia. Area terbangun di Jabodetabek, Surabaya, Bandung, dan Medan hampir dua kali lipat pada 1990–2014, dari 0,46% menjadi 0,75% [4]. Di kota menengah seperti Pekalongan dan Batang, sekitar ±30.000 hektar lahan non perkotaan telah berubah menjadi kawasan permukiman [5]. Berbanding terbalik kota kecil pesisir tropis belum banyak mendapat perhatian pada kajian sejenis yang memiliki karakter termal khas. Interaksi perubahan tutupan lahan, struktur ruang, dan iklim pesisir membuat dinamika panas permukaan tidak selalu mengikuti pola kota besar.

Parigi sebagai kota pesisir kecil, yang juga merupakan ibu kota Kabupaten Parigi Moutong, terletak di pesisir utara Sulawesi Tengah, layak dikaji. Jumlah penduduknya turun dari 32.052 jiwa pada 2014 menjadi 31.273 jiwa pada 2022 atau sekitar -2,43% [6][7], tetapi konversi lahan tetap berlangsung. Studi mencatat perubahan lahan sebesar 91,73 hektar atau 4,4% dari total 2.083 hektar [8]. Karakter Parigi sebagai kota tropis pesisir menambah kompleksitas karena tekanan keterbangunan dan penurunan vegetasi dapat mengganggu koridor angin laut–darat serta menghasilkan respons termal yang tidak linier [9].

Penelitian ini menanyakan sejauh mana intensifikasi lahan terbangun dan degradasi vegetasi mempengaruhi fluktuasi LST di kota pesisir kecil. Hipotesisnya, perluasan kawasan terbangun dan penyusutan vegetasi di Kota Parigi meningkatkan suhu permukaan dan mengubah klasifikasi kenyamanan termal. Penelitian ini menganalisis hubungan spasial

NDVI, NDBI, dan LST pada 2014–2021. Kebaruan utamanya ialah pemanfaatan temuan perubahan kelas termal untuk merumuskan strategi adaptif arsitektur tropis pada skala bangunan dan kawasan. Luaran ini diharapkan memperkuat dasar penataan ruang melalui RDTR, RTBL, serta regulasi perizinan bangunan.

2. METODE PENELITIAN

2.1. Pengumpulan dan Pemrosesan Data

Penelitian ini menggunakan citra *Landsat-8 OLI/TIRS Collection 2* untuk analisis 2014 dan 2021. Tutupan lahan diekstraksi dari *Level-2 Surface Reflectance*, sedangkan LST dari TIRS Band 10 *Level-1*. Data *Level-1* dipilih untuk menjaga radiansi asli sebelum koreksi atmosferik dan emisi manual di *Google Earth Engine*. NDVI dan NDBI dihitung dari reflektansi, sedangkan LST diestimasi dengan algoritma *single-channel* melalui konversi *Digital Number (DN)* ke TOA (*Top of Atmosphere Radiance*, ekstraksi *Brightness Temperature*, estimasi emisivitas (ϵ) dari fraksi vegetasi (F_v) berbasis NDVI, serta koreksi suhu menjadi Celsius terhadap ambang kenyamanan termal [10][11].

2.2. Unit analisis

Pada tahapan pemodelan statistik, NDVI dan NDBI difungsikan sebagai variabel bebas untuk memprediksi LST. Guna memperkuat validitas inferensial, diterapkan teknik *spatial thinning* melalui *sub-sampling* sistematis berjarak 150 m (satu sampel per blok 150x150 m). Prosedur ini secara rinci dilakukan untuk meminimalkan auto korelasi spasial, dimana kelayakan sebaran sampelnya diuji secara empiris menggunakan *Moran's I* sebelum masuk ke tahap regresi.

2.3. Klasifikasi Tutupan Lahan

Klasifikasi penutup lahan mengacu pada SNI 7645:2010 [12]: Permukiman, Sawah, Tanaman Campuran, Perkebunan Kelapa, Ladang, Lahan Terbuka, Hutan Bakau, dan Perairan. *Supervised Random Forest (SRF)* dijalankan dengan $n_{tree} = 500$, $m_{try} = \sqrt{p}$, tanpa batas kedalaman, *seed* tetap, dan galat *out-of-bag (OOB)*.

Seluruh *raster* diselaraskan ke *grid* AOI 30 m, perairan tetapa dipetakan, dikeluarkan dari analisis NDVI–NDBI–LST. Data latih berisi 250 titik terstratifikasi, uji eksternal 50 titik *stratified systematic random sampling*, sedangkan 100 titik hanya untuk rencana survei. Titik uji dipisahkan dengan *buffer* ≥ 150 m. Akurasi diukur *confusion matrix* memakai

OA/ κ /UA/PA/F1-score, interval kepercayaan 95% dihitung binomial Wilson, sensitivitas diuji *bootstrap* 1.000 kali, dan kelas bersampel kecil ditafsirkan hati-hati.

2.4. Teknik Analisis

Pra-kondisi data dilakukan melalui harmonisasi dan registrasi raster pada grid 30 m, dilanjutkan masking (QA_PIXEL/CFMask) dan eksklusi area perairan dari komputasi indeks dan LST. Perubahan tutupan lahan dihitung dari luas tiap kelas pada peta SRF dalam km² dan persentase. NDVI dan NDBI dihitung dari piksel valid dengan ambang seragam untuk 2014 dan 2021; NDBI diperlakukan sebagai indikator spektral keterbangunan.

LST dihitung dari TIRS Band 10 dengan metode *single channel* melalui koreksi radiasi, suhu kecerahan, dan emisivitas; zonasi kenyamanan mengacu pada SNI. Normalisasi temporal dilakukan dengan menghitung selisih (Δ NDVI, Δ NDBI, Δ LST) per grid 30 m antara 2014 dan 2021. Analisis inferensial menggunakan sampel thinning 150 m yang divalidasi dengan uji Moran's I.

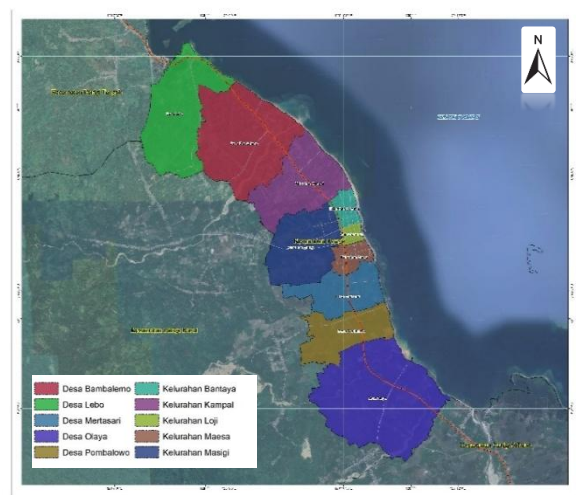
Hubungan antar variabel dianalisis dengan korelasi Pearson dan regresi linier berganda (LST ~ NDVI + NDBI) untuk 2014, 2021, dan model delta. Keandalan model diuji melalui normalitas residu, VIF, dan Moran's I. Akurasi klasifikasi dievaluasi menggunakan OA, kappa, UA, PA, F1-score, dan *confusion matrix*,

dengan mempertimbangkan keterbatasan kelas bersampel minimum. Temuan disintesis menjadi strategi desain adaptif arsitektur tropis pada skala bangunan dan kawasan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian dilakukan di Parigi (Kecamatan Parigi), Kabupaten Parigi Moutong, Sulawesi Tengah, pada koordinat 0°48'49" LS dan 120°10'39" BT. Kegiatan penelitian dilaksanakan pada Agustus–Oktober 2023, bertepatan dengan masa transisi ke musim hujan.



Gambar 1. Lokasi Penelitian

Tabel 1. Confusion Matrix Klasifikasi Tutupan Lahan

Kelas referensi	Per-mukiman	Sawah	Perkebunan Kelapa	Ladang	Lahan Terbuka	Perairan	Hutan Bakau	Jumlah
Permukiman	16	0	1	0	1	0	0	18
Sawah	0	10	0	0	0	0	0	10
Tanaman Campuran	0	0	0	1	0	0	0	8
Perkebunan Kelapa	0	0	7	0	0	0	0	7
Ladang	0	0	0	3	0	0	0	3
Lahan Terbuka	1	0	0	0	1	0	0	2
Perairan	0	0	0	0	0	1	0	1
Hutan Bakau	0	0	0	0	0	0	1	1
Jml. prediksi	17	10	8	4	2	1	1	50

Sumber: Hasil Observasi, 2023

Tabel 2. Nilai UA (User's Accuracy), PA (Producer's Accuracy), dan F1-Score per Kelas

Kelas	UA (%)	PA (%)
Permukiman	94,12	88,89
Sawah	100	100
Tanaman Campuran	100	87,5
Perkebunan Kelapa	87,5	100

Kelas	UA (%)	PA (%)
Ladang	75	100
Lahan Terbuka	50	50
Perairan	100	100
Hutan Bakau	100	100

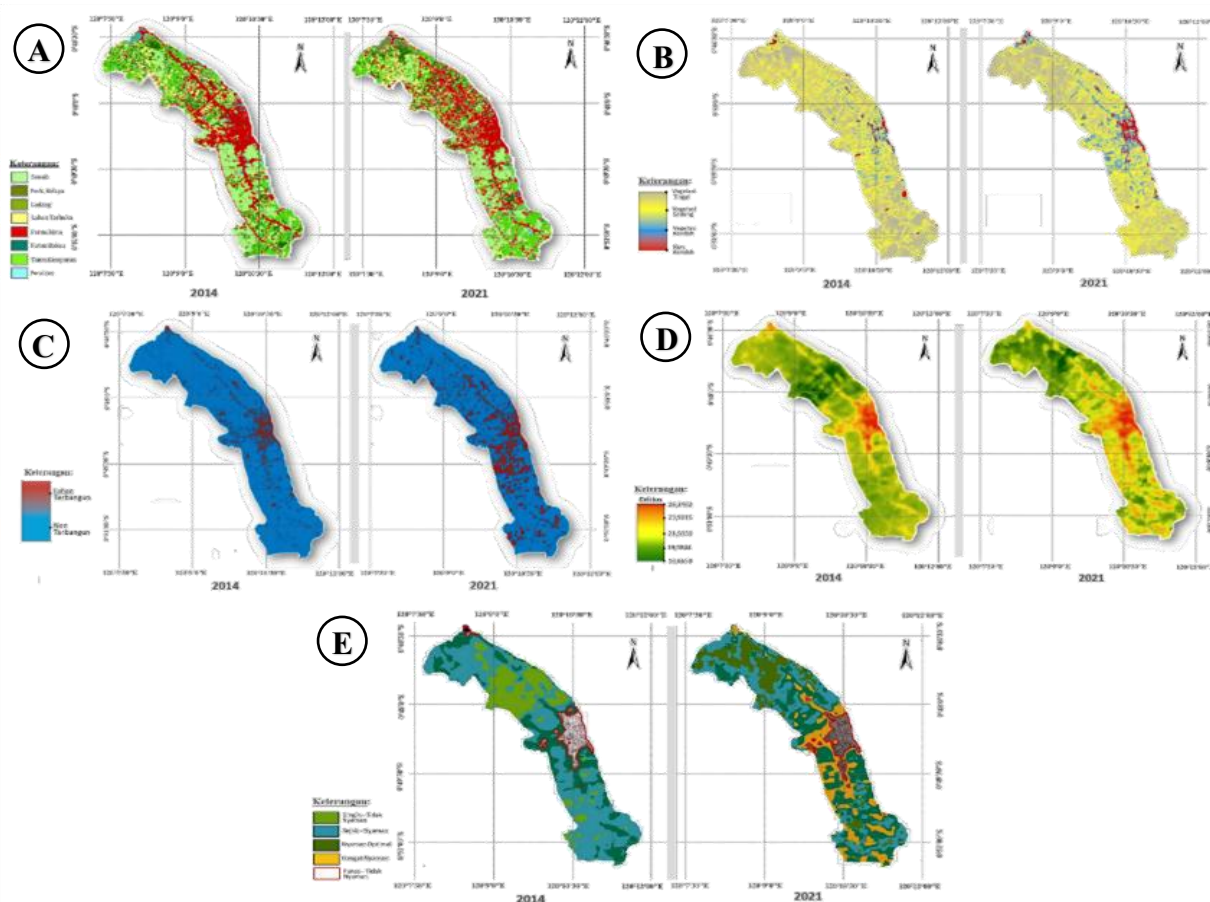
- Keterangan: UA = Akurasi Pengguna, PA = Akurasi Produser.
- Nilai pada kelas sampel dengan uji sangat kecil perlu diolah secara hati-hati.

3.2. Perubahan Tutupan Lahan

Berdasarkan klasifikasi *Supervised Random Forest* (SRF) terverifikasi pada Sub pembahasan 3.1 dan mengacu pada SNI 7645:2010 [12], tutupan lahan Parigi (20,92 km²) pada 2014–2021 menunjukkan alih fungsi vegetasi ke kawasan terbangun. Permukiman menjadi perubahan paling menonjol (+0,61 km² atau +12,18%) dari koridor pesisir ke pusat kota, diiringi penyusutan Perkebunan Kelapa (−0,53 km²), Perairan

(−0,27 km²), Tanaman Campuran (−0,19 km²), Lahan Terbuka (−0,18 km²), dan Sawah (−0,04 km²).

Penurunan perairan mengindikasikan abrasi dan sedimentasi pesisir. Meski Ladang (+0,25 km²) dan Hutan Bakau (+0,35 km²) meningkat, kenaikan ini belum menutup penyusutan vegetasi daratan. Perubahan tersebut menjadi dasar pembacaan NDVI, NDBI, dan LST pada Tabel 3 dan Gambar 2a.



Gambar 2. Analisis Spasial Kota Parigi (2014–2021). (a) Peta Tutupan Lahan; (b) Peta Distribusi NDVI; (c) Peta Distribusi NDBI; (d) Peta Distribusi LST; (e) Peta LST.

Sumber: Hasil Analisis, 2023

Tabel 3. Perubahan Tutupan Lahan 2014–2021

Jenis Tutupan Lahan	2014 (km ²)	2014 (%)	2021 (km ²)	2021 (%)	Δ Luas (km ²)	Δ (%)	T/N
Sawah	4,23	20,22	4,19	20,03	-0,04	-0,95	T
Perkebunan Kelapa	4,06	19,41	3,53	16,87	-0,53	-13,05	T
Ladang	3,21	15,34	3,46	16,54	0,25	7,79	N
Lahan Terbuka	0,63	3,01	0,45	2,15	-0,18	-28,57	T
Permukiman	5,01	23,95	5,62	26,86	0,61	12,18	N
Hutan Bakau	0,51	2,44	0,86	4,11	0,35	68,63	N
Tanaman Campuran	2,54	12,14	2,35	11,23	-0,19	-7,48	T
Perairan	0,73	3,49	0,46	2,2	-0,27	-36,99	T
Jumlah	20,92	100	20,92	100	—	—	—

▪ Keterangan: T = Menurun; N = Meningkatkan; Δ = Perubahan. Perairan dipertahankan pada peta tutupan lahan, dan dikeluarkan dari komputasi NDVI, NDBI, dan LST.

Sumber: Hasil analisis, 2023

3.3. Distribusi NDVI (2014-2021)

Berdasarkan komputasi NDVI pada grid 30 m, dengan mencapai kelas perairan untuk mengurangi *piksel campuran*, analisis tahun 2014–2021 (Tabel 4, Gambar 2b) menunjukkan penyusutan nyata vegetasi tinggi di pusat kota dan koridor pesisir. Perubahan ini mengikuti transisi tutupan lahan yang semakin terbuka

dan terfragmentasi, ditandai dengan meluasnya vegetasi berada di wilayah *peri-urban* serta munculnya vegetasi rendah pada zona penciptaan baru. Pola spasial tersebut menegaskan bahwa perluasan kawasan telah berdampak langsung pada degradasi dominasi vegetasi di wilayah studi.

Tabel 4. Perubahan Luas Kelas NDVI Tahun 2014 dan 2021

Kelas NDVI	2014 (km ²)	2014 (%)	2021 (%)	Δ (km ²)	Δ (%)	T/N
Non-vegetasi	2,23	10,67	10,98	0,06	0,33	N
Vegetasi rendah	3,9	18,66	20,4	0,36	1,76	N
Vegetasi sedang	5,64	26,95	32,31	1,12	5,34	N
Vegetasi tinggi	9,15	43,72	36,31	-1,55	-7,43	T
Jumlah	20,92	100	100	—	—	—

Keterangan: T= Menurun, N= Meningkatkan, Δ = Selisih

Sumber: Hasil Analisis, 2023

3.4. Distribusi NDBI (2014-2021)

Komputasi NDBI pada grid 30 m dengan *masking QA_PIXEL* dan pengecualian area perairan menunjukkan kenaikan dari 0,16 pada 2014 menjadi 0,33 pada 2021, disertai perluasan area terbangun 2,77 km², dari 6,53 km² menjadi 9,30 km². Secara spasial (Tabel 5, Gambar 2c), intensifikasi perkerasan terkonsentrasi di pusat kota dan koridor pesisir utara,

sejalan dengan penyusutan vegetasi rapat. Luasan ini melampaui penambahan kelas Permukiman (+0,61 km²), sebab NDBI merekam permukaan keras, seperti jalan, pelataran, dan bangunan non hunian. Temuan ini menegaskan bahwa intensifikasi di Parigi tidak hanya dipicu hunian, tetapi juga oleh meluasnya perkerasan non permukiman.

Tabel 5. Perubahan Luas Kelas NDBI Tahun 2014 dan 2021

Kelas NDBI	NDBI 2014*	NDBI 2021*	2014 (%)	2021 (km ²)	2021 (%)	Δ Area (km ²)	Δ (%)	T/N
Lahan terbangun	0,16	0,33	31,21	9,3	44,46	2,77	13,24	N

Kelas NDBI	NDBI 2014*	NDBI 2021*	2014 (%)	2021 (km ²)	2021 (%)	Δ Area (km ²)	Δ (%)	T/N
Non-terbangun	-0,51	-0,66	68,79	11,62	55,54	-2,77	-13,24	T
Jumlah	—	—	100	20,92	100	—	—	—

Keterangan: * Rata-rata, T= Menurun, N= Meningkatkan, Δ = Perubahan (selisih), NDBI bersifat spektral dan tidak identik dengan kelas SNI

Sumber: Hasil Analisis, 2024

3.5. Perubahan Distribusi LST (2014-2021)

LST dihitung dengan metode *single-channel* pada citra TIRS Band 10 *Level-1* yang telah teregistrasi (*grid* 30 m, interpolasi *bilinear*), menggunakan *masking* QA_PIXEL dan mengecualikan area perairan. Analisis (Tabel 6, Gambar 2d) berbasis sampel inferensial hasil

thinning dan ambang kelas kenyamanan termal yang konsisten antar tahun menunjukkan kenaikan suhu permukaan rata-rata 2,57°C, dari 20,16°C pada 2014 menjadi 22,73°C pada 2021. Kenaikan paling menonjol terjadi di inti kota dan koridor pesisir yang berimpit dengan perluasan keterbanguan.

Tabel. 6 Ringkasan Perubahan LST

Komponen	2014	2021	Δ
Rata-rata LST (°C)	20,16	22,73	2,57
Zona dingin–tidak nyaman (<22,8°C), % AOI	47,52	14,89	-32,63 pp
Zona dingin–tidak nyaman, luas (km ²)	9,94	3,11	-6,83

Keterangan:

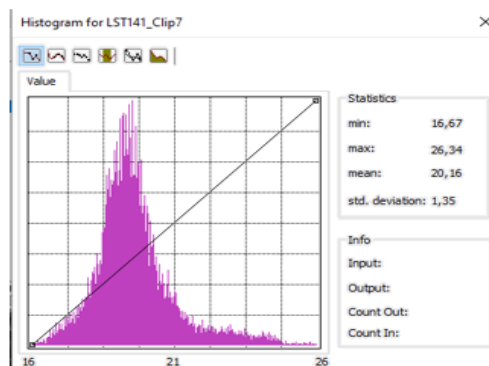
Δ = Perubahan (selisih), *pp* (*poin persentase*) laju perubahan relatif

Sumber: Hasil Analisis, 2024

Gambar 2e dan Gambar 3 memperlihatkan pergeseran komposisi kelas serta histogram LST ke kondisi lebih hangat. *Masking*, registrasi *grid*, dan penguncian ambang kelas membantu menekan artefak metodologis, sehingga pola termal skala 30 m dapat dibaca sebagai perubahan nyata yang selaras dengan kenaikan NDBI dan penyusutan vegetasi rapat. Mengacu pada SNI T-14-1993-037 dalam Hisyam [14], zona nyaman–optimal (22,8–25,8°C) menyusut, sedangkan kelas hangat–nyaman (25,8–27,2°C) dan panas–tidak nyaman (>27,2°C) meluas. Zona dingin–tidak nyaman (<22,8°C) turun dari 47,52% menjadi

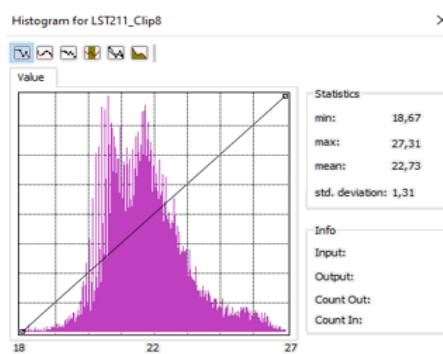
14,89% AOI, atau berkurang 6,83 km² dari total 20,92 km². Pergeseran histogram 18–26°C ke 20–27°C menegaskan kenaikan suhu. Temuan ini lebih tepat dibaca sebagai perubahan pola termal permukaan berbasis LST, bukan klaim *urban heat island*.

Kenaikan LST di pesisir dan inti kota menuntut RTH, vegetasi peneduh jalan, material perkerasan reflektif, dan pengelolaan sempadan pesisir; dalam perspektif *ecological urban morphology*, lemahnya integrasi bangunan, jaringan hijau, dan sirkulasi udara dapat meningkatkan retensi panas permukaan.



Gambar 3. Histogram LST 2014

Sumber: Hasil Analisis, 2023



Gambar 4. Histogram LST 2021

Sumber: Hasil Analisis, 2023

3.6. Korelasi NDVI, NDBI Dan Dampak Terhadap LST

3.6.1. Tahun 2014

Analisis statistik menggunakan 100 sampel inferensial hasil *thinning* berjarak minimum 150 m (*grid* 30 m termasuk QA_PIXEL, tanpa area perairan) menunjukkan korelasi Pearson signifikan ($p < 0,05$).

Ekspansi area terbangun berkaitan dengan degradasi vegetasi dan kenaikan suhu permukaan, tercermin dari korelasi sangat negatif NDVI–NDBI ($r = -0,876$),

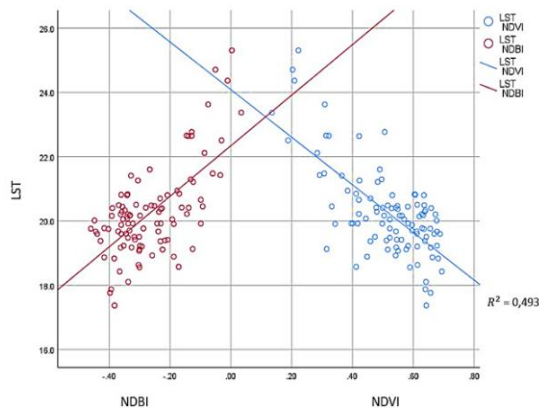
korelasi negatif kuat NDVI–LST ($r = -0,695$), dan korelasi positif sedang NDBI–LST ($r = 0,656$). Model regresi 2014, $LST = 23,758 - 5,540 (NDVI) + 0,394 (NDBI)$, menjelaskan 49,3% variasi suhu permukaan ($R^2 = 0,493$): kenaikan 0,1 NDVI menurunkan suhu $0,55^\circ C$, sedangkan kenaikan 0,1 NDBI menaikkan suhu $0,04^\circ C$. Kolinearitas menengah dengan *Variance Inflation Factor* (VIF) sekitar 4,30 belum cukup kuat mengubah arah koefisien regresi (Gambar 4).

Tabel. 7 Korelasi Product Moment Pearson NDVI, NDBI dan LST 2014

Variabel	NDVI	NDBI	LST
NDVI_2014	1	-0,876**	-0,695**
NDBI_2014	-0,876**	1	0,656**
LST_2014	-0,695**	0,656**	1

Keterangan: ** Korelasi signifikan pada $\alpha = 0,05$ (2-tailed); $N = 100$.

Sumber: Hasil Analisis, 2023



Gambar 5. Scatter Plot Regresi Linear Berganda Tahun 2014

Sumber: Hasil Analisis, 2024

Secara umum, pada 2014 vegetasi berasosiasi lebih kuat dengan penurunan LST daripada keterbangunan. Karena model hanya menjelaskan separuh variasi suhu, material, geometri ruang, dan cuaca lokal masih mungkin berperan. Secara spasial, area ber-NDVI tinggi cenderung menahan panas, sedangkan area ber-NDBI tinggi menjadi sumber pemanasan di pusat kota dan pesisir. Pola ini sejalan dengan studi lain yang menempatkan vegetasi sebagai elemen penting mitigasi panas permukaan [16].

3.6.2. Tahun 2021

Prosedur yang identik seperti 2014, analisis 2021 ($N = 100$) menunjukkan bahwa ekspansi keterbangunan

berasosiasi signifikan ($p < 0,05$) dengan penyusutan vegetasi dan kenaikan suhu permukaan, tercermin pada korelasi NDVI–NDBI ($r = -0,909$), NDVI–LST ($r = -0,637$), dan NDBI–LST ($r = 0,576$). Model regresi menghasilkan persamaan:

$$LST = 25,509 - 0,101(NDVI) - 0,173(NDBI)$$

menjelaskan 40,6% variasi suhu permukaan ($R^2 = 0,406$). Koefisien negatif NDBI bukan indikasi fisik bahwa material terbangun menurunkan suhu, melainkan anomali statistik akibat *multikolinearitas* tinggi (VIF 5,76), karena itu, dampak pemanasan kawasan binaan lebih tepat dibaca dari korelasi positif bivariatnya (Gambar 6).

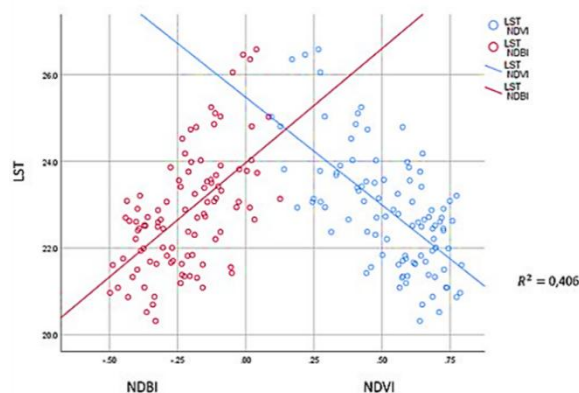
Tabel. 8 Korelasi Product Moment Pearson NDVI, NDBI dan LST 2021

Variabel	NDVI 2021	NDBI 2021	LST 2021
NDVI_2021	1	-0,909**	-0,637**
NDBI_2021	-0,909**	1	0,576**
LST_2021	-0,637**	0,576**	1

Keterangan: ** Korelasi signifikan pada $\alpha = 0,05$ (2-tailed); N = 100. Sumber: Hasil Analisis, 2023

Secara umum, pola 2021 sejalan dengan 2014, vegetasi berkaitan dengan penurunan LST, sedangkan keterbanguan dengan kenaikan panas permukaan. Karena kolinearitas lebih kuat, model multivariat perlu ditafsirkan hati-hati. Secara substantif, arah hubungan antar variabel tetap konsisten dengan temuan studi

sebelumnya, yakni vegetasi cenderung meredam panas permukaan, keterbanguan cenderung memperkuat [15], dan menegaskan urgensi mitigasi termal di kawasan padat pesisir dan pusat kota melalui peningkatan kanopi, koridor hijau, serta material dan permukaan yang lebih adaptif termal.

**Gambar 6. Scatter Plot Regresi Linear Berganda Tahun 2021**

Sumber: Hasil Analisis, 2023

3.7. Analisis Delta Tahun (Δ 2014–2021)

Analisis delta memakai prosedur yang sama dengan sub pembahasan sebelumnya, yakni sampel hasil *thinning* ≥ 150 m pada *grid* 30 m yang telah terko-registrasi. NDVI dan NDBI dihitung pada piksel valid setelah *QA_PIXEL/CFMask*, sedangkan perairan dikeluarkan dari komputasi indeks. Korelasi antar perubahan menunjukkan bahwa Δ NDVI dan Δ NDBI berhubungan sangat negatif ($r = -0,802$), Δ NDVI dan Δ LST negatif lemah ($r = -0,202$), sedangkan Δ NDBI dan Δ LST positif lemah ($r = 0,270$), dan seluruhnya signifikan.

Model regresi linier berganda menghasilkan persamaan:

$$\Delta LST = 2,449 + 0,314 \cdot \Delta NDVI + 2,341 \cdot \Delta NDBI \quad R^2 = 0,073$$

Tabel. 9 Delta NDVI, Delta NDBI dan Delta LST (2014–2021)

Variabel	Δ NDVI	Δ DBI	Δ LST
Δ NDVI	1	-0.802**	-0.202*

Variabel	Δ NDVI	Δ DBI	Δ LST
Δ NDBI	-0.802**	0.000	0.043
	0.000	1	0.270**
Δ LST	-0.202*	0.270**	1
	0.043	0.007	

Keterangan: * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; $N = 100$. Δ = Perubahan
 Sumber: Hasil Analisis, 2024.

Vegetasi NDVI turun dari 18,69 km² menjadi 18,63 km² (-0,06 km²), sedangkan luas terbangun NDBI naik dari 6,53 km² menjadi 9,30 km² (+2,77 km²) dan LST rata-rata dari 20,16°C menjadi 22,73°C (+2,57°C). Penurunan vegetasi dan kenaikan keterbangunan

memperkuat respons termal permukaan. Selisih kenaikan permukiman terklasifikasi (+0,61 km² pada sub pembahasan 3.3) dan luas terbangun NDBI (+2,77 km²) menunjukkan intensifikasi permukaan keras yang melampaui kelas permukiman.

Tabel. 10 Perubahan Luas NDVI, NDBI dan Rata-rata LST

Variabel	2014 (km ²)	2014 (%)	2021 (km ²)	2021 (%)	Δ (km ²)	Δ (%)	T/N
Vegetasi (NDVI rendah+sedang+tinggi)	18,69	89,36	18,63	89,08	-0,06	-0,28 pp	T
Lahan terbangun (NDBI)	6,53	31,21	9,3	44,46	2,77	+13,24 pp	N
LST (\bar{x} , °C)	20,16	—	22,73	—	2,57	—	N

Keterangan: T= Menurun, N= Meningkatkan, \bar{x} = rata-rata , AOI = 20,92 km².
 Sumber: Hasil Analisis, 2023

Secara keseluruhan, analisis delta menunjukkan bahwa perubahan tutupan lahan di Parigi berkaitan dengan peningkatan tekanan panas permukaan, tetapi hubungan pada level piksel tidak sepenuhnya kuat, sebagaimana tercermin dari nilai R² yang rendah. Karena itu, hasil delta lebih tepat dibaca sebagai penguat kecenderungan, bukan dasar klaim kausal yang terlalu jauh.

Hasil tahun 2021 selaras dengan pola 2014, vegetasi berasosiasi dengan penurunan LST, sedangkan keterbangunan berasosiasi dengan kenaikan panas permukaan. Secara substantif, arah hubungan antar variabel tetap konsisten dengan temuan studi sebelumnya, yakni vegetasi cenderung meredam panas permukaan, Sementara itu, peningkatan keterbangunan cenderung mengintensifkan fenomena tersebut [15], sehingga menegaskan pentingnya upaya mitigasi termal di kawasan pesisir terbangun dan pusat kota melalui penambahan kanopi vegetasi, penguatan koridor hijau, serta penerapan material dan permukaan yang adaptif.

3.8. Strategi Perencanaan Arsitektur (Kota) Tropis Adaptif

3.8.1. Paradoks Termal terhadap Perubahan Tutupan Lahan: Implikasi bagi Arsitektur (Kota) Parigi (2014–2021)

Paradoks termal Parigi tampak saat vegetasi menurun secara bersamaan dengan kenaikan keterbangunan dan LST 2,57°C pada tahun 2014 ke 2021. Tekanan termal melemahkan bagian dalam kota dan koridor pesisir, seiring meningkatnya keterbangunan dan melemahnya dominasi vegetasi.

Korelasi antar perubahan memperkuat pola tersebut, yakni ΔNDVI–ΔNDBI sebesar -0,802, ΔNDVI–ΔLST sebesar -0,202, dan ΔNDBI–ΔLST sebesar 0,270. Artinya, peningkatan keterbangunan, meskipun tidak selalu besar secara luas, tetap dapat diikuti peningkatan respons termal permukaan.

Perspektif *ecological urban morphology* bahwa pola *hotspot* seperti ini menunjukkan konfigurasi kawasan, keterbatasan ruang terbuka, dan melemahnya konektivitas vegetasi memperluas retensi panas permukaan. Kesimpulan ini perlu diterjemahkan ke dalam kendali arsitektur dan tata ruang operasional. Karena rasio H/W dan *Sky View Factor* (SVF) tidak

diukur secara langsung, keduanya dibaca sebagai realitas konseptual, bukan hasil empiris. Oleh karena itu, *hotspot* pusat kota dan koridor pesisir menjadi prioritas intervensi kawasan dan bangunan.

Tabel. 1 Implikasi Terhadap Arsitektur Lingkungan Binaan (Kota) Tropis Pesisir Parigi

Fokus	Skala	Implikasi
Lokasi prioritas	Meso: kawasan (kota)	<i>Hotspot</i> LST dan NDBI di inti kota dan koridor pesisir menandakan perlunya struktur ruang yang responsif terhadap iklim pesisir. Prioritas pada kawasan dengan vegetasi menurun, kepadatan meningkat, dan konektivitas ruang terbuka melemah.
Kendali operasional	Mikro: bangunan	Blok bangunan padat di pusat kota–pesisir memerlukan pengendalian panas pada skala tapak dan bangunan melalui pengurangan serapan panas, peningkatan ventilasi alami, peneduhan fasad, dan integrasi elemen hijau. Strategi ini diprioritaskan pada bangunan di zona LST dan NDBI tinggi.

Sumber: Hasil Analisis, 2023

3.8.2. Strategi Adaptif Penerapan Prinsip Arsitektur Tropis Skala Bangunan

Intervensi skala bangunan diarahkan pada *hotspot* LST dan NDBI di koridor pesisir dan inti kota, terutama pada blok padat dengan vegetasi menurun dan permukaan keras dominan. Strategi bangunan diturunkan langsung dari pola spasial teridentifikasi, bukan rekomendasi umum. Sasaran utamanya adalah rumah beratap seng, bangunan berpaparan radiasi tinggi, dan bangunan umum di kawasan padat yang rentan terhadap akumulasi panas serta keterbatasan ventilasi alami.

Pendekatan ini menekan pengendalian serapan panas, ventilasi silang, dan peningkatan *evapotranspirasi* melalui sistem pasif. Literatur

menunjukkan bahwa *atap sejuk*, *atap hijau*, *ventilasi loteng*, dan peneduhan fasad efektif menurunkan suhu ruang dan beban panas bangunan [16], [17], [18], [19]. Di Parigi, strategi tersebut sesuai dengan karakter *hotspot* pusat kota dan pesisir, keterbatasan tinggi, vegetasi terbatas, dan tekanan termal meningkat.

Intervensi adaptif difokuskan pada bangunan di *hotspot* termal dengan acuan Tabel 12 dan temuan spasial NDVI–NDBI–LST 2014–2021. Strategi ini yang diusulkan bersifat indikatif sehingga perlu mengintegrasikan data *in-situ* (*hotspot* empiris), simulasi *unit building* evaluasi performa tiap *hotspot*.

Pendekatan ini dapat menjadi dasar ilmiah RTBL dan acuan perizinan bangunan yang lebih operasional seperti Peraturan Bangunan Setempat (PBS)/Peraturan Bangunan Gedung (PBG).

Tabel. 2 Strategi Adaptif Penerapan Prinsip Arsitektur Tropis Skala Bangunan

Elemen	Prinsip Strategi	Arahan	Target*	Relevansi untuk Parigi
Atap reflektif (<i>cool roof</i>)	Meningkatkan <i>albedo</i> dan mengurangi serapan panas	Penggunaan cat atap dengan <i>reflectance</i> $\geq 0,80$	ΔT ruang $\approx 5-12^{\circ}\text{C}$; hemat energi $\approx 30-55\%$	Relevan untuk rumah dan bangunan di koridor pesisir dengan paparan radiasi tinggi
<i>Green roof</i>	Menambah massa hijau, meningkatkan <i>evapotranspirasi</i> , dan menahan panas	Penerapan sistem ekstensif, media tipis, dan spesies lokal	Reduksi aliran panas $\approx 60-90\%$; ΔT permukaan $\approx 6-13^{\circ}\text{C}$	Sesuai untuk bangunan publik atau blok padat yang minim ruang hijau

Elemen	Prinsip Strategi	Arahan	Target*	Relevansi untuk Parigi
Attic ventilation pada rongga atap	Membuang udara panas dari rongga atap	Penyediaan bukaan seimbang <i>intake-exhaust</i>	ΔT ruang $\approx 0,5-1,5^{\circ}\text{C}$; beban puncak menurun	Relevan untuk bangunan beratap seng di pusat kota dan pesisir
Ventilasi silang alami pada ruang hunian	Meningkatkan kecepatan udara di dalam ruang	Penerapan denah tipis, bukaan berhadapan, dan jalur alir tanpa hambatan	Kecepatan udara $0,3-0,6$ m/s; beban pendinginan turun $\approx 10-20\%$	Penting untuk zona permukiman padat dengan ventilasi alami terbatas
Peneduh fasad barat-timur	Mengurangi radiasi langsung pada dinding dan bukaan	Penggunaan <i>overstek</i> dan/atau kisi peneduh	Reduksi panas matahari pada bukaan barat $\approx 60-80\%$; beban pendinginan turun $\approx 9-15\%$	Relevan untuk bangunan yang menghadap laut atau koridor jalan terbuka
Vegetasi lokal pelindung	Memberikan peneduhan dan meningkatkan <i>evapotranspirasi</i>	Penanaman pohon kanopi dan penggunaan permukaan berpori di sekitar bangunan	ΔT permukaan area teduh turun $\approx 10-25^{\circ}\text{C}$; ΔT udara lokal $\approx 0,5-2^{\circ}\text{C}$	Penting untuk perumahan adaptif dan pemulihan kenyamanan termal mikro

* merupakan parameter adaptif, bersifat indikatif, bukan batas tetap.
 Sumber: Hasil Analisis, 2024, diadaptasi/disesuaikan dari [17], [18], [19]



Gambar 7. Ilustrasi Intervensi Skala Bangunan
 Sumber: Hasil Analisis. Gambar dibuat mesin ilustrator, 2023

3.8.3. Strategi Adaptif Penerapan Prinsip Arsitektur Tropis Skala Kawasan (Kota)

Perspektif *ecological urban morphology* bahwa kota dipahami sebagai sistem ekologis yang dibentuk oleh struktur ruang, jaringan hijau, sirkulasi udara, dan material permukaan [20]. Di kawasan pesisir, terputusnya koridor laut-darat melemahkan ventilasi alami dan memerangkap panas.

Di Parigi, strategi skala kawasan disusun dengan memprioritaskan *hotspot* termal di inti kota dan koridor pesisir yang mengalami kenaikan LST, peningkatan NDBI, penurunan vegetasi rapat, dan bertambahnya permukiman. Tekanan termal ini dipengaruhi kepadatan terbangun, keterbatasan ruang terbuka, dan melemahnya konektivitas vegetasi. Karena itu, intervensi diprioritaskan pada pusat kota, koridor pesisir, ruas jalan utama, pasar, lapangan, dan ruang publik keras minim naungan.

Strategi kawasan diarahkan untuk memulihkan konektivitas hijau–biru, memperkuat ventilasi pesisir–pusat kota, mengendalikan kepadatan dan orientasi massa bangunan, serta memperbaiki kualitas termal

permukaan. *Reflective pavement* ber-*albedo* tinggi terbukti menurunkan suhu permukaan 5–20°C [22], tetapi pengaruhnya pada suhu udara terbatas dan menimbulkan *trade-off* radiasi bagi pejalan kaki, sehingga perlu dipadukan dengan penanaman vegetasi. Fragmentasi vegetasi juga berdampak ganda, karena itu, konfigurasi kanopi perlu mengikuti morfologi setempat [21]. Mitigasi Parigi menuntut restrukturisasi ruang melalui koridor hijau–biru, pengaturan rasio kanyon dan orientasi bangunan, serta peningkatan *albedo* dan permeabilitas permukaan.

Di pusat kota, intervensi difokuskan pada pengendalian kepadatan, ruang terbuka, dan kanopi jalan, di pesisir pada perlindungan koridor angin, sempadan hijau, dan pembatasan permukaan keras. Kantong panas ruang publik berperkerasan ditangani melalui vegetasi peneduh, material reflektif, dan elemen air. Pendekatan ini memberi dasar operasional bagi RDTR, RTBL, dan acuan perizinan bangunan yang lebih operasional (PBS/PBG) agar pengendalian panas permukaan serta pemulihan kenyamanan termal dapat dijalankan terarah.

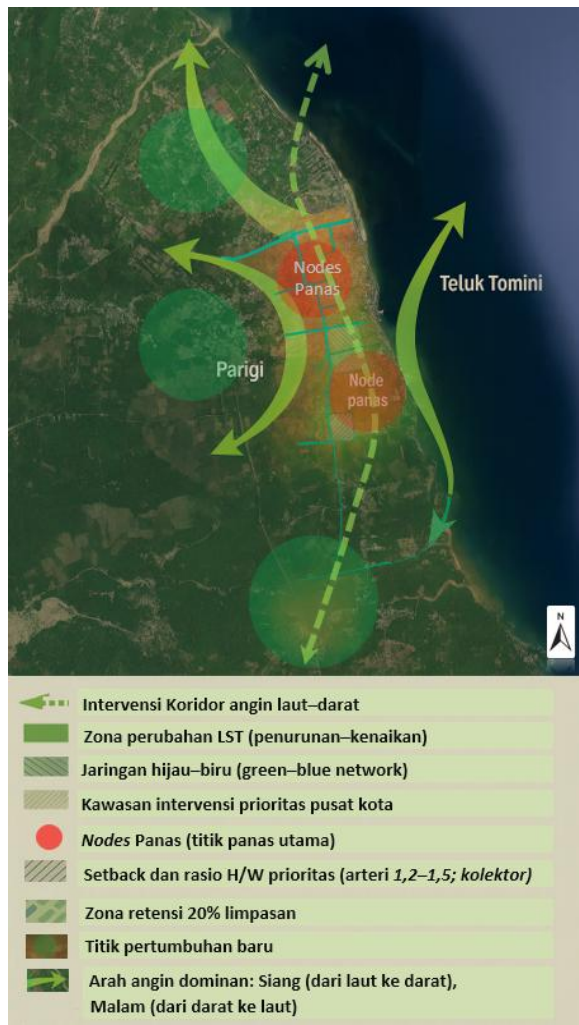
Tabel. 3 Strategi Adaptif Penerapan Prinsip Arsitektur Tropis Skala Kawasan (Kota)

Elemen	Prinsip Strategi	Arahan	Target*	Relevansi untuk Parigi
Regulasi	Mengutamakan adaptasi iklim dalam rencana dan perizinan	Memasukkan norma adaptif-termal ke dalam RDTR, RTBL, dan perizinan bangunan	RTH kota $\geq 30\%$	Penting untuk mengendalikan pertumbuhan kawasan panas di pusat kota dan pesisir
Struktur ruang kota	Menata kawasan berdasarkan keseimbangan ekologis	Menjadikan ruang hijau–biru sebagai elemen struktural dan menghubungkannya dengan titik pertumbuhan baru kota	RTH publik $> 20\%$; 1–2 koridor angin dari pesisir menuju pusat kota	Relevan untuk memulihkan ventilasi alami pada koridor pusat kota–pesisir
Kepadatan dan bentuk bangunan	Menyesuaikan rasio H/W dan orientasi massa terhadap arah angin	Mengatur jarak, ketinggian, dan orientasi massa bangunan pada kawasan padat	Rasio kanyon jalan H/W: arteri 1,2–1,5; kolektor 1,6–2,0; 60–70% segmen sejajar koridor angin	Relevan untuk ruas jalan utama dan blok padat yang menunjukkan LST tinggi

Elemen	Prinsip Strategi	Arahan	Target*	Relevansi untuk Parigi
Konektivitas hijau–biru	Mengintegrasikan taman, jalur hijau, dan drainase ekologis	Membentuk jalur ventilasi alami pesisir–pusat melalui koridor hijau dan elemen air	Lebar koridor 20–60 m	Penting untuk menghubungkan pesisir, sungai, dan pusat kota yang terfragmentasi
Vegetasi dan kanopi jalan	Meningkatkan penauangan pada zona panas	Menambah jejaring kanopi pada trotoar, taman, dan ruang publik	Naungan 60–80% pada siang puncak; jarak tanam 6–8 m	Diprioritaskan pada pasar, alun-alun, dan koridor jalan tanpa naungan
Permukaan terbangun dan perkerasan	Meningkatkan albedo dan permeabilitas	Mengganti perkerasan keras dengan material reflektif dan berpori serta menambah penauangan	Albedo 0,35–0,50; target penurunan suhu permukaan 5–15°C	Relevan untuk kanion jalan, pelataran pasar, alun-alun, dan ruang publik terbuka
Tata air dan drainase ekologis	Memperkuat elemen biru untuk mendukung pendinginan lokal	Menyediakan kolam retensi, kanal hijau, dan <i>bioswale</i>	Retensi 20–30% limpasan; penurunan suhu permukaan 2–4°C	Sesuai untuk kawasan pesisir dan titik drainase yang sering meluap
Titik panas (<i>hotspot urban</i>)	Menambah elemen hijau pada lokasi prioritas	Menyediakan pohon peneduh, ruang publik vegetatif, dan elemen air	Penurunan suhu lokasi 3–5°C; RH naik 10–15% pada siang puncak	Difokuskan pada inti kota, pasar, lapangan, dan koridor pesisir yang minim vegetasi

* merupakan parameter adaptif, bersifat indikatif, bukan batas tetap.

Sumber: Hasil Analisis, 2023



Gambar 8. Ilustrasi Intervensi Skala Kawasan (Kota)

Sumber: Hasil Analisis. Gambar dibuat mesin ilustrator, 2023

4. KETERBATASAN PENELITIAN

Penelitian ini memiliki sejumlah batasan. Resolusi spasial Landsat-8 30 m berpotensi menimbulkan piksel campuran di pesisir, blok terbangun padat, dan zona transisi tutupan lahan, sehingga memengaruhi pembacaan NDVI, NDBI, dan LST. Estimasi LST juga berbasis citra satelit dan belum divalidasi melalui pengukuran suhu *in-situ* saat citra diperoleh.

Secara temporal, analisis hanya membandingkan 2014 dan 2021, sehingga belum menangkap variasi musiman dan dinamika termal jangka pendek. Karena itu, hasilnya lebih tepat dibaca sebagai perbandingan dua titik observasi, bukan deret waktu tahunan. Meski *thinning* diterapkan untuk mengurangi auto korelasi spasial, jumlah sampel terbatas tetap dapat memengaruhi inferensi.

Model ini bersifat asosiatif; hubungan NDVI, NDBI, dan LST konsisten, tetapi belum cukup menjelaskan kausalitas. Variabel morfologi tiga dimensi—rasio H/W, *Sky View Factor* (SVF), *albedo*, dan porositas juga belum diukur langsung, sehingga strategi arsitektur yang diusulkan masih indikatif. Penelitian lanjutan perlu mengintegrasikan data *in-situ* (*hotspot* empiris), simulasi *unit building*, *site*, citra beresolusi lebih tinggi, serta pemodelan tiga dimensi *multi-sensor*, disertai pengukuran mikroklimat atau evaluasi performa tiap *hotspot*.

5. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa dinamika tutupan lahan di Kota Parigi (2014–2021) yang berkontribusi langsung terhadap penguatan respon termal permukaan. Temuan utama menunjukkan perluasan ekspansi sebesar 12,18% (+0,61 km²) yang berlangsung seiring dengan intensifikasi kawasan terbangun berbasis spektral NDBI sebesar 2,77 km², sementara rapatannya menyusut sebesar 7,43%.

Perubahan tersebut diikuti oleh kenaikan rata-rata suhu permukaan (LST) sebesar 2,57°C, disertai berkurangnya zona dingin tidak nyaman (<22,8°C) hingga 6,83 km². Hasil ini menegaskan bahwa pertumbuhan fisik kawasan yang tidak diimbangi oleh keberadaan vegetasi memperkuat akumulasi panas di lingkungan perkotaan.

Secara statistik, analisis menunjukkan pola yang konsisten: NDVI berasosiasi negatif kuat terhadap LST, sedangkan NDBI berasosiasi positif terhadap peningkatan panas permukaan. Secara spasial, konsentrasi kenaikan suhu tertinggi (*hotspot*) teridentifikasi di inti kota dan koridor pesisir, sehingga kedua kawasan tersebut menjadi prioritas intervensi adaptif.

Pengendalian panas perlu diarahkan pada *hotspot* pusat kota dan koridor pesisir melalui intervensi skala bangunan, seperti optimasi ventilasi dan *pendingin atap*, serta intervensi skala kawasan melalui koridor hijau-biru dan perlindungan jalur angin pesisir. Dengan demikian, hasil penelitian ini dapat menjadi dasar penting bagi penyempurnaan instrumen RDTR, RTBL, dan perizinan bangunan (PBS/PBG) dalam mewujudkan kota pesisir yang tangguh terhadap perubahan iklim lokal.

Pada penelitian lanjutan, perlu observasi data *in-situ* (*hotspot* empiris), simulasi unit bangunan dan tapak, citra beresolusi lebih tinggi, serta pemodelan *multi-sensor*.

REFERENCES

- [1] E. Palazzo, "Bridging urban morphology and urban ecology: A framework to identify morpho-ecological periods and patterns in the urban ecosystem," *J. Urban Ecol.*, vol. 8, no. 1, pp. 1–15, 2022. Available: <https://doi.org/10.1093/jue/juac007>
- [2] M. R. Emmanuel, *An Urban Approach to Climate-Sensitive Design Strategies for the Tropics*. New York, NY, USA: Spon Press, 2005. Available: <https://www.routledge.com/An-Urban-Approach-To-Climate-Sensitive-Design-Strategies-for-the-Tropics/Emmanuel/p/book/9780415334105>
- [3] L. Pan, L. Lu, P. Fu, V. Nitivattananon, H. Guo, and Q. Li, "Understanding spatiotemporal evolution of the surface urban heat island in the Bangkok metropolitan region from 2000 to 2020 using enhanced land surface temperature," *Geomatics, Nat. Hazards Risk*, vol. 14, no. 1, 2023. Available: <https://doi.org/10.1080/19475705.2023.2174904>
- [4] A. Civelli, A. Gaduh, A. Rothenberg, and Y. Wang, "Urban sprawl and social capital: Evidence from Indonesian cities," *SSRN Electron. J.*, 2021. Available: <https://doi.org/10.2139/ssrn.4117095>
- [5] E. Fatimah and A. C. Anwar, "Determination of urban sprawl phenomenon in Pekalongan City and its surrounding," *J. Pengemb. Kota*, vol. 11, no. 1, pp. 49–57, 2023. Available: <https://doi.org/10.14710/jpk.11.1.49-57>
- [6] BPS Kabupaten Parigi Moutong, *Kabupaten Parigi Moutong Dalam Angka Tahun 2015*. Parigi Moutong, Indonesia: BPS Kabupaten Parigi Moutong, 2015.
- [7] BPS Kabupaten Parigi Moutong, *Kabupaten Parigi Moutong Dalam Angka Tahun 2023*. Parigi Moutong, Indonesia: BPS Kabupaten Parigi Moutong, 2023.
- [8] M. S. Danish, A. G. Akhmad, Rusli, and Rizkhi, "Perubahan penggunaan lahan di Kecamatan Parigi Kabupaten Parigi Moutong," *J. PeWeKaTadulako J. Urban Reg. Plan. Tadulako*, vol. 1, pp. 24–33, 2022. Available: <https://doi.org/10.22487/jpwkt.v1i1.3>
- [9] A. F. Feldman, D. J. Short Gianotti, J. Dong, I. F. Trigo, G. D. Salvucci, and D. Entekhabi, "Tropical surface temperature response to vegetation cover changes and the role of drylands," *Glob. Chang. Biol.*, vol. 29, no. 1, pp. 110–125, 2022. Available: <https://doi.org/10.1111/gcb.16455>
- [10] N. Gorelick, M. Hancher, M. Dixon, S. Ilyushchenko, D. Thau, and R. Moore, "Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone," *Remote Sens. Environ.*, vol. 202, pp. 18–27, 2017. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- [11] U.S. Geological Survey, *Landsat 8 Data Users Handbook*. Reston, VA, USA: U.S. Geological Survey, 2019. Available: <https://landsat.usgs.gov/documents/Landsat8DataUsersHandbook.pdf>
- [12] Badan Standardisasi Nasional, *SNI 7645:2010 Klasifikasi Penutup Lahan*. Jakarta, Indonesia: Badan Standardisasi Nasional, 2010.
- [13] M. Belgiu and L. Drăguț, "Random forest in remote sensing: A review of applications and future directions," *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, vol. 114, pp. 24–31, 2016. Available: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.01.011>
- [14] W. N. A. Hisyam, "Evaluasi pencahayaan alami dan kenyamanan termal," *Semin. Ilm. Arsit.*, vol. 5, no. 2, 2024. Available: <https://proceedings.ums.ac.id/siar/article/view/4237/3888>
- [15] A. W. Hasyim, B. M. Sukojo, I. A. Anggraini, E. R. Fatahillah, and A. Isdianto, "Urban heat island effect and sustainable planning: Analysis of land surface temperature and vegetation in Malang City," *Int. J. Sustain. Dev. Plan.*, vol. 20, no. 2, pp. 683–697, 2025. Available: <https://doi.org/10.18280/ijstdp.200218>
- [16] R. Bulbaai and J. I. M. Halman, "Energy-efficient building design for a tropical climate: A field study on the Caribbean island Curaçao," *Sustainability*, vol. 13, no. 23, pp. 1–13, 2021. Available: <https://doi.org/10.3390/su132313274>
- [17] J. Park and S. Lee, "Effects of a cool roof system on the mitigation of building temperature: Empirical evidence from a field experiment," *Sustainability*, vol. 14, no. 8, 2022. Available: <https://doi.org/10.3390/su14084843>
- [18] A. Budhiyanto and A. C. Tampubolon, "A comparative study of cool roof and green roof performance in tropical area of Indonesia," *J. Archit. Res. Des. Stud.*, vol. 9, no. 1, pp. 1–10, 2025. Available: <https://doi.org/10.20885/jars.vol9.iss1.art1>
- [19] J. I. Kindangen and O. H. A. Rogi, "The role of attic ventilation to reduce indoor air temperature in zinc-roofed buildings in a humid tropical climate," in *Proc. Atlantis Press*, 2019, pp. 14–18.
- [20] D. Rizzi and S. Utkarsh, *Green Corridors in Stuttgart: Nature-Based Solutions for Air Quality Improvement, Water Quality Improvement, Biodiversity, and Education*, 2020. Available: <https://www.regreen-project.eu/wp-content/uploads/GREEN-CORRIDORS-IN-STUTTGART.pdf>

- [21] J. Amani, R. Tanzadeh, F. Moghadas Nejad, and M. M. Kabiri Nasrabad, "Urban sustainability through pavement technologies: Reducing urban heat islands with cool pavements," *Buildings*, vol. 15, no. 3, p. 504, 2025. Available: <https://doi.org/10.3390/buildings15030504>
- [22] X. Zhao *et al.*, "Assessing the cooling effects of urban parks and their potential influencing factors: Perspectives on maximum impact and accumulation effects," *Sustainability*, vol. 17, no. 15, pp. 1–22, 2025. Available: <https://doi.org/10.3390/su17157015>



© 2026 by the authors. Licensee LINEARS, Indonesia. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC ND) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>).