

## II. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1. Kajian Teoritis

#### 2.1.1. Teori Iklim Mikro dan Transformasi Spasial

Perubahan penggunaan lahan secara masif di kawasan urban dan peri-urban telah memengaruhi pola iklim mikro secara signifikan, terutama dalam hal peningkatan suhu permukaan lahan (LST) dan penurunan tutupan vegetasi. Teori iklim mikro menjelaskan bahwa karakteristik fisik permukaan bumi seperti vegetasi, bahan bangunan, dan kelembaban tanah berperan besar dalam menciptakan kondisi suhu, kelembaban, dan sirkulasi udara pada skala lokal. Studi oleh (Aghashariatmadari, 2021) menunjukkan bahwa perubahan lahan menjadi kawasan terbangun di wilayah Asia Selatan meningkatkan suhu permukaan secara signifikan dalam satu dekade terakhir, sejalan dengan pengurangan vegetasi dan meningkatnya impervious surface area (permukaan kedap air) yang menyerap panas. Hal ini mendukung konsep dasar iklim mikro bahwa perubahan tutupan lahan dapat mengubah keseimbangan energi lokal.

Transformasi spasial merupakan pergeseran struktur ruang dan pola tutupan lahan sebagai dampak pembangunan terencana seperti kawasan industri. Proses ini tidak hanya berdampak pada aspek sosial-ekonomi masyarakat setempat, namun juga berdampak ekologis melalui modifikasi iklim mikro dan berkurangnya jasa ekosistem (Zhai *et al.*, 2025). (Feng *et al.*, 2021) mengkaji transformasi spasial di wilayah pesisir Tiongkok akibat ekspansi kawasan industri, dan menemukan korelasi antara peningkatan tutupan lahan terbangun dengan perubahan suhu permukaan dan indeks vegetasi. Kajian ini memperkuat pentingnya integrasi data spasial temporal dalam mengevaluasi dampak lingkungan dari transformasi tata guna lahan.

Peran vegetasi sebagai regulator iklim mikro menjadi kunci dalam menjaga keseimbangan suhu permukaan (Yao *et al.*, 2025). Pada kawasan industri, hilangnya vegetasi karena alih fungsi lahan memicu efek pulau panas lokal (local heat island) (Singh & Kapoor, 2025). (Kim *et al.*, 2025) menekankan pentingnya

pengelolaan ruang terbuka hijau dalam meredam peningkatan suhu di kota-kota berkembang. Menurut (Z. Yu *et al.*, 2024) Vegetasi tidak hanya berfungsi sebagai peneduh tetapi juga menyerap radiasi matahari dan meningkatkan kelembaban lokal melalui evapotranspirasi. Sehingga, transformasi spasial yang tidak memperhatikan keberlanjutan dapat memperparah stres termal di lingkungan lokal, terutama di kawasan industri yang padat infrastruktur.

### 2.1.2. Suhu Permukaan Lahan (LST)

Suhu Permukaan Lahan (*Land Surface Temperature/LST*) adalah parameter kunci dalam studi dampak perubahan tutupan lahan terhadap lingkungan termal, khususnya setelah pembangunan kawasan industri. LST mencerminkan "radiative skin temperature" permukaan bumi yang sangat dipengaruhi oleh albedo, emisivitas, kelembapan tanah, hingga keberadaan vegetasi (Zhang & Xia, 2024). LST biasanya dihitung menggunakan data satelit, seperti Landsat dan MODIS, dengan bantuan algoritma inversi radiometer misalnya single-window atau split-window sehingga memungkinkan analisis temporal maupun spasial pada skala detail hingga luas (Hussain *et al.*, 2023). Selain itu, LST berperan sebagai indikator utama dinamika termal lingkungan, karena memiliki pengaruh langsung terhadap siklus hidrologi setempat, kenyamanan termal, serta berbagai proses ekologis dalam skala yang lebih luas (Yasin *et al.*, 2024).

Pada kawasan terbangun seperti Kawasan Industri Terpadu Batang (KITB), LST cenderung meningkat seiring berkurangnya vegetasi dan meningkatnya permukaan impervious (jalan, atap, beton). Berbagai studi menunjukkan adanya korelasi negatif signifikan antara LST dan NDVI, serta hubungan positif dengan NDBI. Misalnya, di Adama City (Ethiopia) rata-rata LST naik dari 28,25 °C (2002) menjadi 31,78 °C (2022), seiring penurunan vegetasi (Roba *et al.*, 2024). Korelasi serupa juga ditemukan di Chandigarh (India), di mana NDVI kuat menurun saat LST meningkat karena perluasan kawasan terbangun (Kara & Yavuz, 2025).

Cooling effect vegetasi terhadap LST juga telah banyak dibuktikan. Vegetasi mampu menurunkan suhu permukaan secara signifikan dengan selisih hingga >10 °C dibanding area impervious. Green View Index (GVI) di sepanjang jalan, misalnya,

terbukti secara statistik berbanding terbalik dengan LST, khususnya pada jalan kecil di area urban (Song *et al.*, 2025). Pemetaan LST pada analisis spasial memberikan dasar penting untuk menilai efektivitas penutup lahan dan ruang terbuka hijau, sehingga mendukung perencanaan kawasan industri yang lebih adaptif terhadap perubahan iklim lokal (Chen *et al.*, 2023).

### **2.1.3. Kerapatan Vegetasi dan Perannya terhadap Suhu Permukaan Lahan**

Kerapatan vegetasi biasanya diukur dengan indeks vegetasi seperti NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), EVI (*Enhanced Vegetation Index*), atau LAI (*Leaf Area Index*). NDVI dihitung dari rasio pantulan sinar merah dan near-infrared nilai tinggi menunjukkan vegetasi lebat dan sehat, sedangkan nilai rendah menunjukkan tanah gundul atau tutupan lahan terbangun (Krishnan & Indu, 2023). LAI menggambarkan total luas daun per satuan luas tanah, yang berhubungan dengan kemampuan vegetasi menyerap cahaya dan menguapkan air. Kedua indikator ini penting dalam menjelaskan seberapa efektif vegetasi mampu mendinginkan permukaan melalui proses evapotranspirasi dan peningkatan inersia termal.

Menurut studi ulasan tentang dinamika LST dan vegetasi global, terdapat korelasi negatif yang kuat antara NDVI/EVI dengan LST, terutama saat musim panas, dimana vegetasi aktif mendinginkan permukaan melalui evapotranspirasi dan shading, juga menambah thermal inertia. Sebagai contoh, di wilayah semi-kering di Saudi Arabia, kawasan dengan vegetasi padat menunjukkan LST lebih rendah dibanding area terbuka atau terbangun, dengan  $R^2$  korelasi negatif mencapai  $-0,53$  (Ummah, 2020).

Keterkaitan antara kerapatan vegetasi dan suhu permukaan lahan menjadi penting untuk dianalisis, mengingat pembangunan Kawasan Industri Terpadu Batang (KITB) berpotensi memicu perubahan signifikan pada struktur penutup lahan. Penurunan nilai NDVI atau LAI akibat alih fungsi vegetasi menjadi area terbangun dapat menyebabkan menurunnya kapasitas permukaan dalam menyerap dan mengurangi panas, sehingga berdampak pada meningkatnya suhu permukaan lahan (Damayanti *et al.*, 2023). Oleh karena itu, pengukuran perubahan kerapatan vegetasi secara temporal, yang dikaitkan dengan fluktuasi nilai LST, dapat memberikan gambaran spasial mengenai pengaruh pembangunan terhadap kondisi termal lingkungan setempat. Temuan ini diharapkan

dapat memperkuat argumentasi bahwa pembangunan kawasan industri yang tidak mempertimbangkan aspek tutupan hijau berisiko meningkatkan efek pulau panas lokal dan menurunkan kualitas lingkungan mikro (Vohra *et al.*, 2024).

#### **2.1.4. Tutupan Lahan Terbangun dan Pengaruhnya terhadap Lingkungan**

##### **Termal**

Tutupan lahan terbangun mengacu pada area yang secara dominan terdiri dari permukaan impermeabel seperti bangunan, jalan, dan lansekap buatan yang digambarkan melalui indeks seperti NDBI (*Normalized Difference Built-up Index*). NDBI diekstrak dari citra satelit dengan memanfaatkan rasio pantulan sinar near-infrared dan shortwave-infrared, dan memiliki korelasi positif kuat dengan kondisi urbanisasi serta suhu permukaan lahan tinggi (LST). Dalam lingkungan terbangun, karakteristik fisik material termasuk albedo rendah, kapasitas panas tinggi, dan emisi nol menyebabkan akumulasi energi panas siang hari yang dilepaskan perlahan melalui proses radiasi dan konduksi pada malam hari, memicu peningkatan suhu permukaan dan pembentukan mikroklim panas lokal (*Urban Heat Island/SUHI*) (Panigrahi & Sharma, 2025).

Berbagai penelitian spasial menunjukkan bahwa peningkatan persentase area terbangun secara signifikan berkorelasi dengan kenaikan LST. Misalnya, studi di Islamabad menyimpulkan bahwa area terbangun berkontribusi hingga 48–60% terhadap variabilitas suhu termal di wilayah perkotaan, sedangkan area vegetasi dan perairan justru menurunkannya. Selain itu, analisis di kawasan pesisir menunjukkan bahwa peningkatan lahan terbangun sejalan dengan intensitas SUHI, sedangkan hilangnya vegetasi memperkuat distribusi ruang termal panas. Konsep ini sejalan dengan teori massa termal, yaitu semakin dominan penggunaan beton dan aspal, semakin besar kapasitas penyimpanan energi panas yang menyebabkan pendinginan berlangsung lambat serta suhu permukaan tetap tinggi secara konsisten (Roba *et al.*, 2024).

Pada Kawasan Industri, seperti halnya Kawasan Industri Terpadu Batang (KITB), perluasan area terbangun yang masif diyakini akan menyebabkan peningkatan suhu permukaan secara signifikan, baik secara spasial maupun temporal. Pendekatan

menggunakan indeks NDBI untuk mendeteksi dinamika lahan terbangun, serta pengaitannya dengan fluktuasi *Land Surface Temperature* (LST), menjadi metode yang relevan untuk menilai dampak pembangunan kawasan industri terhadap lingkungan termal. Hal ini sejalan dengan temuan Roba *et al.* (2024) yang mengungkapkan bahwa di Adama City, peningkatan lahan terbangun selama dua dekade berkontribusi pada kenaikan suhu permukaan rata-rata sebesar 3,53 °C, dengan NDBI terbukti memiliki korelasi positif yang lebih kuat terhadap LST dibandingkan dengan NDVI. Dengan mengacu pada pola serupa, penelitian ini berhipotesis bahwa peningkatan intensitas lahan terbangun di KITB akan menyebabkan akumulasi panas yang lebih tinggi, sehingga memicu terbentuknya iklim mikro panas lokal. Oleh karena itu, hasil analisis ini akan menjadi dasar bagi perumusan strategi mitigasi berbasis tata ruang, seperti peningkatan tutupan vegetasi dan pemanfaatan material berdaya pantul tinggi di area industri.

#### **2.1.5. Alih Fungsi Lahan dan Dampaknya terhadap Lingkungan**

Alih fungsi lahan merujuk pada perubahan jenis penggunaan lahan dari satu bentuk ke bentuk lainnya, misalnya dari lahan vegetasi alami atau pertanian menjadi lahan terbangun seperti permukiman atau industri. Perubahan ini biasanya dipicu oleh proses urbanisasi, industrialisasi, dan pertumbuhan ekonomi yang pesat. Secara ekologis, alih fungsi lahan berdampak signifikan terhadap lingkungan, khususnya dalam hal hilangnya vegetasi, perubahan struktur permukaan, dan peningkatan permukaan kedap air, yang seluruhnya memengaruhi siklus energi dan suhu permukaan (Hussain *et al.*, 2023).

Konversi lahan hijau menjadi lahan terbangun menyebabkan berkurangnya kemampuan wilayah dalam menyerap dan menyimpan air, serta menurunnya kemampuan evapotranspirasi, yang pada akhirnya memicu kenaikan suhu permukaan lahan. Studi oleh Roba *et al.* (2024) menunjukkan bahwa selama 20 tahun terakhir, penurunan luas vegetasi di Adama City berkorelasi dengan peningkatan suhu permukaan rata-rata dari 28,25 °C menjadi 31,78 °C. Sementara itu, Hussain *et al.* (2023) mengungkapkan bahwa di wilayah Sahiwal, Pakistan, sekitar 24.773 ha vegetasi telah berubah fungsi menjadi lahan terbangun, dan fenomena ini sejalan dengan kenaikan LST serta penurunan nilai NDVI dan EVI.

Pembangunan Kawasan Industri Terpadu Batang (KITB) menyebabkan alih fungsi lahan dari kawasan vegetatif dan pertanian menjadi kawasan industri berpotensi menimbulkan efek termal yang signifikan. Berdasarkan temuan Roba *et al.* (2024) dan Hussain *et al.* (2023) pola konversi lahan seperti ini terbukti meningkatkan suhu permukaan secara spasial dan temporal. Oleh karena itu, penelitian ini akan meninjau perubahan LULC dan LST di wilayah KITB sebagai dasar analisis pengaruh transformasi ruang terhadap lingkungan termal, sekaligus mendukung perumusan kebijakan mitigasi seperti *green belt*, ruang terbuka hijau, atau penggunaan bahan beralbedo tinggi pada infrastruktur industri.

#### **2.1.6. Kawasan Industri dan Dampaknya terhadap Lingkungan Fisik**

Kawasan industri merupakan wilayah yang secara khusus direncanakan dan dibangun untuk kegiatan manufaktur, logistik, dan jasa penunjang lainnya yang berorientasi pada produktivitas ekonomi. Pembangunan kawasan industri secara masif telah menjadi salah satu pendorong utama perubahan penggunaan lahan, yang secara langsung berdampak terhadap berbagai aspek lingkungan fisik (Liu *et al.*, 2024). Perubahan ini meliputi peningkatan suhu permukaan lahan, penurunan vegetasi, serta transformasi penutup lahan alami menjadi permukaan kedap air seperti beton dan aspal. Dampak tersebut bukan hanya bersifat lokal, tetapi juga memberikan kontribusi pada pembentukan pola-pola termal ekstrem yang dikenal sebagai *industrial heat island* (IHI) atau *extreme urban heat island* (E-UHI) (Meng *et al.*, 2022).

Kawasan industri berperan sebagai pusat emisi panas antropogenik dalam jumlah besar. Aktivitas seperti produksi baja, penggunaan bahan bakar fosil, serta proses pembakaran lainnya melepaskan energi panas yang signifikan, yang menyebabkan peningkatan suhu lahan secara spasial dan temporal. Kawasan industri tidak hanya menciptakan efek pulau panas dalam skala luas, tetapi juga memperkuat *intra-heat island* yang lebih intens di dalam zona perkotaan, terutama pada musim panas (Meng *et al.*, 2022). Selain menghasilkan emisi panas, industrialisasi turut memicu fragmentasi lanskap alami dan pengurangan vegetasi yang signifikan. Transformasi tutupan lahan dari vegetatif ke terbangun mengurangi kapasitas infiltrasi air, meningkatkan limpasan permukaan, dan menurunkan kelembaban udara lokal. Kondisi ini tidak hanya

menurunkan kenyamanan termal masyarakat di sekitar kawasan industri, tetapi juga menurunkan kualitas ekosistem dan kesehatan lingkungan secara keseluruhan (Bagyaraj *et al.*, 2023).

Simulasi termal yang lebih rinci penting dilakukan untuk memetakan dan memprediksi persebaran E-UHI di kawasan industri. Dalam skenario tanpa intervensi lingkungan, suhu permukaan industri dapat mencapai lebih dari 60°C dan menunjukkan korelasi tinggi dengan pola penggunaan lahan dan struktur industri (LIU *et al.*, 2024). Oleh karena itu, perencanaan industri yang tidak memperhatikan daya dukung lingkungan dan keseimbangan vegetasi dapat memperparah dampak perubahan iklim mikro lokal. Penelitian di Kancheepuram, India, mengonfirmasi bahwa lonjakan suhu permukaan paling tinggi terjadi di zona industri, khususnya di area dengan sedikit vegetasi dan permukaan keras seperti pabrik dan area parkir. Dalam rentang waktu 40 tahun, terjadi peningkatan suhu rata-rata sebesar 152% akibat ekspansi industri dan urbanisasi yang cepat (Bagyaraj *et al.*, 2023).

Dampak lingkungan fisik dari kawasan industri juga mencakup penurunan zona kenyamanan termal (thermal comfort zone) di area urban akibat hilangnya ruang terbuka hijau. Studi di Rajshahi, Bangladesh menunjukkan bahwa peningkatan suhu akibat perubahan LULC (*Land Use Land Cover*) yang didominasi oleh industri dan urbanisasi telah memperparah kondisi panas dan mengurangi kesehatan ekologis kawasan (Salan & Bhuiyan, 2024). Dengan demikian, pengembangan kawasan industri seperti Kawasan Industri Terpadu Batang (KITB) perlu dievaluasi secara komprehensif melalui pendekatan spasial dan statistik. Evaluasi ini penting untuk memastikan bahwa pertumbuhan ekonomi tidak mengorbankan keberlanjutan lingkungan fisik di sekitarnya.

## **2.2. Penginderaan Jauh dan Sistem Informasi Geografis (SIG)**

### **2.2.1. Pengertian dan Prinsip Dasar Penginderaan Jauh**

Penginderaan jauh merupakan teknik pengumpulan informasi mengenai permukaan bumi tanpa kontak langsung, melainkan melalui sensor yang terpasang pada wahana seperti satelit atau pesawat udara. Sensor ini bekerja dengan merekam pantulan atau pancaran gelombang elektromagnetik dari objek di permukaan bumi, yang

kemudian diubah menjadi data digital berupa citra satelit. Teknologi ini memiliki keunggulan dalam hal cakupan spasial yang luas, pengamatan berulang, dan efisiensi dalam pemantauan wilayah, terutama untuk mengamati perubahan penggunaan lahan dan suhu permukaan secara berkala (Portela *et al.*, 2020).

Kajian lingkungan perkotaan dan kawasan industri menunjukkan bahwa penginderaan jauh berperan penting dalam mendeteksi perubahan lanskap, seperti alih fungsi lahan vegetatif menjadi area terbangun. Perubahan tersebut memengaruhi keseimbangan energi di permukaan bumi dan berkaitan erat dengan peningkatan suhu permukaan lahan serta munculnya fenomena urban heat island (UHI). Penginderaan jauh juga terbukti efektif dalam mengidentifikasi distribusi suhu permukaan serta memberikan pemahaman mengenai dampak ekologis dari pembangunan kawasan industri dan perkotaan (Bagyaraj *et al.*, 2023).

Kemampuan satelit seperti Landsat dalam menyediakan data multitemporal sejak tahun 1972 memungkinkan pemantauan jangka panjang terhadap dinamika tutupan lahan dan suhu permukaan. (Oli *et al.*, 2025) menekankan bahwa citra Landsat sangat relevan karena menyediakan kanal termal dan spektral yang sesuai untuk analisis perubahan lahan dan suhu permukaan secara kuantitatif dan spasial. Kombinasi antara data spektral dan temporal tersebut menjadi dasar yang kuat untuk analisis lingkungan dalam penelitian ini

### 2.2.2. Estimasi NDVI dan LST dari Citra Satelit

*Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) adalah suatu indeks yang digunakan untuk mengukur tingkat kehijauan vegetasi dengan memanfaatkan data spektral dari citra satelit, khususnya dari kanal Near Infrared (NIR) dan Red (Reyes-Avila & Baxter, 2024).

NDVI dihitung menggunakan rumus:

$$NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red)$$

Nilai NDVI berkisar dari -1 hingga +1, di mana nilai tinggi menunjukkan tutupan vegetasi yang sehat dan lebat, sedangkan nilai rendah menunjukkan area tidak vegetatif seperti air atau permukaan terbangun. NDVI banyak digunakan dalam studi perubahan penutup lahan karena kemampuannya dalam mengukur tingkat kehijauan dan

kepadatan vegetasi (Anand *et al.*, 2025).

Selain NDVI, parameter penting lainnya adalah *Land Surface Temperature* (LST), yaitu suhu fisik permukaan bumi yang diperoleh dari kanal termal citra satelit. Estimasi LST dilakukan melalui konversi digital number (DN) menjadi brightness temperature yang kemudian disertai dengan koreksi emisivitas permukaan. Metode ini terbukti efektif dalam menganalisis tren suhu di kawasan urban, dengan menunjukkan korelasi negatif yang kuat terhadap NDVI serta korelasi positif terhadap indeks permukaan terbangun seperti NDBI dan IBI (Kagabo *et al.*, 2024).

Pemanfaatan citra Landsat (band 10 untuk Landsat 8) telah terbukti mampu memberikan hasil yang representatif untuk estimasi LST, terutama di kawasan industri dan perkotaan. Dalam penelitian oleh Oli *et al.* (2025) peningkatan luas area terbangun sebesar 8,76% dalam 20 tahun menghasilkan kenaikan rata-rata suhu permukaan sebesar 4,63 °C. Hal ini menegaskan bahwa LST dan NDVI adalah indikator penting dalam mengevaluasi dampak perubahan lahan terhadap kondisi termal suatu wilayah.

### **2.2.3. Sistem Informasi Geografis (SIG) untuk Analisis Spasial**

Sistem Informasi Geografis (SIG) adalah teknologi berbasis komputer yang digunakan untuk menyimpan, mengelola, menganalisis, dan menampilkan data yang berhubungan dengan posisi geografis di permukaan bumi. SIG sangat berguna dalam mengintegrasikan berbagai jenis data spasial, termasuk data hasil penginderaan jauh seperti NDVI dan LST, untuk mendapatkan pemahaman yang komprehensif terhadap fenomena lingkungan (Salan & Bhuiyan, 2024).

Dalam studi perubahan suhu permukaan dan tutupan lahan, SIG memungkinkan proses overlay antara peta tutupan lahan dan peta distribusi suhu untuk mengidentifikasi wilayah-wilayah yang terdampak. SIG juga mendukung analisis spasial seperti zonasi panas, statistik deskriptif wilayah, dan regresi geografis berbobot. (Kagabo *et al.*, 2024) menggunakan SIG untuk menganalisis hubungan spasial antara area terbangun dan peningkatan suhu, serta memetakan persebaran indeks termal secara detail dalam konteks perubahan lahan di Kigali.

Oli *et al.* (2025), menunjukkan bahwa integrasi SIG dengan model statistik spasial seperti MGWR (*Multiscale Geographically Weighted Regression*) dapat menangkap

variasi lokal hubungan antara LST dan tutupan lahan. Pendekatan ini lebih unggul dibandingkan regresi biasa karena mempertimbangkan sifat tidak seragam dari fenomena spasial. Penggunaan SIG dalam penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi secara spasial-temporal perubahan suhu permukaan dan vegetasi di kawasan industri KITB, guna mendukung perencanaan tata ruang yang berkelanjutan.

Studi oleh Bagyaraj *et al.* (2023) melakukan simulasi spasial dengan mengintegrasikan SIG dan penginderaan jauh untuk memetakan hubungan antara ekspansi kawasan industri dengan peningkatan suhu permukaan di Kancheepuram, India. Simulasi ini memungkinkan identifikasi area-area dengan kenaikan LST paling signifikan seiring bertambahnya luas lahan terbangun. Demikian pula, Salan & Bhuiyan (2024) menggunakan SIG untuk melakukan simulasi zonasi kenyamanan termal (thermal comfort zone) berdasarkan kombinasi peta LST dan NDVI di Rajshahi, Bangladesh, yang memberikan gambaran spasial mengenai degradasi kenyamanan lingkungan akibat urbanisasi.

## **2.3. Analisis Statistik dalam Penelitian Lingkungan**

### **2.3.1. Statistik Deskriptif dan Inferensial**

Statistik deskriptif memegang peranan penting dalam penelitian lingkungan, khususnya dalam rangka merangkum dan menyajikan data hasil pengukuran suhu permukaan lahan, kerapatan vegetasi, dan tutupan lahan terbangun. Melalui statistik deskriptif, peneliti dapat menampilkan rata-rata, standar deviasi, serta distribusi nilai-nilai parameter lingkungan yang diukur, sehingga pola umum dan anomali dalam data dapat diidentifikasi secara lebih mudah (Rahimi *et al.*, 2025). Dalam studi *urban heat island* (UHI) di Kalaburagi, misalnya, statistik deskriptif digunakan untuk menggambarkan distribusi suhu permukaan lahan dan variasi indeks vegetasi pada berbagai tipe penggunaan lahan (Kumar & Shekhar, 2015).

Statistik inferensial dapat digunakan untuk menguji hipotesis dan menarik kesimpulan yang lebih luas dari data sampel ke populasi. Dalam konteks penelitian lingkungan, statistik inferensial digunakan untuk menentukan apakah perbedaan suhu permukaan lahan antara area dengan kerapatan vegetasi tinggi dan rendah bersifat signifikan secara statistik atau hanya terjadi secara kebetulan. Penggunaan uji korelasi

dan analisis regresi dalam penelitian UHI memungkinkan peneliti untuk menguji hubungan antara NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) dan LST secara kuantitatif, serta memperkirakan dampak perubahan tutupan lahan terhadap suhu permukaan (Shah, 2022).

Kombinasi antara statistik deskriptif dan inferensial memberikan gambaran yang lebih komprehensif dalam analisis lingkungan. Statistik deskriptif membantu mengidentifikasi kecenderungan awal, sedangkan statistik inferensial memberikan dasar ilmiah untuk generalisasi dan pengambilan keputusan berbasis data (Kumar & Shekhar, 2015). Dalam penelitian Kumar & Shekhar (2015), kedua pendekatan ini digunakan secara terpadu untuk mengevaluasi hubungan antara parameter vegetasi dan suhu permukaan lahan, sehingga dapat memberikan rekomendasi yang lebih tepat dalam pengelolaan lingkungan perkotaan.

### **2.3.2. Analisis Korelasi dan regresi Linier Sederhana**

Analisis korelasi merupakan metode statistik yang digunakan untuk mengukur kekuatan dan arah hubungan antara dua variabel, seperti antara suhu permukaan lahan (LST) dan indeks vegetasi (NDVI). Dalam penelitian Kumar & Shekhar (2015), ditemukan adanya korelasi negatif antara LST dan NDVI, yang menunjukkan bahwa area dengan kerapatan vegetasi tinggi cenderung memiliki suhu permukaan yang lebih rendah. Sebaliknya, terdapat korelasi positif antara LST dan NDBI (Normalized Difference Built-up Index), yang mengindikasikan bahwa area terbangun memperkuat efek urban heat island.

Selain korelasi, regresi linier sederhana digunakan untuk memodelkan hubungan fungsional antara satu variabel independen dan satu variabel dependen. Dalam konteks penelitian lingkungan, regresi linier sederhana dapat digunakan untuk memprediksi perubahan suhu permukaan lahan berdasarkan perubahan tutupan vegetasi atau lahan terbangun. Model regresi ini memberikan estimasi kuantitatif terhadap dampak perubahan tutupan lahan terhadap suhu, serta membantu dalam merumuskan kebijakan mitigasi yang berbasis data (Tiwari & Kanchan, 2024).

Penerapan analisis korelasi dan regresi linier sederhana sangat penting dalam penelitian lingkungan perkotaan karena dapat mengidentifikasi variabel-variabel kunci

yang mempengaruhi perubahan suhu permukaan lahan. Dengan mengetahui variabel mana yang paling berpengaruh, peneliti dapat memfokuskan upaya monitoring dan intervensi pada aspek-aspek yang paling krusial (Tiwari & Kanchan, 2024). Studi Kumar & Shekhar (2015) menegaskan pentingnya pendekatan ini untuk memahami mekanisme UHI dan merancang solusi berbasis sains untuk pengelolaan lingkungan perkotaan.

### 2.3.3. Integrasi Statistik dan Analisis Spasial

Integrasi antara analisis statistik dan analisis spasial sangat penting dalam penelitian lingkungan modern, khususnya dalam studi perubahan suhu permukaan lahan dan tutupan vegetasi. Dengan menggunakan data penginderaan jauh seperti citra Landsat, peneliti dapat menggabungkan analisis statistik (deskriptif, korelasi dan regresi) dengan pemetaan spasial untuk mengidentifikasi distribusi geografis dari suhu permukaan lahan serta parameter vegetasi dan lahan terbangun (Salan & Bhuiyan, 2024).

Data penginderaan jauh diolah menjadi parameter spasial seperti Land Surface Temperature (LST), Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), dan Normalized Difference Built-up Index (NDBI). Nilai tiap parameter diekstraksi pada wilayah kajian (ROI) untuk menghasilkan statistik deskriptif seperti rata-rata, minimum, maksimum, dan standar deviasi. Selanjutnya, dilakukan analisis korelasi Pearson untuk menguji hubungan antarvariabel, misalnya hubungan negatif antara NDVI–LST (penurunan vegetasi meningkatkan suhu) dan hubungan positif NDBI–LST (kenaikan area terbangun menaikkan suhu). Analisis regresi linier sederhana maupun berganda digunakan untuk mengukur besarnya pengaruh NDVI dan NDBI terhadap LST. Hasil statistik ini kemudian dipetakan kembali dalam bentuk peta tematik, seperti zonasi wilayah dengan korelasi kuat NDVI rendah–LST tinggi atau peta prediksi perubahan suhu berdasarkan tingkat kerapatan vegetasi dan lahan terbangun (Salan & Bhuiyan, 2024; Oli *et al.*, 2025).

Contoh penerapan integrasi statistik dan spasial terlihat pada penelitian Kumar & Shekhar (2015) yang memetakan distribusi LST dan NDVI di Kalaburagi guna mengidentifikasi zona berisiko tinggi urban heat island. Perangkat lunak GIS seperti

ArcGIS, QGIS, dan ENVI berperan penting dalam proses ini karena mampu mengelola sekaligus menganalisis data spasial secara efisien (Kumar & Shekhar, 2015). Studi oleh Nahas *et al.* (2025) mengombinasikan regresi OLS dan uji Mann-Kendall dengan pemetaan spasial berbasis piksel untuk mengungkap tren peningkatan LST serta degradasi vegetasi di Delta Nil, sehingga area terdampak dapat diidentifikasi secara akurat.

Integrasi statistik dan analisis spasial tidak hanya menghasilkan pemahaman numerik, tetapi juga interpretasi visual yang aplikatif untuk mendukung pengambilan keputusan berbasis bukti. Pendekatan ini sangat relevan dalam konteks penelitian lingkungan perkotaan maupun kawasan industri, di mana perubahan suhu permukaan dan tutupan vegetasi berlangsung dinamis serta tidak merata secara spasial. Dalam penelitian ini, integrasi kedua metode tersebut digunakan untuk mengevaluasi dampak pembangunan Kawasan Industri Terpadu Batang (KITB) terhadap dinamika suhu permukaan, vegetasi, dan wilayah terbangun. Melalui kombinasi analisis spasial-temporal dan uji statistik, diharapkan dapat diidentifikasi zona-zona dengan perubahan paling signifikan sehingga hasil penelitian dapat memberikan dasar ilmiah bagi mitigasi dampak termal serta perencanaan tata ruang yang lebih berkelanjutan di kawasan industri baru ini.

## 2.4. Studi Terdahulu

Tabel 2. 1 Studi Terdahulu

No.	Peneliti (Tahun)	Lokasi Penelitian	Metode/Indeks yang Digunakan	Hasil Utama	Relevansi dengan Penelitian Ini
1	Kagabo <i>et al.</i> (2024)	Kigali, Rwanda	Landsat 1990–2020, GEE, Mann-Kendall, Sen's slope	Suhu naik 0,5°C/dekade, terkait ekspansi lahan terbangun, NDBI & IBI	Menunjukkan hubungan urbanisasi dengan peningkatan LST
2	Bagyaraj <i>et al.</i> (2023)	Kancheepuram, India	Landsat 1988–2021, NDVI, LST	LST naik 152% dalam 4 dekade, area industri suhu tertinggi, vegetasi menurunkan suhu	Relevan karena KITB juga kawasan industri baru
3	Salan & Bhuiyan (2024)	Rajshahi, Bangladesh	SVM, UTFVI, analisis statistik	Lahan terbangun naik 53,61% dalam 30 th, zona kenyamanan termal berkurang	Menjadi acuan menilai kenyamanan termal di KITB
4	Portela <i>et al.</i> (2020)	São José dos Campos, Brasil	Landsat, NDVI, LST	Area industri & terbangun suhu tinggi, vegetasi suhu rendah	Relevan untuk membandingkan pola suhu kawasan industri
5	Oli <i>et al.</i> (2025)	Atlanta, Amerika Serikat	Random Forest, MGWR	Lahan terbangun naik 8,76% dalam 20 th, suhu naik 4,63°C, variasi spasial signifikan	Memberi acuan metodologis dengan regresi spasial-statistik

Berbagai studi sebelumnya telah dilakukan untuk memahami hubungan antara perubahan tutupan lahan dengan peningkatan suhu permukaan, terutama di kawasan yang mengalami urbanisasi dan industrialisasi pesat. Kagabo *et al.* (2024) melakukan penelitian di Kigali, Rwanda, dengan tujuan menilai dampak perubahan penggunaan lahan terhadap suhu permukaan lahan (Land Surface Temperature/LST) selama tiga dekade (1990–2020). Studi ini menggunakan citra satelit Landsat yang diolah dengan Google Earth Engine (GEE), serta uji tren statistik seperti Modified Mann-Kendall dan estimasi Sen's slope. Hasilnya menunjukkan peningkatan suhu rata-rata 0,5 °C per

dekade, terutama pada musim kemarau, yang berkorelasi positif dengan ekspansi lahan terbangun dan indeks urban seperti NDBI dan IBI. Studi ini relevan sebagai dasar dalam penelitian ini karena menunjukkan keterkaitan kuat antara urbanisasi dan peningkatan LST melalui pendekatan spasial dan statistik.

Bagyaraj *et al.* (2023) meneliti efek pulau panas perkotaan (*Urban Heat Island/UHI*) di Distrik Kancheepuram, India, menggunakan citra Landsat tahun 1988 dan 2021. Pendekatan ini menggabungkan NDVI dan LST untuk memetakan perubahan suhu di berbagai kelas tutupan lahan. Penelitian ini menemukan adanya peningkatan suhu permukaan hingga 152% dalam empat dekade, dengan konsentrasi suhu tinggi pada wilayah industri dan terbangun, sedangkan area dengan vegetasi lebat menunjukkan suhu yang lebih rendah. Penelitian ini menggarisbawahi pentingnya vegetasi sebagai penyeimbang suhu dan sangat relevan dengan studi ini, mengingat KITB merupakan kawasan industri yang mengubah lanskap alami menjadi kawasan terbangun.

Salan & Bhuiyan (2024) melakukan studi di Rajshahi, Bangladesh, dengan pendekatan mikro spasial menggunakan klasifikasi Support Vector Machine (SVM) dan pengukuran indeks Urban Thermal Field Variance Index (UTFVI). Penelitian ini menemukan bahwa urbanisasi menyebabkan penurunan zona kenyamanan termal dan peningkatan signifikan dalam luas wilayah terbangun (53,61% dalam 30 tahun). Analisis statistik menunjukkan hubungan positif antara urbanisasi dengan peningkatan LST, dan hubungan negatif antara vegetasi serta badan air dengan suhu permukaan. Studi ini sangat relevan dengan konteks KITB yang juga mengalami konversi besar-besaran dari lahan vegetasi menjadi kawasan industri, serta memberikan pendekatan metodologis yang mendalam dalam menilai kenyamanan termal secara spasial.

Portela *et al.* (2020) meneliti kota São José dos Campos di Brasil sebagai contoh kota industri menengah yang berkembang cepat. Penelitian ini memanfaatkan indeks termal berbasis LST serta NDVI untuk mengevaluasi distribusi suhu permukaan di daerah urban, khususnya kawasan industri dan parkir. Hasil penelitian menunjukkan bahwa daerah-daerah dengan tutupan vegetasi memiliki suhu yang lebih rendah dibandingkan dengan daerah industri dan lahan terbangun yang menunjukkan nilai SUHI (*Surface Urban Heat Island*) tinggi. Studi ini menunjukkan pentingnya

identifikasi indeks termal dalam perencanaan kota dan pengelolaan lingkungan, yang dapat diadopsi untuk evaluasi pasca-pembangunan kawasan industri seperti KITB.

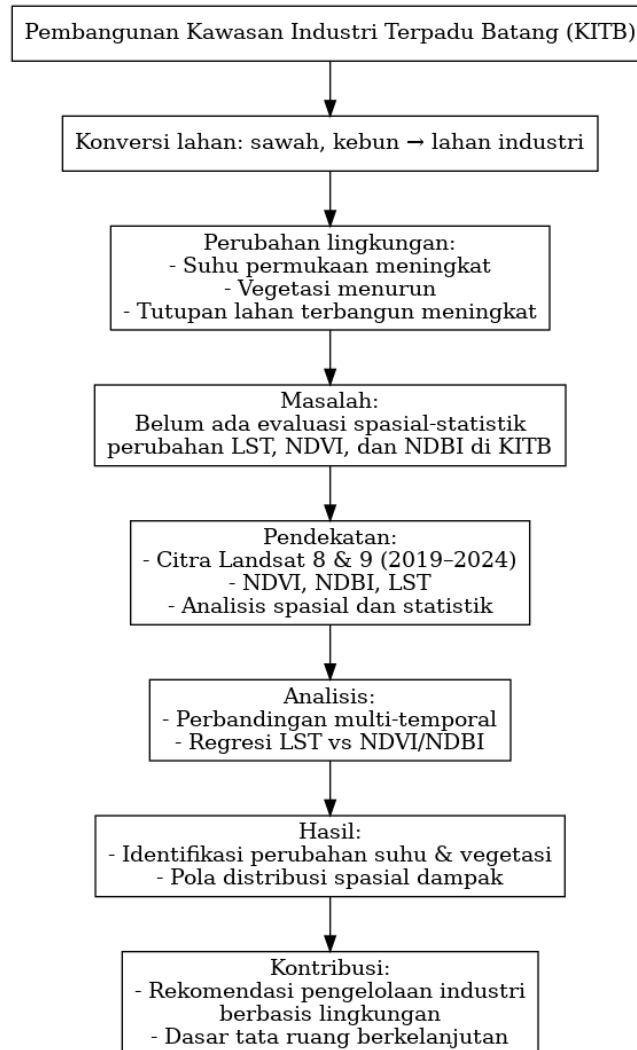
Penelitian oleh Oli *et al.* (2025) di Kota Atlanta, Amerika Serikat, menggunakan kombinasi klasifikasi Random Forest dan model statistik spasial seperti Multiscale Geographically Weighted Regression (MGWR) untuk memahami hubungan spasial antara LULC dan LST. Studi ini menemukan bahwa ekspansi kawasan terbangun sebesar 8,76% selama 20 tahun terakhir menyebabkan kenaikan suhu permukaan rata-rata sebesar 4,63 °C. Model MGWR menunjukkan adanya variasi spasial yang signifikan dalam pengaruh tiap kelas tutupan lahan terhadap LST, dengan kawasan hijau terbukti memberikan efek pendinginan yang signifikan. Studi ini memberikan pendekatan statistik yang kuat untuk mengevaluasi dampak pembangunan terhadap suhu dan sangat mendukung rancangan metode dalam penelitian ini yang juga menggunakan pendekatan spasial-statistik untuk kawasan KITB.

Berdasarkan kelima studi tersebut, dapat dirumuskan beberapa kesenjangan (gap) penelitian yang melatarbelakangi penelitian ini. Pertama, sebagian besar studi dilakukan di kawasan metropolitan atau kota besar, sementara kawasan industri terpadu seperti KITB yang sebelumnya berupa lahan vegetatif belum banyak dikaji secara komprehensif. Kedua, belum banyak studi yang menganalisis secara simultan antara suhu permukaan, kerapatan vegetasi, dan tutupan lahan terbangun dalam satu kerangka analisis terpadu. Ketiga, pendekatan statistik spasial yang mendalam seperti MGWR maupun regresi lokal masih jarang diterapkan pada konteks kawasan industri baru di negara berkembang. Keempat, belum ada penelitian spesifik di Indonesia yang mengkaji dampak pembangunan kawasan industri proyek strategis nasional seperti KITB terhadap aspek termal dan ekologis permukaan lahan.

Oleh karena itu, penelitian ini membawa kebaruan dalam menggabungkan analisis perubahan suhu permukaan lahan, kerapatan vegetasi, dan tutupan lahan terbangun dalam satu kerangka analisis berbasis citra satelit dan pendekatan spasial-statistik. Dengan menggunakan data landsat dan pengolahan melalui *Google Earth Engine* serta integrasi metode statistik spasial, penelitian ini diharapkan mampu memberikan kontribusi nyata dalam pengelolaan lingkungan pasca pembangunan kawasan industri, khususnya dalam konteks Indonesia.

## 2.4. Kerangka Pemikiran

Kerangka pemikiran dalam penelitian ini ditampilkan pada Gambar 2.51.



Gambar 2. 1 Kerangka Pemikiran

Pembangunan kawasan industri merupakan salah satu pendorong utama perubahan tata guna lahan, khususnya pada wilayah yang sebelumnya didominasi oleh vegetasi dan lahan pertanian. Perubahan tersebut secara langsung dan tidak langsung memengaruhi kondisi lingkungan, termasuk peningkatan suhu permukaan lahan (*Land Surface Temperature/LST*), penurunan kerapatan vegetasi (*vegetation density*), serta bertambahnya tutupan lahan terbangun (*built-up area*). Dalam konteks Kawasan Industri Terpadu Batang (KITB), pembangunan yang masif telah mengubah struktur lanskap wilayah yang semula didominasi oleh tutupan vegetasi dan lahan terbuka

menjadi kawasan dengan dominasi infrastruktur, jalan, dan bangunan. Perubahan ini diyakini berkontribusi terhadap peningkatan suhu permukaan akibat hilangnya penutup alami yang berfungsi sebagai penyerap panas dan penyuplai kelembapan melalui proses evapotranspirasi.

Analisis perubahan suhu permukaan lahan, kerapatan vegetasi, dan luasan lahan terbangun dilakukan dengan menggunakan data citra satelit multitemporal (misalnya landsat) yang diolah melalui pendekatan penginderaan jauh dan sistem informasi geografis (SIG). Metode ini memungkinkan pengamatan secara spasial dan temporal, sehingga dapat mengevaluasi perubahan sebelum dan sesudah pembangunan KITB. Selain itu, pendekatan statistik digunakan untuk mengetahui tingkat signifikansi hubungan antar variabel serta membuktikan hipotesis penelitian. Kerangka berpikir dalam penelitian ini didasarkan pada asumsi bahwa pembangunan kawasan industri akan berdampak pada perubahan lingkungan secara spasial dan termal. Maka dari itu, dilakukan perbandingan kondisi lingkungan pra dan pasca pembangunan KITB dengan mengukur dan menganalisis tiga variabel utama, yaitu suhu permukaan lahan, kerapatan vegetasi, dan luas lahan terbangun. Ketiga variabel tersebut dianalisis secara terpadu untuk memperoleh gambaran dampak ekologis secara menyeluruh. Melalui pendekatan ini, penelitian diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap upaya evaluasi dampak pembangunan industri terhadap lingkungan, serta menjadi referensi ilmiah dalam perencanaan wilayah berbasis keberlanjutan.

## **2.6. Hipotesis Penelitian**

Hipotesis dalam penelitian ini dirumuskan untuk menguji dugaan adanya perubahan kondisi lingkungan sebagai akibat dari pembangunan Kawasan Industri Terpadu Batang (KITB). Rumusan hipotesis ini mengacu pada variabel utama yang diteliti, yaitu suhu permukaan lahan, kerapatan vegetasi, dan tutupan lahan terbangun, dengan pendekatan analisis spasial dan statistik.

### **Hipotesis Penelitian :**

1. Pembangunan Kawasan Industri Terpadu Batang (KITB) dapat meningkatkan suhu permukaan lahan (LST) dibandingkan sebelum pembangunan
2. Pembangunan Kawasan Industri Terpadu Batang (KITB) berpotensi menurunkan

kerapatan vegetasi (NDVI) dan meningkatkan luasan wilayah terbangun (Built-up Area).

3. Terdapat korelasi signifikan antara suhu permukaan lahan dengan kerapatan vegetasi dan tutupan lahan terbangun.