Hulonthalo Journal of Civil and Architecture (HJCA)
Vol. 2, No. 1, June 2026, pp. 27-40
ISSN: 2302-9285, DOI: 10.11591/hjca.v2i1.1048

Pemantauan Suhu Permukaan Tanah Real Time Berbasis IoT dan Data Penginderaan Jauh untuk Mitigasi Iklim di Kota Gorontalo

Arthur Gani Koto[1], Muhammad Tauhid[2]
[1]Geografi, Universitas Muhammadiyah Gorontalo, Indonesia
[2]Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Gorontalo, Indonesia

Article Info

Article history:

Received Mei 23, 2026
Revised april 15, 2026
Accepted Juni 26, 2026

Keywords:

Suhu permukaan tanah
Real time
IoT
Penginderaan jauh
Iklim

ABSTRACT

Penelitian ini dilatarbelakangi oleh fenomena pemanasan global dan efek *Urban Heat Island* (UHI) di wilayah perkotaan, khususnya di Kota Gorontalo yang sedang mengalami urbanisasi yang pesat. Pemantauan suhu permukaan tanah atau *Land Surface Temperature* (LST) sangat penting untuk mitigasi perubahan iklim, namun metode berbasis stasiun cuaca konvensional maupun satelit memiliki keterbatasan resolusi spasial dan temporal. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sistem pemantauan suhu secara *real-time* dengan mengintegrasikan sensor *Internet of Things* (IoT) dan data penginderaan jauh menggunakan citra Landsat 8 dan 9. Metode penelitian melibatkan instalasi 11 titik termometer IoT yang didistribusikan secara proporsional pada kawasan permukiman, perkantoran, dan pertokoan di wilayah Kota Gorontalo. Pengambilan data lapangan diselaraskan dengan waktu perekaman citra satelit setiap 16 hari selama periode Maret hingga Mei 2026, yang selanjutnya diproses menggunakan algoritma *Random Forest* pada platform Google Earth Engine (GEE). Hasil penelitian menunjukkan adanya korelasi negatif antara suhu dan kelembaban, serta mengonfirmasi bahwa suhu permukaan tertinggi terkonsentrasi pada lahan terbangun yang minim vegetasi. Analisis komparatif mengungkapkan bahwa interpretasi suhu dari citra Landsat umumnya lebih tinggi sekitar 5–10°C dibandingkan pengukuran termometer IoT, hal ini wajar karena satelit mengukur suhu permukaan objek bumi sedangkan sensor IoT mengukur suhu udara. Walaupun begitu, perbandingan data historis menunjukkan tingkat kehijauan (NDVI) dan suhu rata-rata Kota Gorontalo tidak mengalami perubahan signifikan sejak tahun 1995. Sistem integrasi ini diharapkan dapat menjadi model pemantauan dan mitigasi iklim mikro perkotaan secara berkelanjutan.

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

Corresponding Author:

Arthur Gani Koto
Geografi
Universitas Muhammadiyah Gorontalo
Jln. Prof. Mansoer Pateda Kec. Telaga Biru Kab. Gorontalo, Gorontalo, Indonesia
Email: arthur@umgo.ac.id

1. INTRODUCTION

Pemanasan global sangat terlihat di daerah perkotaan, dimana *Urban Heat Island* (UHI) memperkuat efek pemanasan. Memahami perubahan LST sangat penting dalam mitigasi dan adaptasi terhadap efek UHI, sehingga dapat mengatasi tantangan pemanasan global [1]. Perubahan iklim global telah berdampak pada kawasan perkotaan di seluruh dunia, yang terasa pula pada wilayah tropis seperti Indonesia [2]. Urbanisasi merupakan salah satu faktor yang mengubah lahan bervegetasi seperti hutan, padang rumput, dan lahan pertanian, menjadi area terbangun dan tidak permeabel (beton, aspal), yang menyerap dan menahan lebih banyak panas. Urbanisasi yang cepat telah menyebabkan perubahan luas pada tutupan lahan, terutama konversi area bervegetasi menjadi zona terbangun [3].

Dua faktor paling kritis yang mempengaruhi intensitas UHI yaitu jenis penggunaan lahan dan tutupan vegetasi [4]. Tutupan vegetasi memberikan pendinginan melalui evapotranspirasi, namun jika berkurang maka akan meningkatkan suhu permukaan yang secara langsung memperkuat efek UHI [4][5][6]. Penelitian menunjukkan bahwa Indonesia, sebagai negara Asia Tenggara di zona iklim tropis, menghadapi peningkatan durasi gelombang panas akibat perubahan iklim yang diperparah oleh masifnya urbanisasi sehingga tidak hanya diperlukan upaya mitigasi perubahan iklim tetapi juga solusi adaptasi terhadap kejadian cuaca ekstrem yang semakin sering terjadi [2].

Pemantauan LST merupakan indikator penting dalam pengelolaan sumber daya air, pertanian presisi, dan mitigasi perubahan iklim. Namun, metode tradisional berbasis stasiun cuaca konvensional seringkali memiliki keterbatasan dalam skala spasial dan temporal. Seiring berkembangnya IoT, penelitian terkini menunjukkan bahwa integrasi sensor cerdas dengan sistem komunikasi nirkabel mampu menghasilkan data suhu tanah secara *real-time*[7], terukur, dan adaptif terhadap kondisi lingkungan mikro.

Kota Gorontalo, sebagai salah satu kota berkembang di Indonesia, menghadapi tantangan dalam pengelolaan iklim perkotaan [8]. LST dan lahan terbangun yang semakin meningkat ([9][10][11] menjadi pertanda bahwa Kota Gorontalo telah mengalami UHI. Kota Gorontalo dengan pertumbuhan urbanisasi yang cukup pesat, memerlukan sistem pemantauan yang dapat memberikan data suhu *real-time* berbasis IoT untuk mendukung pengambilan keputusan dalam mitigasi dan adaptasi perubahan iklim. Sistem pemantauan LST *real-time* berbasis IoT yang terintegrasi dengan data penginderaan jauh dapat memberikan solusi komprehensif untuk memahami dinamika *thermal* perkotaan dan mendukung implementasi strategi mitigasi yang efektif. Pendekatan ini tidak hanya akan memberikan data yang kontinu dan akurat, namun dapat menjadi evaluasi efektivitas intervensi mitigasi seperti pengembangan ruang terbuka hijau. Urbanisasi di Kota Gorontalo menambah tekanan pada lahan pertanian, yang semakin terancam oleh kekeringan dan banjir [12].

Pemantauan yang akurat dan pemahaman terhadap lingkungan panas perkotaan sangat penting untuk pengembangan perkotaan yang berkelanjutan dan kesejahteraan manusia. Data LST yang akurat sangat penting karena berbagai proses seperti evapotranspirasi, perubahan iklim, siklus hidrologi, pemantauan vegetasi, dan studi iklim dan lingkungan perkotaan bergantung padanya. Perkembangan teknologi satelit penginderaan jauh khususnya yang memiliki *band thermal* (Landsat, ASTER, Sentinel-3, MODIS), dapat mengukur suhu permukaan di seluruh permukaan bumi dengan resolusi temporal yang cukup tinggi dan nilai rata-rata spasial yang lengkap dibandingkan nilai berbasis titik pengukuran darat.

Satelit penginderaan jauh *Sustainable Development Science Satellite* 1 (SDGSAT-1) memiliki *band Thermal Infrared Spectrometer* (TIS) dengan resolusi spasial 30m dan temporal 11 hari [13], dibanding Landsat (resolusi spasial 30m, temporal 16 hari). Namun

untuk memperoleh citra tersebut secara gratis, pengguna harus memasukkan proposal via https://www.sdgsat.ac.cn/, sementara Landsat bisa langsung diperoleh gratis.

Satelit MODIS (resolusi temporal 1 atau 2 hari) dan Sentinel-3 sensor SLSTR (resolusi temporal 2 hari) dapat mengumpulkan pengamatan harian, resolusi spasialnya relatif kasar (MODIS : 250m, 500m, 1.000m dan SLSTR : 500m, 1.000m) sehingga sulit menangkap fitur perkotaan yang detail, sementara Landsat memiliki resolusi spasial yang lebih baik namun periode kunjungan ulang yang lebih panjang sehingga tidak dapat memberikan pengamatan yang memadai. Untuk mengatasi keterbatasan ini, integrasi IoT dengan data penginderaan jauh menawarkan solusi yang menjanjikan. Sistem pemantauan berbasis IoT telah membawa revolusi dalam teknologi jaringan komunikasi global dan memiliki dampak signifikan dalam bidang pemantauan lingkungan, memungkinkan pengumpulan data yang kontinu dan *real-time* [14]. Pentingnya penelitian ini dilakukan di Kota Gorontalo juga didukung oleh kebutuhan akan sistem peringatan dini secara *real-time* berbasis IoT.

Pendekatan integratif ini bertujuan untuk mengatasi keterbatasan temporal data satelit (umumnya hanya tersedia setiap beberapa hari) dengan pengukuran suhu permukaan secara *real-time* (data setiap menit/jam) berbasis IoT.

Rumusan Permasalahan: 1) Bagaimana mengembangkan sistem pemantauan suhu permukaan tanah *real-time* berbasis *IoT* dan data penginderaan jauh untuk mitigasi iklim di Kota Gorontalo? 2) Apa kelebihan sistem terintegrasi ini dibandingkan metode konvensional berbasis citra satelit saja? 3) Bagaimana penerapan sistem tersebut dapat memberikan model mitigasi iklim mikro di Kota Gorontalo?

Pendekatan Pemecahan Masalah. Integrasi m*ulti-platform*: menggabungkan data suhu permukaan tanah *real-time* berbasis *IoT* dan citra Landsat.

Model data *fusion*: menggunakan *machine learning regression* (*random forest*) untuk kalibrasi silang LST antara data suhu permukaan *real-time* berbasis IoT dan citra Landsat.

Spatial analysis (GIS): untuk pemetaan spatiotemporal suhu permukaan.

Spasial machine learning (SML) : pemrosesan data LST menggunakan *platform Google Earth Engine* (GEE).

State-of-The-Art dan Kebaruan. Penelitian terkait LST selama kurun waktu 9 tahun terakhir (2016-2025) telah mengungkapkan permasalahan terkait metode estimasi LST. Beberapa penelitian yang disajikan pada Tabel 1, tren global menunjukkan kemajuan signifikan dalam penggunaan data penginderaan jauh dan *machine learning* (ML) untuk analisis suhu permukaan tanah. Namun, keterbatasan utama terletak pada:

1. Tidak adanya integrasi langsung antara sensor suhu berbasis IoT di lapangan dan data satelit penginderaan jauh [15][16].
2. Sebagian besar penelitian bersifat periodik (bulanan/tahunan), bukan *real-time* monitoring [9][17][18].
3. Fokus masih pada data LST bukan pada mitigasi iklim mikro di wilayah iklim tropis mikro seperti Gorontalo [17] [19].

2. METHOD

Penelitian ini akan dilaksanakan di Kota Gorontalo. Penelitian ini dimulai dari tahap studi literatur dan eksplorasi data penginderaan jauh. Studi literatur dimulai dengan mengakses artikel-artikel ilmiah dari OJS internasional bereputasi *Scopus* dari laman *Connected Papers, OpenRead, Scispace* dan *Consensus*. Sumber-sumber tersebut dipilih berdasarkan kredibilitas dan relevansinya terhadap topik penelitian. Hal ini dilakukan untuk mengidentifikasi pola dan tren yang relevan dengan topik penelitian. Eksplorasi data penginderaan jauh berupa citra Landsat di *platform* GEE untuk memastikan bahwa citra yang diperoleh mencakup wilayah kajian tersedia. LST diproses pada platform GEE

menggunakan algoritma RF mengikuti langkah [9]. RF dipilih karena akurasi klasifikasinya [22].

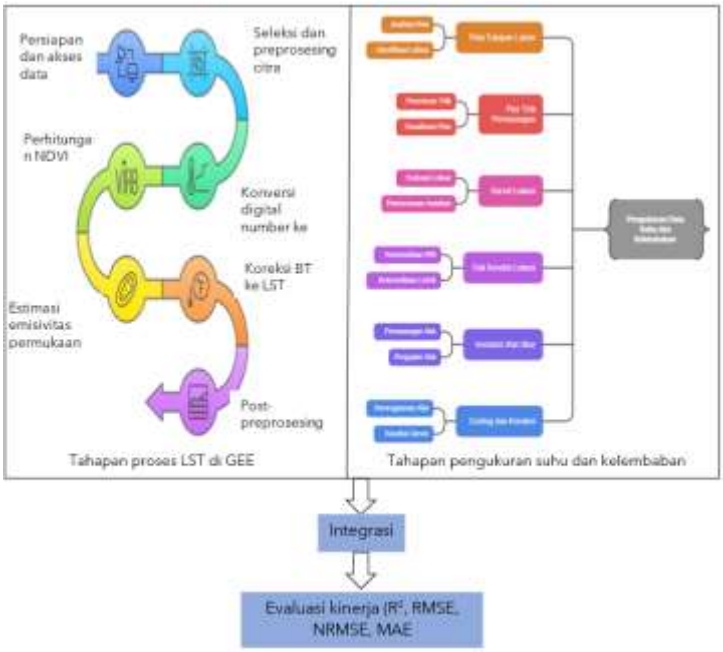
Plotting dan *planning* titik koordinat lokasi tempat instalasi alat ukur *thermometer* dilakukan pada peta berdasarkan sebarannya secara proporsional di seluruh administrasi Kota Gorontalo sebanyak 11 titik, khususnya pada zona-zona yang berdekatan dengan kawasan permukiman dan pertanian. Alat ukur ditempatkan pada kawasan perumahan/pemukiman, perkantoran dan pertokoan. Alat ukur tersebut dirancang untuk ditempelkan pada dinding yang sensornya tidak terhalang atap/pohon agar suhu yang diperoleh merupakan suhu sekitar wilayah tersebut. Selama alat ukur beroperasi memerlukan sumber energi listrik dan jaringan internet (Wifi). Sebanyak 11 data citra Landsat digunakan terdiri dari Landsat 8 dan 9. Prediksi waktu citra Landsat merekam wilayah Kota Gorontalo secara temporal dihitung tiap 16 hari selama Bulan Maret hingga Mei 2026. Pengukuran data lapangan (suhu dan kelembaban) dan data penginderaan jauh yang akan diambil lebih detilnya disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Pengambilan data suhu dan data penginderaan jauh

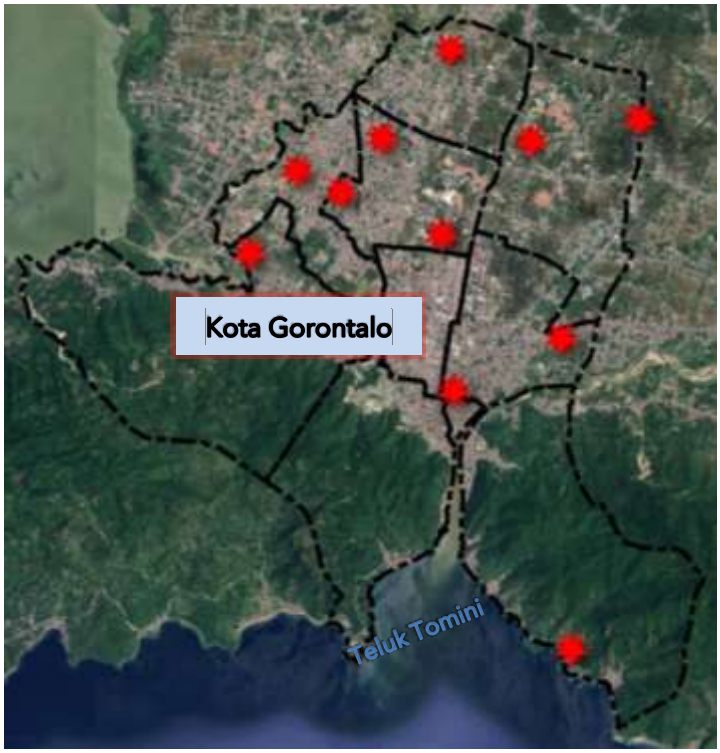
Pengambilan data (waktu)	
Suhu permukaan tanah *IoT*	Data penginderaan jauh
07-08 am, 12-01 pm, 16-17 pm, 09-10 pm	Landsat 8 (7 Maret 2026)
07-08 am, 12-01 pm, 16-17 pm, 09-10 pm	Landsat 9 (15 Maret 2026)
07-08 am, 12-01 pm, 16-17 pm, 09-10 pm	Landsat 8 (23 Maret 2026)
07-08 am, 12-01 pm, 16-17 pm, 09-10 pm	Landsat 9 (31 Maret 2026)
07-08 am, 12-01 pm, 16-17 pm, 09-10 pm	Landsat 8 (8 April 2026)
07-08 am, 12-01 pm, 16-17 pm, 09-10 pm	Landsat 9 (16 April 2026)
07-08 am, 12-01 pm, 16-17 pm, 09-10 pm	Landsat 8 (24 April 2026)
07-08 am, 12-01 pm, 16-17 pm, 09-10 pm	Landsat 9 (2 Mei 2026)
07-08 am, 12-01 pm, 16-17 pm, 09-10 pm	Landsat 8 (10 Mei 2026)
07-08 am, 12-01 pm, 16-17 pm, 09-10 pm	Landsat 9 (18 Mei 2026)
07-08 am, 12-01 pm, 16-17 pm, 09-10 pm	Landsat 8 (26 Mei 2026)

Pengukuran data diperoleh tiap 16 hari disesuaikan dengan resolusi temporal citra Landsat. Pengolahan dan analisis data citra Landsat menggunakan algoritma RF karena akurasi klasifikasinya [22], dapat menangani data dalam jumlah besar dan banyak diterapkan saat ini [23][24][25][26] yang terdapat dalam katalog *platform* GEE.

Pengukuran dilakukan selama 3 bulan (Maret-Mei) dimana pada Bulan Maret merupakan musim penghujan dan Bulan April-Mei termasuk musim kemarau. Pengukuran dilakukan pada dua sesi yaitu saat matahari terbit (siang -sore) pukul 07-08 am, 12-01 pm, 16-17 pm dan pada saat matahari terbenam (malam hari) pukul 09-10 pm. Hal ini dilakukan untuk membandingkan suhu pada saat matahari terbit dengan pada saat matahari terbenam. Diagram alir penelitian disajikan sebagaimana Gambar 1. Lokasi sebaran titik pemasangan alat ukur *thermometer* disajikan pada Gambar 2. Hasil pengukuran LST dan pengukuran data suhu *thermometer* kemudian diintegrasi untuk memperoleh kinerja keduanya. Evaluasi kinerja dilakukan menggunakan penghitungan statistik berupa *Root Mean Square Error* (RMSE), *Mean Absolute Error* (MAE), koefisien determinasi (R^2), dan *Normalized Root Mean Square Error* (NRMSE).



Gambar 1. Diagram alir penelitian



Gambar 2. Titik lokasi instalasi alat ukur *thermometer*

3. RESULTS AND DISCUSSION

Lokasi pemasangan alat ukur tersebar di wilayah Kota Gorontalo secara proporsional berdasarkan penggunaan lahan, ketersediaan jaringan internet (Wifi) dan listrik. Peta lokasi penempatan alat ukur thermometer IoT disajikan pada Gambar 1 dan lokasi pemasangannya disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Lokasi pemasangan alat ukur *thermometer IoT*

No.	Koordinat

	Longitude	Latitude	Lokasi
1	123.0362°	0.5649°	Kelurahan Huangobotu, Kecamatan Dungingi
2	123.0689°	0.5448°	Kelurahan Heledulaa, Kecamatan Kota Selatan
3	123.0496°	0.5623°	Kelurahan Dulalowo, Kecamatan Kota Tengah
4	123.0615°	0.5325°	Kelurahan Biawao, Kecamatan Kota Selatan
5	123.0898°	0.5715°	Kelurahan Dulomo Selatan, Kecamatan Tilongkabila
6	123.0275°	0.5538°	Kelurahan Tuladenggi, Kecamatan Dungingi
7	123.0628°	0.5851°	Kelurahan Bulotadaa, Kecamatan Sipatana
8	123.0654°	0.5366°	Kelurahan Heledulaa Selatan, Kecamatan Kota Timur
9	123.0802°	0.49130°	Kelurahan Leato Selatan, Kecamatan Dumbo Raya
10	122.9970°	0.5505°	Kelurahan Dembe I, Kecamatan Kota Barat
11	123.0776°	0.5639°	Kelurahan Wongakditi Barat, Kecamatan Kota Utara

Contoh pemasangan alat ukur *thermometer IoT* dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Pemasangan alat ukur *thermometer IoT*



Landsat 8 komposit 754 (11 Juni 2026)



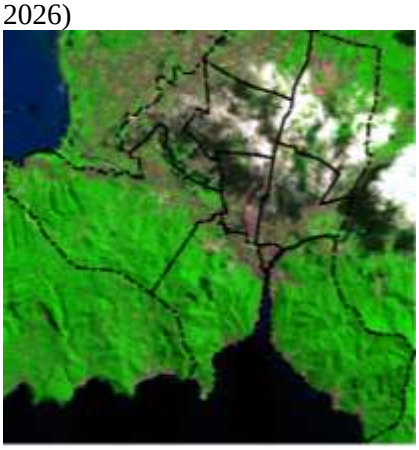
Landsat 9 komposit 754 (19 Juni 2026)



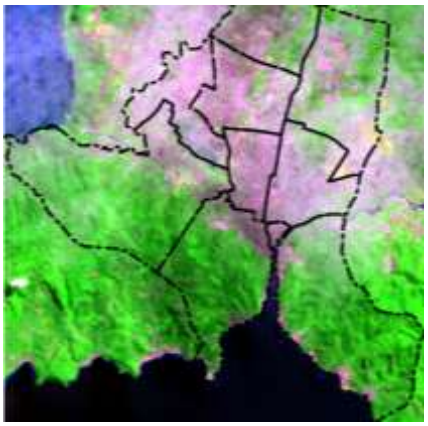
Landsat 8 komposit 754 (27 Juni 2026)



Landsat 9 komposit 754 (5 Juli 2026)



Landsat 8 komposit 754 (13 Juli 2026)



Landsat 9 komposit 754 (21 Juli 2026)



Landsat 8 komposit 754 (29 Juli 2026)



Landsat 9 komposit 754 (6 Agustus 2026)



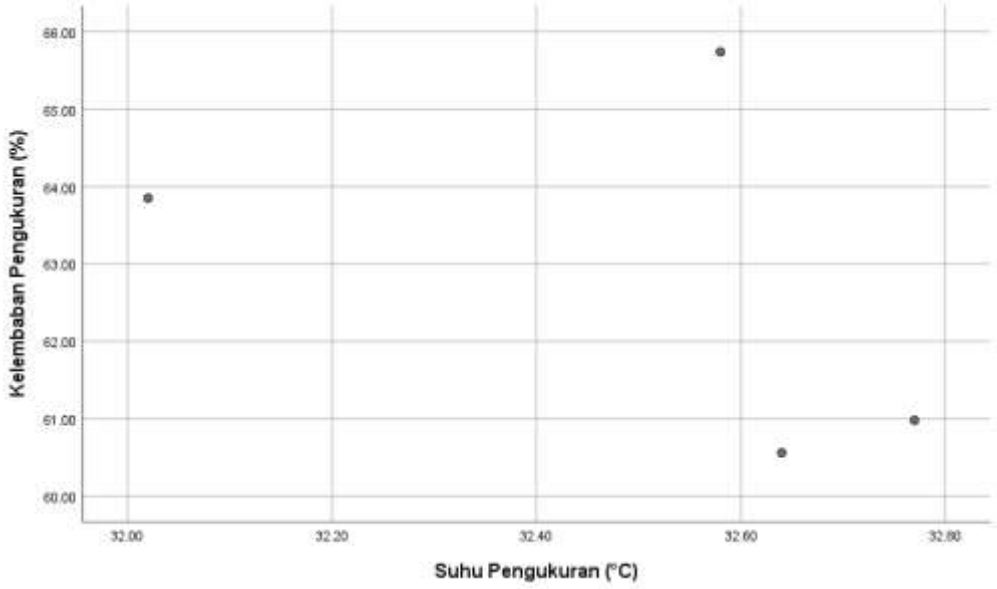
Landsat 8 komposit 754 (14 Agusuts 2026)

Gambar 4. Visualisasi citra Landsat 8/9

Berdasarkan metadata citra, tutupan awan pada lokasi penelitian disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Metadata citra landsat

Date acquired	Imagery	Cloud cover study area (%)	Cloud cover scene land (%)	Cloud cover scene (%)
11 Juni	Landsat 8	25.26	27.35	16.46
19 Juni	Landsat 9	11.24	36.52	12.59
27 Juni	Landsat 8	1.22	14.14	4.03
5 Juli	Landsat 9	44.19	29.2	7.59
13 Juli	Landsat 8	24.93	26.04	7.08
21 Juli	Landsat 9	39.84	54.33	46.73
29 Juli	Landsat 8	16.08	37.80	8.99
6 Agustus	Landsat 9	1.00	13.43	3.09
14 Agustus	Landsat 8	7.40	20.49	5.11



Gambar 5. *Scatter plot* hubungan ∑suhu(^{0}C) dan ∑kelembaban(%)

Gambar 3 menunjukkan korelasi negatif, jika suhu semakin menurun maka kelembaban semakin meningkat. Peta suhu permukaan tanah disajikan pada Gambar 6.



LST 11 Juni 2026



LST 19 Juni 2026



LST 27 Juni 2026



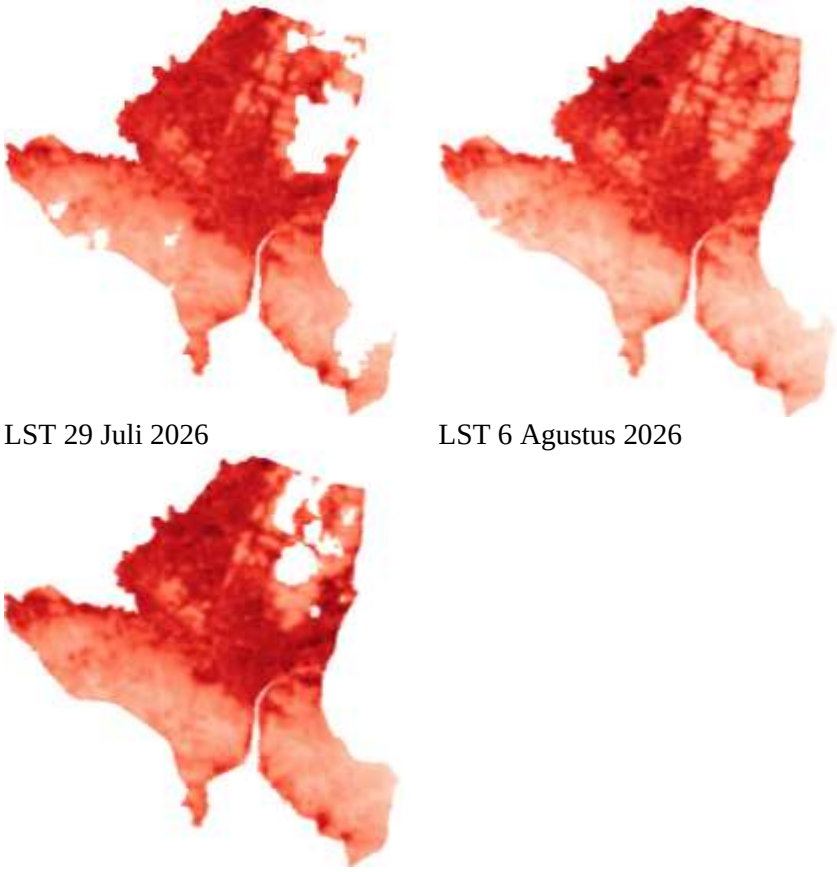
LST 5 Juli 2026



LST 13 Juli 2026



LST 21 Juli 2026



LST 29 Juli 2026 LST 6 Agustus 2026

LST 14 Agusuts 2026

Gambar 6. LST citra Landsat 8/9

Gambar 6 nampak suhu tinggi berada di lahan terbangun yang minim vegetasi. Nampak beberapa wilayah yang tidak ada data karena tertutup awan tebal sehingga tidak dapat dianalisis. Citra Landsat perekaman 5 Juli 2026 memiliki tutupan awan 32.74% dan wilayah penelitian awan tebal. Nilai TVDI antara 0,63–0,74 menunjukkan bahwa wilayah penelitian selama periode Juni–Juli berada dalam kondisi agak kering hingga kering meskipun kelembaban udara lapangan masih berada pada kisaran 60–66%.

Tabel 4. Hasil pengukuran suhu dan kelembaban berdasarkan alat ukur *thermometer IoT*

Tanggal	Suhu (^{0}C)	Kelembaban (%)
11 Juni	32.58	65.74
19 Juni	32.64	60.56
27 Juni	32.77	60.98
5 Juli	32.02	63.85
13 Juli	32.86	51.93
21 Juli	32.49	56.57
29 Juli	31.90	64.00
6 Agustus	32.2	56.81
14 Agustus	32.92	56.98

Tabel 5. Hasil interpretasi suhu rata-rata dan kelembaban dari citra Landsat

Tanggal	Suhu (^{0}C)	Indeks Kelembaban
11 Juni	39.85	0.64
19 Juni	37.44	0.63
27 Juni	42.95	0.69

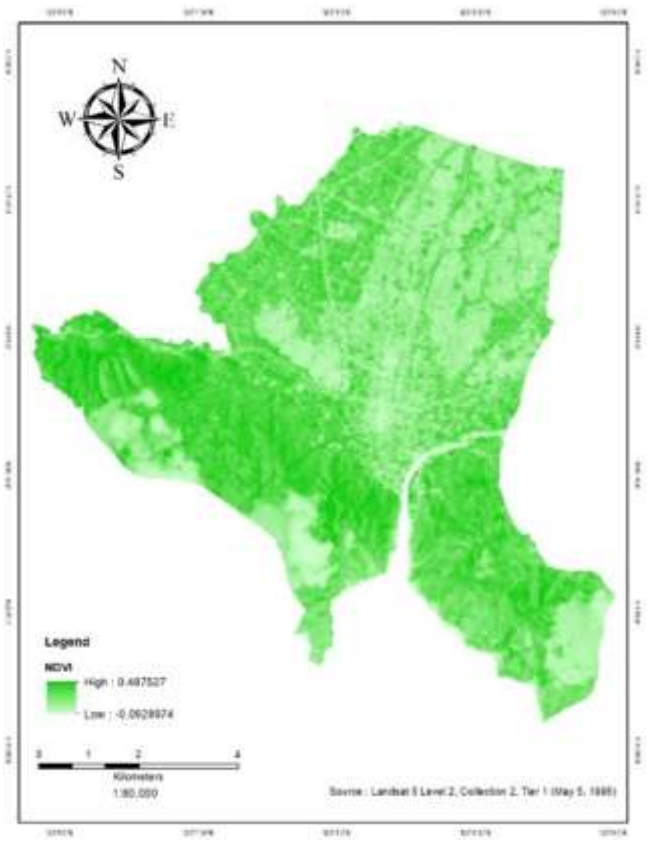
5 Juli	23.49	0.74
13 Juli	39.70	0.57
21 Juli	29.24	0.59
29 Juli	42.59	0.76
6 Agustus	42.47	0.69
14 Agustus	42.10	0.75

Berdasarkan data pada Tabel 4 dan 5 menunjukkan bahwa hasil interpretasi suhu rata-rata dan kelembaban dari citra Landsat umumnya lebih tinggi daripada suhu udara hasil pengukuran lapangan dengan selisih sekitar 5–10°C. Pola ini sesuai dengan teori karena Landsat mengukur suhu permukaan sedangkan sensor alat ukur dilapangan mengukur suhu udara. Kedua metode pengukuran tersebut dapat dipakai sebagai tanda bahwa keduanya menunjukkan jika pada saat tersebut terjadi kondisi cukup kering.

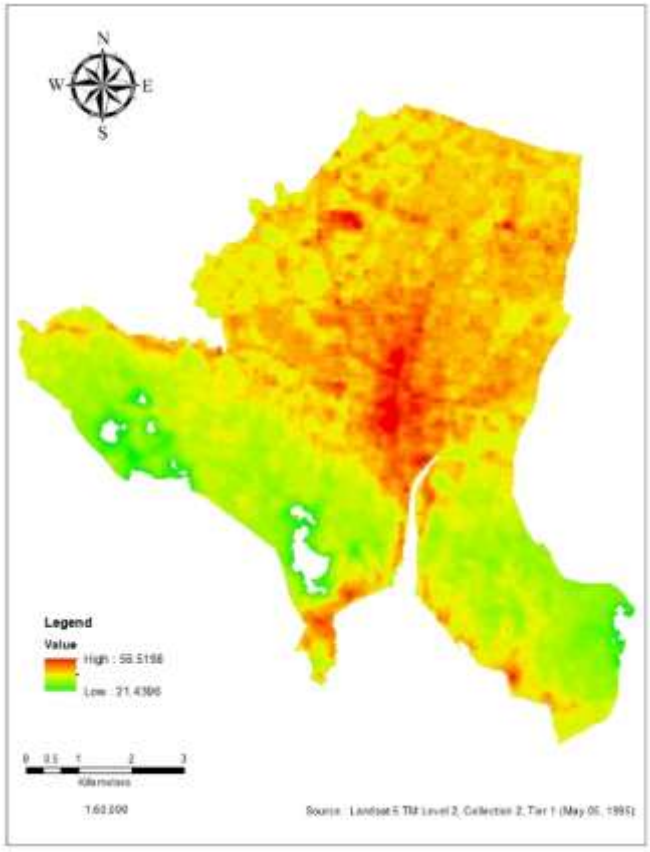
Tabel 6. Selisih pengukuran suhu di lapangan dengan suhu inerpretasi citra *Landsat*

Tanggal	Suhu Pengukuran (°C)	LST (°C)	Selisih (°C)
11 Juni	32.58	39.85	7.27
19 Juni	32.64	37.44	4.80
27 Juni	32.77	42.95	10.18
5 Juli	32.02	23.49	-8.53
13 Juli	32.86	39.70	6.84
21 Juli	32.49	29.24	-3.25
29 Juli	31.90	42.59	10.69
6 Agustus	32.2	42.47	10.27
14 Agustus	32.92	42.10	10.82

Tanggal 11, 19, dan 27 Juni, LST lebih tinggi 4,8–10,2°C dibandingkan suhu hasil pengukuran lapangan. Hal tersebut terjadi karena *thermometer IoT* mengukur suhu udara pada ketinggian tertentu sedangkan citra *Landsat* mengukur suhu permukaan objek permukaan bumi seperti tanah, beton, vegetasi, atap bangunan. Hasil pengukuran LST pada Tahun 1995 menunjukkan nilai suhu tidak jauh berbeda dengan pengukuran saat ini yaitu berkisar 30^0C-an [9] seperti nampak pada Gambar 6. Hal ini mengindikasikan jika iklim Kota Gorontalo tidak mengalami perubahan siginifikan. Begitupun tingkat kehijauan (NDVI) tahun 1995 berkisar -0.093 – 0.487 tidak jauh beda dengan NDVI Tahun 2026 yaitu -0.110 – 0.549.



Gambar 7. Peta indeks kehijauan Kota Gorontalo Tahun 1995



Gambar 8. Peta LST Kota Gorontalo Tahun 1995

4. CONCLUSION

Penelitian ini menyoroti fenomena pemanasan global dan efek UHI yang diperparah oleh pesatnya urbanisasi di Kota Gorontalo. Karena metode pemantauan suhu berbasis stasiun cuaca maupun satelit penginderaan jauh memiliki keterbatasan skala spasial dan temporal, penelitian ini mengembangkan sistem terintegrasi yang menggabungkan sensor suhu berbasis IoT secara *real-time* dengan citra satelit Landsat. Tujuannya adalah untuk mendukung pemetaan spatiotemporal suhu permukaan tanah (LST) dan menyediakan model mitigasi iklim mikro perkotaan.

Metode yang digunakan mencakup instalasi 11 titik alat ukur termometer IoT yang disebar secara proporsional pada area permukiman, pertokoan, dan perkantoran di seluruh administrasi Kota Gorontalo. Pengambilan data satelit dan pengukuran lapangan dilakukan secara bersamaan setiap 16 hari dari bulan Maret hingga Mei 2026 agar selaras dengan resolusi temporal Landsat 8 dan 9. Pengolahan data LST dilakukan menggunakan algoritma Random Forest melalui platform Google Earth Engine (GEE), sedangkan evaluasi kinerja sistem diukur dengan metrik seperti RMSE, MAE, NRMSE, dan R^2.

Hasil dan pembahasan menunjukkan adanya korelasi negatif antara suhu dan kelembaban, di mana suhu yang turun akan diikuti oleh peningkatan kelembaban. Suhu tertinggi sebagian besar terpusat pada lahan terbangun yang minim tutupan vegetasi. Terdapat selisih sekitar 5–10°C antara interpretasi citra satelit dan data lapangan, yang mana suhu Landsat lebih tinggi karena satelit mengukur suhu objek permukaan bumi secara langsung, sementara sensor IoT mengukur suhu udara sekitar. Meskipun demikian, perbandingan dengan data historis tahun 1995 menunjukkan bahwa tingkat kehijauan (NDVI) dan iklim Kota Gorontalo saat ini tidak mengalami perubahan yang signifikan.

REFERENCES

[1] B. Rana *et al.*, “Remote sensing-based impact analysis of artificial lighting on land surface temperature using google earth engine,” *Theor. Appl. Climatol.*, vol. 156, no. 7, p. 394, Jul. 2025, doi: 10.1007/s00704-025-05625-6.

[2] M. D. Setiawati, M. P. Jarzebski, M. Gomez-Garcia, and K. Fukushi, “Accelerating Urban Heating Under Land-Cover and Climate Change Scenarios in Indonesia: Application of the Universal Thermal Climate Index,” *Front. Built Environ.*, vol. 7, no. May, pp. 1–14, May 2021, doi: 10.3389/fbuil.2021.622382.

[3] S. O. Deviro, L. Karlinasari, and A. D. Nurhayati, “Urban Heat Island phenomenon and the role of urban green spaces in regulating thermal comfort in Bogor City, Indonesia,” *J. Degrad. Min. Lands Manag.*, vol. 12, no. 4, pp. 8391–8404, Jul. 2025, doi: 10.15243/jdmlm.2025.124.8391.

[4] C. Liu, S. Lu, J. Tian, L. Yin, L. Wang, and W. Zheng, “Research Overview on Urban Heat Islands Driven by Computational Intelligence,” *Land*, vol. 13, no. 12, p. 2176, Dec. 2024, doi: 10.3390/land13122176.

[5] S. Yuan, Z. Ren, X. Shan, Q. Deng, and Z. Zhou, “Seasonal different effects of land cover on urban heat island in Wuhan’s metropolitan area,” *Urban Clim.*, vol. 49, p. 101547, May 2023, doi: 10.1016/j.uclim.2023.101547.

[6] R. Gupta, “GIS-Based Analysis of Land Surface Characteristics and Urban Heat Islands in Metropolitan Cities of India,” *Int. J. Eng. Geosci.*, vol. 10, no. 3, pp. 440–455, Sep. 2025, doi: 10.26833/ijeg.1638818.

[7] R. P K *et al.*, “IoT-Based Low-Cost Soil Moisture and Soil Temperature Monitoring System,” *Int. J. Electr. Electron. Eng.*, vol. 10, no. 10, pp. 66–74, Oct. 2023, doi: 10.14445/23488379/IJEEE-V10I10P108.

[8] P. Gaborit, "Climate adaptation to Multi-Hazard climate related risks in ten Indonesian Cities: Ambitions and challenges," *Clim. Risk Manag.*, vol. 37, no. June, p. 100453, 2022, doi: 10.1016/j.crm.2022.100453.

[9] A. G. Koto, M. I. Abas, Syahrial, and D. O. Suparwata, "Application of Spatial Machine Learning (SML) for Estimating Land Surface Temperature in Gorontalo City," *Jambura Geosci. Rev.*, vol. 8, no. 1, pp. 61–73, 2026, doi: https://doi.org/10.37905/jgeosrev.v8i1.34308.

[10] A. G. Koto and I. Taslim, "DETEKSI PERKEMBANGAN LAHAN TERBANGUN KOTA GORONTALO BERDASARKAN CITRA LAST (LANDSAT, ASTER, & SENTINEL-2A) (Detection of the built-up area development in Gorontalo City Based on LAST (Landsat, ASTER, & Sentinel-2A) Imagery)," *J. Sains Inf. Geogr.*, vol. 1, no. 2, p. 28, Nov. 2018, doi: 10.31314/jsig.v1i2.177.

[11] A. G. Koto, "Analisis Suhu Permukaan Kota Gorontalo dan Sekitarnya Menggunakan Saluran Thermal Citra Landsat 7 ETM +," *RADIAL – J. Perad. saIns, rekayAsa dan Teknol.*, vol. 4, no. 1, pp. 1–7, 2016, doi: 10.37971/radial.v4i1.117.

[12] H. S. Dillon, A. Alnur, A. Achmad, and F. Khudi, "Urban Analysis Report 2020 Gorontalo," 2020. [Online]. Available: https://www.dml.or.id/wp-content/uploads/2024/11/UAR-GORONTALO.pdf

[13] H. Guo *et al.*, "The SDGSAT-1 mission and its role in monitoring SDG indicators," *Remote Sens. Environ.*, vol. 328, no. July 2024, p. 114885, Oct. 2025, doi: 10.1016/j.rse.2025.114885.

[14] S. Ranjan Laha, B. K. Pattanayak, and S. Pattnaik, "Advancement of Environmental Monitoring System Using IoT and Sensor: A Comprehensive Analysis," *AIMS Environ. Sci.*, vol. 9, no. 6, pp. 771–800, 2022, doi: 10.3934/environsci.2022044.

[15] G. Limoncella *et al.*, "A Machine Learning Model Integrating Remote Sensing, Ground Station, and Geospatial Data to Predict Fine-Resolution Daily Air Temperature for Tuscany, Italy," *Remote Sens.*, vol. 17, no. 17, p. 3052, Sep. 2025, doi: 10.3390/rs17173052.

[16] J. De, "Urbanization, climate change, and remote sensing: a systematic review of research trends and sustainability concerns," *Urban Ecosyst.*, vol. 28, no. 5, p. 191, Oct. 2025, doi: 10.1007/s11252-025-01800-9.

[17] X. Yuan, J. Han, Z. Lv, X. Liu, G. Arturo Sanchez-Azofeifa, and S. Xue, "An Innovative Low-Altitude Dual-Source Remote Sensing Platform for Urban Thermal Environment Observation: Integration, Tests, Optimization, and Assessment," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 63, pp. 1–14, 2025, doi: 10.1109/TGRS.2025.3627255.

[18] Q. M. Ajaj, "Remote Sensing-based Land Surface Temperature Retrieval in Kirkuk City , Iraq Using GIS and TES Algorithm : A Climatic Concern," pp. 475–481, 2025.

[19] J. Saini, A. K. Gupta, R. Dhupper, and A. Shrivastava, "Spatio-temporal study of urban dynamics with implications on land surface temperature of Gurugram City, India," *Environ. Monit. Assess.*, vol. 197, no. 8, p. 946, Jul. 2025, doi: 10.1007/s10661-025-14392-w.