

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Indonesia beriklim tropis dengan ciri utama kelembapan tinggi yang dapat mencapai 80%, suhu udara relatif panas hingga sekitar 35 °C, dan paparan radiasi matahari yang intens. Kondisi ini menimbulkan tantangan dalam menciptakan kenyamanan termal, khususnya di bangunan pada wilayah tropis lembap. Kenyamanan termal penting untuk mendukung aktivitas manusia sehari-hari baik di rumah, sekolah, maupun tempat kerja. Menurut (Koenigsberger et al., 1975), kenyamanan ditentukan oleh faktor iklim seperti radiasi matahari, suhu udara, kelembaban, dan kecepatan angin, serta faktor individu yang meliputi pakaian, aklimatisasi, usia, jenis kelamin, kesehatan, maupun kondisi fisik. Tubuh manusia selalu berusaha menjaga keseimbangan termal, namun kemampuan adaptasi ini memiliki batas: sekitar 20% terhadap kondisi panas dan 45% terhadap kondisi dingin (Sedarmayanti, 2009). Dari sisi arsitektur, ruang dalam bangunan memiliki tiga fungsi pokok, yakni sebagai pelindung, wadah aktivitas, dan sarana interaksi sosial budaya (Markus & Morris, 1980).

Fenomena *Urban Heat Island* (UHI) telah dicatat sejak awal abad ke-19 sebagai salah satu bentuk perubahan iklim perkotaan. UHI terjadi karena kawasan perkotaan menyimpan panas lebih besar dibandingkan wilayah pedesaan akibat permukaan terbangun yang menyerap radiasi matahari dan terbatasnya pelepasan panas karena rapatnya bangunan (Voogt & Oke, 2003), (Gartland, 2012), (X. Liu et al., 2020). Suhu di perkotaan dapat meningkat 1–3 °C dibandingkan kawasan sekitarnya, bahkan lebih tinggi pada musim panas (EPA, 2008), (Singh & Grover, 2015). Aktivitas urban seperti industri, transportasi, dan komersial juga berkontribusi terhadap pelepasan panas antropogenik yang memperparah kondisi ini (Kurniati et al., 2015). Dengan demikian, UHI dapat didefinisikan sebagai deviasi suhu yang lebih tinggi di kawasan urban akibat penumpukan panas dibandingkan daerah suburban atau rural.

Standar internasional mengenai kenyamanan termal, seperti ISO 7730:1994, menjelaskan bahwa kenyamanan manusia dipengaruhi empat variabel iklim (suhu udara, suhu radiasi, kelembaban, dan kecepatan angin) serta dua faktor individu (aktivitas metabolisme dan pakaian). Konsep ini diperkuat oleh standar AASHRAE 55-2004 yang mengadopsi teori keseimbangan panas (Fanger, 1988). Model ini dikenal sebagai model statis, yang merangkum enam faktor penentu kenyamanan termal: *metabolic rate*,

clothing insulation, air temperature, radiant temperature, air speed, dan humidity.

Berbeda dengan karya para peneliti lain tentang kenyamanan termal di luar ruangan yang berfokus pada model termoregulasi teoretis, survei kuesioner lapangan tentang kenyamanan termal di luar ruangan memerlukan pemahaman terhadap parameter subjektif manusia untuk mengevaluasi kenyamanan termal di luar ruangan secara lebih holistik. Studi lapangan untuk menyelidiki kenyamanan termal di luar ruangan telah dilakukan di berbagai tempat dengan iklim hangat dan lembap, seperti Dhaka, Bangladesh (Chowdhury et al., 2017), (Ahmed, 2003), Hong Kong (Cheng et al., 2010), Dar es Salaam (Ndetto dan Matzarakis, 2016), dan Taiwan (Lin, 2009). Serta berbagai studi tentang kenyamanan termal di luar ruangan telah dilakukan di jalan-jalan (Jamei & Rajagopalan, 2017), (Pearlmutter et al., 2007), kawasan perumahan (Mi et al., 2020), (Qunshan Zhao et al., 2018), taman hijau (Hami et al., 2019), (Marrone et al., 2018), dan sekolah (Mahmoud & Abdallah, 2022), (Elgheznawy & Eltarabily, 2021). Penting untuk meneliti kenyamanan termal ruang campuran guna memperdalam pemahaman kita tentang berbagai faktor yang memengaruhi kenyamanan termal di luar ruangan, termasuk parameter lingkungan dan fitur perkotaan. Penelitian tentang kenyamanan termal di luar ruangan umumnya berfokus pada ruang multifungsi (Ghaffarianhoseini et al., 2019), (Zhong et al., 2023) yang biasanya memiliki fungsi ganda, seperti rekreasi, hiburan, pendidikan, dan olahraga.

Studi-studi ini berfokus pada evaluasi hubungan antara kenyamanan termal di luar ruangan dan variabel lingkungan dalam konteks iklim yang berbeda. Seperti yang ditekankan oleh Nikolopoulou: “pengaruh parameter iklim yang berbeda bervariasi sesuai dengan konteks iklim, tetapi semua studi menyoroti kompleksitas dalam menentukan hubungan antara variabel lingkungan dan kenyamanan termal. Selain itu, temuan umum dari semua survei berkaitan dengan rentang zona kenyamanan yang luas; jauh lebih luas daripada yang didefinisikan oleh model teoretis, memperkuat argumen untuk adaptasi termal (Nikolopoulou, 2011).

Studi lapangan melibatkan pengukuran mikrometeorologi, termasuk empat variabel lingkungan dasar yang mempengaruhi kenyamanan termal, yaitu suhu lingkungan, kelembapan udara, kecepatan angin, dan T_{mrt} , yang biasanya dihitung. Pengukuran dilakukan bersamaan dengan survei kuesioner, yang mencakup pertanyaan tentang dua variabel perilaku: aktivitas yang mencerminkan laju metabolisme dan pakaian.

Pada ruang luar, persepsi kenyamanan bersifat lebih kompleks (Lin, 2009) menekankan bahwa kondisi termal ruang publik terbuka

berpengaruh terhadap perilaku penggunaan ruang. Adaptasi termal, yang melibatkan aspek fisiologis, psikologis, dan perilaku, turut menentukan bagaimana pengguna menilai lingkungan termal (Indraganti, 2010; Abdollahzadeh & Bilorja, 2021). Lingkungan yang mendukung dapat mendorong aktivitas luar-ruang menjadi bagian dari kebiasaan sehari-hari (Owen et al., 2004).

Permukiman didefinisikan sebagai wadah aktivitas manusia yang dibentuk oleh bangunan, infrastruktur, serta interaksi sosial. Menurut Doxiadis (1968), permukiman terdiri atas dua elemen: wadah berupa rumah, jaringan prasarana, dan lingkungan alam; serta isi yang mencakup manusia dengan berbagai aktivitasnya. Dalam konteks kota padat, sensasi termal luar-ruang dipengaruhi oleh kombinasi kondisi cuaca, kesehatan individu, dan faktor psikologis (Sharmin & Steemers, 2020). Suhu udara menjadi faktor mikroklimatik paling dominan (W. Liu et al., 2016; Tan et al., 2019), namun kecepatan angin dan suhu radiasi juga berperan signifikan (Niu et al., 2015). Aliran udara dengan kecepatan di atas 1,5 m/s, misalnya, mampu secara nyata meningkatkan kenyamanan (Ali-Toudert & Mayer, 2006), (Johansson & Emmanuel, 2006). Selain iklim, aspek desain kota juga memengaruhi kenyamanan, mulai dari rasio aspek (H/W), orientasi jalan, vegetasi, hingga material bangunan (Deng & Wong, 2020); (Taleghani et al., 2015). Berbagai penelitian menawarkan strategi peningkatan kenyamanan luar-ruang, seperti optimalisasi ventilasi (Hong & Lin, 2015), penggunaan material berdaya pantul tinggi (Taleghani, 2018), penanaman vegetasi (Besir & Cuce, 2018), (Zölch et al., 2016), maupun pemanfaatan badan air (Steenefeld et al., 2014).

Kenyamanan termal sangat penting bagi kesehatan dan produktivitas penghuni, khususnya masyarakat pesisir yang rentan terhadap kondisi panas. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa cuaca ekstrem, gelombang panas akibat pemanasan global, serta UHI memperburuk kelayakan huni kota (Tan et al., 2016; Nogueira et al., 2020). Lingkungan luar yang nyaman bukan hanya memperpanjang durasi aktivitas, tetapi juga mengurangi ketergantungan pada pendingin ruangan, menekan konsumsi energi, meningkatkan interaksi sosial, kesehatan masyarakat, bahkan pariwisata (Lai et al., 2014).

Kawasan pesisir Indonesia, kenyamanan termal cenderung menurun pada siang hari dengan suhu berkisar antara 28–33 °C. Studi di Sulawesi Selatan menunjukkan suhu netral berada pada 29,36 °C, sementara suhu aktual berkisar 27,46–32,86 °C (Hamzah et al., 2020) (Mulyadi et al., 2020). Kondisi serupa juga dijumpai di Gorontalo, yang beriklim tropis lembap dengan suhu rata-rata tahunan 28–30 °C dan kelembaban tinggi (Statistik, 2023), (B. K. Gorontalo, 2023).

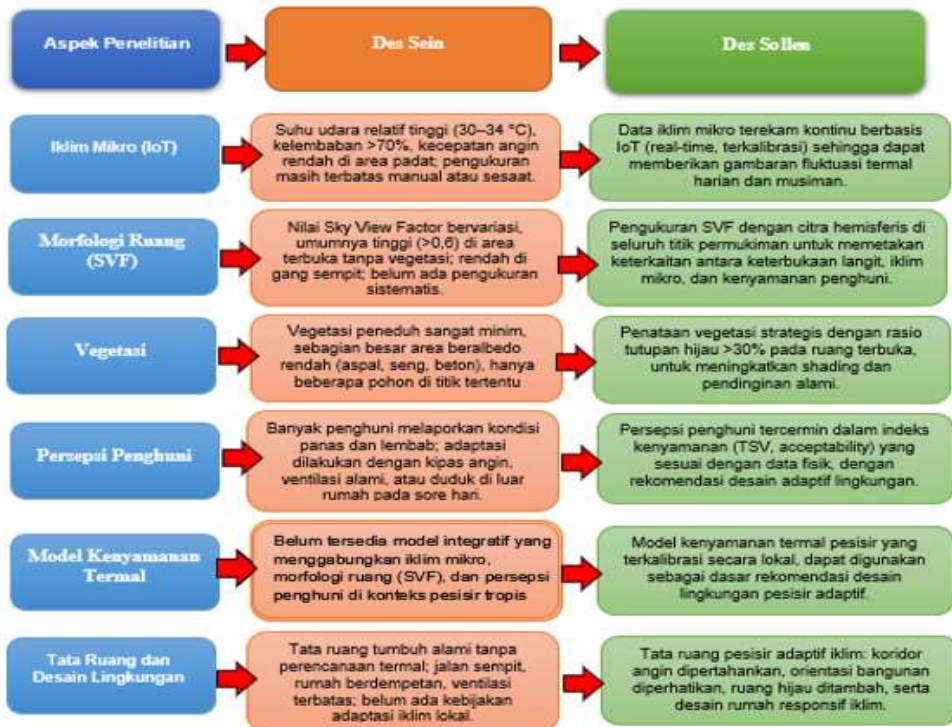
Permukiman pesisir Gorontalo memiliki karakteristik sosial dan spasial khas. Sistem kekerabatan membentuk kelompok rumah yang saling terhubung oleh jalan setapak sebagai ruang bersama. (Azimzadeh, 2003) menunjukkan bahwa struktur ruang dipengaruhi erat oleh budaya kekerabatan, yang menghasilkan keterhubungan tinggi antar rumah. Rasa kebersamaan ini juga menentukan pola pergerakan dan konektivitas antar ruang (Can, 2012). Dari sisi fisik, rumah pesisir masih beragam: ada yang permanen dengan dinding batako dan atap seng/metal, ada pula rumah panggung dari kayu dan papan. Variasi material dan pola ruang ini menjadikan permukiman pesisir Gorontalo menghadapi tantangan besar dalam menjaga kenyamanan termal.

Secara umum, iklim pesisir yang dipengaruhi laut dan udara memperkuat tingkat panas dan kelembaban, sementara perubahan iklim global memperburuk kondisi tersebut. Ketidaknyamanan termal tidak hanya menurunkan kualitas hidup, tetapi juga berdampak pada kesehatan masyarakat. Oleh karena itu, penting untuk mengkaji kenyamanan termal di permukiman pesisir Kota Gorontalo guna menemukan strategi mitigasi yang adaptif terhadap perubahan iklim.

Meskipun berbagai studi internasional telah membahas kenyamanan termal, *Urban Heat Island*, serta faktor spasial perkotaan, penelitian di kawasan pesisir tropis Indonesia khususnya yang mengintegrasikan data iklim mikro berbasis sensor dengan analisis spasial seperti *Sky View Factor* (SVF) dan konfigurasi ruang masih sangat terbatas. Padahal, permukiman pesisir memiliki karakteristik unik berupa kepadatan bangunan, variasi material sederhana, dan pola ruang yang dipengaruhi kekerabatan, yang semuanya berpotensi memperburuk ketidaknyamanan termal. Kondisi ini diperparah oleh iklim tropis lembap dengan suhu tinggi dan kelembaban ekstrem. Oleh karena itu, penelitian mengenai kenyamanan termal pada permukiman pesisir Kota Gorontalo menjadi penting, tidak hanya untuk memahami kondisi lokal tetapi juga sebagai kontribusi terhadap strategi mitigasi panas perkotaan dan perencanaan permukiman berkelanjutan di kawasan tropis.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, baik dari hasil obesrvasi maupun teori dan ilmu pengetahuan yang telah dikemukakan, dapat disusun das sein das sollen sebagaimana gambar 1.1.



Gambar 1. 1 Das Sein dan Das Sollen

Dari das sein dan das sollen dibuatlah beberapa rumusan masalah yang dapat diangkat dalam penelitian kenyamanan termal di lingkungan permukiman pesisir di kota Gorontalo adalah:

1. Bagaimana karakteristik iklim mikro berbasis pengukuran IoT mempengaruhi tingkat kenyamanan termal di permukiman pesisir Kota Gorontalo?
2. Bagaimana pengaruh Sky View Factor (SVF) terhadap kondisi lingkungan termal dan distribusi kenyamanan termal pada permukiman pesisir Kota Gorontalo?
3. Bagaimana mengembangkan model kenyamanan termal berbasis integrasi iklim mikro, Sky View Factor (SVF), dan persepsi penghuni untuk menghasilkan zonasi kenyamanan termal serta strategi desain permukiman pesisir tropis di Kota Gorontalo?

1.3. Tujuan Penelitian

1.3.1. Tujuan umum

Secara umum, penelitian ini bertujuan untuk memahami dan menganalisis faktor-faktor yang memengaruhi kenyamanan termal di

kawasan permukiman pesisir Kota Gorontalo dengan memanfaatkan teknologi pengukuran berbasis IoT. Penelitian ini Mengembangkan model kenyamanan termal berbasis integrasi iklim mikro, Sky View Factor (SVF), dan persepsi penghuni untuk menghasilkan zonasi kenyamanan termal serta langkah-langkah desain untuk meningkatkan kenyamanan termal permukiman pesisir tropis yang responsif terhadap kondisi iklim lokal di Kota Gorontalo.

1.3.2. Tujuan Khusus

Secara khusus, tujuan penelitian ini adalah untuk:

1. Menganalisis karakteristik iklim mikro berdasarkan pengukuran berbasis IoT serta mengevaluasi pengaruhnya terhadap tingkat kenyamanan termal di permukiman pesisir Kota Gorontalo.
2. Mengkaji pengaruh Sky View Factor (SVF) terhadap kondisi lingkungan termal dan distribusi spasial kenyamanan termal, sehingga diperoleh pemahaman mengenai peran morfologi ruang dan keterbukaan langit dalam membentuk iklim mikro dan kenyamanan termal di kawasan permukiman pesisir.
3. Mengembangkan model kenyamanan termal yang mengintegrasikan variabel iklim mikro, SVF, dan persepsi penghuni dalam konteks lingkungan permukiman pesisir tropis Kota Gorontalo.

1.4. Batasan Masalah

1.4.1. Data

1. Sumber Data Iklim Mikro
Data iklim mikro diperoleh dari pengukuran lapangan menggunakan sensor berbasis IoT pada beberapa titik pengamatan (T0–T5) di kawasan permukiman pesisir Kota Gorontalo.
2. Parameter yang Dianalisis
3. Penelitian dibatasi pada parameter utama iklim mikro yang mempengaruhi kenyamanan termal, yaitu:
 - a. Suhu udara (T_a)
 - b. Kelembaban relatif (RH)
 - c. Kecepatan angin (v)
 Parameter lain seperti radiasi matahari langsung atau Mean Radiant Temperature (MRT) tidak diukur secara langsung,

namun dapat dipertimbangkan secara konseptual melalui pendekatan SVF.

4. Data *Sky View Factor* (SVF) dan *Physiological Equivalent Temperature* (PET)
 Nilai SVF dan PET diperoleh melalui simulasi menggunakan ENVI-met, sedangkan data iklim mikro (suhu udara, kelembaban relatif, dan kecepatan angin) diperoleh dari pengukuran lapangan berbasis sensor IoT dan digunakan untuk validasi kondisi aktual.
5. Data Persepsi Penghuni
 Data persepsi diperoleh melalui kuesioner lapangan menggunakan pendekatan:
 - a. *Thermal Sensation Vote* (TSV)
 - b. *Acceptability*
 Data ini bersifat subjektif dan dikaitkan dengan kondisi lingkungan saat pengukuran.
6. Periode dan Waktu Pengambilan Data
 Pengambilan data dilakukan dalam periode tertentu (harian dan/atau musiman terbatas), sehingga belum mencakup variasi iklim tahunan secara penuh.
7. Validasi Data
 Data IoT dikalibrasi atau dibandingkan secara terbatas dengan data referensi (misalnya BMKG), namun tidak mencakup validasi jangka panjang multi-tahun.

1.4.2. Ruang lingkup

1. Lokasi Penelitian
 Penelitian difokuskan pada kawasan permukiman pesisir di Kota Gorontalo, khususnya pada transek dari wilayah pantai menuju daratan dengan karakteristik morfologi yang berbeda.
2. Skala Kajian
 Kajian dilakukan pada skala:
 - a. Mikroklimat (lingkungan luar ruang/*outdoor*)
 - b. Lingkup permukiman (bukan skala kota secara keseluruhan)
3. Aspek yang Dikaji
 Penelitian difokuskan pada integrasi tiga komponen utama:
 - a. Iklim mikro (Ta, RH, v)
 - b. Morfologi ruang (SVF)
 - c. Persepsi penghuni (TSV & acceptability)

Aspek lain seperti ekonomi, sosial budaya secara mendalam, atau struktur bangunan tidak menjadi fokus utama.

4. Model yang Dikembangkan

Model yang dikembangkan merupakan model kenyamanan termal adaptif berbasis empiris (lapangan), bukan simulasi numerik kompleks atau model global standar seperti PMV murni indoor.

5. Output Penelitian

Output penelitian dibatasi pada:

- a. Model kenyamanan termal pesisir
- b. Zonasi spasial kenyamanan termal (nyaman, transisi, kritis)
- c. Rekomendasi desain lingkungan permukiman adaptif iklim
Tidak sampai pada tahap perancangan arsitektur detail atau implementasi konstruksi.

6. Kondisi Lingkungan

Penelitian difokuskan pada kondisi iklim tropis lembab khas pesisir, sehingga hasil model bersifat kontekstual dan tidak secara langsung digeneralisasi untuk wilayah non-pesisir atau iklim berbeda.

1.5. Manfaat Penelitian

Dalam rangka mendapatkan dan menganalisis serta merespon kondisi iklim lingkungan permukiman pesisir terhadap kenyamanan termal di kota Gorontalo yang secara alami serta memperhatikan kelestarian lingkungan, diharapkan penelitian ini mampu dapat memberikan manfaat, antara lain:

1. Dalam lingkup akademis, penelitian ini menyumbangkan ilmu pengetahuan terkait kenyamanan termal di lingkungan permukiman pesisir kota, terutama iklim personal, iklim dan lingkungan melalui bangunan yang dapat merespon kondisi iklim secara alami, pengaruh aspek vegetasi terhadap tingkat kenyamanan termal lingkungan di permukiman pesisir, serta Kondisi penghuni/masyarakat terhadap tingkat kenyamanan termal didalam rumah.
2. Lingkup implementasi, hasil penelitian ini diharapkan berkontribusi yang baru sebagai referensi, masukan kepada pemerintah, perencana, dan arsitek dalam menyusun kebijakan terhadap kenyamanan termal pada permukiman pesisir.

1.6. Kajian Teori

Bagian ini menyajikan landasan teori untuk memahami fenomena kenyamanan termal pada permukiman pesisir tropis, khususnya dalam

konteks Kota Gorontalo. Kajian difokuskan pada hubungan antara variabel iklim mikro, karakter morfologi ruang, persepsi termal masyarakat, serta pendekatan pemodelan kenyamanan termal yang digunakan dalam penelitian. Dengan kerangka tersebut, kajian teori tidak hanya berfungsi sebagai rujukan konseptual, tetapi juga menjadi pijakan untuk menafsirkan temuan lapangan dan menyusun arah pemodelan yang sesuai dengan karakter lingkungan pesisir tropis lembap.

1.6.1. Konsep Kenyamanan Termal Ruang Luar pada Iklim Tropis

Dalam iklim tropis lembap, kenyamanan termal ruang luar bersifat sangat dinamis karena dipengaruhi radiasi matahari, perubahan kecepatan angin, kelembapan, serta interaksi dengan permukaan sekitar seperti jalan, dinding, atap, dan vegetasi. Ketidaknyamanan sering muncul lebih cepat karena kelembapan tinggi menghambat penguapan keringat sehingga tubuh lebih sulit membuang panas, dan akibatnya sensasi “panas” dapat terasa lebih kuat dibanding angka suhu udara yang tercatat. Secara fisik, kondisi termal ruang luar dibentuk oleh kombinasi T_a , RH, v , dan terutama MRT yang sering menjadi faktor dominan akibat radiasi dan pantulan permukaan keras, sementara angin berperan sebagai kompensasi penting melalui pendinginan konvektif. Karena itu, evaluasi kenyamanan termal modern umumnya menggunakan indeks komposit seperti PET dan UTCI yang lebih sensitif terhadap perubahan iklim mikro outdoor dibanding indikator suhu udara saja.

Dari sisi pemodelan, penelitian ini menempatkan PMV (Model Fanger) (Fanger, 1972) sebagai baseline penting karena menjelaskan kenyamanan termal berbasis keseimbangan panas tubuh dan memasukkan faktor personal berupa metabolisme (M) serta isolasi pakaian (I_{cl}), yang kemudian diadopsi luas dalam ISO 7730. Namun, berbagai kajian menunjukkan bahwa PMV sering kurang representatif bila diterapkan langsung pada ruang luar tropis karena lingkungan lebih berubah-ubah dan adaptasi perilaku lebih dominan. Oleh sebab itu, penelitian ini mengintegrasikan pendekatan iklim perkotaan yang menekankan peran geometri ruang, khususnya konsep street canyon dari Oke (Oke, 1988), (Oke, 2010) yang menjelaskan perubahan pola aliran berdasarkan rasio H/W , serta konsep SVF sebagai indikator keterbukaan langit yang berhubungan dengan paparan radiasi dan pembentukan *Mean Radiant Temperature* (MRT); metode pengukuran *Sky View Factor* (SVF) juga memiliki pijakan klasik melalui pendekatan SVF oleh Steyn (Steyn, 1980). Dengan sintesis tersebut, kenyamanan termal permukiman pesisir dipahami sebagai interaksi iklim mikro (T_a , RH, v , MRT), morfologi (SVF, H/W , koridor angin), dan vegetasi; sehingga pengembangan

model kenyamanan termal pesisir perlu memasukkan koreksi berbasis struktur ruang dan kemampuan koridor angin untuk menghasilkan analisis yang lebih kontekstual dan aplikatif dalam rekomendasi penataan permukiman.

1.6.2. Mikroklimat Permukiman Pesisir dan Peran Angin Laut (Sea Breeze)

a. Pengertian Mikroklimat Pesisir

Mikroklimat pesisir adalah kondisi iklim pada skala lokal yang terbentuk dari interaksi antara atmosfer, permukaan daratan, dan laut di sekitarnya. Karakter mikroklimat ini berbeda dari kawasan non-pesisir karena laut memberikan pengaruh langsung yang dinamis, baik melalui perubahan suhu permukaan maupun pola sirkulasi angin harian. Di permukiman pesisir, variasi mikroklimat tidak hanya dipengaruhi oleh faktor meteorologis seperti suhu udara, kelembapan, dan angin, tetapi juga oleh struktur fisik permukiman, misalnya kepadatan bangunan, arah dan lebar jalan, serta keberadaan vegetasi peneduh. Karena itu, meskipun berada dalam satu wilayah pesisir yang sama, setiap titik permukiman dapat memiliki kondisi termal yang berbeda tergantung pada karakter ruang dan konfigurasi permukaan yang membentuknya.

b. Mekanisme Sea Breeze

Sea breeze (angin laut) merupakan angin lokal yang bergerak dari laut menuju daratan akibat perbedaan pemanasan permukaan antara darat dan laut. Pada siang hari, daratan mengalami pemanasan lebih cepat dibanding laut sehingga tekanan udara di atas daratan menurun. Sebaliknya, udara di atas laut relatif lebih sejuk dan bertekanan lebih tinggi. Perbedaan tekanan ini mendorong massa udara bergerak menuju daratan sebagai angin laut. Pada malam hari prosesnya dapat berbalik, membentuk angin darat yang bergerak dari daratan ke laut. Dalam konteks wilayah pesisir perkotaan, sistem sea breeze juga dapat berinteraksi dengan kondisi lokal seperti kepadatan bangunan dan pulau panas perkotaan, sehingga kekuatan dan arah pergerakannya dapat mengalami perubahan pada skala kawasan.

c. Pengaruh *Sea Breeze* terhadap Tekanan Panas (Pendinginan Konvektif)

Sea breeze berperan penting dalam menurunkan tekanan panas pada ruang luar karena meningkatkan pendinginan konvektif. Saat kecepatan angin meningkat, pelepasan panas dari permukaan tubuh ke udara berlangsung lebih efektif. Selain itu, aliran udara juga

membantu proses evaporasi keringat sehingga tubuh lebih mudah membuang panas. Dalam konteks iklim tropis lembap, fungsi sea breeze menjadi semakin signifikan karena kelembapan tinggi sering menghambat mekanisme pendinginan tubuh. Oleh sebab itu, keberadaan angin laut dapat menjadi faktor kompensasi yang menurunkan sensasi panas di lingkungan luar ruang, terutama pada jam-jam siang ketika radiasi matahari dan suhu udara sedang tinggi.

d. Ketidakmerataan Pengaruh *Sea Breeze*: Peran Koridor Angin

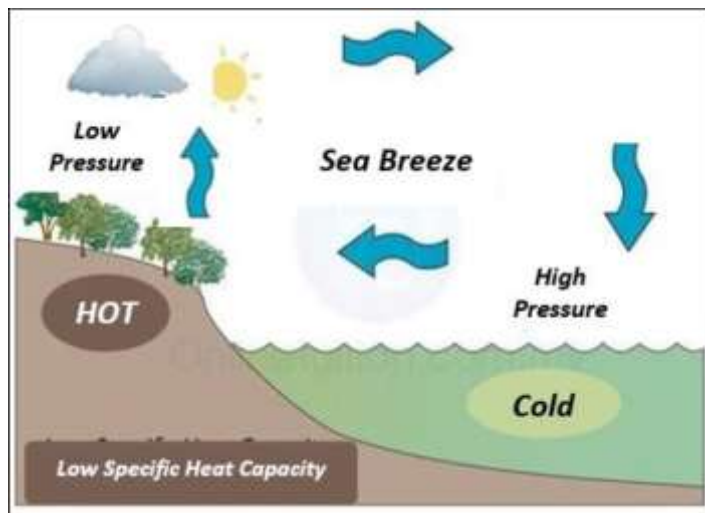
Meskipun sea breeze berpotensi menjadi pendingin alami pada kawasan pesisir, pengaruhnya tidak selalu dirasakan merata di seluruh titik permukiman. Ketidakmerataan ini terjadi karena aliran angin laut tidak bergerak secara seragam, melainkan dipengaruhi oleh struktur ruang yang dilalui. Dalam konteks kota pesisir, interaksi angin laut dengan dinamika atmosfer perkotaan seperti pulau panas (*Urban Heat Island*) dapat mengubah pola propagasi angin, sehingga sebagian area menerima hembusan lebih kuat, sementara area lain relatif lebih lemah. (Hu et al., 2022)

Koridor angin menjadi elemen spasial yang menentukan apakah angin laut dapat masuk dan bekerja efektif di dalam jaringan permukiman. Koridor angin dipahami sebagai jalur ruang luar misalnya ruas jalan, gang, atau sela antar bangunan yang memungkinkan aliran udara bergerak dari arah pantai menuju bagian permukiman yang lebih dalam. Keberadaan koridor yang cukup terbuka dan terhubung langsung dengan arah angin dominan akan memperkuat aliran pada level pejalan kaki dan mempercepat proses penggantian massa udara panas. Prinsip ini sejalan dengan konsep klasik street canyon yang menekankan bahwa bentuk ruang jalan memengaruhi pola aliran dan pencampuran udara, sehingga kualitas koridor angin tidak dapat dilepaskan dari geometri ruang (misalnya aspek rasio H/W) (Ngan & Lo, 2017).

Sebaliknya, pada permukiman dengan koridor sempit, banyak belokan, serta kepadatan bangunan tinggi, aliran angin laut dapat melemah sebelum mencapai bagian dalam kawasan. Dalam kondisi ini, koridor angin kehilangan kemampuan untuk “membilas” udara panas pada level pejalan kaki, sehingga panas lebih mudah terakumulasi dan kenyamanan termal menurun. Penelitian mengenai sea breeze cooling capacity menunjukkan bahwa efek pendinginan angin laut sangat dipengaruhi kondisi spasial dan morfologi kota, termasuk karakter bangunan yang dapat menurunkan intensitas

angin dan membatasi jangkauan pendinginannya (Y. Zhou et al., 2019).

Dengan demikian, ketidakmerataan pengaruh sea breeze pada permukiman pesisir tidak cukup dijelaskan hanya oleh faktor cuaca regional, tetapi terutama oleh bagaimana ruang permukiman membentuk dan mempertahankan koridor angin. Artinya, lokasi yang berada pada iklim pesisir yang sama tetap dapat memiliki pengalaman termal berbeda karena kualitas jalur aliran anginnya tidak setara. Pemahaman ini penting untuk penelitian disertasi karena menegaskan bahwa strategi peningkatan kenyamanan termal pesisir harus menyeimbangkan dua hal: menjaga koridor angin tetap terbuka agar pendinginan konvektif bekerja efektif, sekaligus mengendalikan beban radiasi melalui peneduhan dan pengelolaan bentuk ruang (Ribeiro et al., 2018).



Gambar 1. 2. Sirkulasi angin laut (Sea Breeze) (Jones, D., 2015)

1.6.3. Variabel Mikroklimat Kunci untuk Kenyamanan Termal

- 1) T_a , RH, v , dan MRT: Fungsi dan Peran Masing-Masing
 Kenyamanan termal pada ruang luar dibentuk oleh kombinasi variabel mikroklimat utama, yaitu suhu udara (T_a), kelembapan relatif (RH), kecepatan angin (v), dan suhu radiasi rata-rata atau Mean Radiant Temperature (MRT). T_a menggambarkan kondisi panas lingkungan yang memengaruhi perpindahan panas sensibel antara tubuh dan udara. RH berperan dalam menentukan efektivitas penguapan keringat; semakin tinggi kelembapan, semakin sulit tubuh melepas

panas melalui evaporasi sehingga sensasi panas meningkat. Kecepatan angin (v) menjadi faktor yang membantu pendinginan melalui konveksi sekaligus mempercepat penguapan keringat. Sementara itu, MRT merepresentasikan beban radiasi yang diterima tubuh akibat radiasi matahari, langit, dan pantulan dari permukaan sekitar. Literatur kajian outdoor thermal comfort menegaskan bahwa variabel-variabel ini merupakan parameter paling berpengaruh untuk menjelaskan variasi kenyamanan termal di ruang luar.

2) Penekanan pada Iklim Tropis Lembap: MRT dan v sebagai Faktor Paling Menentukan

Pada iklim tropis lembap, kontribusi MRT dan v cenderung lebih dominan dibanding T_a semata. MRT sering menjadi penentu utama karena radiasi matahari tropis yang kuat, ditambah pantulan permukaan keras seperti aspal dan dinding bangunan, dapat menaikkan beban panas tubuh secara drastis meskipun suhu udara tidak terlalu ekstrem. Studi klasik berbasis pengukuran dan pemodelan menunjukkan bahwa pengurangan MRT melalui peneduhan (misalnya oleh pohon) merupakan strategi paling efektif untuk meningkatkan kenyamanan termal di ruang luar.

Di sisi lain, kecepatan angin (v) berfungsi sebagai “pendingin alami” yang sangat terasa dalam konteks tropis karena mampu mengurangi stres panas melalui pendinginan konvektif. Penelitian di kawasan pesisir menunjukkan bahwa di antara variabel meteorologis (T_a , RH, radiasi, dan angin), kecepatan angin sering muncul sebagai parameter paling kritis yang menentukan perubahan kenyamanan termal outdoor.

3) Hubungan Variabel Mikroklimat dengan Persepsi Panas (TSV)

Selain indikator fisik, persepsi manusia terhadap panas umumnya direkam menggunakan *Thermal Sensation Vote* (TSV), yaitu penilaian sensasi termal yang mengacu pada skala tujuh tingkat dari -3 (dingin) sampai +3 (panas). Skala TSV ini luas digunakan dalam studi kenyamanan termal dan mengacu pada pedoman survei persepsi termal. Dalam praktiknya, perubahan T_a dan MRT umumnya berkorelasi dengan peningkatan nilai TSV (terasa lebih panas), sedangkan peningkatan kecepatan angin cenderung menurunkan nilai TSV karena tubuh lebih mudah melepas panas. Temuan terbaru juga menunjukkan bahwa sensasi termal (TSV) dapat sangat sensitif terhadap perubahan angin, terutama dalam kondisi lingkungan yang dinamis, sehingga variabel v dan MRT perlu dipahami sebagai variabel kunci ketika menjelaskan persepsi panas masyarakat tropis.

Dengan demikian, pada permukiman pesisir tropis lembap, analisis kenyamanan termal tidak cukup jika hanya membaca T_a dan RH , tetapi perlu menempatkan MRT dan v sebagai variabel dominan yang menjelaskan variasi sensasi panas antar lokasi. Kerangka ini selaras dengan tujuan disertasi untuk mengaitkan perubahan mikroklimat dengan faktor spasial seperti SVF , H/W , vegetasi, dan koridor angin, agar variasi kenyamanan termal dapat dipahami secara lebih kontekstual di permukiman pesisir.

1.6.4. Morfologi Permukiman: SVF dan H/W

Morfologi permukiman merupakan salah satu faktor utama yang membentuk kualitas mikroklimat pada ruang luar. Bentuk ruang yang terbentuk dari susunan massa bangunan, lebar jalan, orientasi koridor, serta keberadaan elemen peneduh akan memengaruhi dua mekanisme termal yang paling dominan pada iklim tropis lembap, yaitu paparan radiasi dan kekuatan koridor angin. Karena itu, dua permukiman pada wilayah pesisir yang sama dapat memiliki pengalaman termal yang berbeda jika konfigurasi ruangnya berbeda, terutama dalam hal tingkat keterbukaan langit dan kemampuan angin laut menembus kawasan. Kerangka ini sejalan dengan pendekatan urban climate yang menempatkan geometri street canyon sebagai elemen dasar iklim mikro kota.

1) *Urban Canyon* dan Rasio (H/W)

Konsep *urban canyon* menjelaskan ruang jalan atau gang yang dibatasi bangunan di sisi kiri dan kanan, sehingga membentuk koridor yang memiliki karakter “terbuka” atau “terkungkung”. Parameter utama untuk membaca kondisi ini adalah rasio H/W , yaitu perbandingan antara tinggi bangunan (H) dan lebar jalan/ruang antar bangunan (W). Nilai H/W yang kecil biasanya menggambarkan ruang yang lebih terbuka, sedangkan nilai H/W yang besar menunjukkan koridor jalan yang sempit dan tertutup. Rasio ini penting karena menentukan bagaimana aliran udara bergerak dan bercampur di dalam koridor, termasuk apakah angin dapat mencapai level pejalan kaki secara efektif atau justru melemah karena terhalang bentuk ruang.

Secara mekanisme, H/W berhubungan langsung dengan kekuatan koridor angin di dalam permukiman. Pada koridor yang sangat sempit dan terkungkung, aliran angin cenderung membentuk pusaran (*vortex*) yang membuat pergerakan udara di permukaan jalan tidak selalu lancar. Sebaliknya, pada koridor yang lebih terbuka, aliran angin cenderung lebih mudah masuk dan melewati ruang, sehingga membantu proses “pembilasan” udara panas. Oke (1988)

menunjukkan bahwa perbedaan nilai H/W dapat menghasilkan rezim aliran yang berbeda, mulai dari ruang yang sangat terbuka hingga ruang yang sangat terkungkung. Dengan demikian, H/W dapat digunakan sebagai indikator awal untuk menilai apakah suatu permukiman berpotensi memiliki koridor angin yang efektif atau tidak. Pada penelitian ini, konsep H/W relevan karena permukiman pesisir seperti Kelurahan Pohe tidak hanya dipengaruhi oleh angin laut, tetapi juga oleh apakah koridor jalan dan sela bangunan memungkinkan angin tersebut menembus ke dalam permukiman. Jika H/W tinggi dan koridor sempit, manfaat *sea breeze* dapat melemah sebelum menjangkau area hunian yang lebih dalam. Sebaliknya, koridor yang lebih terbuka memberi peluang lebih besar bagi angin laut untuk mempertahankan kecepatannya dan membantu menurunkan tekanan panas pada ruang luar. Kerangka ini penting untuk membaca variasi termal antar titik pengamatan dalam satu kawasan pesisir.

2) SVF sebagai Indikator Keterbukaan Langit

Selain H/W, indikator morfologi yang sangat penting dalam kajian kenyamanan termal outdoor adalah SVF. SVF menjelaskan seberapa besar proporsi langit yang terlihat dari suatu titik pengamatan. Secara konseptual, SVF tinggi menunjukkan ruang terbuka dengan pandangan langit luas, sedangkan SVF rendah menggambarkan ruang yang tertutup oleh bangunan atau vegetasi. SVF banyak digunakan karena mampu menyederhanakan bentuk ruang tiga dimensi menjadi satu parameter yang mudah dibandingkan antar titik pengamatan.

Dalam kajian iklim perkotaan, SVF dipahami sebagai “jembatan” antara bentuk ruang dan proses termal, terutama terkait radiasi. Titik dengan SVF tinggi umumnya lebih mudah menerima radiasi matahari langsung dan radiasi langit, sehingga beban panas radiasi (yang tercermin pada MRT/Tmrt) cenderung meningkat pada siang hari. Sebaliknya, SVF rendah sering mengurangi radiasi langsung karena ruang lebih terlindungi oleh obstruksi, tetapi kondisi ini juga dapat membuat pelepasan panas malam hari lebih lambat karena ruang lebih “menahan” energi panas. Karena itu, SVF tidak selalu menghasilkan kondisi yang lebih nyaman atau lebih panas secara tunggal, melainkan bergantung pada konteks waktu dan karakter permukaan sekelilingnya. Dari sisi metode, SVF dapat dihitung melalui berbagai pendekatan, mulai dari metode geometrik sederhana, foto hemisferis (*fish-eye*), hingga pemanfaatan *citra street view* dan model kota 3D. Dalam sejarah pengembangan metode, Johnson (1984) menjelaskan analisis SVF pada *urban canyon*, dan secara eksplisit menyebut Steyn (1980)

sebagai salah satu rujukan awal dalam perhitungan view factor menggunakan lensa *fisheye*. Dengan demikian, SVF memiliki dasar teori yang kuat dan berkembang luas untuk studi iklim perkotaan. Dalam konteks Indonesia, studi pada koridor pejalan kaki Jakarta juga menunjukkan bahwa SVF berkorelasi signifikan terhadap indikator kenyamanan termal seperti T_{mrt} dan PET, sehingga keterbukaan ruang menjadi faktor penting dalam menentukan kualitas termal ruang luar. Temuan ini memperkuat bahwa SVF dapat digunakan sebagai parameter evaluasi yang relevan pada lingkungan tropis, terutama untuk membaca dampak paparan radiasi pada siang hari.

- 3) Sintesis SVF dan H/W terhadap Kenyamanan Termal Pesisir
SVF dan H/W pada dasarnya menggambarkan dua dimensi kunci dari morfologi permukiman: keterbukaan radiasi dan kualitas koridor angin. SVF yang tinggi dapat meningkatkan paparan radiasi dan menaikkan T_{mrt} , sementara H/W yang tinggi dapat melemahkan koridor angin dan memperlambat pertukaran udara panas di permukaan. Artinya, ketidaknyamanan termal pada permukiman pesisir sering muncul ketika dua kondisi terjadi bersamaan: ruang sangat terbuka terhadap radiasi (SVF tinggi) tetapi koridor angin lemah akibat struktur permukiman yang rapat, atau sebaliknya, ruang sangat terkungkung sehingga panas terperangkap dan angin sulit masuk. Dengan demikian, analisis kenyamanan termal pada permukiman pesisir perlu membaca SVF dan H/W secara simultan, bukan terpisah, karena keduanya bekerja dalam hubungan timbal balik terhadap beban radiasi dan efektivitas pendinginan oleh angin laut.

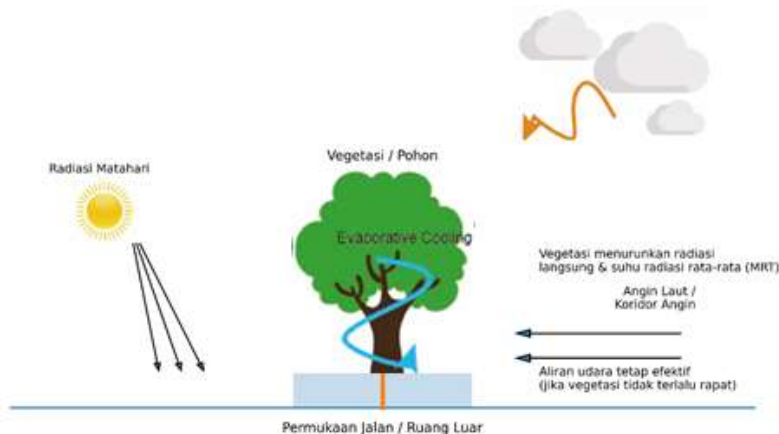
1.6.5. Vegetasi sebagai Mitigasi Panas dan Penguat kenyamanan Termal

Untuk memahami fenomena kenyamanan termal pada permukiman pesisir tropis, khususnya dalam konteks Kota Gorontalo. Kajian difokuskan pada hubungan antara variabel iklim mikro, karakter morfologi ruang, persepsi termal masyarakat, serta pendekatan pemodelan kenyamanan termal yang digunakan dalam penelitian. Dengan kerangka tersebut, kajian teori tidak hanya berfungsi sebagai rujukan konseptual, tetapi juga menjadi pijakan untuk menafsirkan temuan lapangan dan menyusun arah pemodelan yang sesuai dengan karakter lingkungan pesisir tropis lembap.

Dalam iklim tropis lembap, kenyamanan termal ruang luar bersifat sangat dinamis karena dipengaruhi radiasi matahari, perubahan kecepatan angin, kelembapan, serta interaksi dengan permukaan sekitar seperti jalan, dinding, atap, dan vegetasi. Ketidaknyamanan sering muncul lebih cepat

karena kelembapan tinggi menghambat penguapan keringat sehingga tubuh lebih sulit membuang panas, dan akibatnya sensasi “panas” dapat terasa lebih kuat dibanding angka suhu udara yang tercatat. Secara fisik, kondisi termal ruang luar dibentuk oleh kombinasi T_a , RH, v , dan terutama MRT yang sering menjadi faktor dominan akibat radiasi dan pantulan permukaan keras, sementara angin berperan sebagai kompensasi penting melalui pendinginan konvektif. Karena itu, evaluasi kenyamanan termal modern umumnya menggunakan indeks komposit seperti PET dan UTCI yang lebih sensitif terhadap perubahan iklimat outdoor dibanding indikator suhu udara saja.

Dari sisi pemodelan, penelitian ini menempatkan PMV (Model Fanger) sebagai baseline penting karena menjelaskan kenyamanan termal berbasis keseimbangan panas tubuh dan memasukkan faktor personal berupa metabolisme (M) serta isolasi pakaian (I_{cl}), yang kemudian diadopsi luas dalam ISO 7730. Namun, berbagai kajian menunjukkan bahwa PMV sering kurang representatif bila diterapkan langsung pada ruang luar tropis karena lingkungan lebih berubah-ubah dan adaptasi perilaku lebih dominan. Oleh sebab itu, penelitian ini mengintegrasikan pendekatan iklim perkotaan yang menekankan peran geometri ruang, khususnya konsep street canyon dari Oke yang menjelaskan perubahan pola aliran berdasarkan rasio H/W , serta konsep SVF sebagai indikator keterbukaan langit yang berhubungan dengan paparan radiasi dan pembentukan MRT; metode pengukuran SVF juga memiliki pijakan klasik melalui pendekatan view factor oleh Steyn. Dengan sintesis tersebut, kenyamanan termal permukiman pesisir dipahami sebagai interaksi iklimat (T_a , RH, v , MRT), morfologi (SVF, H/W , koridor angin), dan vegetasi; sehingga pengembangan model kenyamanan termal pesisir perlu memasukkan koreksi berbasis struktur ruang dan kemampuan koridor angin untuk menghasilkan analisis yang lebih kontekstual dan aplikatif dalam rekomendasi penataan permukiman.



Gambar 1. 3 Peran vegetasi dalam mitigasi panas melalui peneduh dan evapotranspirasi tanpa menghambat koridor angin pada ruang luar permukiman pesisir.

1.6.6. Vegetasi sebagai Mitigasi Panas dan Penguat kenyamanan Termal

Indeks kenyamanan termal digunakan untuk menerjemahkan kombinasi variabel mikroklimat menjadi satu nilai yang merepresentasikan tingkat kenyamanan atau stres panas yang dirasakan manusia. Pendekatan ini penting karena kondisi termal ruang luar tidak hanya ditentukan oleh suhu udara, tetapi juga oleh kelembapan, radiasi, dan angin yang bekerja secara simultan. Kajian tinjauan model kenyamanan termal menunjukkan bahwa perkembangan indeks termal mengalami perluasan dari konteks ruang dalam menuju ruang luar, termasuk penyesuaian terhadap populasi dan kondisi iklim tertentu.

1) *Predicted Mean Vote (PMV)*

PMV adalah indeks yang paling klasik dan banyak digunakan sebagai rujukan standar, terutama dalam evaluasi kenyamanan termal bangunan. PMV dikembangkan dari teori keseimbangan panas tubuh manusia dan memprediksi sensasi termal rata-rata populasi berdasarkan enam variabel utama: suhu udara, suhu radiasi rata-rata, kelembapan, kecepatan angin, aktivitas/metabolisme, dan isolasi pakaian. PMV kemudian diadopsi dan digunakan luas dalam standar internasional seperti ISO 7730.

Namun, keterbatasan PMV mulai terlihat ketika diterapkan pada ruang luar tropis yang sangat dinamis. Hal ini karena PMV pada dasarnya dikembangkan dari eksperimen ruang terkendali (climate chamber) dan lebih cocok untuk kondisi indoor yang stabil. Pada ruang luar, paparan radiasi yang berubah cepat, ketidakseragaman angin, serta adaptasi perilaku masyarakat dapat membuat hasil

prediksi PMV berbeda dari persepsi nyata. Studi terbaru juga menunjukkan bahwa akurasi PMV tidak selalu tinggi ketika dibandingkan dengan kenyamanan yang benar-benar dirasakan, sehingga PMV perlu digunakan dengan pendekatan kontekstual atau dikombinasikan dengan data persepsi lapangan.

2) PET (*Physiological Equivalent Temperature*)

PET merupakan indeks yang banyak digunakan dalam studi kenyamanan termal outdoor karena hasilnya dinyatakan dalam satuan °C, sehingga lebih mudah dipahami oleh perencana kota dan peneliti lintas disiplin. PET didefinisikan sebagai suhu udara pada kondisi referensi (tanpa angin dan tanpa radiasi langsung) yang menghasilkan respons fisiologis setara dengan kondisi luar ruang yang sedang dievaluasi. Karena bersifat berbasis keseimbangan energi tubuh, PET mampu menangkap efek gabungan radiasi, angin, dan kelembapan pada sensasi termal.

Dalam konteks tropis lembap dan kawasan pesisir, PET sering dianggap lebih representatif dibanding hanya menggunakan suhu udara karena PET sensitif terhadap peningkatan MRT akibat radiasi tropis yang kuat, sekaligus sensitif terhadap peran angin sebagai pendingin konvektif. Dengan demikian, PET dapat memberikan gambaran yang lebih realistis tentang tingkat stres panas pada ruang luar, terutama pada koridor jalan dan ruang terbuka yang terpapar matahari.

3) UTCI (*Universal Thermal Climate Index*)

UTCI dikembangkan sebagai indeks termal universal yang mengintegrasikan model fisiologis lebih kompleks dan mempertimbangkan respons tubuh manusia pada berbagai kondisi iklim. UTCI didefinisikan sebagai suhu udara setara pada kondisi referensi yang memunculkan respons fisiologis sama dengan kondisi nyata, sehingga indeks ini digunakan luas untuk menilai stres panas atau stres dingin pada skala bioklimatik.

Meski UTCI sangat kuat secara fisiologis dan cocok untuk evaluasi lintas iklim, penerapannya tetap perlu disesuaikan dengan konteks studi. Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa pada kondisi tertentu, sensitivitas UTCI terhadap kombinasi variabel dapat memunculkan keterbatasan interpretasi, sehingga pemilihan indeks harus mempertimbangkan tujuan penelitian, iklim, dan karakter lingkungan terbangun. Dengan kata lain, tidak ada satu indeks yang selalu paling tepat untuk semua kondisi; indeks harus dipilih atau dikalibrasi sesuai kebutuhan analisis.

4) Keterbatasan Indeks Standar untuk Permukiman Pesisir Tropis

Pada permukiman pesisir tropis, keterbatasan indeks kenyamanan termal umumnya muncul karena kondisi mikroklimat sangat dipengaruhi oleh fenomena lokal seperti angin laut (sea breeze), paparan radiasi ekstrem akibat keterbukaan langit, serta efek morfologi permukiman terhadap koridor angin. Indeks standar cenderung lebih akurat pada kondisi stabil, sedangkan pada kawasan pesisir, kecepatan angin dapat berubah cepat antar jam dan antar lokasi karena pengaruh koridor jalan, kepadatan bangunan, dan hambatan ruang. Oleh sebab itu, evaluasi kenyamanan termal pesisir lebih kuat jika tidak hanya menggunakan satu indeks, tetapi juga menggabungkan variabel morfologi (misalnya SVF, H/W, vegetasi) dan persepsi termal (TSV, kenyamanan, akseptabilitas) agar hasilnya benar-benar mencerminkan pengalaman masyarakat.

Dengan demikian, PMV, PET, dan UTCI dapat dipahami sebagai alat kuantitatif yang penting, tetapi tetap memiliki keterbatasan jika digunakan secara “langsung” tanpa mempertimbangkan konteks spasial tropis pesisir. Kerangka ini mendukung arah disertasi yang tidak berhenti pada evaluasi indeks termal, tetapi memperluasnya melalui koreksi berbasis parameter ruang (SVF, H/W), vegetasi, dan kekuatan koridor angin, sehingga model yang dihasilkan lebih kontekstual dan aplikatif untuk penataan permukiman pesisir Kota Gorontalo.

1.6.7. Physiological Equivalent Temperature (PET)

PET didefinisikan sebagai suhu fisiologis setara di suatu tempat tertentu (di luar ruangan atau di dalam ruangan) dan setara dengan suhu udara di mana, dalam pengaturan dalam ruangan yang khas, keseimbangan panas tubuh manusia (metabolisme kerja 80 W aktivitas ringan, ditambah metabolisme dasar; resistansi panas pakaian 0,9 clo) terjaga dengan suhu inti dan kulit yang sama dengan kondisi yang sedang dievaluasi.

Dasar perhitungan PET berasal dari *Munich Energy balance Model for Individuals* (MEMI) yang merupakan model keseimbangan panas termofisiologis (P Höpfe, 1993), (P Höpfe, 1999). Secara rinci model MEMI didasarkan pada persamaan keseimbangan energi untuk tubuh manusia:

$$M + W + R + C + ED + Ere + Esw + S = 0 \quad \dots\dots\dots (1.1)$$

di mana:

- M = Laju metabolisme
 W = Output pekerjaan fisik
 R = Radiasi netto tubuh
 C = Aliran panas konvektif
 ED = Aliran panas laten untuk menguapkan air yang menyebar melalui kulit
 Ere = Jumlah aliran panas untuk memanaskan atau melembabkan udara
 Esw = Aliran panas karena penguapan keringat
 S = Aliran penyimpanan panas untuk memanaskan atau mendinginkan massa tubuh

1.6.8. Temperature Humidity Index (THI)

Temperature Humidity Index (THI), merupakan metode yang digunakan dalam menganalisis tingkat kenyamanan termal pada ruang terbuka. Pengukuran tingkat kenyamanan termal yang tepat digunakan pada wilayah dengan iklim tropis, yaitu metode THI (Wijaya, 2011). Suhu merupakan parameter iklim yang langsung dirasakan oleh manusia, sebagai indikator kenyamanan. Kenyamanan yang dirasakan oleh manusia cenderung semakin berkurang karena sensasi panas, dengan indikasi suhu yang melebihi batas tertentu (Hidayat, 2010). Kenyamanan yang semakin tinggi dapat dilihat dengan indikasi yang turun dari batas tertentu, yakni suhu yang cenderung dingin.

Perhitungan THI dimanfaatkan untuk perencanaan pengembangan penataan ruang terbuka dan kota yang hijau, dan ramah lingkungan (Trinah et al., 2017). Indeks kenyamanan ini dihitung dengan menggunakan variabel suhu rata-rata (°C) dan persentase kelembaban relatif (%). Data yang digunakan berupa data harian, dengan hasil nilai indeks yang disesuaikan dengan kriteria.

Data suhu dan kelembaban, selanjutnya digunakan untuk mendapatkan nilai indeks THI, sebagai dasar penentuan kategori kenyamanan termal. Nilai THI dihitung berdasarkan rumus Nieuwolt (Nieuwolt, 1976) sebagai berikut:

$$THI = 0.8 t + \frac{(RH \times t)}{500} \dots\dots\dots (1.2)$$

$$THI = 0.55 t + 0.2d + 5.3 \dots\dots\dots (1.3)$$

THI adalah nilai indeks kenyamanan, T adalah suhu udara dalam satuan ($^{\circ}\text{C}$) dan RH adalah kelembaban relatif dalam satuan (%). Kemudian nilai indeks kenyamanan digunakan untuk menentukan kategori kenyamanan di wilayah kajian. Emmanuel (2005), (McGregor & Nieuwolt, 1998) mengategorikan kenyamanan berdasarkan penilaian responden yang kemudian didapat kategori berdasarkan rentang nilai THI yang terdapat pada Tabel 1.1.

Tabel 1. 1. Nilai Indeks Kenyamanan berdasarkan nilai THI

Nilai indeks	Tingkat kenyamanan termal
21-24	Nyaman
25-26	Sangat tidak nyaman
>26	Tidak nyaman

Sumber: Nieuwolt and Mc Gregor 1998

Tabel 1. 2. Kategori Kenyamanan berdasarkan nilai THI

No	Kategori	McGregor dan Nieuwolt (1998)	Laurie (1986)	Mudiyarso dan Suharsono (1992)	Frik dan Suskiyanto (1998)
1	Sangat Nyaman	< 19	-	-	-
2	Nyaman	19 - < 22	21 - < 27	-	< 29.0
3	Sedang	23 - < 26	-	-	-
4	Tidak Nyaman	>27	>27	>27	29.0 – 30.5
5	Sangat Tidak Nyaman	-	-	-	> 30.5

1.7. Kerangka Konseptual, Kerangka Berpikir dan Hipotesis Penelitian

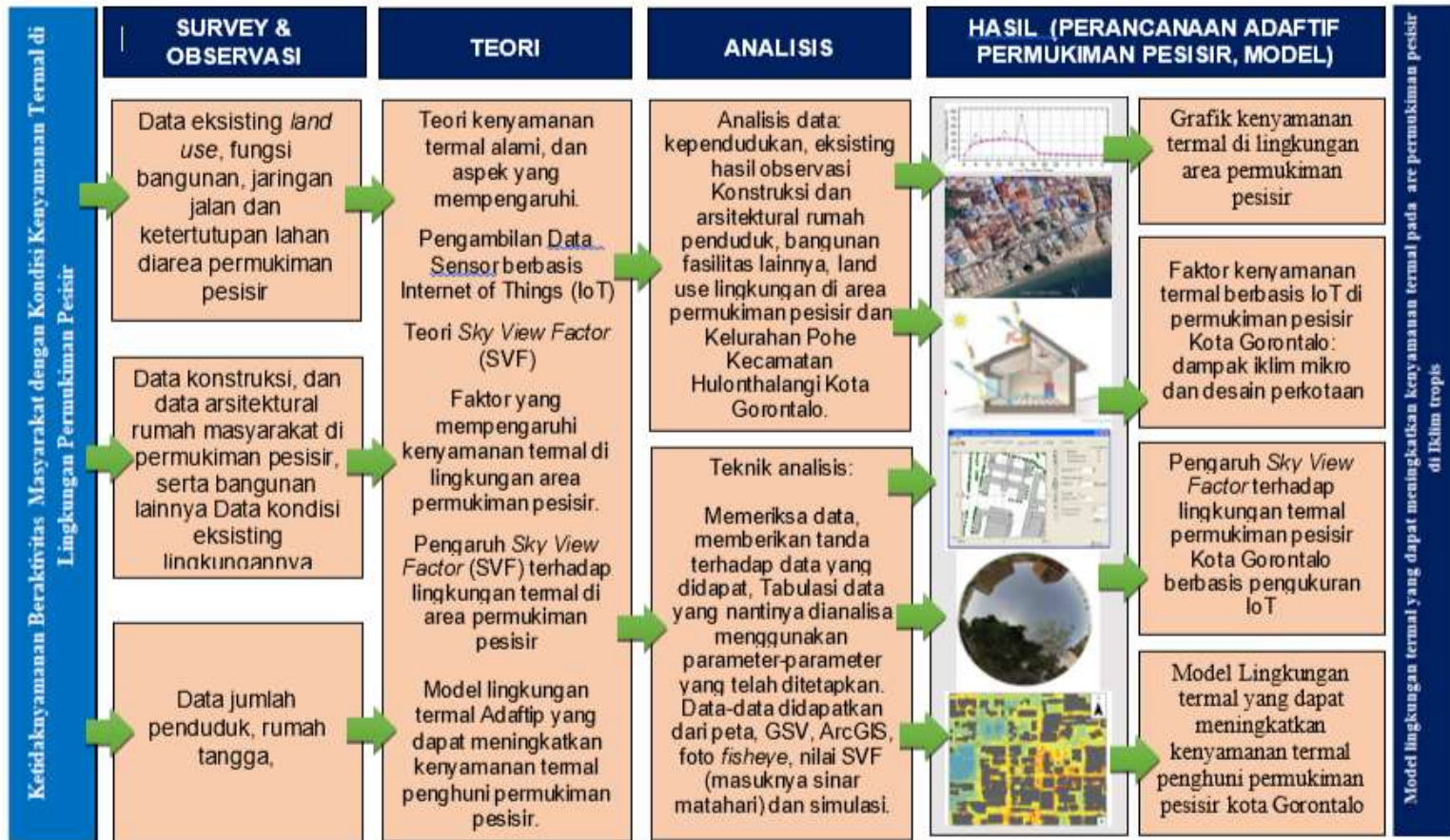
1.7.1. Kerangka Konseptual

Kerangka konseptual pada Gambar 1.3 menggambarkan hubungan kausal antara faktor iklim mikro, morfologi ruang perkotaan, dan kenyamanan termal penghuni di lingkungan permukiman pesisir Kota Gorontalo. Penelitian ini berangkat dari pemahaman bahwa kenyamanan termal di kawasan pesisir tropis lembab dipengaruhi oleh kombinasi antara parameter fisik lingkungan (suhu, kelembapan, dan kecepatan angin) serta kondisi spasial seperti *Sky View Factor* (SVF), rasio tinggi terhadap lebar ruang (H/W), dan vegetasi sekitar (Oke, 1988; Middel et al., 2017). Bentuk dan kepadatan ruang permukiman menentukan kapasitas lingkungan dalam melepas panas

melalui ventilasi dan radiasi, sehingga secara langsung membentuk kondisi mikroklimat yang dirasakan penghuni (Zhu et al., 2022).

Untuk memahami hubungan tersebut secara empiris, penelitian ini menggunakan pengukuran berbasis *Internet of Things* (IoT) guna merekam parameter suhu udara, kelembapan relatif, dan intensitas radiasi secara real-time di beberapa titik permukiman pesisir. Pendekatan ini memungkinkan analisis termal dengan resolusi waktu tinggi sehingga mampu menangkap variasi harian dan spasial yang sulit diperoleh melalui metode konvensional (Liu et al., 2023; Elnabawi & Hwang, 2024). Selanjutnya, data mikroklimat tersebut diintegrasikan dengan hasil pengukuran morfologi ruang (SVF) yang diperoleh melalui analisis citra hemisferis (fisheye) dan observasi spasial lapangan. Kedua set data ini digunakan untuk membangun hubungan antara bentuk ruang, kondisi termal aktual, dan persepsi kenyamanan penghuni.

Interaksi antara parameter fisik lingkungan dan respon adaptif manusia menjadi dasar bagi penyusunan model lingkungan termal adaptif. Model ini menunjukkan bahwa bentuk ruang yang padat dengan nilai SVF rendah cenderung meningkatkan suhu dan menurunkan kenyamanan, sedangkan konfigurasi ruang terbuka dan vegetasi mampu meningkatkan ventilasi alami serta mengurangi beban panas. Dengan demikian, kerangka konseptual ini mengintegrasikan dimensi fisik (morfologi dan iklim mikro) dan sosial (perilaku adaptif dan persepsi kenyamanan) dalam satu sistem yang saling memengaruhi, sejalan dengan teori *adaptive thermal comfort* yang menekankan pentingnya interaksi dua arah antara manusia dan lingkungan (de Dear & Brager, 1998).



Gambar 1. 4. Kerangka Konseptual

1.7.2. Kerangka Pikir Penelitian



Gambar 1. 5. Kerangka Pikir Penelitian

1.7.3. Hipotesis Penelitian

1. Hipotesis umum (*grand hypothesis*)

H₀: Integrasi iklim mikro, SVF, dan persepsi penghuni tidak meningkatkan akurasi prediksi kenyamanan termal.

H₁: Integrasi iklim mikro, SVF, dan persepsi penghuni meningkatkan secara signifikan akurasi prediksi kenyamanan termal dibandingkan pendekatan parsial.

2. Hipotesis 1 – Hubungan Iklim Mikro

H₁: Faktor iklim mikro (suhu udara, kelembaban relatif, dan kecepatan angin) berpengaruh signifikan terhadap kondisi kenyamanan termal di permukiman pesisir Kota Gorontalo.

2. Hipotesis 2 – SVF dan Morfologi

H₂: Aspek Sky View Factor (SVF) berpengaruh signifikan terhadap kondisi termal dan kenyamanan termal di permukiman pesisir Kota Gorontalo.

3. Hipotesis 3 – Model Integratif

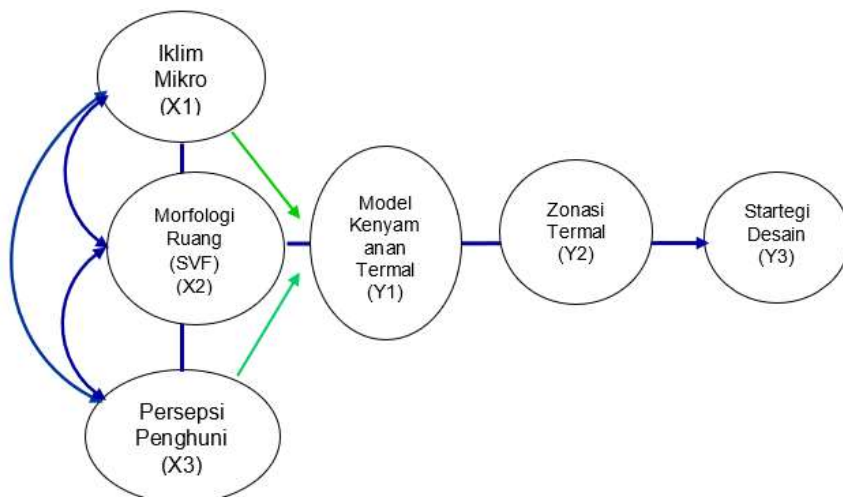
H₃: Model kenyamanan termal adaptif berbasis integrasi iklim mikro, SVF, dan persepsi penghuni memberikan akurasi prediksi yang lebih tinggi dibanding model parsial.

4. Hipotesis 4 – Output Spasial

H₄: Nilai kenyamanan termal hasil model (Y1) dapat diklasifikasikan secara signifikan menjadi zona nyaman, transisi, dan kritis yang konsisten secara spasial.

5. Hipotesis 5 – Implikasi Desain

H₅: Zonasi termal (Y2) secara signifikan memandu penentuan strategi desain adaptif (Y3)



Integrasi mikroklimat, SVF, dan persepsi penghuni menghasilkan model kenyamanan termal yang lebih akurat dan kontekstual, yang dapat ditransformasikan menjadi zonasi spasial dan strategi desain adaptif di permukiman pesisir tropis.

1.8. State of The Art dan Research Gap Penelitian

Perkembangan penelitian tentang kenyamanan termal menunjukkan pergeseran dari pendekatan fisiologis menuju model hibrida yang lebih adaptif terhadap perilaku manusia dan karakteristik morfologi lingkungan. Model fisiologis klasik yang dikembangkan oleh (Fanger, 1970) serta menjadi dasar bagi ASHRAE 55 dan ISO 7730, telah memberikan landasan teoretis penting. Namun, penerapannya di ruang luar tropis lembap dinilai kurang representatif karena mengabaikan aspek adaptasi perilaku dan kondisi mikroklimat. Sejak (Nikolopoulou et al., 2001) memperkenalkan faktor perilaku dalam kenyamanan termal, penelitian lapangan di Indonesia seperti (Feriadi & Wong, 2004) dan (Sangkertadi, 2013) menegaskan pentingnya konteks sosial dan iklim lokal dalam memahami kenyamanan termal masyarakat tropis. Perhatian ilmiah kemudian berkembang pada pengaruh morfologi perkotaan, sebagaimana terlihat pada studi (Liang Chen et al., 2012) di Hong Kong, Lin et al. (2014) di Taiwan, dan (Tarigan et al., 2024) di Jakarta yang menyoroti variabel seperti rasio tinggi-lebar bangunan (H/W), ruang terbuka hijau (RTH), serta Sky View Factor (SVF). Namun, penelitian-penelitian tersebut masih terfragmentasi dan belum mengintegrasikan parameter morfologi dengan indeks fisiologis seperti PMV dalam satu model matematis yang komprehensif.

Sementara itu, kajian di kawasan pesisir seperti yang dilakukan oleh (Hamzah et al., 2018) dan (Mulyadi et al., 2020) menunjukkan perlunya penyesuaian model PMV dengan mempertimbangkan pengaruh angin laut dan bentuk morfologi, meski keduanya masih terbatas pada validasi deskriptif. Tren penelitian global terbaru memperlihatkan arah yang lebih multidisipliner dan kuantitatif, sebagaimana ditunjukkan oleh (Qiantao Zhao et al., 2021), (Aghamolaei et al., 2023), dan (Fujiwara et al., 2024), yang menekankan integrasi lintas disiplin, serta (Özbey & Turhan, 2024), (Fujiwara et al., 2024), (Costa et al., 2024) dan (Jayasooriya et al., 2025) yang memperkuat analisis tentang peran vegetasi dan SVF.

Permukiman pesisir di kawasan tropis, termasuk di Kota Gorontalo, menghadapi tekanan nyata akibat peningkatan suhu permukaan dan perubahan pola angin laut yang memperburuk stres termal bagi penghuni (IPCC, 2018). Kondisi ini menuntut pendekatan desain berbasis data empiris dan model prediktif yang mempertimbangkan karakter iklim mikro, morfologi

ruang, serta vegetasi lokal (Costa et al., 2024; Mendes et al., 2025). Penelitian di kawasan pesisir Indonesia menunjukkan bahwa adaptasi desain berbasis ventilasi alami, bayangan vegetasi, dan orientasi bangunan menjadi kunci peningkatan kenyamanan termal (Hamzah, 2018; Mulyadi, 2019; Sangkertadi, 2016).

Dengan demikian, masih terdapat kesenjangan riset berupa ketiadaan model adaptif yang secara khusus dirancang untuk wilayah pesisir tropis lembap dan mampu mengintegrasikan variabel PMV, H/W, SVF, vegetasi, dan angin secara simultan. Untuk menjawab hal tersebut, Amru et al. (2025) mengembangkan Model, yaitu model adaptif morfologi berbasis data lapangan yang dikumpulkan melalui sistem sensor IoT, sebagai langkah inovatif dalam merumuskan pendekatan kenyamanan termal yang lebih kontekstual dan representatif bagi kawasan pesisir tropis.

Tabel 1. 3. *State of The Art*

No	Peneliti / Standar	Lokasi / Lingkup Studi	Pendekatan / Variabel	Temuan Utama	Gap / Keterbatasan	Kontribusi Penelitian Ini (2025)
1	Fanger (1970)	Lab iklim sedang	PMV–PPD fisiologis	Standar fisiologis global	Tidak adaptif tropis lembap	Basis fisiologis model baru
2	ASHRAE 55 (1981; revisi 2017, 2020)	Standar internasional	PMV–PPD + adaptif	Standar global indoor	Tidak kontekstual tropis outdoor	Perlu koreksi lokal
3	ISO 7730 (1984, 2005, 2021)	Standar global	PMV–PPD (ISO)	Standar kenyamanan	Tidak akurat outdoor tropis	Validasi → perlu adaptasi
4	Nikolopoulou et al. (2001)	Eropa	Outdoor comfort, perilaku	Faktor perilaku signifikan	Tidak kuantifikasi morfologi	Basis integrasi adaptif
5	Feriadi & Wong (2004)	Indonesia	PMV vs kenyamanan aktual	Penghuni lebih sejuk	Belum pesisir	Validasi bias PMV
6	Lin et al. (2014)	Taiwan (subtropis)	SVF vs PET	SVF signifikan turunkan PET	Belum integrasi dengan PMV, bukan konteks pesisir	Integrasi SVF dengan PMV untuk wilayah pesisir di iklim tropis
7	Ng & Cheng (2012)	Hongkong	Urban thermal comfort	Morfologi urban dominan	Tidak ada model matematis	Relevansi tropis padat
8	Sangkertadi (2013, 2016)	Indonesia	Outdoor comfort, PMV vs TSV	Angin & radiasi dominan	Tidak masukkan SVF	Variabel iklim mikro

9	Karyono (2010)	Indonesia	Kenyamanan–energi	Efisiensi energi	Tidak fokus outdoor	Integrasi kenyamanan–energi
10	Karyono (2016)	Indonesia	Arsitektur tropis	Strategi desain kenyamanan	Teoritis	Basis arsitektural
11	Baharuddin Hamzah (2018)	Pesisir Sulawesi	PMV vs TSV	Deviasi signifikan, angin laut penting	Hanya validasi, tanpa modifikasi	Basis koreksi pesisir
12	Rosady Mulyadi (2019)	Gorontalo makassar	PMV vs TSV	Morfologi dominan	Tidak ada persamaan korektif	Basis empiris morfologi
13	Baruti (2019)	Review lembap	Literatur	Gap pesisir informal	Tidak ada model	Justifikasi pesisir
14	Zhao et al. (2021)	Global	Review model kenyamanan	Tren perkembangan	Umum, tidak kontekstual	Landasan teoritis
15	Hermawan & Švajlenka (2022)	Indonesia	Vernakular pesisir vs pegunungan	Adaptasi morfologi signifikan	Tidak ada indeks fisiologis	Integrasi H/W & ventilasi
16	Arif & Yola (2022)	Jakarta sidewalk	SVF & kenyamanan pedestrian	SVF signifikan	Fokus pedestrian	Bukti empiris SVF di tropis
17	Aghamolaei et al. (2023)	Global review	<i>Outdoor Thermal Comfort (OTC)</i>	Identifikasi parameter efektif (iklim mikro, morfologi, sosial)	Tidak spesifik pesisir tropis	Peta riset global terkini
18	Tarigan et al. (2024)	Jakarta (MH Thamrin)	<i>Urban canyon</i> (H/W), RTH	RTH & H/W pengaruhi kenyamanan	Tidak integrasi PMV, H/W hanya kualitatif	Validasi variabel H/W untuk model kuantitatif
19	Costa et al. (2024)	Global	OTC + morfologi	Integrasi PMV, PET, UTCI	Tidak ada model pesisir	Landasan hibrid

20	Jayasooriya et al. (2024)	Tropis	Vegetasi + SVF	Vegetasi turunkan panas	Tidak hubungkan ke PMV	Variabel vegetasi penting
21	Mendes et al. (2025)	Brasil (kampus)	PET + SVF mapping	SVF optimal 0.35 - 0.55	Fokus kampus	Acuan SVF kuantitatif
22	Siola, A et.al (2025)	Pesisir Gorontalo	Persaaman/Model terbaru: integrasi PMV (H/W + SVF + vegetasi + angin)	Model empiris matematis berbasis tropis pesisir	Belum pernah ada model sejenis	Mengembangkan model baru untuk kenyamanan termal pesisir

Tabel 1. 4. *Research Gap* dan Kontribusi Penelitian

Aspek Penelitian	Kesenjangan Penelitian (Research Gap)	Kontribusi Penelitian Disertasi ini
Model Kenyamanan Termal	Model global seperti PMV (Fanger), Adaptive ASHRAE, atau PET/UTCI masih berorientasi pada konteks subtropis dan ruang dalam; kurang sesuai untuk iklim tropis lembab, khususnya pesisir (de Dear et al., 2020; Yang et al., 2021; (T. Liu et al., 2025)	Mengembangkan Model Kenyamanan Termal Pesisir yang disesuaikan dengan karakteristik tropis lembab dan konteks permukiman pesisir Indonesia (lokal Gorontalo).
Variabel Lingkungan & Morfologi	Sebagian besar penelitian hanya menyoroti parameter iklim mikro (Ta, RH, v), sementara faktor morfologi seperti <i>Sky View Factor</i> (SVF), vegetasi, albedo, dan kerapatan bangunan jarang diintegrasikan dalam model termal pesisir (Xiang, 2022).	Mengintegrasikan parameter iklim mikro + variabel morfologi permukiman (SVF, vegetasi, albedo, jarak antar bangunan, orientasi angin) ke dalam formulasi model kenyamanan termal pesisir.

Metodologi Pengukuran	Sebagian besar penelitian masih menggunakan pengukuran manual (snapshot) dengan data terbatas pada waktu tertentu. Monitoring spasial temporal <i>real time</i> masih sangat jarang diterapkan di permukiman pesisir tropis (Gupta et al., 2022; Rahman et al., 2023).	Menerapkan sensor IoT berbasis real-time monitoring untuk memperoleh data termal spasial temporal secara berkelanjutan di 6 titik ukur pada permukiman pesisir Kota Gorontalo.
Konteks Studi	Penelitian termal banyak berfokus pada ruang dalam (<i>indoor</i>) atau pusat kota (<i>urban core</i>). Penelitian di permukiman pesisir tropis sangat terbatas, terutama di Indonesia (Santamouris, 2021; Li et al., 2020).	Mengisi kekosongan dengan fokus pada permukiman pesisir tropis Kota Gorontalo sebagai studi kasus, yang mewakili konteks unik dengan kelembaban tinggi, paparan angin laut, dan UHI lokal.
Kontribusi Praktis	Literatur yang ada lebih menekankan kajian ilmiah tanpa secara langsung menurunkan rekomendasi perencanaan lingkungan pesisir yang aplikatif.	Memberikan rekomendasi desain dan kebijakan tata ruang pesisir adaptif iklim, yang dapat diimplementasikan oleh pemerintah daerah dan perencana kota.
Kontribusi Teoretis	Literatur termal tropis masih parsial, belum ada model integratif yang diuji untuk konteks pesisir.	Memberikan kontribusi teoretis berupa formulasi baru kenyamanan termal, memperkaya literatur global kenyamanan termal di iklim tropis lembab.

Tabel 1. 5. Penelitian Terdahulu

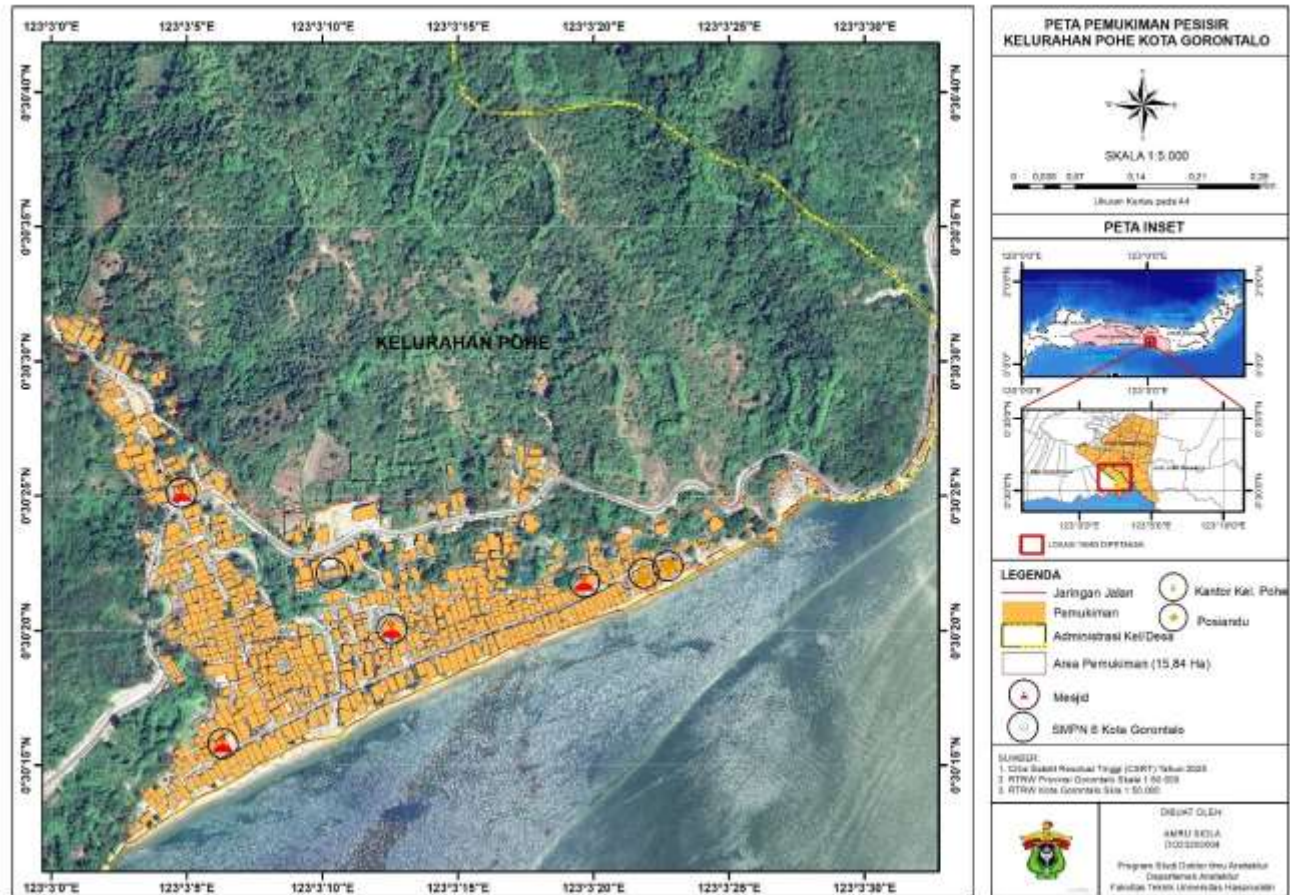
No	Peneliti & Tahun	Lokasi / Lingkup Studi	Temuan Utama	Relevansi
1	Fanger (1970)	Iklim sedang, lab	Mengembangkan PMV–PPD fisiologis	Fondasi standar kenyamanan
2	ASHRAE 55 (1981; revisi 2017, 2020)	Standar internasional	Kriteria kenyamanan termal (PMV & adaptif)	Rujukan global
3	ISO 7730 (1984; revisi 2005, 2021)	Standar global	Menetapkan PMV–PPD berbasis fisiologis	Basis penggunaan PMV
4	Nikolopoulou et al. (2001)	Ruang luar perkotaan, Eropa	Faktor perilaku signifikan dalam kenyamanan outdoor	Dasar model adaptif outdoor
5	Feriadi & Wong (2004)	Indonesia	Preferensi penghuni ≠ prediksi PMV	Bukti bias PMV di tropis
6	Karyono (2010)	Indonesia	Kenyamanan termal & efisiensi energi	Hubungkan kenyamanan–energi
7	Ng & Cheng (2012)	Hongkong	Morfologi urban memengaruhi kenyamanan	Konteks tropis padat
8	Sangkertadi (2013; 2016)	Indonesia	Outdoor comfort: angin & radiasi dominan	Variabel penting tropis
9	Lin, Tsai, Liao, & Huang (2014)	Taiwan (subtropis)	SVF berpengaruh signifikan terhadap PET; SVF kecil → lebih sejuk	Memvalidasi peran SVF; dasar integrasi SVF dalam model
10	Karyono (2016)	Indonesia	Arsitektur tropis & kenyamanan	Basis desain iklim tropis

11	Baharuddin Hamzah (2018)	Sulawesi pesisir	PMV vs TSV → deviasi signifikan; angin laut penting	Perlu modifikasi PMV
12	Rosady Mulyadi (2019)	Gorontalo pesisir	PMV vs TSV → dipengaruhi morfologi	Basis empiris morfologi
13	Baruti (2019)	Review iklim lembap	Gap riset pesisir informal	Justifikasi studi pesisir
14	Zhao, Lian, & Lai (2021)	Global review	Perkembangan model kenyamanan	Basis metodologi baru
15	Arif & Yola (2022)	Jakarta sidewalk	SVF signifikan pada kenyamanan pedestrian	Bukti empiris variabel SVF
16	Hermawan & Švajlenka (2022)	Pesisir vs pegunungan, Indonesia	Adaptasi morfologi signifikan	Relevansi H/W & ventilasi
17	Aghamolaei et al. (2023)	Global review OTC	Parameter efektif & pendekatan OTC di kota	Tinjauan komprehensif terkini
18	Costa et al. (2024)	Global	Integrasi PMV, PET, UTCI + SVF, vegetasi, H/W	Landasan model hibrid
19	Jayasooriya et al. (2024)	Perkotaan tropis	Vegetasi menurunkan beban panas & memodulasi SVF	Variabel vegetasi penting
20	Tarigan et al. (2024) – MH Thamrin, Jakarta	Koridor jalan urban (street canyon)	H/W dan kerapatan RTH memengaruhi kenyamanan; analisis atribut termal tapak	Validasi efek urban canyon (H/W); belum integrasi PMV
21	Mendes et al. (2025)	Brasil, kampus	Ambang SVF optimal 0.35–0.55 untuk kenyamanan	Acuan SVF kuantitatif

1.9. Lokasi Penelitian

Kelurahan Pohe merupakan kawasan permukiman pesisir di Kecamatan Hulonthalangi, Kota Gorontalo, yang jarak dari pusat Kota Gorontalo berkisar 8 (delapan) Km, dan dengan kondisi geografis yang sangat dipengaruhi kedekatannya dengan pantai. Secara spasial, perkembangan permukiman cenderung mengikuti jaringan jalan dan aktivitas masyarakat di tepi laut sehingga membentuk koridor-koridor ruang luar yang menjadi jalur utama pergerakan udara. Karakter ini penting dalam kajian kenyamanan termal karena iklim mikro pesisir tidak hanya ditentukan oleh suhu dan kelembapan, tetapi juga dipengaruhi dinamika angin laut (*sea breeze*), paparan radiasi matahari, serta konfigurasi fisik lingkungan seperti kepadatan bangunan dan keterbatasan vegetasi peneduh. Oleh karena itu, Pohe menjadi lokasi yang relevan untuk mengkaji hubungan antara variabel iklim mikro (T_a , RH, v , MRT) dengan elemen spasial seperti koridor angin dan tingkat keterbukaan ruang yang secara langsung membentuk pengalaman termal masyarakat.

Selain aspek fisik, Pohe juga memiliki karakter sosial khas komunitas pesisir yang aktivitas ekonominya dekat dengan ruang luar dan dipengaruhi kondisi lingkungan setempat. Pola hunian dan mobilitas warga umumnya bergerak dari garis pantai menuju bagian permukiman yang lebih dalam, dengan kepadatan yang dapat meningkat pada segmen tertentu. Dalam keseharian, masyarakat banyak melakukan aktivitas domestik dan sosial di area teras atau halaman, disertai aktivitas ekonomi skala kecil dan pergerakan intens di sepanjang koridor jalan, sehingga paparan panas, kelembapan, dan hembusan angin laut menjadi bagian dari pengalaman harian yang membentuk persepsi kenyamanan. Kondisi ini menunjukkan bahwa kenyamanan termal di Pohe tidak hanya berhubungan dengan data iklim mikro, tetapi juga terkait dengan pola adaptasi jangka panjang warga terhadap lingkungan pesisir, sehingga memperkuat urgensi penelitian untuk menghasilkan rekomendasi penataan permukiman yang lebih responsif terhadap iklim.



Gambar 1. 6. Lokasi penelitian/Peta Permukiman Kelurahan Pohe Kota Gorontalo.

1.10. Kebaruan Penelitian

Tabel 1. 6. Kebaruan Penelitian

Fokus Penelitian Terdahulu	Lokasi & Studi Kasus	Temuan/Keterbatasan	Kebaruan Penelitian Gorontalo (2025)
Analisis kenyamanan termal berbasis PMV–PPD standar (Fanger, 1988; ASHRAE 55; ISO 7730)	Global, perkotaan subtropis	Model statis, kurang sesuai untuk iklim tropis lembap; tidak mempertimbangkan adaptasi masyarakat lokal	Mengintegrasikan PMV–PPD dengan pendekatan adaptif berbasis data IoT, sesuai dengan konteks tropis pesisir
Pengaruh Sky View Factor terhadap suhu dan ventilasi perkotaan (Oke, 1987; Deng & Wong, 2020)	Kota besar modern (Eropa, Asia Timur)	SVF diteliti pada kawasan urban padat, jarang diaplikasikan pada permukiman pesisir linear	Menempatkan SVF sebagai variabel kunci dalam konfigurasi spasial pesisir tropis dengan iklim lembap
Studi urban heat island (Santamouris, 2021; Li et al., 2020)	Kota besar/subtropis	Fokus pada fenomena UHI skala makro; tidak menysasar skala mikro permukiman	Fokus pada skala mikro permukiman pesisir tropis lembap untuk memetakan variasi kenyamanan termal
Analisis kenyamanan termal di kota besar Indonesia (Wicaksono et al., 2021 – Surabaya;	Indonesia, kawasan urban	Menggunakan simulasi (ENVI-met/CFD), terbatas data lapangan real-time	Menggunakan IoT sensor untuk monitoring iklim mikro real-time basis data empiris baru di permukiman pesisir tropis lembap

Kurniawati et al., 2019 – Jakarta)			
Pemanfaatan teknologi sensor dalam studi lingkungan (Abdollahzadeh & Biloria, 2021)	Global, smart city	IoT dipakai pada konteks smart building atau ruang publik, bukan permukiman tradisional	Aplikasi IoT untuk permukiman pesisir tropis memperluas konteks penggunaan teknologi
Integrasi desain perkotaan dengan kenyamanan termal (Ng & Ren, 2015)	Kota padat Asia	Fokus pada perencanaan makro (CBD, distrik)	Mengaitkan desain perkotaan skala mikro (orientasi bangunan, vegetasi, H/W ratio) dengan kenyamanan termal warga pesisir
Penelitian lokal Gorontalo (terbatas, studi spasial & sosial, belum ada integrasi IoT–SVF)	Gorontalo, pesisir tropis lembap	Belum ada penelitian termal berbasis data lapangan real-time, SVF, dan model adaptif	Studi pertama di Gorontalo dengan konteks wilayah permukiman pesisir di iklim tropis lembap yang mengintegrasikan IoT, SVF, dan model adaptif kontribusi teoritis & praktis

Pada Tabel 1.6 memperlihatkan bahwa sebagian besar penelitian terdahulu mengenai kenyamanan termal masih berfokus pada kawasan urban padat atau kota besar dengan iklim subtropis, serta dominan menggunakan model statis maupun simulasi numerik (PMV–PPD, ENVI-met, CFD) yang kurang merepresentasikan kondisi riil lapangan. Selain itu, variabel Sky View Factor (SVF) umumnya diteliti pada kawasan perkotaan skala makro, sementara aplikasi pada permukiman pesisir tropis yang linear dan beriklim lembap belum banyak dilakukan. Penelitian ini menghadirkan kebaruan dengan mengintegrasikan pengukuran mikroklimat berbasis IoT secara real-time, analisis SVF dalam konteks pesisir tropis lembap, serta pengembangan model lingkungan adaptif yang relevan untuk meningkatkan kenyamanan termal di Kota Gorontalo. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya memperluas cakupan studi termal di kawasan tropis, tetapi juga memberikan kontribusi praktis bagi perencanaan kota pesisir dan pengembangan kebijakan adaptasi iklim mikro berbasis data empiris.

BAB II

ANALISIS KENYAMANAN TERMAL BERBASIS IoT DI PERMUKIMAN PESISIR KOTA GORONTALO: DAMPAK IKLIM MIKRO DAN DESAIN PERKOTAAN

2.1 Abstrak

Latar Belakang Lingkungan permukiman pesisir memiliki kondisi termal yang seringkali memaksa masyarakat untuk menyesuaikan diri dengan suhu tinggi, kelembapan ekstrem, dan aliran udara yang terbatas. Hal ini terutama terlihat di Kelurahan Pohe, Kota Gorontalo, yang berada di pesisir sekaligus di kaki gunung sehingga rentan mengalami tekanan panas mikroklimat. **Tujuan** Penelitian ini bertujuan menilai variasi kenyamanan termal di permukiman pesisir berdasarkan kondisi lingkungan nyata, serta mengidentifikasi faktor yang berkontribusi pada perbedaan karakteristik termal di tiap titik pengukuran. **Metode** Data dikumpulkan menggunakan *smart thermal system* berbasis Internet of Things (IoT) yang memonitor suhu udara, kelembapan relatif, dan kecepatan angin secara *real time*. Sensor dipasang pada interval 50 meter, mulai dari Titik 0 (sekitar 15 meter dari garis pantai) hingga Titik 05 (250 meter dari pantai). Data yang terkumpul dianalisis untuk melihat pola variasi termal di sepanjang jalur pengukuran. **Hasil** menunjukkan bahwa setiap titik memiliki karakteristik mikroklimat yang berbeda. Titik 0 mencatat suhu maksimum 33,3 °C dengan kecepatan angin 6,7 m/s. Titik 01, yang berjarak 50 m dari pantai, menunjukkan suhu ekstrem 38,5 °C. Titik 03 memiliki kecepatan angin terendah (2,9 m/s), sedangkan Titik 05 menampilkan suhu maksimum 37,7 °C dengan kelembapan tetap tinggi. **Kesimpulan** temuan ini menegaskan bahwa jarak dari pantai, kontur lahan, serta kepadatan bangunan memengaruhi variasi termal lokal. Rekomendasi mitigasi meliputi peningkatan vegetasi peneduh, penggunaan material bangunan reflektif, serta perencanaan tata ruang yang mendukung ventilasi alami.

2.2. Pendahuluan

Permukiman pesisir di Kota Gorontalo tumbuh mengikuti garis pantai dengan pola konfigurasi linear yang terbentuk secara alami maupun hasil perencanaan. Lingkungan pesisir menghadirkan tantangan dan potensi dalam aspek termal, seperti tingginya intensitas radiasi matahari, angin laut, serta kelembapan yang tinggi. Kondisi ini mempengaruhi kenyamanan termal, baik

di dalam maupun di luar bangunan, yang secara langsung berdampak pada kesehatan, produktivitas, dan kesejahteraan penghuni (Baruti, 2022).

Kenyamanan termal dilingkungan permukiman faktor penting yang mempengaruhi kualitas hidup masyarakat, terutama di wilayah tropis, khususnya di wilayah tropis lembab seperti di Kota Gorontalo. Permukiman pesisir sebagai kawasan yang bersentuhan langsung dengan karakteristik iklim laut cenderung pesisir sebagai kawasan yang bersentuhan memiliki kondisi lingkungan termal yang khas. Sirkulasi udara, kelembaban, radiasi matahari, dan temperatur permukaan menjadi elemen-elemen penting dalam membentuk kenyamanan termal bagi penghuni kawasan tersebut (H. Zhang et al., 2022).

Pertumbuhan kota-kota pesisir di wilayah tropis lembab, seperti Kota Gorontalo, menimbulkan tantangan kompleks dalam penyediaan permukiman yang memenuhi standar kenyamanan dan kesehatan bagi penduduknya. Kota Gorontalo, sebagai salah satu kota pesisir di Indonesia, mengalami perkembangan pesat yang diiringi dengan perubahan pola penggunaan lahan serta peningkatan kepadatan penduduk (Gorontalo, 2024). Fenomena ini menyebabkan tekanan pada lingkungan termal kawasan permukiman, terutama akibat modifikasi tata ruang dan berkurangnya area hijau. Konsekuensi dari perubahan ini tidak hanya berdampak pada kualitas lingkungan, tetapi juga pada aspek kenyamanan termal yang berperan penting dalam kualitas hidup masyarakat. Dalam konteks iklim tropis lembab, parameter termal lingkungan seperti suhu udara, kelembaban, dan pergerakan angin memiliki pengaruh signifikan terhadap kenyamanan termal serta kualitas permukiman (Koenigsberger et al., 1975), (Frick & Mulyani, 2006), (Baruti, 2022).

2.3. Kenyamanan Termal

Kenyamanan termal dipahami sebagai kondisi psikologis seseorang yang menunjukkan tingkat kepuasan terhadap lingkungan termalnya (Peter Höppe, 2002), (Fanger, 1988) menjelaskan bahwa kenyamanan termal terjadi ketika tercapai keseimbangan panas antara tubuh dan lingkungannya. Saat ini, fenomena *Urban Heat Island* (UHI) menjadi isu penting di kawasan perkotaan padat sebagai konsekuensi urbanisasi yang pesat (Lei Chen et al., 2018). Proses pembangunan kota secara nyata memengaruhi kondisi meteorologi setempat (Landsberg, 1981) dan menyebabkan perubahan iklim mikro, salah satunya berupa peningkatan suhu udara (Martínez-Solanas & Basagaña, 2019), (Koerniawan & Gao, 2014). Untuk memahami dinamika UHI, terdapat dua skala utama yang digunakan, yaitu *Urban Boundary Layer* (UBL) dan *Urban Canopy Layer* (UCL) (Oke et al., 2017). UBL berada di atas

ketinggian rata-rata bangunan, sedangkan UCL berada pada lapisan antara permukaan tanah hingga atap bangunan dan dikenal sebagai skala mikro.

Kebutuhan untuk memperhatikan parameter termal semakin mendesak seiring tingginya laju urbanisasi dan perubahan tata guna lahan di kawasan pesisir (Eko & Rahayu, 2015). Alih fungsi lahan yang tidak terkendali berpotensi memicu efek pulau panas perkotaan, yang pada akhirnya menurunkan kualitas kenyamanan dan kesehatan permukiman (Karyono, 1999). Dengan demikian, standar permukiman pesisir tidak hanya ditentukan oleh aspek fisik bangunan maupun infrastruktur, melainkan juga oleh kemampuannya menyesuaikan diri dengan variabilitas parameter termal lingkungan untuk menciptakan hunian yang layak. Hal ini sejalan dengan pandangan (Doxiadis, 1968) yang menekankan bahwa kota adalah sistem buatan manusia yang berkembang berdasarkan kebutuhan serta kapasitas adaptasi terhadap lingkungannya.

Kajian tentang kenyamanan termal di kawasan perkotaan tropis sebenarnya telah banyak dilakukan (Koerniawan & Gao, 2014), (Sangkertadi, 2013). Namun, sebagian besar penelitian masih berfokus pada kota besar atau ruang publik, sementara studi mengenai pengaruh parameter termal terhadap standar permukiman pesisir di iklim tropis lembab, khususnya di Kota Gorontalo, masih sangat terbatas. Penelitian (Kustianingrum, 2010) misalnya, lebih menekankan aspek spasial permukiman tidak terencana tanpa menyoroti faktor termal lingkungan secara mendalam, padahal faktor tersebut berperan penting dalam menentukan kenyamanan dan kesehatan hunian.

Kebaruan penelitian ini terletak pada pendekatan komprehensif yang menghubungkan parameter termal lingkungan dengan standar permukiman pesisir tropis lembab berbasis studi kasus Kota Gorontalo. Dengan memanfaatkan data iklim lokal dan analisis spasial, penelitian ini mengidentifikasi parameter termal utama yang memengaruhi kenyamanan serta kesehatan penghuni, sekaligus mengevaluasi standar permukiman eksisting agar dapat disesuaikan dengan dinamika lingkungan termal.

Urgensi penelitian ini semakin kuat mengingat dampak ketidaknyamanan termal yang dapat menurunkan produktivitas, memicu penyakit terkait panas, dan mengurangi kualitas hidup masyarakat pesisir (Falasca et al., 2019), (Sangkertadi, 2013). Kota Gorontalo, yang berada di wilayah pesisir dengan tingkat radiasi matahari tinggi dan kelembapan relatif yang konstan, menghadapi risiko serius terhadap masalah lingkungan termal, termasuk meningkatnya kebutuhan pendinginan dan ancaman kesehatan. Karena itu, penyusunan standar permukiman yang mempertimbangkan

faktor termal merupakan langkah strategis untuk perencanaan kawasan pesisir tropis lembab yang adaptif.

Berdasarkan hal tersebut, tujuan penelitian ini adalah menganalisis pengaruh parameter termal terhadap standar permukiman pesisir tropis lembab dengan studi kasus Permukiman Pesisir di Kelurahan Pohe Kota Gorontalo. Fokus analisis meliputi identifikasi parameter termal paling signifikan, evaluasi standar permukiman yang berlaku, serta penyusunan rekomendasi standar adaptif. Keaslian penelitian ini terletak pada integrasi data iklim lokal, analisis spasial permukiman, serta pengembangan standar berbasis kenyamanan termal. Hasilnya diharapkan dapat menjadi rujukan penting dalam penyusunan kebijakan dan praktik perencanaan permukiman pesisir yang lebih adaptif dan berkelanjutan.

2.3.1. Kenyamanan Termal Lingkungan (Ruang Luar)

Kenyamanan termal di ruang luar sangat dipengaruhi oleh keberadaan vegetasi, khususnya pepohonan, yang berperan sebagai penyegar udara sekaligus peneduh, serta berkaitan erat dengan fenomena Urban Heat Island (UHI) (Kurniati et al., 2015), (Qaid et al., 2016). (Fanger, 1970) mendefinisikan kenyamanan termal sebagai kondisi kepuasan manusia terhadap lingkungannya yang ditentukan oleh kombinasi faktor fisik dan iklim. Menurut (P Höppe, 1999a), sensasi termal dipengaruhi oleh suhu udara, suhu radiasi, kelembaban, dan kecepatan angin, sedangkan faktor individu seperti jenis pakaian dan aktivitas juga memberikan kontribusi (Standard, 2005). Pada iklim tropis, manusia cenderung memilih ruang dengan kondisi yang lebih sejuk untuk beraktivitas (Zacharias et al., 2001). Apabila kenyamanan termal di ruang publik tidak terpenuhi, minat masyarakat untuk melakukan aktivitas luar ruangan, termasuk di kawasan pesisir, akan menurun.

Selain itu, suhu udara merupakan faktor dominan yang memengaruhi kenyamanan ruang luar (Wonorahardjo & Koerniawan, 2008). Kajian mengenai kenyamanan termal ruang luar dapat menjadi dasar evaluasi dalam perencanaan kota maupun desain bangunan. Lingkungan luar yang nyaman mendorong masyarakat untuk lebih sering beraktivitas di ruang terbuka, yang pada gilirannya meningkatkan interaksi sosial dan memperkuat kohesi masyarakat (M. Li et al., 2022), (UN Habitat, 2025). Namun, dampak pemanasan global saat ini membuat banyak orang enggan beraktivitas di luar ruangan (J. Zhang et al., 2019). Lebih jauh, (Ronald, 2005) menekankan bahwa kenyamanan ruang juga dipengaruhi oleh aspek spasial pada hunian, yang mencakup: (1) Orientasi, yaitu hubungan individu atau kelompok dengan tanda-tanda tertentu di lingkungannya; (2) Tata letak, yakni posisi

ruang yang dapat dijelaskan secara geometris melalui penanda di permukaan tanah; (3) Hirarki, yaitu tingkat ruang yang terbentuk berdasarkan budaya, status, dan nilai tertentu; (4) Keterbukaan, yang merujuk pada tersedianya ruang terbuka baik secara fisik maupun sosial; dan (5) Besaran ruang, yang berhubungan dengan konsep keterbukaan serta bentuk ruang, baik horizontal maupun vertikal, yang menentukan fleksibilitas dalam pengembangan ruang.

Kenyamanan termal seseorang secara umum dipengaruhi oleh dua faktor yaitu: Faktor lingkungan (kecepatan angin, temperatur udara, suhu radiasi dan kelembaban udara) serta Faktor Individu (aktivitas dan pakaian yang digunakan). Ada berbagai formula yang dapat digunakan sebagai referensi untuk menghitung kenyamanan termis manusia di suatu lingkungan iklim mikro. Diantaranya adalah (Fanger, 1970), ASHRAE Fundamental, ISO 7730 (2003), (Sangkertadi, 2013) mereferensikan bahwa kenyamanan termal ruang luar di iklim tropis lembab ditentukan oleh interaksi dinamis antara suhu udara, kelembaban, radiasi matahari, dan kecepatan angin, dengan peran dominan ventilasi alami dan adaptasi manusia terhadap lingkungan.

2.3.2. Faktor Pengaruh Kenyamanan Termal

1. Kenyamanan termal tidak hanya dipengaruhi oleh kondisi fisik, tetapi juga oleh aspek psikologis manusia. Sejumlah penelitian menegaskan bahwa temperatur udara merupakan faktor utama yang menentukan kenyamanan termal. Berdasarkan (SNI 03-2396-2001, 2001),, suhu $< 20,5^{\circ}\text{C}$ dikategorikan sebagai dingin, suhu ideal berada pada rentang $24,8\text{--}27,1^{\circ}\text{C}$, sedangkan suhu $> 28^{\circ}\text{C}$ masuk kategori panas. Berbeda dengan parameter lainnya, kelembaban udara cenderung fluktuatif karena sangat dipengaruhi oleh perubahan temperatur. Semakin tinggi temperatur udara, semakin besar pula kapasitas udara untuk menampung uap air. Kelembaban absolut didefinisikan sebagai kandungan uap air yang terkandung dalam satu kilogram udara kering, dinyatakan dalam satuan gram/kg
2. Masih menurut (SNI 03-2396-2001, 2001), kelembaban udara rendah berada di bawah 40%, sedang antara 40–70%, dan tinggi di atas 70%. Faktor lain yang turut berperan adalah kecepatan aliran udara. Untuk menciptakan kenyamanan, kecepatan udara pada ketinggian kepala sebaiknya tidak lebih dari 0,25 m/detik dan idealnya berada di sekitar 0,15 m/detik. Nilai ini masih dapat bervariasi, tergantung pada kondisi temperatur udara kering rancangan yang digunakan.

3. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa faktor-faktor lingkungan spasial juga berpengaruh besar terhadap kenyamanan termal. Kajian di luar skala bangunan banyak menyoroti bentuk ruang, tata letak bangunan, ruang jalan, material permukaan tanah, ruang hijau, dan keberadaan badan air. Beberapa studi menekankan bahwa konfigurasi spasial berperan penting dalam mengendalikan kondisi termal perkotaan. Misalnya, (H. Wang & Liu, 2020) serta (P. Wang et al., 2023) meneliti strategi mitigasi lingkungan termal pada kawasan perkotaan dengan tingkat kepadatan berbeda di Toronto. Hasilnya menunjukkan bahwa durasi paparan sinar matahari dan tingkat radiasi rata-rata memiliki pengaruh signifikan terhadap kenyamanan termal.
4. Penelitian lain oleh (Lai et al., 2014) dan (Qiantao Zhao et al., 2021) menyoroti peran peneduh bangunan dalam menurunkan suhu udara perkotaan, sehingga mampu memperbaiki kualitas termal. Sementara itu, (Huang et al., 2019) mengungkapkan adanya keterkaitan erat antara bentuk kota, kondisi cuaca, dan kenyamanan termal. Mereka menemukan bahwa faktor meteorologis secara langsung memengaruhi kenyamanan termal pada kawasan perkotaan.

2.4. Gradien Termis

Gradien termis ini disebut juga dengan iklim vertikal. Semakin tinggi suatu daerah, maka semakin rendah suhu udaranya. Secara umum, perubahan suhu terjadi berkisar antara 0,6°C tiap kenaikan ketinggian 100 m. Suhu udara diukur dengan menggunakan thermometer (Incropera et al., 2007). Untuk mengetahui suhu rata-rata suatu tempat, maka persamaan yang digunakan yaitu:

$$T_x = T^\circ - (h/100 \times 0,6 \text{ }^\circ\text{C}) \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

Keterangan

- T_x = suhu rata-rata daerah yang dicari
 T° = suhu rata - rata tempat yang telah diketahui
 0,6 °C = penurunan suhu setiap naik 100 m
 h = ketinggian lokasi. (AS)

2.5. Metode Penelitian

Sirkulasi udara berperan penting dalam proses perpindahan panas antar area dan berkontribusi dalam menurunkan tingkat kelembapan lingkungan (Z. Liu et al., 2023), (Lechner, 2007), (Manteghi et al., 2015), (Gunawardena et al., 2017). Dalam konteks kawasan pesisir, kecepatan aliran udara sangat dipengaruhi oleh geometri ruang sirkulasi antar bangunan. Semakin sempit jarak antar bangunan, semakin terbatas pula pergerakan angin, sedangkan koridor sirkulasi yang lebih lebar memungkinkan kecepatan angin meningkat secara signifikan (Kalumata & Indarwanto, 2016), (Zeng et al., 2024). Kondisi ini secara langsung memengaruhi distribusi panas dan tingkat kenyamanan termal pada lingkungan permukiman pesisir (Zhu et al., 2022), (Elnabawi & Hamza, 2024).

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif deskriptif (Neuman, 2000), (Sugiyono, 2020), (Creswell, J. W., & Creswell, 2022), untuk menjelaskan hubungan antara lebar jalur sirkulasi sebagai variabel bebas dan kecepatan angin sebagai variabel terikat dalam sistem permukiman pesisir. Pendekatan ini sesuai dengan praktik umum dalam studi mikroklimat perkotaan yang meneliti hubungan antarparameter fisik lingkungan secara empiris melalui pengukuran lapangan (Oke, 1988), (Memon et al., 2010).

Data dikumpulkan melalui observasi lapangan dan pengukuran langsung terhadap parameter mikroklimat, meliputi suhu udara, kelembapan relatif, dan kecepatan angin, untuk mengidentifikasi kondisi termal aktual di lokasi penelitian (Elnabawi & Hamza, 2024), (Z. Liu et al., 2023). Instrumen yang digunakan dikalibrasi pada ketinggian standar 1,5 m dari permukaan tanah guna merepresentasikan kondisi kenyamanan pejalan kaki sesuai pedoman pengukuran iklim mikro (ISO 7726:2017), (Kwok et al., 2021).

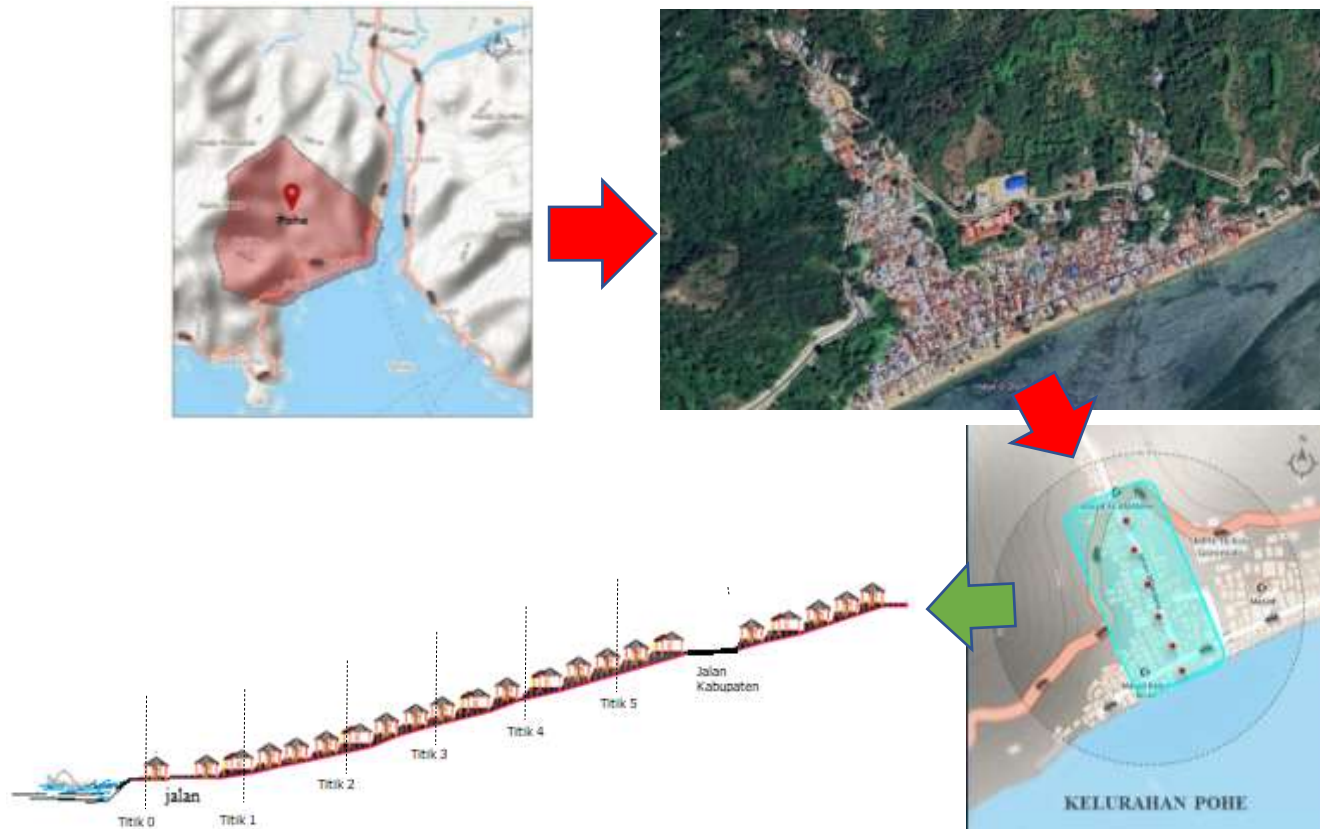
2.5.1. Lokasi Penelitian

Selain itu, observasi visual dilakukan untuk mendokumentasikan kondisi fisik lingkungan, seperti kepadatan bangunan, vegetasi peneduh, dan orientasi jalur sirkulasi, dengan tujuan memahami konteks morfologi permukiman di Kelurahan Pohe, Kota Gorontalo. Pendekatan ini memungkinkan analisis keterkaitan antara elemen spasial dan dinamika aliran udara pada skala mikro sebagaimana direkomendasikan oleh studi ventilasi perkotaan di kawasan pesisir (Zhu et al., 2022), (Zeng et al., 2024).

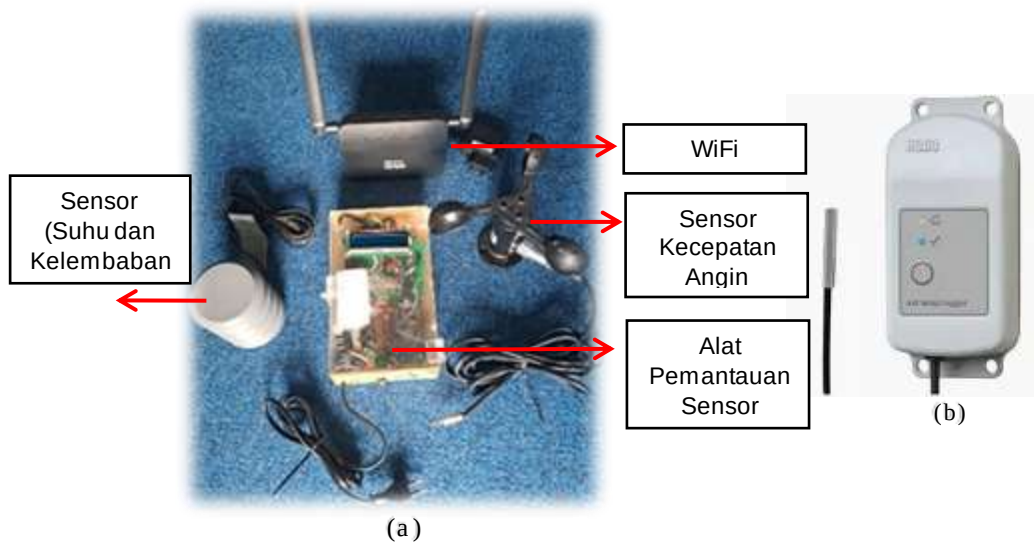
Pengukuran lapangan dilakukan di enam titik observasi (T0–T.05) dengan jarak antar titik sejauh 50 meter, membentang dari tepi pantai (T0) hingga 250 meter ke arah daratan (T.05). Setiap titik merepresentasikan karakter mikroklimat yang berbeda berdasarkan jarak dari laut, kepadatan bangunan, serta kondisi vegetasi. Titik awal (T0) berjarak sekitar 17 meter dari garis pantai, mewakili area dengan pengaruh langsung dari laut, sedangkan titik lainnya menggambarkan kondisi transisi menuju daratan yang lebih padat bangunan.

Pengambilan data dilakukan serta pengukuran di setiap titik berlangsung dengan dalam interval satu jam, antara 4 Juni hingga 2 Juli 2025. Sistem pengukuran menggunakan Internet of Things (IoT)-based *Smart Thermal Monitoring System* berbasis mikrokontroler ESP32 yang dilengkapi sensor suhu, kelembapan, dan kecepatan angin. Sensor ditempatkan pada ketinggian 2,10 meter dari permukaan tanah, mengikuti standar pengukuran kenyamanan termal manusia yang direkomendasikan oleh (ISO 7726:2017). Jalur pengukuran mengikuti orientasi jalan utama beraspal yang mengarah timur laut (menuju kaki bukit) untuk menangkap variasi termal akibat perubahan topografi dan orientasi terhadap arah angin dominan.

Pemilihan waktu penelitian pada periode Juni 2025–Juli 2025 dilakukan karena periode ini merepresentasikan kondisi musim kemarau awal di Kota Gorontalo, sehingga pengaruh radiasi matahari, suhu udara, dan ventilasi angin laut relatif stabil untuk menggambarkan karakter mikroklimat pesisir. Selain itu, kondisi cuaca yang lebih konsisten pada periode tersebut memungkinkan pengukuran lapangan berbasis IoT dan simulasi mikroklimat dilakukan secara lebih optimal, sehingga variasi kenyamanan termal yang diamati lebih mencerminkan pengaruh morfologi ruang dan ventilasi alami dibandingkan gangguan cuaca ekstrem musiman.



Gambar 2. 1. Lokasi Penelitian Kelurahan Pohe Kota Gorontalo



Gambar 2. 2. Alat ukur (a) SMART Termal IoT, (b) Hobo Data Logger External

2.5.2. Metode Kalibrasi Alat sensor dengan sistem koreksi

Metode kalibrasi sensor menggunakan *regresi linier* multi-titik merupakan pendekatan yang lebih akurat dibandingkan metode dua titik, karena memanfaatkan banyak pasangan data antara pembacaan sensor (sensor SHT35) dan alat referensi standar. Dalam metode ini, hubungan antara nilai sensor dan nilai sebenarnya diasumsikan linier, sehingga dapat dimodelkan dalam bentuk persamaan garis lurus dengan dua parameter utama, yaitu faktor skala (a) dan konstanta koreksi (b). Nilai a dan b diperoleh melalui proses regresi linier yang bertujuan meminimalkan selisih (error) antara data hasil pengukuran sensor dan data referensi. Dengan demikian, model ini mampu menangkap kecenderungan sistematis kesalahan sensor, baik berupa bias (offset) maupun kesalahan skala.

Setelah parameter kalibrasi diperoleh, langkah selanjutnya adalah menerapkan koreksi pada seluruh data sensor menggunakan persamaan linier tersebut. Untuk pengukuran suhu, nilai terkoreksi dihitung dengan mengalikan pembacaan sensor dengan koefisien a_T dan menambahkan konstanta b_T , sedangkan untuk kelembaban relatif digunakan parameter a_{RH} dan b_{RH} . Proses ini memastikan bahwa setiap data yang dihasilkan sensor telah disesuaikan mendekati nilai sebenarnya. Sebagai contoh sederhana, dari dua titik referensi suhu (25°C dan 40°C) yang dibandingkan dengan pembacaan sensor ($26,5^{\circ}\text{C}$ dan $41,2^{\circ}\text{C}$), diperoleh nilai $a \approx 1,02$ dan $b \approx -2,03$. Dengan demikian, setiap pembacaan sensor dapat dikoreksi menggunakan persamaan $T_{\text{kalibrasi}} = 1,02 \times T_{\text{sensor}} - 2,03$. Ketika sensor membaca 30°C , hasil setelah kalibrasi menjadi $28,57^{\circ}\text{C}$, yang menunjukkan adanya koreksi signifikan terhadap bias awal sensor. Pendekatan ini sangat penting dalam penelitian berbasis data lingkungan, karena meningkatkan

validitas dan reliabilitas data yang digunakan dalam analisis lanjutan, seperti pemodelan kenyamanan termal atau evaluasi mikroklimat.

Sampel tata cara kalibrasi:

a. Misal saat referensi suhu:

- Referensi: 25°C → Sensor baca 26.5°C
- Referensi: 40°C → Sensor baca 41.2°C

b. Hitung:

$$a = \frac{40 - 50}{41.2 - 26.5} = \frac{15}{14.7} \approx 1.02$$

$$b = 25 - (1.02 \cdot 26.5) \approx -2.03$$

c. Sehingga rumus koreksi:

$$T_{calibrated} = 1.02 \cdot T_{SHT35} - 2.03$$

d. Jika sensor membaca 30°C, maka:

$$T_{calibrated} = 1.02 \cdot 30 - 2.03 = 28.57^\circ\text{C}$$

2.5.3. Metode hasil data ukur alat sensor IoT dengan data ukur BMKG (Stasiun Klimatologi Gorontalo)

Pengolahan data dalam penelitian ini diawali dengan proses normalisasi untuk menyelaraskan hasil pengukuran sensor IoT di lapangan dengan data referensi dari BMKG. Cara hitung pada tabel tersebut menggunakan normalisasi rasio dan selisih absolut (Δ), di mana rasio diperoleh dari perbandingan antara nilai sensor dan nilai referensi dari Sensor IoT dan BMKG, sedangkan selisih (Δ) menunjukkan perbedaan langsung antara keduanya (Sensor IoT – BMKG). Pendekatan ini digunakan untuk mengidentifikasi besarnya deviasi atau bias pembacaan sensor terhadap kondisi klimatologis standar.

Hasil normalisasi ini kemudian menjadi dasar dalam proses koreksi data, sehingga diperoleh nilai yang lebih representatif untuk digunakan dalam analisis lanjutan, khususnya dalam perhitungan kenyamanan termal. Dengan demikian, data yang digunakan bukan lagi data mentah sensor, melainkan data yang telah disesuaikan, sehingga mampu menggambarkan kondisi mikroklimat lokal secara lebih akurat dan dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah.

a. Persamaan:

$$\text{Rasio Normalisasi} = \frac{\text{Data Sensor IoT}}{\text{Data BMKG}}$$

$$\text{Selisih } (\Delta) = \text{Data Sensor IoT} - \text{Data BMKG}$$

b. Data pembandingan (waktu sama):

- BMKG (referensi) = 30.4°C
- Sensor IoT = 33.3°C

$$\text{Rasio Normalisasi} = \frac{33.3}{30.4} = 1.095 \approx 1.10$$

$$\Delta = 33.3 - 30.4 = 2.90^\circ\text{C}$$

Artinya, suhu sensor IoT lebih tinggi 2,90°C dibandingkan data BMKG, dengan rasio 1,10 atau sekitar 10% lebih tinggi dari nilai referensi.

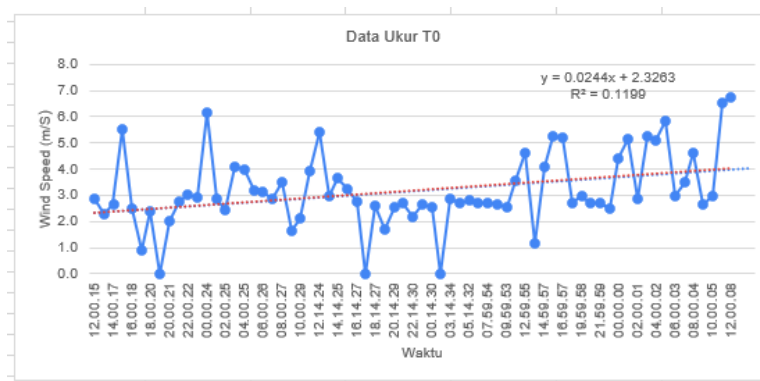
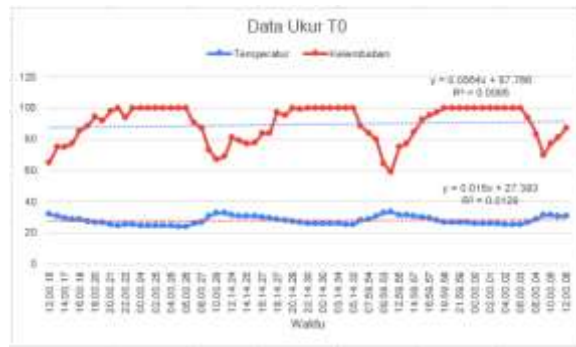
2.6. Hasil

2.6.1. Kondisi Termal Lingkungan Pesisir

Hasil pengukuran kondisi lingkungan termal permukiman pesisir yang dilakukan selama lima belas hari pada lima titik berbeda dengan kondisi kontur permukaan tanah yang landai. Pengukuran pada titik T0 selama 3 (tiga) hari (4 Juni 2025 – 7 Juni 2025), di peletakan alat ukur pesisir pantai dengan jarak dari pinggir pantai ± 15 m, sesuai Pada Gambar 2.3, dimana suhu maximum 33,3 °C, kelembaban maximum 99,9 %, dan untuk kecepatan angin maximum 6,7 m/s, dengan suhu rata-rata 27,9 °C (tabel 2.1).

Tabel 2. 1. Titik Ukur T0 (area pesisir pantai)

Termal	Rata-Rata	Maximum	Minimum
Suhu (°C)	27.9	33.3	24.0
Kelembaban (%)	89.7	99.9	58.8
Kecepatan angin (m/s)	3.2	6.7	0.0

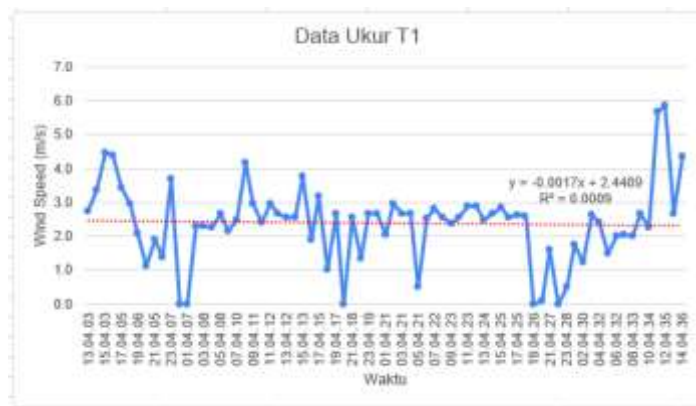
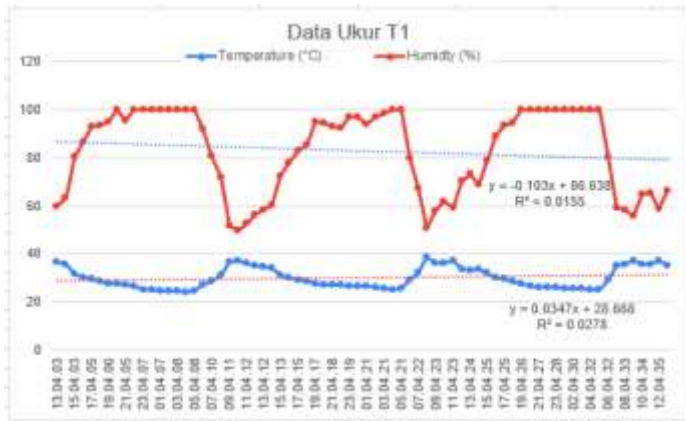


Gambar 2. 3. Grafik titik ukur T0 dilingkungan ruang luar, Profil hasil pengukuran Suhu ($^{\circ}\text{C}$), Kelembaban (%) dan Kecepatan angin (m/s).

Untuk Pengukuran pada titik T.01 selama 3 (tiga) hari dari (8 Juni 2025 – 11 juni 2025) di peletakan alat ukur dipinggir jalan, dimana jarak dari titik 0 ke titik 01 ± 50 m, sesuai Pada Gambar 2.4, dimana suhu maximum $38,5^{\circ}\text{C}$, kelembaban maximum 100 %, dan untuk kecepatan angin maximum 5,7 m/s, dengan suhu rata-rata $29,7^{\circ}\text{C}$ (tabel 2.2).

Tabel 2. 2. Titik Ukur T.01 (jarak 50 meter dari titik ukur T0)

Termal	Rata-Rata	Maximum	Minimum
Suhu ($^{\circ}\text{C}$)	29.7	38.5	24.1
Kelembaban (%)	82.5	99.9	49.6
Kecepatan angin (m/s)	2.4	5.9	0.0



Gambar 2. 4. Grafik titik ukur (T.01) sekitar jalan dengan jarak dari titik 0 adalah 50 m, Profil hasil pengukuran Suhu (°C), Kelembaban (%) dan Kecepatan angin (m/s).

Sedangkan hasil pengukuran termal lingkungan pada titik T.02 selama 3 (tiga) hari (11 Juni 2025 – 14 Juni 2025) yang penempatan alat ukur dipinggir jalan, dimana jarak dari titik T.01 ke titik 2 $\pm$ 50 m, sesuai Pada Gambar 2.5, dimana suhu maximum 35,0 °C, kelembaban maximum 99,9 %, dan untuk kecepatan angin maximum 5,3 m/s, dengan suhu rata-rata 28,0 °C (tabel 2.3).

Tabel 2. 3. Titik Ukur T.02 (jarak 50 meter dari titik ukur T.01)

Termal	Rata-Rata	Maximum	Minimum
Suhu (°C)	28.1	35.0	24.8
Kelembaban (%)	91.0	99.9	60.2
Kecepatan angin (m/s)	2.1	5.3	0.0

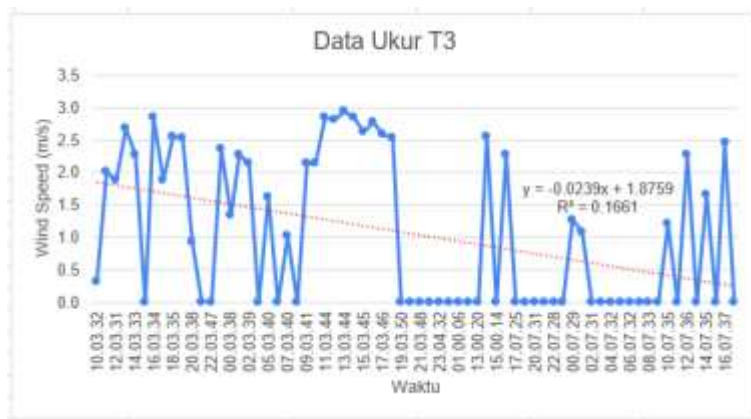
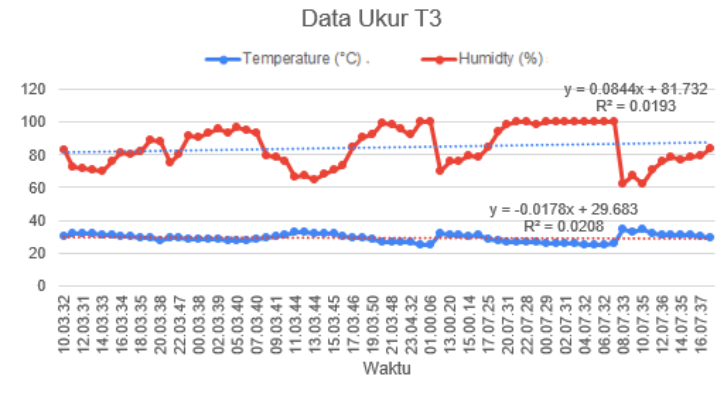


Gambar 2. 5. Grafik titik ukur (T.02) sekitar jalan dengan jarak dari titik (T.01) adalah 50 m, Profil hasil pengukuran Suhu (°C), Kelembaban (%) dan Kecepatan angin (m/s).

Untuk pengukuran termal lingkungan pada titik T.03 selama 5 (lima) hari (15 Juni 2025 – 20 juni 2025) yang penempatan alat ukur dipinggir jalan, dimana jarak dari titik T.02 ke titik 3 $\pm$ 50 m, sesuai Pada Gambar 2.6, dimana suhu maximum 34,3 °C, kelembaban maximum 100 %, dan untuk kecepatan angin maximum 2,9 m/s, dengan suhu rata-rata 29,07 °C (tabel 2.4).

Tabel 2. 4. Titik Ukur T.03 (jarak 50 meter dari titik ukur T.02)

Termal	rata-rata	Maximum	Minimum
Suhu (°C)	29.07	34.3	24.7
Kelembaban (%)	85	100	61.7
Kecepatan angin (m/s)	1.1	2.9	0.0

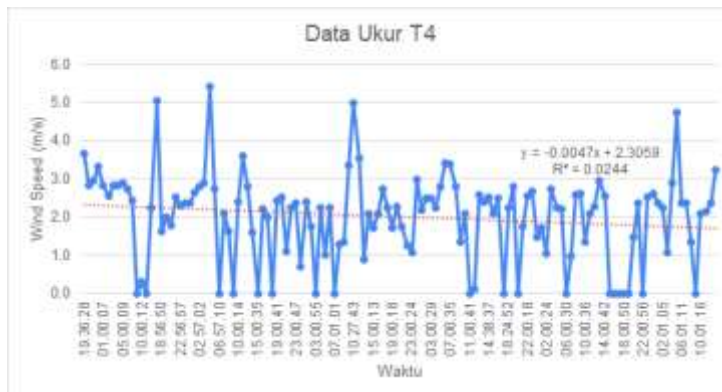
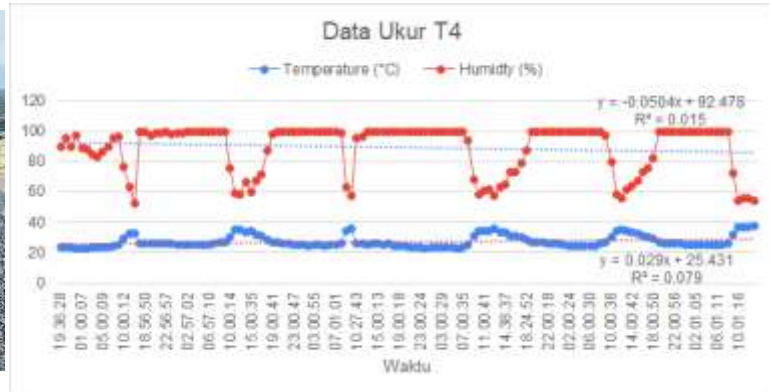


Gambar 2. 6. Grafik titik ukur T.03 sekitar jalan dengan jarak dari titik T.02 adalah 50 m dan jarak dari titik 0 adalah ± 150 m, Profil hasil pengukuran Suhu ($^{\circ}\text{C}$), Kelembaban (%) dan Kecepatan angin (m/s).

Untuk pengukuran termal lingkungan pada titik T.04 selama 7 (Tujuh) hari (21 juni 2025 – 28 juni 2025) yang penempatan alat ukur dipinggir jalan, dimana jarak dari titik 3 ke titik T.04 ± 50 m, sesuai Pada Gambar 2.7, dimana suhu maximum $37,3^{\circ}\text{C}$, kelembaban maximum 100 %, dan untuk kecepatan angin maximum 5,4 m/s, dengan suhu rata-rata $27,4^{\circ}\text{C}$ (tabel 2.5).

Tabel 2. 5. Titik Ukur T.04 (jarak 50 meter dari titik ukur T.03)

Termal	rata-rata	Maximum	Minimum
Suhu ($^{\circ}\text{C}$)	27.4	37.3	22.8
Kelembaban (%)	89	100	52.5
Kecepatan angin (m/s)	2.1	5.4	0.0

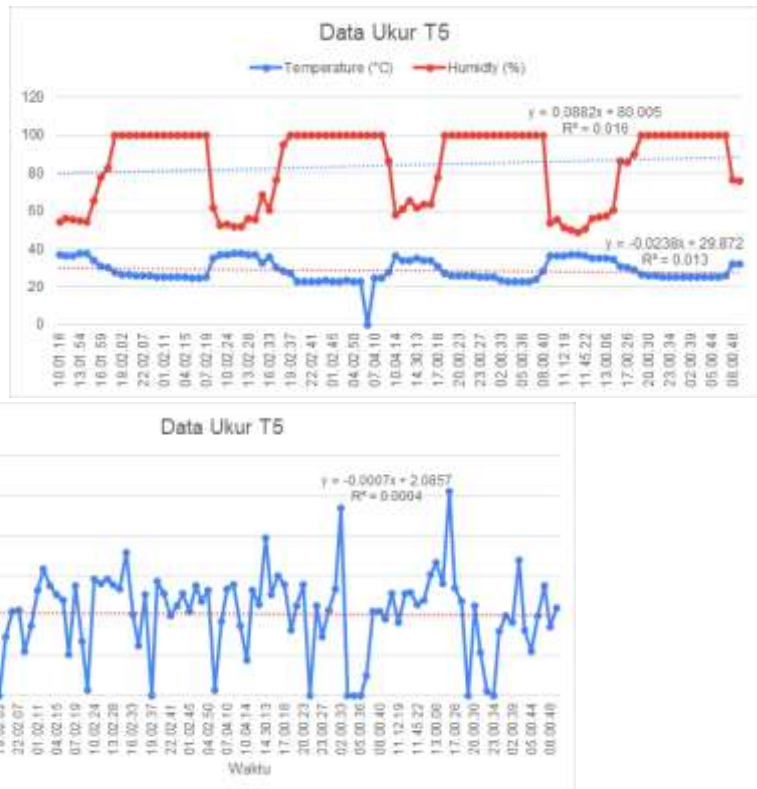


Gambar 2. 7. Grafik titik ukur T.04 sekitar jalan dengan jarak dari titik T.03 adalah 50 m dan jarak dari titik T0 adalah ± 200 m, Profil hasil pengukuran Suhu ($^{\circ}\text{C}$), Kelembaban (%) dan Kecepatan angin (m/s).

Pengukuran termal lingkungan pada posisi titik T.05 selama 4 (empat) hari (28 Juni 2025 – 2 junli 2025) yang penempatan alat ukur dipinggir jalan, dimana jarak dari titik T.03 ke titik 04 ± 50 m, sesuai Pada Gambar 2.8, dimana suhu maximum $37,8^{\circ}\text{C}$, kelembaban maximum 100 %, dan untuk kecepatan angin maximum 4,7 m/s, dengan suhu rata-rata $28,59^{\circ}\text{C}$ (tabel 2.6).

Tabel 2. 6. Titik Ukur T.05 (jarak 250 meter dari titik ukur T0) `

Termal	rata-rata	Maximum	Minimum
Suhu ($^{\circ}\text{C}$)	28.59	37.8	22.7
Kelembaban (%)	86	100	51.7
Kecepatan angin (m/s)	2.0	4.7	0.0



Gambar 2. 8. Grafik titik ukur T.05 sekitar jalan dengan jarak dari titik T.04 adalah 50 m dan jarak dari titik T0 adalah ± 250 m, Profil hasil pengukuran Suhu ($^{\circ}\text{C}$), Kelembaban (%) dan Kecepatan angin (m/s).

Berikut adalah tabel yang merangkum nilai maksimum, minimum, dan rata-rata dari seluruh titik pengukuran.

Tabel 2. 7. Perbandingan Data Pengukuran

Titik Ukur	Suhu $^{\circ}\text{C}$			Kelembaban (%)			Kecepatan Angin (m/s)		
	Rata-rata	Max	Min	Rata-rata	Max	Min	Rata-rata	Max	Min
T0	27.9	33.3	24.0	89.7	99.9	58.8	3.2	6.7	0.0
T.01	29.7	38.5	24.1	91.0	99.9	60.2	2.1	5.3	0.0
T.02	28.1	35.0	24.8	82.5	99.9	49.6	2.4	5.9	0.0
T.03	29.07	34.3	24.7	85	100	61.7	1.1	2.9	0.0
T.04	27.4	37.3	22.8	89	100	52.5	2.1	5.4	0.0
T.05	28.59	37.8	22.7	86	100	51.7	2.0	4.7	0.0

Berdasarkan Tabel 2.7, terlihat adanya variasi mikroklimatik yang cukup signifikan di sepanjang transek pengukuran T0 hingga T.05. Titik T0 yang berlokasi paling dekat dengan pesisir menunjukkan suhu rata-rata terendah (27,9 °C) dan kelembapan tertinggi (89,7%), dengan kecepatan angin rata-rata terbesar (3,2 m/s), mencerminkan pengaruh langsung ventilasi angin laut (sea breeze) dan efek pendinginan evaporatif. Sebaliknya, titik T.01 yang mulai menjauh dari garis pantai mencatat suhu rata-rata tertinggi (29,7 °C) dan kelembapan tinggi (91%), namun dengan kecepatan angin yang menurun (2,1 m/s), menandakan berkurangnya sirkulasi udara akibat peningkatan densitas bangunan. Tren serupa terlihat pada titik T.02 hingga T.05, di mana suhu dan kelembapan menunjukkan fluktuasi yang dipengaruhi oleh kombinasi faktor tutupan vegetasi, material permukaan, serta orientasi bangunan terhadap arah angin. Titik T.03 memperlihatkan penurunan kecepatan angin paling signifikan (1,1 m/s), menunjukkan adanya hambatan aliran udara akibat kepadatan massa bangunan di area tersebut. Secara keseluruhan, pola data ini menegaskan bahwa gradien termal dan kelembapan di kawasan pesisir sangat dipengaruhi oleh jarak dari laut serta konfigurasi morfologi lingkungan, di mana zona terbuka dengan sirkulasi angin kuat cenderung lebih sejuk dan nyaman dibandingkan area padat dengan ventilasi terbatas.

2.6.2. Perbandingan Data Sensor IoT dengan Data BMKG (Stasiun Klimatologi Gorontalo)

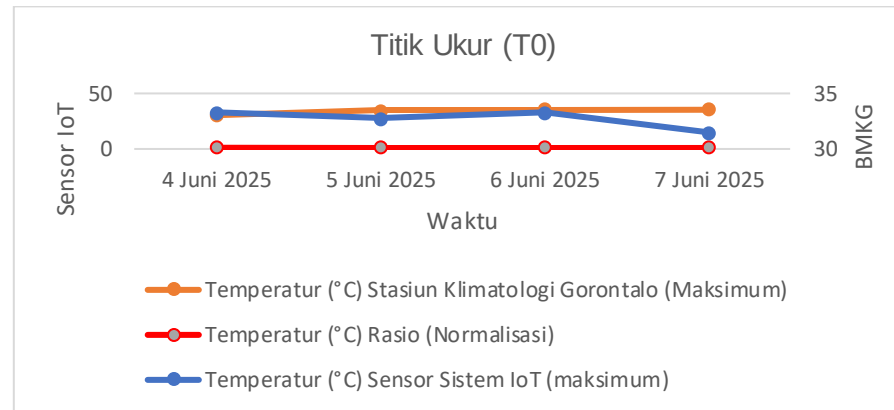
Perbandingan antara data sensor berbasis Internet of Things (IoT) dengan data Stasiun Klimatologi Gorontalo dilakukan untuk mengevaluasi tingkat kesesuaian serta mengidentifikasi perbedaan karakteristik antara kondisi mikroklimat lokal dan data klimatologi regional. Analisis ini menggunakan pendekatan rasio normalisasi dan selisih absolut (Δ) terhadap parameter utama, yaitu temperatur udara, kelembapan relatif, dan kecepatan angin. Perlu ditegaskan bahwa data yang digunakan dalam grafik merupakan nilai maksimum harian dari masing-masing sumber data, baik dari sensor IoT maupun dari BMKG, sehingga perbandingan yang dilakukan merepresentasikan kondisi ekstrem termal yang terjadi pada setiap hari pengamatan.

Namun demikian, terdapat keterbatasan pada data BMKG yang digunakan, yaitu tidak tersedianya informasi waktu (jam) terjadinya nilai maksimum tersebut, karena data yang disajikan hanya dalam bentuk agregasi harian. Hal ini berbeda dengan data sensor IoT yang direkam secara kontinu setiap jam (24 jam), sehingga memiliki resolusi temporal yang lebih tinggi dan mampu menangkap dinamika mikroklimat secara lebih detail. Perbedaan resolusi temporal ini menjadi faktor penting dalam interpretasi

hasil, sekaligus menegaskan bahwa data IoT lebih representatif dalam menggambarkan kondisi termal aktual di lokasi penelitian, terutama dalam konteks analisis kenyamanan termal pada skala lingkungan permukiman pesisir.

Tabel 2. 8. Hasil perbandingan rasio data ukur Sensor IoT untuk titik ukur (T0) dengan data BMKG (Stasiun klimatologi Gorontalo)

Tanggal	Temperatur (°C)				Humidity (%)				Wind Speed (m/s)			
	Sensor Sistem IoT (maks.)	Stasiun Klimatologi Gorontalo (Maks.)	Rasio (Normalisasi)	Selisih (Δ)	Sensor Sistem IoT	Stasiun Klimatologi Gorontalo (Maks.)	Rasio (Normalisasi)	Selisih (Δ)	Sensor Sistem IoT	Stasiun Klimatologi Gorontalo (Maks.)	Rasio (Normalisasi)	Selisih (Δ)
4 Juni 2025	33.3	30.4	1.10	2.90	75	86.6	0.87	-11.6	2.3	8.7	0.26	-6.4
5 Juni 2025	32.7	34.6	0.95	-1.90	68	82.1	0.83	-14.1	3.9	6.3	0.62	-2.4
6 Juni 2025	33.3	35.1	0.95	-1.80	59	82.5	0.72	-23.5	3.5	6.6	0.53	-3.1
7 Juni 2025	31.5	35.3	0.89	-3.80	70	80.6	0.87	-10.6	2.7	6.6	0.41	-3.9

**Gambar 2. 9.** Grafik perbandingan rasio Data Sensor IoT dengan Data BMKG (Stasiun Klimatologi Gorontalo)

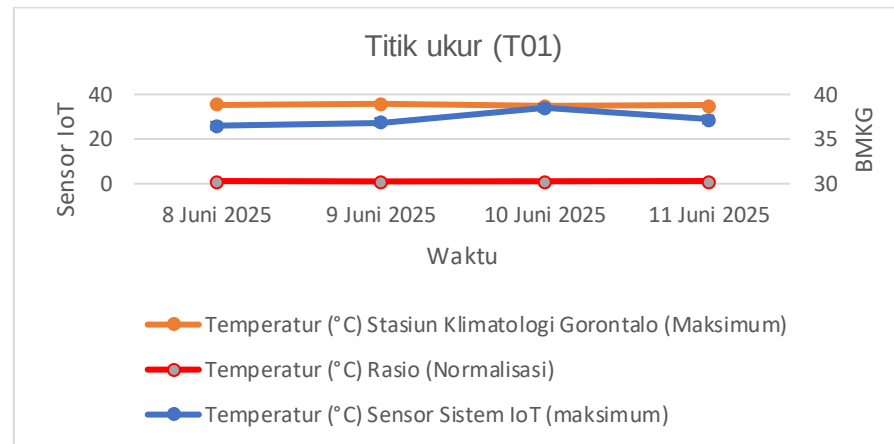
Grafik pada titik ukur T0 (gambar 2.9) menunjukkan perbandingan nilai temperatur maksimum harian antara data sensor IoT dan data Stasiun Klimatologi Gorontalo selama periode pengamatan 4–7 Juni 2025. Secara umum, kedua data menunjukkan pola tren yang relatif serupa, yaitu berada pada kisaran suhu 31–35°C, dengan kecenderungan peningkatan pada tanggal 5–6 Juni dan penurunan pada tanggal 7 Juni. Hal ini mengindikasikan bahwa data sensor IoT mampu merepresentasikan pola fluktuasi temperatur yang sejalan dengan data klimatologi regional.

Berdasarkan hasil analisis tabel dan grafik pada Titik Ukur (T0), terlihat bahwa data sensor IoT memiliki deviasi terhadap data referensi BMKG, baik dalam bentuk overestimate maupun underestimate, dengan selisih suhu harian berkisar antara $\pm 1,8^{\circ}\text{C}$ hingga $\pm 3,8^{\circ}\text{C}$ dan rata-rata error sekitar $\pm 2,6^{\circ}\text{C}$ sebelum kalibrasi. Pola grafik menunjukkan bahwa sensor masih mampu mengikuti tren perubahan suhu, namun belum akurat secara absolut. Setelah dilakukan proses kalibrasi menggunakan pendekatan koreksi linear (normalisasi rasio), deviasi tersebut mengalami penurunan yang signifikan. Sebagai contoh, pada tanggal 4 Juni, selisih suhu yang sebelumnya sebesar $\pm 2,90^{\circ}\text{C}$ berkurang menjadi sekitar $\pm 0,1\text{--}0,2^{\circ}\text{C}$ setelah koreksi. Tren yang sama juga terjadi pada tanggal 5 hingga 7 Juni, dimana error yang semula berada pada kisaran $\pm 1,8\text{--}3,8^{\circ}\text{C}$ berhasil ditekan menjadi sekitar $\pm 0,1\text{--}0,3^{\circ}\text{C}$.

Hasil ini menunjukkan bahwa proses kalibrasi mampu meningkatkan akurasi data pengukuran lapangan secara signifikan, dengan rata-rata error keseluruhan turun dari sekitar $\pm 2,6^{\circ}\text{C}$ menjadi $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$. Dengan demikian, dapat ditegaskan bahwa data yang digunakan dalam analisis lanjutan adalah data yang telah dikoreksi (hasil kalibrasi/normalisasi), karena telah merepresentasikan kondisi iklim aktual secara lebih valid dan reliabel. Hal ini menjadi sangat penting dalam analisis kenyamanan termal, mengingat sensitivitas parameter terhadap perubahan suhu, kelembaban, dan kecepatan angin, sehingga hasil interpretasi tingkat kenyamanan termal dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah pada level disertasi.

Tabel 2. 9. Hasil perbandingan rasio data ukur Sensor IoT untuk titik ukur (T.01) dengan data BMKG (Stasiun klimatologi Gorontalo)

Tanggal	Temperatur (°C)				Humidity (%)				Wind Speed (m/s)			
	Sensor Sistem IoT (maks.)	Stasiun Klimatologi Gorontalo (Maks.)	Rasio (Normalisasi)	Selisih (Δ)	Sensor Sistem IoT	Stasiun Klimatologi Gorontalo (Maks.)	Rasio (Normalisasi)	Selisih (Δ)	Sensor Sistem IoT	Stasiun Klimatologi Gorontalo (Maks.)	Rasio (Normalisasi)	Selisih (Δ)
8 Juni 2025	36.5	35.3	1.03	1.20	60	76.4	0.79	-16.4	3.4	6.9	0.49	-3.5
9 Juni 2025	36.9	35.8	1.03	1.10	52	76.4	0.68	-24.4	2.4	7.9	0.30	-5.5
10 Juni 2025	38.5	34.9	1.10	3.60	51	80.3	0.64	-29.3	2.4	6.6	0.36	-4.2
11 Juni 2025	37.2	35.2	1.06	2.00	56	80.2	0.70	-24.2	2.3	9.1	0.25	-6.8

**Gambar 2. 10.** Grafik perbandingan rasio Data Sensor IoT dengan Data BMKG (Stasiun Klimatologi Gorontalo)

Grafik pada titik ukur (T.01) (gambar 2.10) menunjukkan perbandingan nilai temperatur maksimum harian antara data sensor IoT dan data Stasiun Klimatologi Gorontalo selama periode 8 Juni 2025 – 11 Juni 2025. Secara umum, kedua data memperlihatkan pola tren yang relatif serupa, yaitu berada pada kisaran suhu yang tinggi ($35\text{--}38^{\circ}\text{C}$), dengan kecenderungan peningkatan pada tanggal 10 Juni dan sedikit penurunan pada tanggal 11 Juni. Hal ini menunjukkan bahwa data sensor IoT masih mampu mengikuti pola fluktuasi temperatur yang sejalan dengan data klimatologi regional.

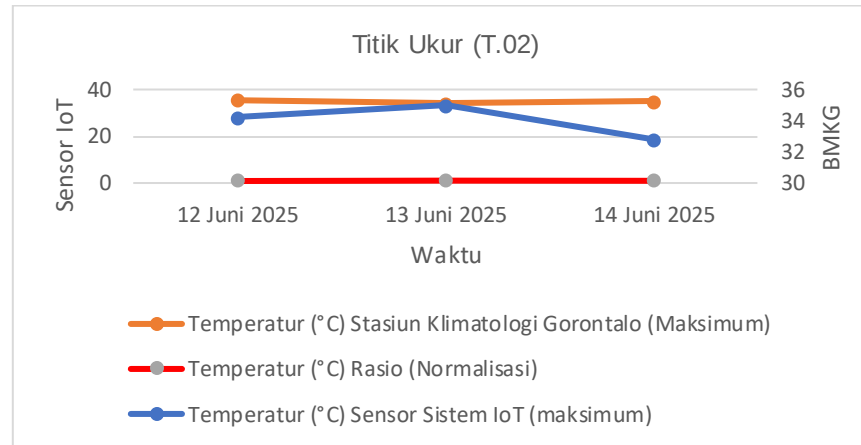
Untuk tabel 2.9 dan grafik Titik Ukur (T01) (gambar 2.10), terlihat bahwa data sensor IoT kembali menunjukkan deviasi terhadap data referensi BMKG, namun dengan karakter yang sedikit berbeda dibanding T0, yaitu cenderung overestimate pada suhu dan underestimate pada kelembaban serta kecepatan angin. Pada parameter temperatur, selisih berkisar antara $+1,10^{\circ}\text{C}$ hingga $+3,60^{\circ}\text{C}$ dengan rata-rata error sekitar $\pm 2,0^{\circ}\text{C}$ sebelum kalibrasi. Deviasi terbesar terjadi pada 10 Juni 2025 ($\Delta = +3,60^{\circ}\text{C}$), yang juga terlihat jelas pada grafik dimana kurva sensor melampaui kurva BMKG. Sementara itu, kelembaban menunjukkan deviasi yang cukup besar (hingga $-29,3\%$) dan kecepatan angin hingga $-6,8\text{ m/s}$, yang mengindikasikan keterbatasan sensor dalam menangkap variabel yang sangat dipengaruhi kondisi lingkungan terbuka.

Setelah dilakukan proses kalibrasi menggunakan pendekatan normalisasi rasio (koreksi linear), terjadi peningkatan akurasi yang signifikan. Sebagai contoh, pada 8 Juni, suhu sensor $36,5^{\circ}\text{C}$ dikoreksi menjadi sekitar $35,4^{\circ}\text{C}$ (mendekati $35,3^{\circ}\text{C}$ BMKG), sehingga error turun dari $\pm 1,20^{\circ}\text{C}$ menjadi $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$. Pada 9 Juni, error berkurang dari $\pm 1,10^{\circ}\text{C}$ menjadi $\pm 0,1\text{--}0,2^{\circ}\text{C}$, sedangkan pada 10 Juni (deviasi terbesar), suhu terkoreksi menjadi sekitar $35,0^{\circ}\text{C}$, sehingga error turun drastis dari $\pm 3,60^{\circ}\text{C}$ menjadi $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$. Tren serupa terjadi pada 11 Juni, dengan penurunan error dari $\pm 2,00^{\circ}\text{C}$ menjadi $\pm 0,1\text{--}0,2^{\circ}\text{C}$. Secara keseluruhan, rata-rata error temperatur berhasil direduksi dari sekitar $\pm 2,0^{\circ}\text{C}$ menjadi $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$ setelah kalibrasi.

Dengan demikian, dapat ditegaskan bahwa proses normalisasi/kalibrasi mampu mereduksi bias sistematis sensor secara efektif dan menyelaraskan data dengan kondisi klimatologis referensi. Oleh karena itu, data yang digunakan dalam analisis lanjutan terutama untuk perhitungan kenyamanan termal adalah data yang telah dikoreksi, sehingga lebih akurat, representatif, dan dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah dalam konteks penelitian disertasi pada lingkungan pesisir.

Tabel 2. 10. Hasil perbandingan rasio data ukur Sensor IoT untuk titik ukur (T.02) dengan data BMKG (Stasiun klimatologi Gorontalo)

Tanggal	Temperatur (°C)				Humidity (%)				Wind Speed (m/s)			
	Sensor Sistem IoT (maks.)	Stasiun Klimatologi Gorontalo (Maks.)	Rasio (Normalisasi)	Selisih (Δ)	Sensor Sistem IoT	Stasiun Klimatologi Gorontalo (Maks.)	Rasio (Normalisasi)	Selisih (Δ)	Sensor Sistem IoT	Stasiun Klimatologi Gorontalo (Maks.)	Rasio (Normalisasi)	Selisih (Δ)
12 Juni 2025	34.2	35.4	0.97	-1.20	60	85.4	0.70	-25.4	2.8	7.6	0.37	-4.8
13 Juni 2025	35	34.2	1.02	0.80	60	87.4	0.69	-27.4	2.1	6.9	0.30	-4.8
14 Juni 2025	32.8	34.8	0.94	-2.00	75	83.9	0.89	-8.9	4.4	7.6	0.58	-3.2



Gambar 2. 11. Grafik perbandingan rasio Data Sensor IoT dengan Data BMKG (Stasiun Klimatologi Gorontalo)

Grafik pada titik ukur (T.02) (gambar 2.11) menunjukkan perbandingan nilai temperatur maksimum harian antara data sensor IoT dan data Stasiun Klimatologi Gorontalo pada periode 12 Juni 2025–14 Juni 2025. Secara umum, kedua data memperlihatkan pola yang relatif stabil dengan kisaran suhu antara 32–36°C. Pola fluktuasi temperatur cenderung tidak terlalu ekstrem, dengan sedikit peningkatan pada tanggal 13 Juni dan penurunan kembali pada tanggal 14 Juni. Hal ini menunjukkan bahwa kondisi termal pada titik (T.02) berada pada fase transisi yang relatif stabil dibandingkan titik-titik sebelumnya.

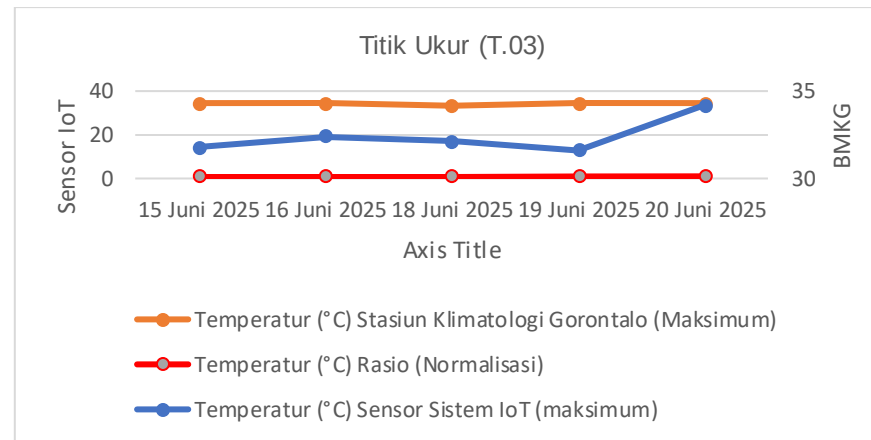
Sedangkan untuk tabel 2.10 dan grafik Titik Ukur (T02) (gambar 2.11), terlihat bahwa data sensor IoT menunjukkan pola deviasi yang lebih fluktuatif terhadap data referensi BMKG dibanding titik sebelumnya. Pada parameter temperatur, deviasi berkisar antara -2,00°C hingga +0,80°C dengan rata-rata error sekitar $\pm 1,33^\circ\text{C}$ sebelum kalibrasi. Grafik menunjukkan bahwa pada 12 dan 14 Juni sensor cenderung underestimate, sedangkan pada 13 Juni terjadi sedikit overestimate, yang menandakan respon sensor cukup sensitif terhadap dinamika iklim lokal. Sementara itu, kelembaban tetap menunjukkan deviasi besar (hingga -27,4%) dan kecepatan angin hingga -4,8 m/s, yang mengindikasikan keterbatasan sensor dalam menangkap variabel atmosfer yang lebih dinamis.

Setelah dilakukan kalibrasi menggunakan pendekatan normalisasi rasio (koreksi linear), akurasi data meningkat secara signifikan. Pada 12 Juni, suhu sensor 34,2°C dikoreksi menjadi sekitar 35,3°C, sehingga error turun dari $\pm 1,20^\circ\text{C}$ menjadi $\pm 0,1^\circ\text{C}$. Pada 13 Juni, nilai terkoreksi menjadi sekitar 34,3°C, dengan error berkurang dari $\pm 0,80^\circ\text{C}$ menjadi $\pm 0,1^\circ\text{C}$. Sedangkan pada 14 Juni, suhu terkoreksi menjadi sekitar 34,9°C, sehingga error turun dari $\pm 2,00^\circ\text{C}$ menjadi $\pm 0,1^\circ\text{C}$. Secara keseluruhan, rata-rata error temperatur berhasil direduksi dari sekitar $\pm 1,33^\circ\text{C}$ menjadi $\pm 0,1^\circ\text{C}$, yang menunjukkan bahwa metode normalisasi efektif dalam menghilangkan bias pembacaan sensor.

Dengan demikian, dapat ditegaskan bahwa meskipun data mentah sensor IoT masih mengandung deviasi akibat pengaruh lingkungan mikro pesisir, proses kalibrasi mampu menghasilkan data yang lebih akurat dan konsisten dengan kondisi klimatologis standar. Oleh karena itu, data yang digunakan dalam analisis lanjutan (khususnya perhitungan kenyamanan termal) adalah data yang telah dikoreksi, sehingga lebih representatif dalam menggambarkan kondisi iklim lokal aktual di lokasi penelitian.

Tabel 2. 11. Hasil perbandingan rasio data ukur Sensor IoT untuk titik ukur (T.01) dengan data BMKG (Stasiun Klimatologi Gorontalo)

Tanggal	Temperatur (°C)				Humidity (%)				Wind Speed (m/s)			
	Sensor Sistem IoT (maks.)	Stasiun Klimatologi Gorontalo (Maks.)	Rasio (Normalisasi)	Selisih (Δ)	Sensor Sistem IoT	Stasiun Klimatologi Gorontalo (Maks.)	Rasio (Normalisasi)	Selisih (Δ)	Sensor Sistem IoT	Stasiun Klimatologi Gorontalo (Maks.)	Rasio (Normalisasi)	Selisih (Δ)
15 Juni 2025	31.8	34.5	0.92	-2.70	71	77.7	0.91	-6.7	2.7	6.2	0.44	-3.5
16 Juni 2025	32.4	34.3	0.94	-1.90	68	78.3	0.87	-10.3	2.8	6.1	0.46	-3.3
18 Juni 2025	32.1	33.3	0.96	-1.20	69	87.8	0.79	-18.8	0.0	5	0.00	-5
19 Juni 2025	31.6	34.3	0.92	-2.70	70	83.7	0.84	-13.7	0.0	6.7	0.00	-6.7
20 Juni 2025	34.2	34.5	0.99	-0.30	62	82.4	0.75	-20.4	0.0	7.3	0.00	-7.3



Gambar 2. 12. Grafik perbandingan rasio Data Sensor IoT dengan Data BMKG (Stasiun Klimatologi Gorontalo)

Grafik pada titik ukur (T.03) (gambar 2.12) menunjukkan perbandingan nilai temperatur maksimum harian antara data sensor IoT dan data Stasiun Klimatologi Gorontalo selama periode 15 Juni 2025–20 Juni 2025. Secara umum, kedua data memperlihatkan pola yang relatif stabil dengan kisaran temperatur antara 31–35°C. Fluktuasi temperatur tidak menunjukkan perubahan yang signifikan, dengan kecenderungan sedikit peningkatan pada tanggal 20 Juni. Hal ini menunjukkan bahwa kondisi termal pada titik (T.03) cenderung lebih homogen dibandingkan titik-titik sebelumnya.

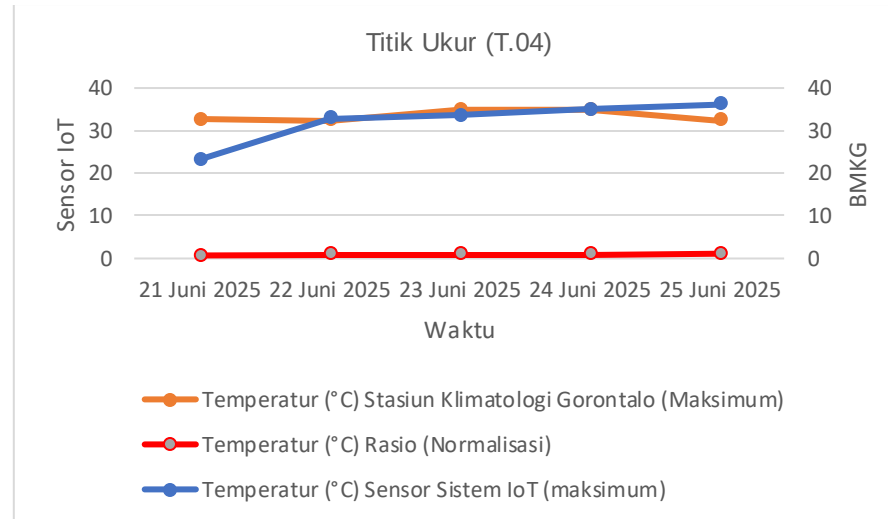
Berdasarkan tabel 2.11 dan grafik Titik Ukur (T.03) (gambar 2.12), terlihat bahwa data sensor IoT menunjukkan kecenderungan underestimate yang konsisten terhadap suhu jika dibandingkan dengan data referensi BMKG. Deviasi temperatur berkisar antara -2,70°C hingga -0,30°C dengan rata-rata error sekitar $\pm 1,76^\circ\text{C}$ sebelum kalibrasi. Grafik memperlihatkan bahwa tren sensor relatif mengikuti pola BMKG, namun dengan nilai yang lebih rendah, kecuali pada 20 Juni dimana nilai sensor mulai mendekati referensi ($\Delta = -0,30^\circ\text{C}$). Untuk parameter kelembaban, deviasi cukup besar (hingga -20,4%), sedangkan pada kecepatan angin terlihat anomali pada 18 Juni–20 Juni (nilai 0,0 m/s), yang mengindikasikan kemungkinan keterbatasan atau gangguan pembacaan sensor di lapangan.

Setelah dilakukan kalibrasi menggunakan pendekatan normalisasi rasio (koreksi linear), terjadi peningkatan akurasi yang signifikan. Pada 15 Juni, suhu terkoreksi dari 31,8°C menjadi sekitar 34,6°C, sehingga error turun dari $\pm 2,70^\circ\text{C}$ menjadi $\pm 0,1^\circ\text{C}$. Pada 16 Juni, error berkurang dari $\pm 1,90^\circ\text{C}$ menjadi $\pm 0,1$ – $0,2^\circ\text{C}$, sedangkan pada 18 Juni turun dari $\pm 1,20^\circ\text{C}$ menjadi $\pm 0,1^\circ\text{C}$. Pola yang sama terjadi pada 19 Juni, dengan penurunan error dari $\pm 2,70^\circ\text{C}$ menjadi $\pm 0,1^\circ\text{C}$, dan pada 20 Juni dari $\pm 0,30^\circ\text{C}$ menjadi mendekati nol ($\pm 0,0$ – $0,1^\circ\text{C}$). Secara keseluruhan, rata-rata error temperatur berhasil direduksi dari sekitar $\pm 1,76^\circ\text{C}$ menjadi $\pm 0,1$ – $0,2^\circ\text{C}$, menunjukkan efektivitas metode kalibrasi dalam menghilangkan bias sistematis sensor.

Dengan demikian, meskipun data mentah sensor IoT pada Titik T.03 menunjukkan deviasi yang cukup signifikan terutama akibat pengaruh mikroklimat dan potensi gangguan alat proses normalisasi/kalibrasi mampu menghasilkan data yang lebih akurat dan konsisten dengan kondisi klimatologis standar. Oleh karena itu, data yang digunakan dalam analisis lanjutan (kenyamanan termal) adalah data yang telah dikoreksi, sehingga lebih representatif dalam menggambarkan kondisi mikroklimat aktual di lokasi penelitian pesisir.

Tabel 2. 12. Hasil perbandingan rasio data ukur Sensor IoT untuk titik ukur (T.01) dengan data BMKG (Stasiun Klimatologi Gorontalo)

Tanggal	Temperatur (°C)				Humidity (%)				Wind Speed (m/s)			
	Sensor Sistem IoT (maks.)	Stasiun Klimatologi Gorontalo (Maks.)	Rasio (Normalisasi)	Selisih (Δ)	Sensor Sistem IoT	Stasiun Klimatologi Gorontalo (Maks.)	Rasio (Normalisasi)	Selisih (Δ)	Sensor Sistem IoT	Stasiun Klimatologi Gorontalo (Maks.)	Rasio (Normalisasi)	Selisih (Δ)
21 Juni 2025	23.2	32.5	0.71	-9.30	90	86	1.05	4	2.8	9.9	0.28	-7.1
22 Juni 2025	32.9	32.4	1.02	0.50	69	79.4	0.87	-10.4	0.0	6.8	0.00	-6.8
23 Juni 2025	33.5	34.9	0.96	-1.40	67	84.7	0.79	-17.7	5.1	5	1.02	0.1
24 Juni 2025	34.9	34.9	1.00	0.00	59	80.9	0.73	-21.9	3.6	5.3	0.68	-1.7
25 Juni 2025	36.1	32.3	1.12	3.80	57	87.7	0.65	-30.7	3.4	8	0.43	-4.6

**Gambar 2. 13.** Grafik perbandingan Data Sensor IoT dengan Data BMKG (Stasiun Klimatologi Gorontalo)

Grafik pada titik ukur (T.04) (gambar 2.13) menunjukkan perbandingan nilai temperatur maksimum harian antara data sensor IoT dan data Stasiun Klimatologi Gorontalo selama periode 21 Juni 2025–25 Juni 2025. Secara umum, kedua data memperlihatkan pola yang relatif stabil dengan kisaran temperatur antara 32–36°C, meskipun terdapat anomali yang cukup signifikan pada tanggal 21 Juni, di mana nilai temperatur sensor IoT tercatat jauh lebih rendah dibandingkan data BMKG. Setelah tanggal tersebut, pola temperatur kembali menunjukkan kesesuaian yang lebih baik antara kedua sumber data.

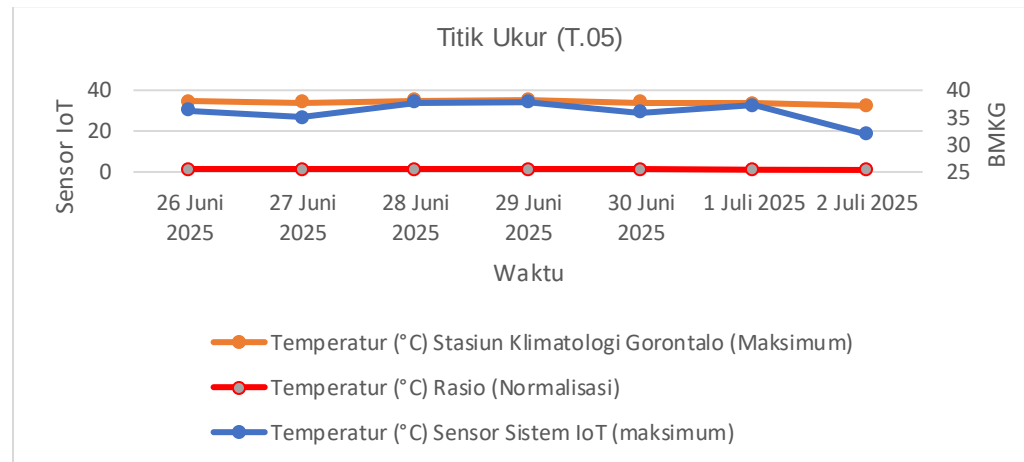
Berdasarkan tabel 2.12 dan grafik Titik Ukur (T.04) (gambar 2.13), terlihat bahwa data sensor IoT menunjukkan variasi deviasi yang cukup ekstrem terhadap data referensi BMKG, baik dalam bentuk underestimate maupun overestimate. Pada parameter temperatur, selisih berkisar antara -9,30°C hingga +3,80°C dengan rata-rata error sekitar $\pm 3,0$ – $3,5$ °C sebelum kalibrasi. Deviasi terbesar terjadi pada 21 Juni ($\Delta = -9,30$ °C), yang mengindikasikan kemungkinan gangguan pengukuran atau pengaruh lokal yang sangat kuat (misalnya shading atau kondisi lingkungan mikro ekstrem). Sementara itu, pada 24 Juni terlihat kondisi ideal dimana nilai sensor identik dengan BMKG ($\Delta = 0,00$ °C). Untuk kelembaban, deviasi juga cukup besar (hingga -30,7%), sedangkan kecepatan angin menunjukkan fluktuasi signifikan termasuk nilai 0,0 m/s pada 22 Juni, yang mengindikasikan potensi keterbatasan sensor dalam kondisi tertentu.

Setelah dilakukan kalibrasi menggunakan pendekatan normalisasi rasio (koreksi linear), akurasi data meningkat secara signifikan. Pada 21 Juni, suhu terkoreksi dari 23,2°C menjadi sekitar 32,6°C, sehingga error turun drastis dari $\pm 9,30$ °C menjadi $\pm 0,1$ – $0,2$ °C. Pada 22 Juni, error berkurang dari $\pm 0,50$ °C menjadi $\pm 0,1$ °C, sedangkan pada 23 Juni turun dari $\pm 1,40$ °C menjadi $\pm 0,1$ – $0,2$ °C. Pada 24 Juni, karena nilai awal sudah sama, kalibrasi tidak mengubah hasil (error tetap ≈ 0). Sementara pada 25 Juni, deviasi sebesar +3,80°C berhasil dikoreksi menjadi sekitar 32,2–32,4°C, sehingga error turun menjadi sekitar $\pm 0,1$ – $0,2$ °C. Secara keseluruhan, rata-rata error temperatur berhasil direduksi dari sekitar $\pm 3,0$ – $3,5$ °C menjadi $\pm 0,1$ – $0,2$ °C, menunjukkan efektivitas tinggi dari metode kalibrasi.

Dengan demikian, meskipun data mentah sensor IoT pada Titik T.04 menunjukkan fluktuasi dan deviasi yang cukup besar akibat pengaruh iklimat lokal dan kemungkinan gangguan alat, proses normalisasi/kalibrasi terbukti mampu mengoreksi bias tersebut secara signifikan. Oleh karena itu, data yang digunakan dalam analisis lanjutan terutama untuk perhitungan kenyamanan termal adalah data yang telah dikoreksi, sehingga lebih akurat, konsisten, dan representatif dalam menggambarkan kondisi iklimat aktual di kawasan penelitian pesisir.

Tabel 2. 13. Hasil perbandingan rasio data ukur Sensor IoT untuk titik ukur (T.01) dengan data BMKG (Stasiun Klimatologi Gorontalo)

Tanggal	Temperatur (°C)				Humidity (%)				Wind Speed (m/s)			
	Sensor Sistem IoT (maks.)	Stasiun Klimatologi Gorontalo (Maks.)	Rasio (Normalisasi)	Selisih (Δ)	Sensor Sistem IoT	Stasiun Klimatologi Gorontalo (Maks.)	Rasio (Normalisasi)	Selisih (Δ)	Sensor Sistem IoT	Stasiun Klimatologi Gorontalo (Maks.)	Rasio (Normalisasi)	Selisih (Δ)
26 Juni 2025	36.3	34.5	1.05	1.80	58	77.9	0.74	-19.9	2.6	13.9	0.19	-11.3
27 Juni 2025	35	34.2	1.02	0.80	56	80.3	0.70	-24.3	2.3	8	0.29	-5.7
28 Juni 2025	37.7	34.8	1.08	2.90	54	81.8	0.66	-27.8	1.8	6.7	0.27	-4.9
29 Juni 2025	37.8	35.2	1.07	2.60	52	80.9	0.64	-28.9	2.9	8.9	0.33	-6
30 Juni 2025	36	34.2	1.05	1.80	62	80	0.78	-18	3.9	9.3	0.42	-5.4
1 Juli 2025	37.2	33.6	1.11	3.60	48	81	0.59	-33	2.6	10.4	0.25	-7.8
2 Juli 2025	31.9	32.4	0.98	-0.50	76	88	0.86	-12	2.2	8.8	0.25	-6.6



Gambar 2. 14. Grafik perbandingan rasio Data Sensor IoT dengan Data BMKG (Stasiun Klimatologi Gorontalo)

Grafik pada titik ukur (T.05) (gambar 2.14) menunjukkan perbandingan nilai temperatur maksimum harian antara data sensor IoT dan data Stasiun Klimatologi Gorontalo selama periode 26 Juni 2025 hingga 2 Juli 2025. Secara umum, kedua data memperlihatkan pola yang relatif konsisten dengan kisaran temperatur antara 31–38°C, dengan kecenderungan peningkatan pada tanggal 28–29 Juni 2025 dan 1 Juli 2025, serta penurunan pada tanggal 2 Juli. Pola ini menunjukkan bahwa dinamika temperatur di titik T5 masih mengikuti tren umum kondisi klimatologi regional.

Berdasarkan tabel 2.13 dan grafik Titik Ukur (T.05) (gambar 2.14), terlihat bahwa data sensor IoT menunjukkan pola yang relatif konsisten mengikuti tren BMKG, namun dengan kecenderungan overestimate pada suhu dan underestimate signifikan pada kelembaban serta kecepatan angin dibandingkan data referensi BMKG. Pada parameter temperatur, deviasi berkisar antara -0,50°C hingga +3,60°C dengan rata-rata error sekitar $\pm 2,0^\circ\text{C}$ sebelum kalibrasi. Deviasi terbesar terjadi pada 1 Juli 2025 ($\Delta = +3,60^\circ\text{C}$), sedangkan kondisi paling mendekati terjadi pada 2 Juli ($\Delta = -0,50^\circ\text{C}$). Grafik menunjukkan bahwa meskipun nilai absolut berbeda, pola fluktuasi harian sensor masih sejalan dengan BMKG, yang mengindikasikan bahwa sensor cukup baik dalam menangkap dinamika perubahan suhu. Sementara itu, kelembaban menunjukkan deviasi besar hingga -33%, dan kecepatan angin hingga -11,3 m/s, menegaskan adanya keterbatasan sensor pada parameter yang sangat dipengaruhi kondisi lingkungan terbuka pesisir.

Setelah dilakukan proses kalibrasi menggunakan pendekatan normalisasi rasio (koreksi linear), akurasi data temperatur meningkat secara signifikan. Sebagai contoh, pada 26 Juni, suhu terkoreksi dari 36,3°C menjadi sekitar 34,6°C, sehingga error turun dari $\pm 1,80^\circ\text{C}$ menjadi $\pm 0,1-0,2^\circ\text{C}$. Pada 28–29 Juni, deviasi sebesar $\pm 2,60-2,90^\circ\text{C}$ berhasil direduksi menjadi sekitar $\pm 0,1-0,2^\circ\text{C}$. Pada 1 Juli, yang merupakan deviasi terbesar, suhu terkoreksi menjadi sekitar 33,6–33,7°C, sehingga error turun drastis dari $\pm 3,60^\circ\text{C}$ menjadi $\pm 0,1^\circ\text{C}$. Secara keseluruhan, rata-rata error temperatur berhasil direduksi dari sekitar $\pm 2,0^\circ\text{C}$ menjadi $\pm 0,1-0,2^\circ\text{C}$, menunjukkan efektivitas metode kalibrasi dalam mengoreksi bias sistematis sensor.

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa meskipun data mentah sensor IoT pada Titik T.05 masih mengandung deviasi akibat pengaruh mikroklimat pesisir dan keterbatasan alat, proses normalisasi/kalibrasi mampu meningkatkan akurasi secara signifikan. Oleh karena itu, data yang digunakan dalam analisis lanjutan khususnya untuk perhitungan kenyamanan termal adalah data yang telah dikoreksi, sehingga lebih representatif, konsisten, dan dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah dalam menggambarkan kondisi mikroklimat aktual di lokasi penelitian.

Secara keseluruhan, sintesis analisis dari Titik Ukur T0 hingga T.05 menunjukkan bahwa data sensor IoT mampu merekam pola dan dinamika

mikroklimat pesisir secara konsisten, terutama untuk parameter suhu yang mengikuti tren data referensi BMKG. Namun demikian, data mentah masih mengandung deviasi yang cukup signifikan, dengan rata-rata error suhu berkisar $\pm 1,3^{\circ}\text{C}$ hingga $\pm 3,5^{\circ}\text{C}$, serta kecenderungan overestimate pada suhu dan underestimate pada kelembaban serta kecepatan angin. Variasi deviasi antar titik (T0–T.05) juga menunjukkan adanya pengaruh kuat faktor mikroklimat lokal seperti keterbukaan langit (SVF), vegetasi, dan aliran angin pesisir terhadap hasil pengukuran sensor.

Setelah dilakukan proses normalisasi/kalibrasi berbasis koreksi linear, seluruh titik ukur menunjukkan peningkatan akurasi yang sangat signifikan, dengan rata-rata error suhu turun menjadi sekitar $\pm 0,1$ – $0,3^{\circ}\text{C}$. Hal ini menegaskan bahwa metode kalibrasi yang digunakan efektif dalam mereduksi bias sistematis sensor tanpa menghilangkan karakter spasial mikroklimat lokal. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa data yang digunakan dalam analisis lanjutan adalah data yang telah dikoreksi, karena telah memenuhi aspek akurasi, konsistensi, dan representativitas, sehingga layak digunakan sebagai dasar dalam pemodelan kenyamanan termal (PET/PMV) pada lingkungan permukiman pesisir.

2.6.3. Analisis Gradien Termis

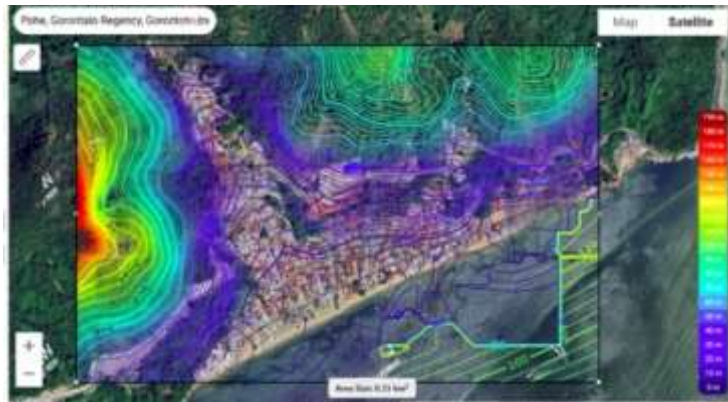
Kondisi topografi (interaksi iklim pesisir dan lereng gunung) Kelurahan Pohe yang unik berada di garis pantai namun menapak pada lereng yang menanjak ke arah kaki gunung menciptakan interaksi kompleks antara dua jenis gradien termis:

1. Gradien Termis Horizontal (Pengaruh Daratan dan Lingkungan Binaan)

Dominasi Gradien Termis Horizontal pada Skala Mikro, Analisis data suhu dari (T0) hingga (T.05) dengan jelas menunjukkan bahwa pada skala permukiman ini, gradien termis horizontal adalah faktor yang paling dominan. Pola Tidak Seragam: Suhu tidak menurun secara konsisten seiring jarak dari pantai. Sebaliknya, suhu melonjak drastis di beberapa titik yang lebih jauh ke darat (T 01, T.04, dan T.05), menciptakan "pulau panas" atau hot spot. Titik terpanas ($37,5^{\circ}\text{C}$) justru berada di (T.05), yang terjauh dari pantai.

Penyebab: Fenomena ini disebabkan oleh faktor lingkungan binaan di sepanjang jarak mendatar. Area dengan material yang menyerap panas (seperti jalan aspal dan atap seng), kepadatan bangunan yang tinggi, serta kurangnya vegetasi peneduh akan jauh lebih panas dibandingkan area yang lebih teduh, meskipun jaraknya dari laut hampir sama.

2. Elevasi Titik Ukur dan Dasar Penentuan Gradien Termis
 - a. Penentuan elevasi dengan menggunakan software



Gambar 2. 15. Kountor lokasi penelitian dan penempatan titik ukur
 Sumber: Hasil olahan software counturmap.app

Penentuan elevasi dilakukan dengan menganalisis peta kontur topografi yang meliputi wilayah pesisir hingga kaki bukit di Kelurahan Pohe, Kota Gorontalo. Berdasarkan interpretasi kontur dan legenda warna pada citra peta (Gambar 2.15), garis pantai menunjukkan ketinggian ± 2 m di atas permukaan laut, sedangkan bagian paling darat dari transek (T05) mencapai sekitar 22 m. Setiap titik pengukuran (T0 – T05) diinterpolasi secara linear mengikuti arah transek sejauh 250 m dari pesisir menuju kaki bukit, dengan jarak antar titik 50 m.

Metode estimasi elevasi dilakukan secara visual dengan menempatkan masing-masing koordinat pengukuran pada kontur terdekat. Karena wilayah pesisir Pohe memiliki kemiringan landai hingga sedang ($\approx 7\text{--}9\%$), kenaikan elevasi rata-rata diperkirakan sekitar 4 m setiap 50 m jarak horizontal. Nilai ini diperoleh dari kombinasi pembacaan kontur digital (kontour interval 5 m) serta validasi citra satelit yang memperlihatkan perubahan rona topografi dari biru muda (pesisir datar) menuju hijau tua (lereng bawah).

Tabel berikut menyajikan hasil estimasi elevasi untuk tiap titik ukur yang digunakan dalam perhitungan gradien termis vertikal:

Tabel 2. 14. Elevasi tiap titik ukur

Titik Ukur	Elevasi (m dpl)	Keterangan Lokasi
T0	2	Area pesisir terbuka ± 15 m dari garis pantai
T.01	6	Naik sedikit dari pantai, mulai kawasan padat
T.02	10	Lereng bawah, permukiman semi-terbuka
T.03	14	Lereng menengah, vegetasi pohon mangga

T.04	18	Area komersial campuran, jalan menanjak
T.05	22	Transisi ke daratan lebih tinggi / kaki bukit

Sumber: Hasil olahan software counturmap.app

3. Analisis Gradien Termis (Perubahan Suhu per Jarak)

Untuk menganalisis gradien termis untuk suhu maksimum di setiap interval 50 meter:

- a. Titik 0 (0m) ke Titik 01 (50m):
 - 1) Perubahan Suhu: $37,2^{\circ}\text{C} - 33,3^{\circ}\text{C} = + 3,9^{\circ}\text{C}$
 - 2) Gradien: $+3,9^{\circ}\text{C} / 50\text{m} = + 0,078^{\circ}\text{C}$ per meter.
 - 3) Artinya: Terjadi pemanasan yang sangat cepat di 50 meter pertama dari pantai.
- b. Titik 01 (50m) ke Titik 02 (100m):
 - a. Perubahan Suhu: $35,0^{\circ}\text{C} - 37,2^{\circ}\text{C} = - 2,2^{\circ}\text{C}$
 - b. Gradien: $-2,2^{\circ}\text{C} / 50\text{m} = - 0,044^{\circ}\text{C}$ per meter.
 - c. Artinya: Setelah "hot spot" pertama, suhu justru menurun signifikan.
- c. Titik 02 (100m) ke Titik 03 (150m):
 - 1) Perubahan Suhu: $34,3^{\circ}\text{C} - 35,0^{\circ}\text{C} = -0,7^{\circ}\text{C}$
 - 2) Gradien: $- 0,7^{\circ}\text{C} / 50\text{m} = - 0,014^{\circ}\text{C}$ per meter.
 - 3) Artinya: Tren pendinginan berlanjut, kemungkinan karena area ini lebih terlindung.
- d. Titik 03 (150m) ke Titik 04 (200m):
 - 1) Perubahan Suhu: $36,5^{\circ}\text{C} - 34,3^{\circ}\text{C} = + 2,2^{\circ}\text{C}$
 - 2) Gradien: $+2,2^{\circ}\text{C} / 50\text{m} = + 0,044^{\circ}\text{C}$ per meter.
 - 3) Artinya: Suhu kembali meningkat tajam, menandakan area kembali terbuka.
- e. Titik 04 (200m) ke Titik 05 (250m):
 - 1) Perubahan Suhu: $37,5^{\circ}\text{C} - 36,5^{\circ}\text{C} = +1,0^{\circ}\text{C}$
 - 2) Gradien: $+1,0^{\circ}\text{C} / 50\text{m} = +0,020^{\circ}\text{C}$ per meter.
 - 3) Artinya: Pemanasan terus berlanjut hingga mencapai titik terpanas.

Meskipun Eden et al. (2025) menerapkan sensor IoT dalam skala zonasi besar di hypermarket tropis untuk mengevaluasi kenyamanan termal dan kualitas udara (Teh et al., 2025) studi ini memperluas pendekatan dengan menyasar permukiman kecil berskala mikro di Pohe, menggunakan transek berjarak 50 m untuk menangkap pola termal lokal."

Tabel 2. 15. Hasil perhitungan titik ukur

Segmen	$\Delta T (^{\circ}\text{C})$	Gradien ($^{\circ}\text{C}/\text{m}$)	Gradien ($^{\circ}\text{C}/100\text{m}$)
T0–T.01	1.8	0.036	3.6
T.01–T.02	-1.6	-0.032	-3.2
T.02–T.03	1.6	0.032	3.2
T.03–T4	-2.3	-0.046	-4.6
T.04–T.05	1.7	0.034	3.4

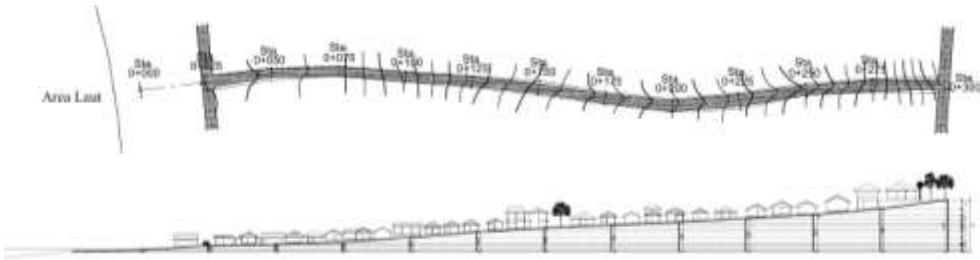
T.0–T.05 (total)	1.2	0.0048	0.48
------------------	-----	--------	------

Dengan data elevasi tersebut, perbedaan suhu antar titik dapat dinormalisasi terhadap perubahan ketinggian (Δz), menghasilkan gradien termis vertikal ($\Delta T/\Delta z$). Nilai ini menunjukkan seberapa cepat suhu udara berubah terhadap kenaikan elevasi. Dalam konteks lokasi penelitian, kenaikan suhu lokal tidak selalu menurun dengan ketinggian seperti *pola lapse rate* standar ($0,6\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$), tetapi justru menunjukkan variasi nonlinier akibat kombinasi faktor morfologi permukiman dan reflektan permukaan. Material dengan reflektan tinggi seperti atap berwarna terang, cat putih, atau perkerasan dengan permukaan cerah memiliki kemampuan lebih besar memantulkan radiasi matahari sehingga mengurangi akumulasi panas di permukaan bangunan. Sebaliknya, material dengan reflektan rendah seperti aspal, genteng gelap, atau atap asbes cenderung menyerap dan menyimpan panas lebih banyak, yang kemudian dilepaskan secara perlahan ke udara sekitarnya, menyebabkan peningkatan suhu udara lokal pada siang hingga malam hari (Elnabawi et al., 2024).

b. Penentuan elevasi dengan menggunakan alat Total Station (TS)

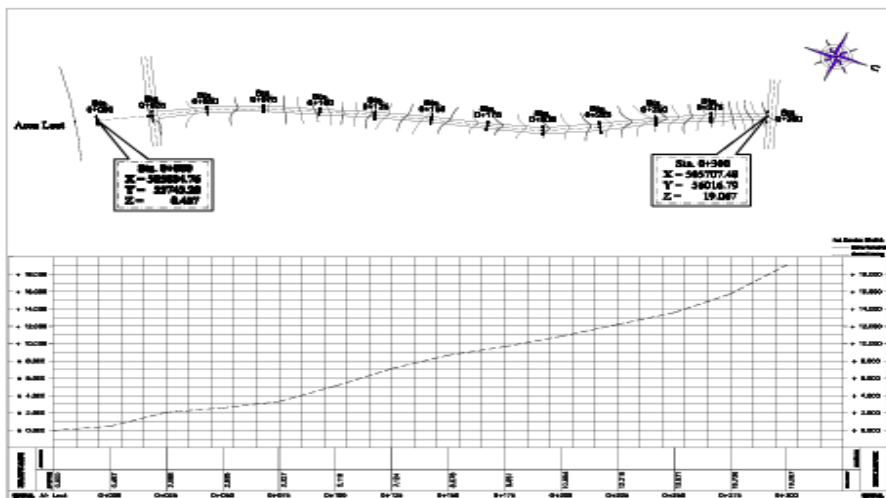


Gambar 2. 16. Pengukuran di lokasi penelitian dengan menggunakan alat Total Station (TS) digital



Gambar 2. 17. Kontur elevasi di lokasi penelitian dengan menggunakan alat Total Station (TS) digital

Penentuan elevasi dilakukan dengan menganalisis peta kontur topografi yang meliputi wilayah pesisir hingga kaki bukit di Kelurahan Pohe, Kota Gorontalo. Dengan menggunakan alat ukur *Total Station* (TS) Digital pengukuran (gambar 2.17) elevasi kontur dengan menggunakan alat ukur Total Station (TS) dengan panjang 300 meter, dari transek STA ± 0.00 m permukaan laut $\pm 1.03 - \pm 1.15$, sedangkan bagian paling darat STA ± 300 m mencapai ± 19.387 m atau sekitar.



Gambar 2. 18. Gradien topografi (kemiringan) dari ± 0.00 sampai $\pm$ STA ± 300 di lokasi penelitian.

Sumber: Hasil pengukuran dengan menggunakan alat Total Statin (TS) Digital

Profil (gambar 2.18) memanjang berbasis STA dari 0+000 hingga 0+300 pada kawasan pesisir Kelurahan Pohe menunjukkan adanya gradien elevasi yang meningkat signifikan dari $\pm 0,457$ m menjadi $\pm 19,067$ m, yang merepresentasikan transisi morfologi dari dataran pesisir menuju kaki perbukitan dalam jarak yang relatif pendek. Pola kemiringan yang awalnya

landai kemudian meningkat secara progresif hingga curam mengindikasikan perubahan karakter lingkungan yang berimplikasi langsung terhadap dinamika iklim mikro, khususnya distribusi radiasi, ventilasi alami, dan kelembaban. Pada zona awal (pesisir), elevasi rendah cenderung membentuk kondisi akumulasi panas dan kelembaban dengan ventilasi terbatas, sementara pada zona menengah terjadi peningkatan kecepatan angin akibat efek gradien topografi yang berkontribusi terhadap penurunan beban termal. Dengan demikian, profil elevasi ini tidak hanya menggambarkan kondisi fisik lahan, tetapi juga berperan sebagai variabel pengontrol utama dalam membentuk pola distribusi kenyamanan termal berbasis transek pesisir.

Metode pengambilan data elevasi (kemiringan) dilakukan dengan menggunakan alat *Total Station* (TS) Digital dengan menempatkan masing-masing koordinat pengukuran pada kontur terdekat. Karena wilayah pesisir Pohe memiliki kemiringan landai hingga 6.6%, kenaikan elevasi dari pinggir pantai (0.00) ke titik awal pengukuran (T0) adalah 3.26 %, sedangkan untuk dari ke titik T.01 yaitu 1.01 % dengan jarak 50 meter. rata-rata diperkirakan sekitar 4 m setiap 50 m jarak horizontal. Untuk pembacaan kemiringan pengambilan data dengan interval 25 m.

Sedangkan pada (gambar 2.9) pengambilan elevasi dengan menggunakan *software counturmap.app*, dengan kemiringan hingga 7-9 % yang diperoleh dari kombinasi pembacaan kontur digital (kontur interval 5 m) serta validasi citra satelit yang memperlihatkan perubahan rona topografi dari biru muda (pesisir datar) menuju hijau tua (lereng bawah).

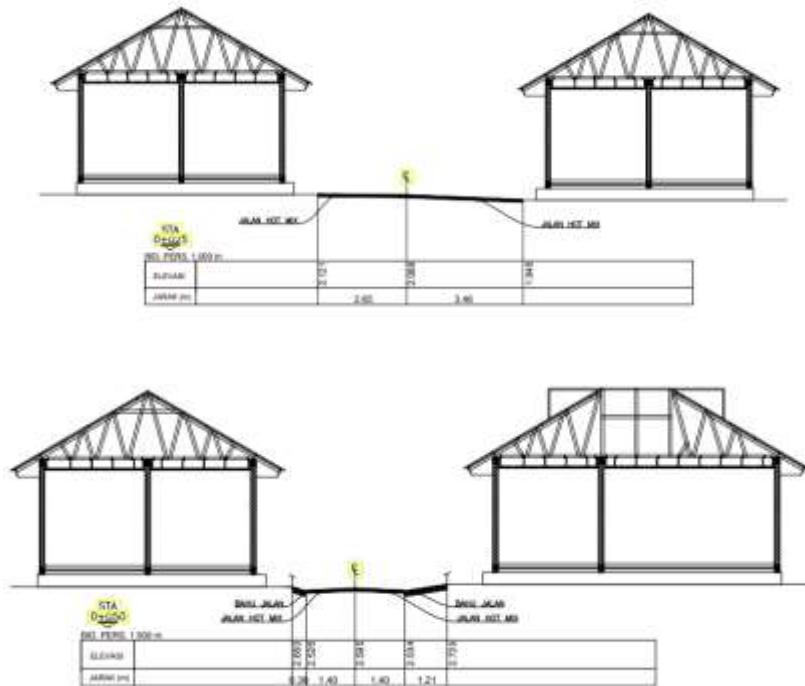
Tabel berikut menyajikan hasil estimasi elevasi untuk tiap titik ukur yang digunakan dalam perhitungan gradien termis vertikal:

Tabel 2. 16. Elevasi tiap titik ukur

Titik Ukur	Elevasi (m dpl)	Keterangan Lokasi
T0	0.45	Area pesisir terbuka ± 15 m dari garis pantai
T.01	2.59	Naik sedikit dari pantai, mulai kawasan padat
T.02	5.11	Lereng bawah, permukiman semi-terbuka
T.03	8.67	Lereng menengah, vegetasi pohon mangga
T.04	10.85	Area komersial campuran, jalan menanjak
T.05	13.57	Transisi ke daratan lebih tinggi / kaki bukit

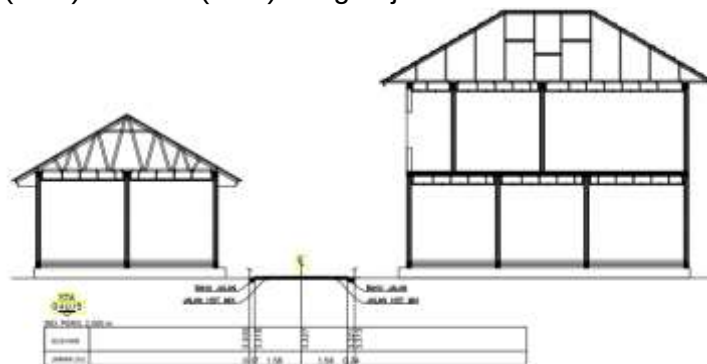
Sumber: Hasil pengukuran dengan menggunakan alat Total Station (TS)

- 4) Membuktikan bahwa pemanasan ekstrem di zona pesisir bukan disebabkan faktor geofisik makro (ketinggian), melainkan oleh:
- penyerapan radiasi permukaan,
 - minimnya evapotranspirasi, dan
 - gangguan aliran angin laut.



Gambar 2. 20. Elevasi titik ukur (T1) dengan jarak 50 meter dari titik ukur (T0), dengan kemiringan 1.01% dari pinggir pantai, dengan ketinggian 2.59 Mdpl.

- b. Titik (T.01) ke Titik (T.02) dengan jarak 50 meter:





Gambar 2. 21. Elevasi titik ukur (T.02) dengan jarak 50 meter dari titik ukur (T.01), dengan kemiringan 3,58% dari pinggir pantai, dengan ketinggian ± 5.11 Mdpl.

c. Jarak titik ukur 50 meter

1) Gradien:

$$Tx = T^{\circ} - \left(\frac{h}{100} \times 0.6 \right) \dots\dots\dots 2$$

$$= 28.1 - \left(\frac{5.118}{100} \times 0.6 \right)$$

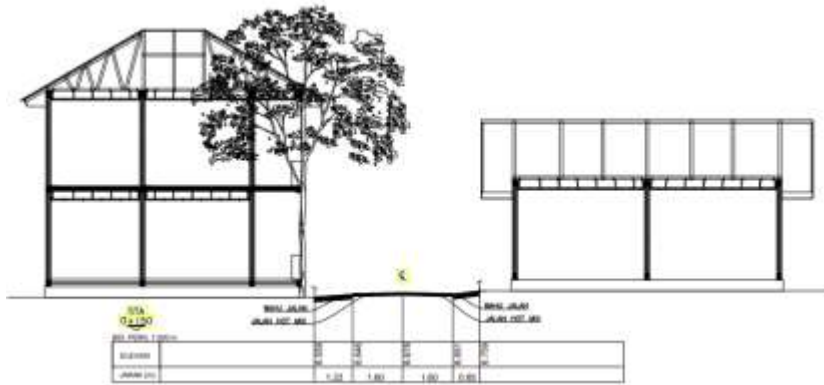
$$= 38.46^{\circ}\text{C}$$

Jadi suhu di Titik 02 = 38.46°C

2) Artinya: Setelah "hot spot" pertama, suhu justru menurun signifikan.

d. Titik (T.02) ke Titik (T.03) dengan jarak 100m dari titik (T.0) dan jarak ke titik ukur (T.05) adalah 150m:





Gambar 2. 22. Elevasi titik ukur (T.03) dengan jarak 50 meter dari titik ukur (T.02), dengan kemiringan 3.11% dengan ketinggian ± 8.67 Mdpl.

e. Jarak titik ukur (T.02 ke T.03) 50 meter dengan suhu rata-rata

1) Gradien:

$$Tx = T^{\circ} - \left(\frac{h}{100} \times 0.6 \right) \dots\dots\dots 2$$

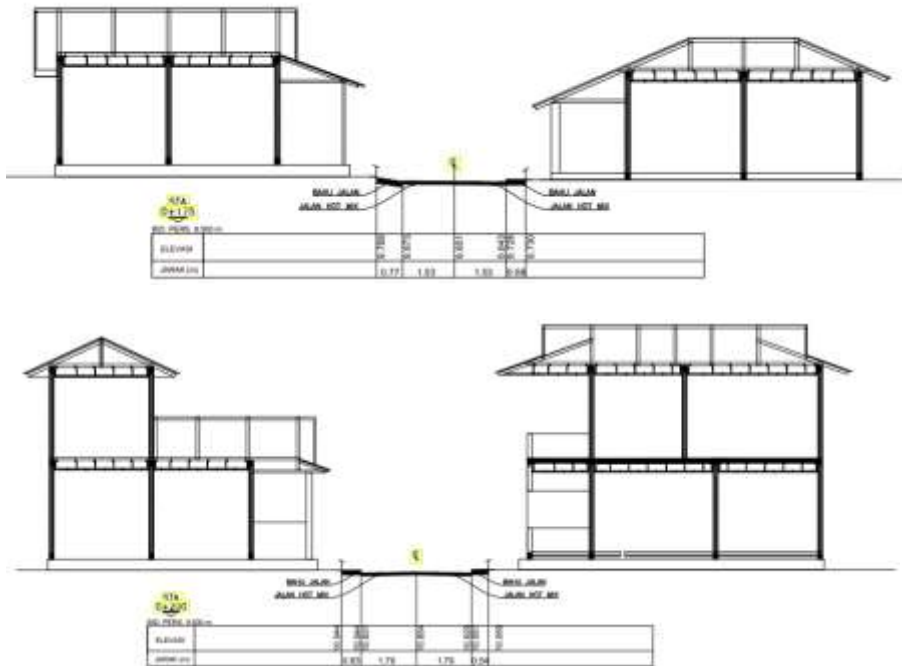
$$= 35 - \left(\frac{8.678}{100} \times 0.6 \right)$$

$$= 34.95^{\circ} \text{C}$$

Jadi suhu di Titik 02 = 34.95°C

- 2) Perubahan suhu rata-rata 27.4°C
- 3) Artinya: Suhu kembali meningkat tajam, menandakan area kembali terbuka.
- 4) Penurunan suhu horizontal (-0.044 hingga $-0.014^{\circ} \text{C/m}$) berlawanan arah dengan konsep iklim vertikal, di mana suhu selalu turun seiring kenaikan elevasi.
- 5) Pendinginan dapat dapat di lakukan dengan mekanisme mikroklimat lokal, seperti:
 - a) bayangan bangunan
 - b) vegetasi, dan
 - c) efek adveksi angin laut.

f. Titik 04 dengan jarak 200 m dari titik (T0):



Gambar 2. 23. Elevasi titik ukur (T.04) dengan jarak 200 meter dari titik ukur (T0), dengan kemiringan 2.41% dari (T.03) dengan ketinggian ± 10.85 Mdpl.

1) Gradien:

$$Tx = T^o - \left(\frac{h}{100} \times 0.6 \right) \dots\dots\dots 2$$

$$= 27.4 - \left(\frac{10.854}{100} \times 0.6 \right)$$

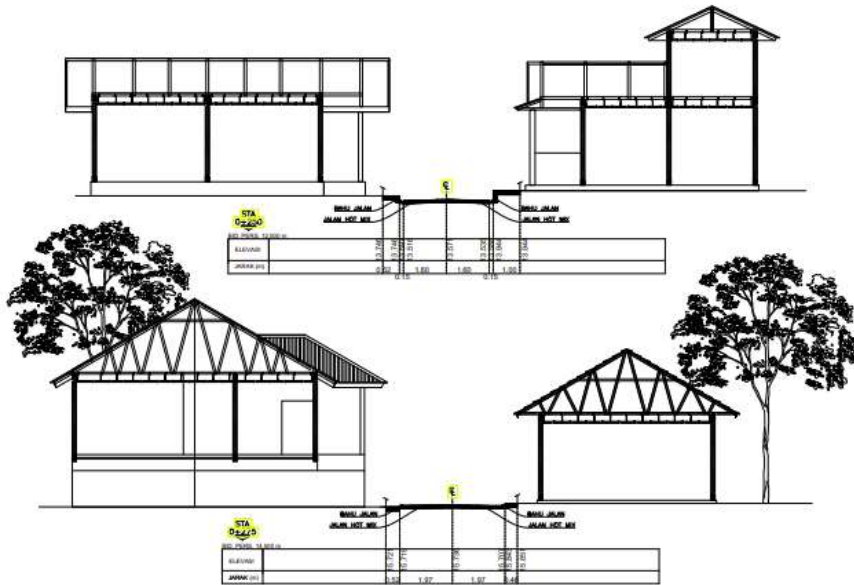
$$= 27.33 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Jadi suhu di Titik 04 = 27.33 °C

- 2) Perubahan suhu rata-rata 27.3 °C
- 3) Artinya: Pemanasan terus berlanjut hingga mencapai titik terpanas.
- 4) Kenaikan suhu kembali terjadi meskipun elevasi relatif tetap, menunjukkan bahwa:
 - a) Jarak dari laut dan keterbukaan ruang lebih dominan daripada faktor ketinggian.

b) Hal ini secara tegas menunjukkan keterbatasan penerapan model iklim vertikal pada skala mikro-spasial pesisir

g. Titik 05 dengan jarak dari Titik 0 adalah 250m:



Gambar 2. 24. Elevasi titik ukur (T.05) dengan jarak 250 meter dari titik ukur (T0), dengan kemiringan 2.71% dengan ketinggian ± 13.57 Mdpl

1) Gradient:

$$Tx = T^{\circ} - \left(\frac{h}{100} \times 0.6\right) \dots\dots\dots$$

$$= 29 - \left(\frac{13.571}{100} \times 0.6\right)$$

$$= 28.92\text{ }^{\circ}\text{C}$$

Jadi suhu di Titik 05 = 28.92 °C

- 2) Perubahan suhu rata-rata 29.0°C
- 3) suhu di Titik 05 dikoreksi dengan pendekatan gradien vertikal atmosfer standar sebesar 0.6°C per 100 m, maka penurunan suhu teoritis akibat elevasi 13.571 m hanya sekitar 0.081°C .
- 4) analisis gradien dari T0 ke T05, cara kedua biasanya lebih konsisten secara metodologis.

Berdasarkan hasil pengukuran, Titik 05 berada pada jarak 250 meter dari Titik 0 dengan elevasi sekitar 13.57 mdpl dan kemiringan lahan sebesar 2.71%. Dengan menggunakan pendekatan gradien vertikal atmosfer standar sebesar 0.6°C per 100 meter, diperoleh suhu teoritis di Titik 05 sebesar 28.92°C dari suhu acuan 29.0°C . Hasil ini menunjukkan bahwa pengaruh elevasi terhadap suhu udara di Titik 05 hanya menurunkan suhu sekitar 0.08°C , sehingga secara praktis tergolong sangat kecil. Dengan demikian, kondisi termal pada Titik 05 lebih dipengaruhi oleh faktor mikroklimat lokal, seperti paparan radiasi, ventilasi angin, vegetasi, dan karakter lingkungan terbangun, dibandingkan oleh faktor ketinggian semata.

Meskipun Eden et al. (2025) menerapkan sensor IoT dalam skala zonasi besar di hypermarket tropis untuk mengevaluasi kenyamanan termal dan kualitas udara (Teh et al., 2025) studi ini memperluas pendekatan dengan menyasar permukiman kecil berskala mikro di Pohe, menggunakan transek berjarak 50 m untuk menangkap pola termal lokal."

Secara keseluruhan, gradien termis maksimum sepanjang transek menunjukkan bahwa kenyamanan termal kawasan pesisir sangat dipengaruhi oleh variasi mikrospasial, bukan sekadar jarak dari laut. Keberadaan *hot spot* primer sekunder dan *zona buffer* termal membuktikan bahwa elemen seperti vegetasi, orientasi bangunan, dan keterbukaan ruang berperan krusial dalam membentuk dinamika suhu. Temuan ini memperkuat pentingnya pendekatan desain dan penataan kawasan berbasis mikroklimat untuk mereduksi panas ekstrem di lingkungan pesisir tropis.

5. Perbandingan kuantitatif gradien

a. Skala Besaran Gradien

Gradien vertikal standar

Gradien vertikal standar atmosfer menggunakan asumsi:

$$T = 0.6^{\circ}\text{C}/100\text{m}$$

Artinya, setiap kenaikan elevasi 100 meter, suhu udara secara teoritis akan turun sebesar 0.6°C .

Jika dinyatakan dalam skala per meter:

$$T = 0.006^{\circ}\text{C}/\text{m}$$

Jadi, skala besaran gradien vertikal standar adalah:

$$0,60^{\circ}\text{C}/100\text{m} = 0,006^{\circ}\text{C}/\text{m} \dots\dots\dots (2.2)$$

b. Gradien horizontal hasil penelitian

Gradien horizontal hasil penelitian dihitung dari perubahan suhu aktual antar titik dibagi beda elevasi, lalu dinyatakan dalam °C/100 m.

$$-0,014 \text{ hingga } +0,078 \text{ } ^\circ\text{C/m} \dots\dots\dots (2.3)$$

Artinya, gradien termis horizontal yang Anda temukan hingga ± 13 kali lebih besar dibandingkan gradien vertikal atmosfer standar.

Perubahan suhu akibat konfigurasi ruang mikroklimat jauh lebih cepat dan tajam dibandingkan perubahan suhu akibat kenaikan ketinggian alami.

Tabel 2. 18. Hasil perhitungan titik ukur

Segmen	ΔT (°C)	Δh (m)	Gradien (°C/m)	Gradien (°C/100 m)
T0–T.01	+2.1	2.595	+0.809	+80.92
T.01–T.02	-1.9	5.118	-0.371	-37.12
T.02–T.03	+0.97	8.678	+0.112	+11.18
T.03–T.04	-1.67	10.854	-0.154	-15.39
T.04–T.05	+1.6	13.571	+0.118	+11.79
T0–T.05 (total)	1.1	40.816	0.027	2.7

Penjelasan Perhitungan Total (T0–T.05)

ΔT total:

$$29.0 - 27.9 = +1.10^\circ\text{C}$$

Δh total:

$$2.595 + 5.118 + 8.678 + 10.854 + 13.571 = 40.816 \text{ m}$$

Gradien total:

$$\frac{1.10}{40.816} = 0.027 \text{ } ^\circ\text{C/m}$$

$$0.27 \times 100 = 2.70 \text{ } ^\circ\text{C}/100\text{m}$$

Hasil perhitungan (tabel 2.9) menunjukkan bahwa gradien horizontal antar segmen memiliki nilai yang sangat fluktuatif, dengan rentang antara -37.12 hingga +80.92 °C/100 m. Nilai ini jauh lebih besar dibandingkan gradien vertikal standar atmosfer sebesar -0.6 °C/100 m. Namun, ketika dihitung secara keseluruhan dari Titik 0 hingga Titik 5, gradien total hanya

sebesar $+2.70\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun terjadi variasi suhu yang signifikan pada skala lokal, efek keseluruhan cenderung melemah akibat adanya pola naik-turun suhu antar segmen. Perbedaan ini menegaskan bahwa perubahan suhu pada kawasan permukiman pesisir lebih dipengaruhi oleh heterogenitas mikroklimat lokal dibandingkan oleh perubahan elevasi. Dengan demikian, gradien horizontal hasil penelitian lebih representatif dalam menjelaskan dinamika termal ruang luar dibandingkan gradien vertikal atmosfer standar

Pada tabel 2.18 tanda positif (+) dan negatif (-) pada gradien menunjukkan bahwa perubahan suhu di kawasan penelitian tidak mengikuti pola gradien vertikal atmosfer yang bersifat konstan, melainkan dikendalikan oleh heterogenitas mikroklimat lokal. Gradien positif menunjukkan dominasi radiasi dan akumulasi panas, sedangkan gradien negatif menunjukkan dominasi ventilasi dan peneduhan. Fluktuasi ini menegaskan bahwa kenyamanan termal ruang luar di permukiman pesisir lebih ditentukan oleh interaksi radiasi angin dibandingkan oleh elevasi. Gradien positif terjadi ketika radiasi dan akumulasi panas lebih dominan, sedangkan gradien negatif terjadi ketika ventilasi angin dan peneduhan lebih dominan. Pola ini menunjukkan bahwa suhu lebih dikendalikan oleh mikroklimat lokal daripada elevasi.

Dengan data elevasi tersebut, perbedaan suhu antar titik dapat dinormalisasi terhadap perubahan ketinggian (Δz), menghasilkan gradien termis vertikal ($\Delta T/\Delta z$). Nilai ini menunjukkan seberapa cepat suhu udara berubah terhadap kenaikan elevasi. Dalam konteks lokasi penelitian, kenaikan suhu lokal tidak selalu menurun dengan ketinggian seperti pola lapse rate standar ($0,6\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$), tetapi justru menunjukkan variasi nonlinier akibat kombinasi faktor morfologi permukiman dan reflektan permukaan. Material dengan reflektan tinggi seperti atap berwarna terang, cat putih, atau perkerasan dengan permukaan cerah memiliki kemampuan lebih besar memantulkan radiasi matahari sehingga mengurangi akumulasi panas di permukaan bangunan. Sebaliknya, material dengan reflektan rendah seperti aspal, genteng gelap, atau atap asbes cenderung menyerap dan menyimpan panas lebih banyak, yang kemudian dilepaskan secara perlahan ke udara sekitarnya, menyebabkan peningkatan suhu udara lokal pada siang hingga malam hari (Elnabawi et al., 2024).

Tabel 2. 19. Perbandingan Karakteristik Gradien Termis Vertikal dan Gradien Termis Horizontal di Kawasan Pesisir

Aspek	Gradien Vertikal (Tx)	Gradien Horizontal Pesisir
Arah gradien	Satu arah (turun)	Fluktuatif ($\pm$)
Skala	Makro / regional	Mikro / lokal
Besaran	$\sim 0,006$ °C/m	hingga $0,078$ °C/m
Mekanisme utama	Tekanan & ekspansi udara	Radiasi, SVF, adveksi
Sensitif terhadap desain	Tidak	Sangat tinggi

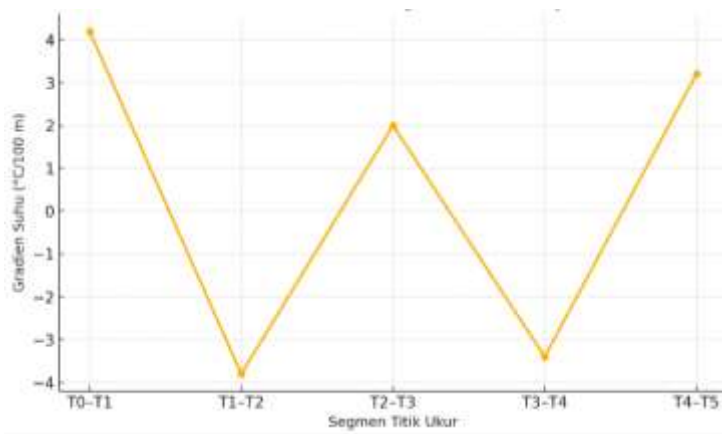
Perbandingan (tabel 2.19) menunjukkan bahwa gradien termis vertikal (Tx) hanya merepresentasikan pola penurunan suhu makroklimatik yang relatif stabil akibat kenaikan ketinggian dan kurang peka terhadap variasi spasial, sedangkan gradien termis horizontal pesisir bersifat mikroklimatik, fluktuatif, dan jauh lebih sensitif terhadap kondisi fisik lingkungan. Temuan di Kelurahan Pohe menegaskan bahwa variasi reflektan permukaan, kepadatan bangunan, dan keberadaan vegetasi menyebabkan perubahan suhu yang tidak mengikuti pola *lapse rate* standar $0,6$ °C per 100 m, dengan terbentuknya penumpukan panas lokal pada area berreflektan rendah dan padat bangunan (Titik 01– Titik 03), serta kondisi suhu yang lebih rendah pada area ber-reflektan tinggi dan bervegetasi (Titik 0 dan sebagian Titik 03), sehingga pendekatan mikroklimat menjadi lebih relevan untuk menjelaskan dinamika suhu dan kenyamanan termal kawasan pesisir tropis.

2.6.4. Interpretasi Pola Gradien Termal

Analisis spasial terhadap gradien suhu menunjukkan bahwa pola pemanasan di sepanjang transek tidak bersifat linier, melainkan berfluktuasi akibat pengaruh kondisi mikro setempat.

Pada segmen pertama (T0–T.01), terjadi kenaikan suhu yang cukup tajam, yaitu sekitar $+1.8$ °C setiap 50 meter dari garis pantai. Fenomena ini mengindikasikan adanya “hot spot” lokal di titik T.01, yang kemungkinan disebabkan oleh berkurangnya pengaruh pendinginan laut dan meningkatnya penyerapan panas oleh material permukaan urban. Namun, pada segmen berikutnya (T.01–T.02), suhu menurun hampir dengan besar yang sama (-1.6 °C), menunjukkan bahwa heterogenitas morfologi dan material bangunan menciptakan variasi mikroklimat yang signifikan bahkan dalam jarak puluhan meter.

Secara keseluruhan, rentang variasi suhu antar titik tertinggi berada pada kisaran 1.6–1.8 °C per 50 meter (setara 3.2–3.6 °C per 100 meter). Perbedaan ini tergolong besar pada skala mikroklimatik, yang berarti perubahan spasial dalam radius kecil dapat memengaruhi tingkat kenyamanan termal secara nyata. Meskipun peningkatan suhu rata-rata dari pantai hingga kaki bukit (T0–T.05) hanya sekitar +0.69 °C secara agregat, nilai tersebut menyembunyikan kontras lokal yang cukup tajam di beberapa segmen pengamatan. Dengan demikian, distribusi suhu di kawasan ini lebih dipengaruhi oleh kondisi spasial dan morfologi lokal dibandingkan oleh jarak absolut dari pantai.

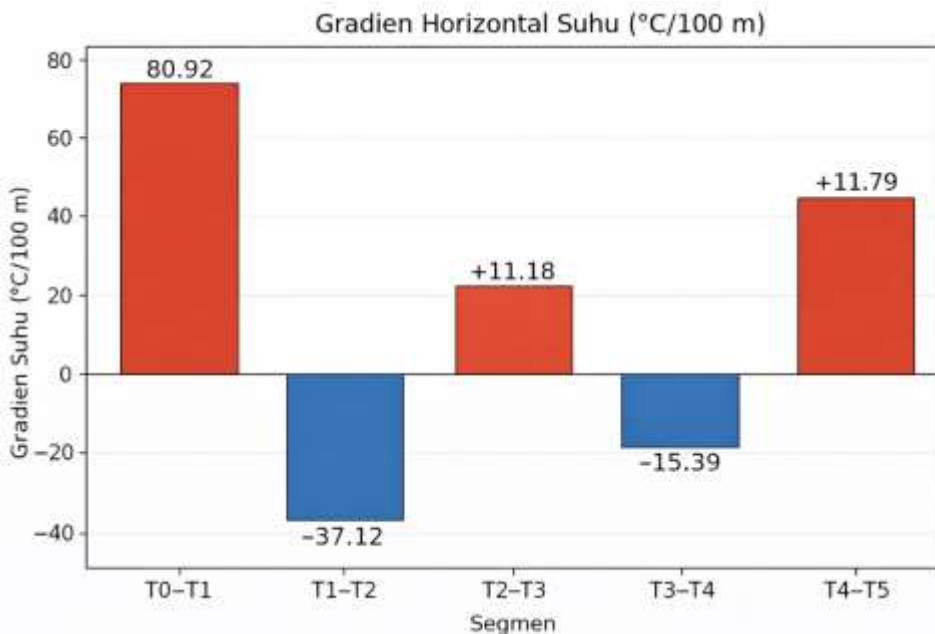


Gambar 2. 25. Grafik gradien suhu antar titik pengukuran ($\Delta T/\Delta x$) yang menggambarkan pola kenaikan dan penurunan suhu sepanjang transek T0 –T.05.

Grafik (Gambar 2.25) menunjukkan variasi spasial gradien suhu udara di sepanjang transek pengukuran T0 –T5 dengan interval jarak 50 meter dari pesisir menuju kaki bukit. Nilai gradien positif mengindikasikan kenaikan suhu antar segmen, sedangkan nilai negatif menunjukkan penurunan suhu relatif akibat faktor lingkungan lokal.

Kenaikan paling tajam terjadi pada segmen T0 –T.01 (+3.4 °C/100 m), yang menandakan munculnya hot spot di zona T.01. Hal ini disebabkan oleh berkurangnya efek pendinginan sea breeze dari laut akibat hambatan bangunan padat dan permukaan jalan beraspal yang menyerap panas secara intensif. Sebaliknya, segmen T.01 –T.02 menunjukkan gradien negatif (–3.8 °C/100 m), yang menandakan adanya cooling pocket lokal di sekitar T.02. Fenomena ini kemungkinan dipengaruhi oleh adanya vegetasi dan peningkatan ventilasi udara di area tersebut, yang memperbaiki pelepasan panas dan menurunkan suhu permukaan.

Segmen T.03–T.04 juga memperlihatkan gradien negatif, meskipun lebih kecil, yang menunjukkan peran topografi dan vegetasi lereng bukit dalam menurunkan suhu melalui suplai udara lebih sejuk (*adiabatic cooling*). Secara keseluruhan, fluktuasi positif–negatif antar segmen ini mencerminkan karakter heterogenitas mikroklimat pesisir, di mana kombinasi faktor morfologi, material permukaan, vegetasi, dan sirkulasi udara lokal berinteraksi membentuk pola suhu yang tidak monoton sepanjang transek pengamatan.



Gambar 2. 26. Gradien spasial suhu udara sepanjang transek Pesisir - Daratan

Gambar 2.26 menunjukkan pola grafik gradien horizontal menunjukkan bahwa perubahan suhu antar segmen memiliki nilai yang sangat fluktuatif, dengan rentang antara -37.12 hingga +80.92 °C/100 m. Nilai ini jauh lebih besar dibandingkan gradien vertikal standar atmosfer sebesar -0.6 °C/100 m. Segmen dengan gradien positif menunjukkan dominasi radiasi dan akumulasi panas, sedangkan segmen dengan gradien negatif menunjukkan dominasi ventilasi dan pelepasan panas. Pola ini menegaskan bahwa dinamika suhu pada permukiman pesisir tidak dikendalikan oleh elevasi, melainkan oleh variasi mikroklimat lokal.

Sebaliknya, penurunan signifikan pada segmen T.01–T.02 (–3,8 °C/100 m) mencerminkan efek heterogenitas spasial, di mana vegetasi dan permukaan tanah berperan sebagai thermal buffer yang menurunkan suhu lokal melalui peneduhan dan peningkatan pelepasan panas laten.

Pendinginan serupa juga terlihat pada segmen T.03 –T.04, yang diperkirakan disebabkan oleh peningkatan elevasi dan aliran udara dari vegetasi perbukitan yang bersifat adiabatik. Secara keseluruhan, variasi spasial suhu antar segmen memperkuat temuan bahwa kondisi mikroklimat di kawasan pesisir tropis tidak hanya ditentukan oleh jarak dari garis pantai, tetapi juga oleh kombinasi faktor keterbukaan permukiman, material permukaan, vegetasi, dan dinamika angin lokal. Pola gradien positif dan negatif ini menegaskan perlunya perencanaan tata ruang adaptif berbasis data mikroklimat untuk mitigasi panas di lingkungan permukiman pesisir.

Perbandingan ini menunjukkan bahwa gradien termis horizontal di kawasan pesisir tropis memiliki intensitas dan kompleksitas yang jauh melampaui gradien termis vertikal atmosfer standar. Persamaan T_x (iklim vertikal) tidak mampu menjelaskan fluktuasi suhu mikroklimat yang terjadi dalam jarak puluhan meter. Oleh karena itu, penggunaan model *lapse rate* (gradien termis) vertikal, (Incropera et al., 2007) pada kajian kenyamanan termal kawasan pesisir berpotensi menghasilkan simplifikasi berlebihan. Temuan ini menegaskan bahwa iklim mikro horizontal perlu diperlakukan sebagai sistem termal independen, yang menuntut pendekatan analisis berbasis spasial, morfologi kawasan, dan dinamika atmosfer lokal.

TOPIK 1. ANALISIS KENYAMANAN TERMAL BERBASIS IoT DI PERMUKIMAN PESIR KOTA GORONTALO: DAMPAK IKLIM MIKRO DAN DESAIN PERKOTAAN

Studi Kasus: Kelurahan Pohe, Kota Gorontalo



Gambar 2. 27. Hasil Visual untuk Analisis Kenyamanan Termal Berbasis IoT, di permukiman peisirs Kota Gorontalo

2.7. Kesimpulan

Penelitian ini menyoroti variasi kenyamanan termal di kawasan pesisir Kelurahan Pohe, Kota Gorontalo, melalui penerapan sistem pemantauan suhu dan kelembapan berbasis *Internet of Things* (IoT). Sensor ditempatkan secara berjenjang dari garis pantai hingga 250 meter ke arah daratan untuk merekam dinamika iklim mikro di sepanjang transek tersebut. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa jarak dari laut, kemiringan lahan, serta tingkat kepadatan bangunan memiliki pengaruh nyata terhadap distribusi suhu udara dan kelembapan relatif di kawasan tersebut. Area yang berdekatan dengan garis pantai (T0 – T.01) memperlihatkan suhu yang lebih rendah karena pengaruh pendinginan angin laut (*sea breeze*), sedangkan area yang lebih jauh dari pantai (T.03 – T.05) mengalami peningkatan suhu dan penurunan kenyamanan akibat sirkulasi udara yang terbatas serta dominasi permukaan dengan kemampuan serap panas tinggi seperti aspal dan atap asbes.

Dalam penelitian ini, hal tersebut dibuktikan oleh nilai gradien termis horizontal yang sangat fluktuatif, berkisar antara -37 hingga $+80$ °C/100 m, yang jauh melampaui gradien vertikal atmosfer standar sebesar $-0,6$ °C/100 m, sehingga menunjukkan bahwa perubahan suhu dalam skala mikro lebih cepat dan tajam akibat konfigurasi ruang dibandingkan akibat perubahan ketinggian. Temuan ini menegaskan pentingnya penerapan strategi desain pasif dalam meningkatkan kenyamanan termal di kawasan pesisir tropis. Upaya mitigasi yang direkomendasikan meliputi peningkatan vegetasi peneduh di sepanjang koridor jalan, penggunaan material bangunan berwarna terang dengan daya pantul tinggi (*cool roof*), serta pengaturan jarak dan orientasi bangunan untuk memperlancar ventilasi alami. Strategi ini sejalan dengan penelitian (Arif & Yola, 2022) serta Elnabawi et al. (2024), yang menekankan bahwa kombinasi vegetasi dan pengendalian SVF dapat menurunkan suhu permukaan hingga $2-3$ °C serta memperbaiki kenyamanan termal di lingkungan padat perkotaan beriklim tropis.

Hasil analisis gradien termis pada penelitian ini memberikan bukti empiris yang kuat bahwa dinamika suhu pada permukiman pesisir tidak dapat dijelaskan secara memadai hanya melalui pendekatan gradien vertikal atmosfer. Nilai gradien horizontal yang diperoleh dari data lapangan menunjukkan besaran yang jauh lebih tinggi serta pola yang fluktuatif dibandingkan gradien vertikal standar yang bersifat konstan. Kondisi ini menegaskan bahwa perubahan suhu aktual lebih dipengaruhi oleh variasi spasial pada skala mikro daripada oleh perubahan elevasi semata.

Temuan ini menunjukkan bahwa gradien horizontal memiliki peran yang lebih dominan dibandingkan gradien vertikal dalam membentuk kondisi termal ruang luar di kawasan pesisir. Variasi suhu yang terjadi antar titik tidak mengikuti pola penurunan linear sebagaimana diasumsikan dalam *lapse rate atmosfer*, melainkan dipengaruhi oleh interaksi kompleks antara radiasi matahari, ventilasi angin, serta karakteristik lingkungan terbangun. Dengan demikian, pendekatan berbasis gradien vertikal tidak lagi cukup representatif untuk menjelaskan kondisi termal pada skala permukiman.

Lebih lanjut, hasil penelitian ini menegaskan bahwa iklim mikro lokal merupakan faktor utama dalam menentukan kenyamanan termal. Fluktuasi gradien yang menunjukkan nilai positif dan negatif secara bergantian merupakan refleksi dari dominasi faktor-faktor iklim mikro tersebut dalam mengontrol keseimbangan energi di permukaan.

Dengan demikian, kontribusi utama penelitian ini terletak pada integrasi antara observasi iklim mikro berbasis IoT dan analisis spasial-morfologis untuk mengungkap dinamika kenyamanan termal di kawasan pesisir tropis. Pendekatan ini tidak hanya memberikan dasar

empiris bagi perancangan permukiman pesisir yang berkelanjutan, tetapi juga membuka arah baru dalam pengembangan model kenyamanan termal berbasis data spasial dan analisis SVF di wilayah pesisir Indonesia.