

**INTEGRASI PEMANTAUAN KONDISI LINGKUNGAN KAWASAN  
PERKOTAAN DENGAN KEBIJAKAN SDGs 11**  
(STUDI KASUS: KEHIDUPAN BERKELANJUTAN DIPULAU BATAM)  
*Integration Of Monitoring The Environmental Conditions Of Municipal Areas  
With Sdgs 11 Policies*  
(Study Case: Sustainable Living On The Island Of Batam)

**Delima Purba<sup>1</sup>, Wenang Anurogo<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Prodi Teknologi Geomatika Politeknik Negeri Batam, Indonesia

<sup>2</sup> Prodi Teknologi Geomatika Politeknik Negeri Batam, Indonesia

**Penulis Korespondensi:** Delima Purba | Email: [delimapurba091@gmail.com](mailto:delimapurba091@gmail.com)

---

**ABSTRAK**

Pertumbuhan penduduk dan urbanisasi yang pesat telah memberikan tekanan signifikan terhadap kualitas lingkungan perkotaan, termasuk di Pulau Batam. Sebagai kota industri yang berkembang cepat, Batam menghadapi tantangan lingkungan serius seperti peningkatan suhu, polusi udara, degradasi lahan, dan penurunan kualitas hidup. Penelitian ini bertujuan untuk memantau kondisi lingkungan di Pulau Batam menggunakan teknologi penginderaan jauh berbasis citra Landsat 8 dengan pendekatan indeks lingkungan seperti Suhu Permukaan Daratan dengan metode LST, Kekeringan dengan metode TVDI, Kelembaban dengan metode NDWI, Potensi Kekeringan dengan metode NDDI, serta estimasi PM<sub>2,5</sub> dan PM<sub>10</sub> dengan menggunakan metode AOT. Hasil pengolahan menunjukkan nilai maksimum Suhu Permukaan Darat sebesar 34,92°C, Kekeringan 0,999997, Kelembaban 1,07121, Potensi kekeringan 13,58, PM<sub>2,5</sub> sebesar 70 µg/m<sup>3</sup>, dan PM<sub>10</sub> sebesar 111 µg/m<sup>3</sup>. Nilai aktual dari hasil validasi lapangan dan pengolahan data diperoleh nilai regresi dengan persamaan  $Y=0,5439x+12,475$ (LST),  $Y=0,1938x+27,232$ (TVDI),  $Y=26,389x+74,773$ (NDWI),  $Y=0,4747x+15,302$ (PM<sub>2,5</sub>) dan  $Y=0,3904x+18,81$ (PM<sub>10</sub>) dengan nilai aktual Suhu Permukaan Darat sebesar 31,46°C, Kekeringan 27,42, Kelembaban 103,00%RH, Potensi Kekeringan -0,84095, PM<sub>2,5</sub> sebesar 48,55 µg/m<sup>3</sup>, dan PM<sub>10</sub> sebesar 62,26 µg/m<sup>3</sup>. Validasi menghasilkan koefisien determinasi ( $R^2$ ) yang kuat untuk masing-masing parameter, yaitu Suhu Permukaan Darat (0,7192), Kekeringan (0,7144), Kelembaban (0,8074), PM<sub>2,5</sub> (0,7369), dan PM<sub>10</sub> (0,8648). Hasil penelitian ini menegaskan pentingnya pemanfaatan data spasial dalam perencanaan kota berkelanjutan, serta mendukung pencapaian indikator SDGs 11.6 (pengurangan dampak lingkungan) dan 11.7 (penyediaan ruang publik hijau yang inklusif dan aman).

**KATA KUNCI :** Kondisi Lingkungan, Penginderaan Jauh, Landsat 8, LST, TVDI, NDWI, NDDI, PM<sub>2,5</sub>, PM<sub>10</sub>

**ABSTRACT**

*Rapid population growth and urbanization have put significant pressure on urban environmental quality, including in Batam Island. As a fast-growing industrial city, Batam faces serious environmental challenges such as rising temperatures, air pollution, land degradation, and declining quality of life. This research aims to monitor environmental conditions in Batam Island using remote sensing technology based on Landsat 8 imagery with environmental index approaches such as Land Surface Temperature using LST method, Drought using TVDI method, Humidity using NDWI method, Drought Potential using NDDI method, and estimation of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> using AOT method. The processing results show the maximum values of Land Surface Temperature of 34.92°C, Drought 0.999997, Humidity 1.07121, Drought potential 13.58, PM<sub>2.5</sub> of 70 µg/m<sup>3</sup>, and PM<sub>10</sub> of 111 µg/m<sup>3</sup>. The actual values from the results of field validation and data processing obtained regression values with the equation  $Y=0.5439x+12.475$  (LST),  $Y=0.1938x+27.232$  (TVDI),  $Y=26.389x+74.773$  (NDWI),  $Y=0.4747x+15.302$  (PM<sub>2.5</sub>) and  $Y=0,3904x+18.81$  (PM<sub>10</sub>) with actual values of Land Surface Temperature of 31.46°C, Dryness of 27.42, Humidity of 103.00% RH, Drought Potential of -0.84095, PM<sub>2.5</sub> of 48.55 µg/m<sup>3</sup>, and PM<sub>10</sub> of 62.26 µg/m<sup>3</sup>. The validation resulted in a strong coefficient of determination ( $R^2$ ) for each parameter, namely Land Surface Temperature (0.7192), Drought (0.7144), Humidity (0.8074), PM<sub>2.5</sub> (0.7369), and PM<sub>10</sub> (0.8648). The results of this study confirm the importance of utilizing spatial data in sustainable urban planning, as well as supporting the achievement of SDGs indicators 11.6 (reduction of environmental impacts) and 11.7 (provision of inclusive and safe green public spaces).*

**Keywords:** Environmental Conditions, Remote Sensing, Landsat 8, LST, TVDI, NDWI, NDDI, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>

---

## 1. Pendahuluan

Pertumbuhan penduduk dan urbanisasi yang pesat merupakan tantangan utama dalam pembangunan wilayah perkotaan di berbagai negara, termasuk Indonesia. Urbanisasi tidak hanya terjadi akibat perpindahan penduduk dari desa ke kota, tetapi juga disebabkan oleh perubahan status wilayah pedesaan menjadi kawasan perkotaan (Carolin, V., & Kurniati, E. (2025). Fenomena ini telah menjadi pendorong utama perubahan lingkungan global yang didominasi oleh aktivitas manusia selama dua abad terakhir (Lambin & Meyfroidt, 2011; Liao et al., 2022). Peningkatan aktivitas industri dan infrastruktur telah memberikan tekanan besar terhadap kondisi ekologi, meningkatkan polusi, mempercepat degradasi lahan, dan mengurangi kualitas hidup masyarakat di kawasan urban (Situmorang, M. T. N., & Hut, S. (2024).

Dalam menjawab tantangan tersebut, Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (Sustainable Development Goals/SDGs) menjadi kerangka kerja global yang penting. Khususnya, SDGs tujuan ke-11 menekankan pada pembangunan kota dan permukiman yang inklusif, aman, tangguh, dan berkelanjutan (Sudipa, I. G. I., Harto, B., Sahusilawane, W., Afriyadi, H., Lestari, S., & Handayani, D. (2023)). Indonesia sebagai negara dengan tingkat urbanisasi yang tinggi menghadapi permasalahan lingkungan yang semakin kompleks. Menurut data BPS (2020), lebih dari 56% penduduk Indonesia tinggal di wilayah perkotaan, yang berkontribusi langsung terhadap peningkatan suhu lokal, polusi udara, dan tekanan terhadap sistem layanan dasar kota. Kondisi ini diperparah oleh pengelolaan lingkungan yang belum optimal, terutama di kota-kota industri yang berkembang cepat seperti Pulau Batam.

Pulau Batam, yang terletak di Provinsi Kepulauan Riau, merupakan salah satu kawasan strategis yang mengalami pertumbuhan industri, penduduk, dan infrastruktur yang sangat cepat dalam dua dekade terakhir. Namun, perkembangan ini turut memicu berbagai permasalahan lingkungan seperti peningkatan suhu permukaan, menurunnya kelembapan, kekeringan lahan, serta tingginya konsentrasi polusi udara berupa PM<sub>2.5</sub> dan PM<sub>10</sub> (DLH Batam, 2022; BP Batam, 2020). Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kondisi lingkungan Pulau Batam secara spasial dengan menggunakan data penginderaan jauh berbasis citra Landsat 8 dan metode pemantauan partikel atmosfer menggunakan *Aerosol Optical Thickness (AOT)*. Parameter utama yang dikaji meliputi *Land Surface Temperature (LST)*, *Temperature Vegetation Dryness Index (TVDI)*, *Normalized Difference Water Index (NDWI)*, *Normalized Difference Drought Index (NDDI)*, serta

estimasi PM<sub>2.5</sub> dan PM<sub>10</sub>. Kajian ini juga mengaitkan temuan dengan target SDGs 11.6 dan 11.7, yang berfokus pada pengurangan dampak lingkungan dan penyediaan ruang kota yang aman dan sehat.

## 2. Data dan Metodologi

### 2.1. Data dan Lokasi

Lokasi Penelitian : Kota Batam

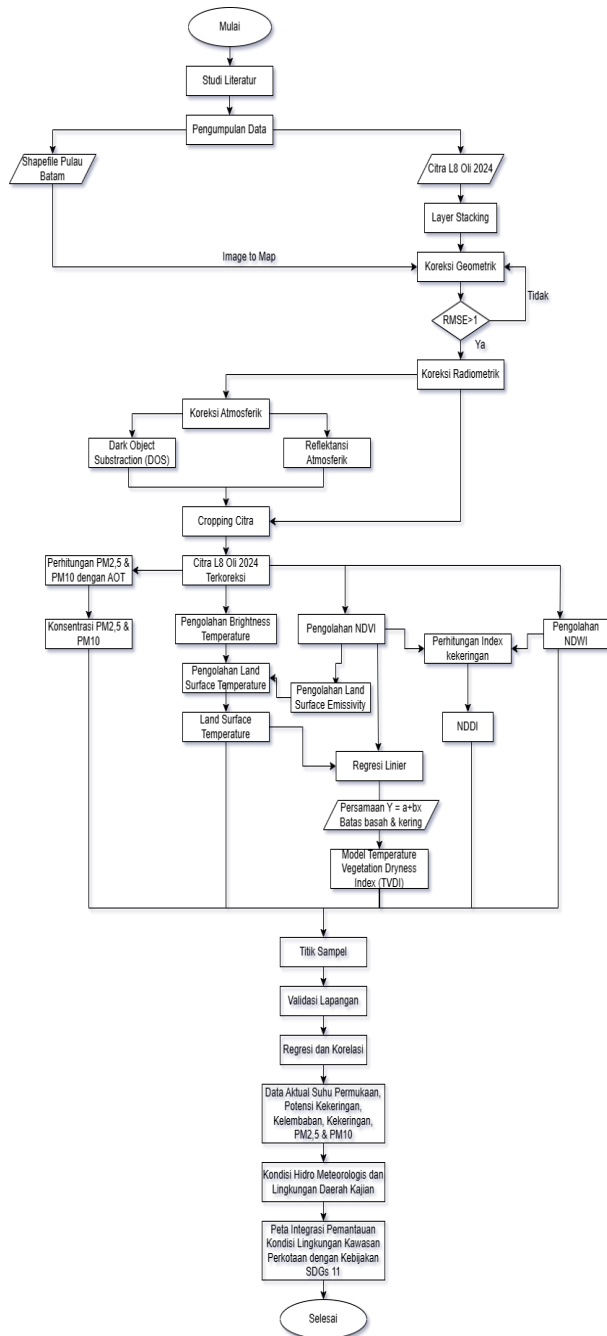
Penelitian ini dilakukan menggunakan perekaman data Landsat 8 pada tahun 2024. Pemilihan rekaman data landsat didasarkan atas pertimbangan cuaca, waktu perekaman dan persentase awan pada citra landsat yang digunakan.



Gambar 1. Peta Lokasi Penelitian

### 2.2. Metodologi

Tahapan penelitian disajikan pada Gambar 2. Penelitian ini dimulai dengan studi literatur untuk menentukan parameter yang akan digunakan dan hal-hal apa saja yang akan dilakukan agar penelitian dapat berjalan lancar. Adapun data yang dipakai dalam penelitian ini yaitu data Landsat 8 pada 06 April 2024 dengan nama file; LC08\_L1TP\_125059\_20240406\_20240412\_02\_T1\_T yang diunduh dalam web; <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Pengambilan data lapangan dilakukan pada tanggal 09 Desember – 11 Desember 2024. Alat yang digunakan dalam penelitian; Suhu menggunakan Thermometer, Kelembaban Temperature, Pengambilan data PM<sub>2,5</sub> & PM<sub>10</sub> menggunakan aplikasi *Breezometer*. Pengolahan dilakukan menggunakan *software*; ENVI, QGIS, dan ArcGIS, Excel. Bahan yang digunakan Citra Landsat 8 Level 1B dan Shapefile.



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

### 2.2.1 Pengumpulan Data

1. Media Internet: Teknik pengumpulan data dilakukan menggunakan media internet, yaitu dengan melakukan pengunduhan *shapefile* Kota Batam di situs Ina Geoportals dan pengunduhan data Citra Landsat 8 di Website USG <https://earthexplorer.usgs.gov/> dengan akun yang sudah dimiliki. Kemudian memilih lokasi Pulau Batam dan waktu perekaman data pada 06 April

2024 dengan mempertimbangkan persentase tutupan awan pada citra landsat yang digunakan. Adapun data yang diunduh berupa data Landsat 8 OLI C2L1 (*Collection 2, Level 1*) dengan path 125 dan row 59.

2. Processing data citra atau ekstraksi informasi data citra.

3. Survei lapangan: Survei lapangan dilakukan pengambilan sample secara langsung ke lokasi penelitian. Pengumpulan data lapangan secara langsung dan klasifikasi setiap titik yang di ambil di peroleh dari *purposive random sampling*. Survei lapangan dilakukan dengan melakukan pemantauan Suhu menggunakan *infrared termometer*, Kelembaban menggunakan *HTC-1 Hygrometer Termometer*, Kekeringan, bencana kekeringan, PM10, dan PM2.5 menggunakan *BreezeMeter (IQAirVisual)*. Nantinya akan dilakukan perbandingan antara hasil klasifikasi data citra landsat 8 yang sudah diolah menggunakan software ENVI dengan hasil visual yang ada di lapangan.

### 2.2.2 Pengolahan Data

#### 1. Koreksi Geometrik

Pada tahap koreksi geometrik, dilakukan dengan menggunakan titik GCP (*Ground Control Point*) yang dikerjakan menggunakan software ENVI (10 titik). Titik GCP terdiri dari koordinat X dan koordinat Y. Titik GCP diperlukan untuk menyesuaikan koordinat pixel dari citra dengan objek yang sama di bumi dalam bidang datar. Koreksi geometrik yang dilakukan pada penelitian ini menggunakan registrasi geometrik citra (*image to map registration*) dengan menggunakan data *shapefile* Administrasi Pulau Batam yang sudah dikoreksi. Koreksi geometrik dikatakan berhasil ketika nilai RMSE < 1. Apabila nilai RMSE ≥ 1 maka harus dilakukan koreksi ulang sampai memenuhi syarat koreksi. Semakin kecil nilai RMSE maka semakin baik pula ketelitiannya.

#### 2. Koreksi Radiometrik

Langkah selanjutnya melakukan koreksi radiometrik yang bertujuan untuk memperbaiki kualitas visual citra dan memperbaiki nilai-nilai piksel yang tidak sesuai dengan nilai spektral sebenarnya. Koreksi radiometrik citra dalam penelitian ini dilakukan dengan merubah nilai dari citra mentah berupa DN menjadi nilai *reflektan* (ToA) sehingga nilai piksel pada citra akan tajam dan jelas. Adapun nilai reflektan yang dihitung meliputi nilai ToA *reflektan* tanpa koreksi sudut matahari dengan rumus (1) dan ToA *reflektan* dengan koreksi sudut matahari menggunakan rumus (2).

Data band OLI juga dapat dikonversi ke TOA reflektansi planet menggunakan koefisien reflektansi rescaling disediakan dalam file metadata produk (berkas mtl). Persamaan berikut ini digunakan untuk mengkonversi nilai DN ke TOA reflektansi untuk data OLI sebagai berikut (USGS, 2018):

Keterangan:

$$\rho\lambda' = M\rho * Qcal + A\rho \quad (1)$$

$\rho\lambda'$  = Nilai Spektral dari ToA *reflektan* tanpa koreksi sudut matahari

$M\rho$  = Nilai *Reflectance Multiplicative* band tertentu

$Qcal$  = *Digital Number band* tertentu

$A\rho$  = Nilai *Reflectance Additive* band tertentu

Kemudian untuk mencari reflektansi TOA dengan koreksi untuk sudut matahari digunakan rumus (USGS, 2018):

$$\rho\lambda \frac{\rho\lambda}{\cos(\theta se)} = \frac{\rho\lambda}{\sin(\theta se)} \quad (2)$$

Keterangan :

$\rho\lambda$  = Nilai *reflektan* terkoreksi sudut matahari

$\theta SE$  = Sudut elevasi matahari (SUN\_ELEVATION)

$\theta SZ$  = Sudut solar zenith ( $\theta sz = 90^\circ - \theta SE$ )

Pada koreksi radiometric di LST menggunakan Langkah seperti rumus (3). Tahapan ini khusus dilakukan untuk menghilangkan gangguan atmosfer pada citra band 10 Landsat 8 untuk mengubah nilai DN ke TOA Radiance, Rumus yang digunakan adalah sebagai berikut (USGS, 2018):

$$L\lambda = ML*Qcal + AL \quad (3)$$

### 3. Koreksi Atmosferik

Koreksi atmosferik sangat penting dilakukan dengan tujuan untuk memperoleh nilai reflektan yang dihasilkan oleh objek di bumi. Penelitian ini menggunakan koreksi atmosfer DOS (*Dark Object Substraction*) yang mudah dan efisien untuk koreksi atmosferik. Koreksi atmosferik DOS dilakukan melalui perhitungan di band math ENVI 5.3 menggunakan rumus(4) untuk memperoleh nilai surface reflectance.

$$\rho BoA = \rho\lambda' - \rho min \quad (4)$$

Keterangan:

$\rho BoA$  = *Surface reflectance* (mWatt cm<sup>-2</sup> sr<sup>-1</sup>  $\mu$ m<sup>-1</sup>)

$\rho\lambda'$  = Reflektan ToA, tanpa koreksi sudut matahari (mWatt cm<sup>-2</sup> sr<sup>-1</sup>  $\mu$ m<sup>-1</sup>)

$\rho min$  = Nilai minimum histogram di dalam *Region of Interest* (ROI)

Setelah melakukan koreksi radiometrik, reflektansi yang diukur dari satelit (ToA reflektan) dikurangi

dengan nilai *surface reflectance* melalui rumus(5) untuk mendapatkan *reflektansi atmosfer*.

$$R = ToA Ref - Surface Reflectance \quad (5)$$

Keterangan:

$R$  = *Atmospheric reflectance*

Pada koreksi Atmosferik dalam penelitian ini untuk mendapatkan PM2,5 dan PM10 dengan menggunakan band 1, 3 dan 4 metode AOT dengan rumus (14) dan (17).

### 4. Cropping Citra

Pemotongan Citra (*Cropping*) dilakukan dengan cara mengambil area tertentu yang akan diamati (*Area of Interest*) dalam suatu citra, dengan tujuan untuk memudahkan analisis gambar dan memperkecil ukuran penyimpangan citra. Pemotongan citra difokuskan pada daerah studi penelitian di Pulau Batam agar lebih memudahkan dalam melakukan pengolahan data.

### 5. Land Surface Temperature (LST)

Suhu Permukaan atau *Land Surface Temperature*(LST) merupakan merupakan suhu permukaan yang berasal dari pantulan objek citra satelit. Suhu kecerahan atau *Brightness Temperature* telah banyak digunakan untuk mengukur suhu permukaan bumi berdasarkan termal inframerah yang ada pada aplikasi penginderaan jauh. Mengubah nilai radian menjadi suhu kecerahan. Suhu kecerahan diperoleh dengan mengambil nilai radiansi dari band 10 untuk landsat 8 yang akan dianalisis dengan rumus(6) algoritma sebagai berikut :

$$T = \frac{K2}{\ln\left(\frac{K1}{L\lambda + 1}\right)} \quad (6)$$

Keterangan

$T$  : Temperatur Kecerahan dalam kelvin

$L\lambda$  : Nilai Spektral Radiasi

$K1$  : Konstanta termal band 10 (Landsat 8)

$K2$  : Konstanta termal band 10 (Landsat 8)

### Land Surface Emisivty (LSE)

*Emisivitas* permukaan tanah (*Land Surface Emissivity*, LSE) merupakan sifat intrinsik dari material alami di permukaan bumi, dan sering dianggap sebagai indikator dari komposisi materialnya. Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) atau Indeks vegetasi merupakan suatu indeks yang digunakan untuk menganalisis keadaan vegetasi dalam suatu Kawasan melalui transformasi saluran (band). Nilai emisivitas yang diturunkan oleh nilai NDVI dengan rumus (7):

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (7)$$

Keterangan :

NIR : *Band Near-Infrared Radiation* pada (Band 5)

Red : Band merah pada (Band 4)

Kemudian menghitung PV (*Proporsi Vegetasi*), ini digunakan untuk mengubah nilai temperature menjadi suhu permukaan untuk mencari nilai *emisivitas* LSE (*Land Surface Emisivity*) dibutuhkan *Proporsi Vegetasi* (PV) dengan hasil hitungan NDVI, Maka dapat diperoleh rumus (8) sebagai berikut:

$$PV = \frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} + NDVI_{min}} \quad (8)$$

Keterangan:

NDVI = Nilai NDVI

NDVI<sub>min</sub> = Nilai NDVI terendah

NDVI<sub>max</sub> = Nilai NDVI tertinggi

Yang kemudian nilai Emisivitas LSE (E) akan dihitung menggunakan rumus berikut:

$$E = 0,004 \times PV + 0,986 \quad (9)$$

Keterangan:

PV = Band hasil perhitungan *Proporsi Vegetasi*

### Land Surface Temperature (LST)

Setelah didapatkan nilai LSE yang menggambarkan emisivitas, kemudian nilai tersebut ditransformasikan untuk mendapatkan nilai suhu permukaan (LST). Didefinisikan oleh LST Internasional dan Kelompok Kerja Emisivitas sebagai ukuran seberapa panas atau dingin permukaan bumi saat disentuh atau dirasakan (Yu et al., 2013), Mengkonversi suhu kecerahan ke suhu permukaan lahan menggunakan rumus persamaan Artis dan Carnahan (1982), dengan rumus (10) sebagai berikut:

$$Ts = \frac{T}{1 + \left(\frac{\lambda T}{P}\right) \ln \epsilon} \quad (10)$$

Keterangan :

Ts = Temperatur Permukaan Kawasan

T = Temperatur Kecerahan

$\lambda$  = Panjang gelombang radiasi yang dipancarkan

$\rho$  = Dengan nilai hc/K (1,438 x 10<sup>-2</sup> mK)

H = Nilai konstanta Plank's (6,26 x 10<sup>-3</sup>)

c = Nilai Kecepatan cahaya (2,998 x 10<sup>8</sup> m.scc<sup>-1</sup>)

K: Konstanta Stefan Boltzman (1,38 x 10<sup>-23</sup> JK<sup>-1</sup>)

$\epsilon$  = *Emisivitas obyek*

Kemudian *temperature* Kelvin dikonversi menjadi Celcius:

$$^{\circ}K = ^{\circ}C - 273.15$$

Keterangan:

$^{\circ}K$  = *Temperature* dalam Kelvin

$^{\circ}C$  = *Temperature* dalam Celcius

### 6. Temperature Vegetation Dryness Index (TVDI)

Indeks kekeringan yang ditentukan berdasarkan parameter empirik dari hubungan antara temperatur permukaan (TS) dan indeks vegetasi (NDVI). Indeks tersebut dikaitkan dengan kelembaban tanah dan diperoleh hanya berdasarkan input dari informasi satelit penginderaan jauh (Sandholt, 2002) dengan rumus algoritma sebagai berikut:

$$TVDI = \frac{LST - LST_{min}}{LST_{max} - LST_{min}} \quad (11)$$

TVDI = Index kekeringan

LST<sub>min</sub> = temperatur permukaan minimum sisi basah

LST = temperatur permukaan yang diamati pada suatu pixel

LST<sub>max</sub> = temperatur permukaan maksimum yang diamati untuk tiap nilai Kering.

### 7. Normalized Difference Wetness Index (NDWI)

Proses pengolahan algoritma NDWI dilakukan untuk memperoleh indeks kelembaban atau kebasahan pada vegetasi dan tanah. NDWI menekankan pada kebasahan vegetasi (Gu, dkk, 2007). NDWI menggunakan nilai reflektansi dari band near infrared (NIR) dan band gelombang pendek infrared (SWIR). Berikut algoritma NDWI dituliskan dalam rumus (12) (Gu, dkk, 2007):

$$NDWI = \frac{GREEN - NIR}{GREEN + NIR} \quad (12)$$

Keterangan:

NDWI = Nilai NDWI (*Normalized Difference Wetness Index*)

Green = saluran inframerah dekat (Band 3)

NIR = saluran inframerah dekat (Band 5)

### 8. Normalized Difference Drought Index (NDDI)

Indeks NDDI dihasilkan dengan menggabungkan parameter vegetasi kehijauan (NDVI) dan tingkat kebasahan vegetasi (NDWI). Dalam NDDI, nilai yang lebih tinggi menunjukkan kondisi kering. Berikut algoritma NDDI dituliskan dalam rumus (13) (Gu, dkk, 2007):

$$NDDI = \frac{(NDVI - NDWI)}{(NDVI + NDWI)} \quad (13)$$

Keterangan:

NDVI = indeks vegetasi, dan

NDWI = indeks kebasahan.

### 9. Perhitungan PM 10 dengan AOT (*Aerosol Optical Thickness*)

menyatakan derajat kemampuan aerosol dalam mencegah transmisi cahaya di atmosfer. AoT yang akurat penting untuk menunjukkan kualitas udara.

Selanjutnya, menghitung *Aerosol Optical Thickness* (AOT) dari Landsat 8.

Adapun rumus algoritma perhitungan AOT (Hadjimitsis 2009 dalam Mozafari dkk, 2019) yaitu:

$$AOT(\lambda) = a_j * R\lambda_i$$

$$AOT = a_0R\lambda_1 + a_1R\lambda_2 + a_2R\lambda_3 + \dots \quad (14)$$

Keterangan :

$R\lambda_i$  = Reflektansi atmosferik ( $i = 1,2,3,4,\dots$  sesuai dengan pita gelombang satelit)

$a_j$  = Koefisien algoritma

AOT telah diganti dengan istilah PM 10 pada rumus (14), sehingga algoritma untuk perhitungan estimasi PM 10 dengan AOT dalam penelitian ini dilakukan melalui rumus (15). Adapun rumus untuk menghitung nilai PM 10 dengan AOT (dalam Mozafari dkk, 2019) yaitu:

$$PM10 = -444RB1 + 1.766 RB3 - 1.664RB4 + 78 \quad (15)$$

Keterangan:

$PM10$  = PM10 konsentrasi ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

$RB1$  = TOA\_reflectance of Band 1

$RB3$  = TOA\_reflectance of Band 3

$RB4$  = TOA\_reflectance of Band 4

#### 10. Perhitungan PM2.5 dengan AOT (*Aerosol Optical Thickness*)

*Aerosol Optical Thickness* menyatakan derajat kemampuan aerosol dalam mencegah transmisi cahaya di atmosfer. Estimasi AOT yang akurat sangat penting untuk menunjukkan kualitas udara. Analisis algoritma telah digunakan untuk menghubungkan PM 2,5 dengan reflektansi atmosfer. Adapun rumus algoritma perhitungan(16), AOT (Hadjimitsis 2009 dalam Mozafari dkk, 2019) yaitu:

$$AOT(\lambda) = a_j * R\lambda_i$$

$$AOT = a_0R\lambda_1 + a_1R\lambda_2 + a_2R\lambda_3 + \dots \quad (16)$$

Keterangan :

$R\lambda_i$  = Reflektansi atmosferik ( $i = 1,2,3,4,\dots$  sesuai dengan pita gelombang satelit)

$a_j$  = Koefisien algoritma

AOT telah diganti dengan istilah PM 2,5 dengan menggunakan rumus (16), sehingga algoritma untuk perhitungan estimasi PM 2,5 dengan metode AOT dalam penelitian ini dilakukan melalui rumus (17). Adapun rumus(17) untuk menghitung nilai PM 2,5 dengan AOT (dalam Mozafari dkk, 2019) yaitu:

$$PM2.5 = 369*RB1 - 197* RB3 - 376*RB4 + 3.2 \quad (17)$$

Keterangan:

$PM2,5$  = PM10 konsentrasi ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

$RB1$  = TOA\_reflectance of Band 1

$RB3$  = TOA\_reflectance of Band 3

$RB4$  = TOA\_reflectance of Band 4

Kategori ISPU	PM 10 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	PM 2,5 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Keterangan
0 - 50	50	15,5	Baik
51 - 100	150	55,4	Sedang
101 - 200	350	150,4	Tidak sehat
201 - 300	420	250,4	Sangat tidak sehat
>300	500	500	Berbahaya

Tabel 1. Kategori ISPU Berdasarkan Nasional Ambient Air Quality Standart (airpollution2014.weebly)

Dari pemantauan dilapangan untuk PM2,5 & PM10 dibandingkan dengan hasil nilai citra, untuk mendapatkan nilai aktual sesuai dengan nilai konsentrasi ISPU pada tabel 1.

#### 11. Distribusi Konsentrasi

Setelah melakukan perhitungan dari keenam parameter yaitu Suhu dengan LST, Kekeringan dengan TVDI, Kelembaban dengan NDWI, Potensi Kekeringan dengan NDDI dan PM2,5 & PM10 dengan AOT, tahap selanjutnya mengolah data di ArcGIS. Citra hasil perhitungan di export terlebih dahulu ke dalam bentuk TIFF untuk dapat diolah. Tahap selanjutnya dilakukan extract by mask untuk menghapus bagian yang tidak ingin ditampilkan pada citra lalu direclassify untuk merubah nilai setiap data menjadi beberapa kelas sesuai dengan kebutuhan.

#### 12. Titik Sampel

Dalam penelitian ini, Teknik sampling yang digunakan untuk pengambilan sample yaitu purposive random sampling. Penggunaan titik sampling ini dilakukan secara acak dan berdasarkan pada pertimbangan tujuan penelitian. Banyak sampel tergantung pada alasan pengambilan sampel. Minimal jumlah sampel yang baik berjumlah 30, sedangkan dalam penelitian jumlah sampel minimal 15 dari masing-masing kelompok dan untuk penelitian survei jumlah sampel minimal sebanyak 100. Besaran ukuran sampel tergantung dari besaran tingkat ketelitian yang diinginkan peneliti.

#### 13. Validasi Lapangan

Dilakukan untuk membuktikan hasil penelitian yang telah dikerjakan sebelumnya dengan keadaan sebenarnya di lapangan. Uji lapangan dalam penelitian ini dilakukan dengan mengambil titik-titik koordinat yang dijadikan sebagai titik sampel

menggunakan GPS, Suhu dengan bantuan alat thermometer, kelembaban dengan menggunakan alat Temperature, dan untuk pemantauan polusi udara dengan menggunakan aplikasi *BreezoMeter*.

#### 14. Regresi dan Korelasi

Hasil yang diperoleh dari lapangan, selanjutnya dilakukan analisis regresi dan korelasi. Yang bertujuan untuk mengetahui besarnya kekuatan hubungan antar kedua variabel dan memastikan akurasi hasil yang diperoleh.

Adapun regresi digunakan untuk melihat keceratan dan keakuratan hubungan setiap parameter antara hasil pengukuran dilapangan dengan data citra penginderaan jauh. Proses pembuatan model pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan regresi linier sederhana dengan rumus (18)(19)(20):

$$y = ax + b \quad (18)$$

Keterangan :

a = Koefisien regresi

b = Konstanta

x = Variabel bebas

y = Variabel terikat

Untuk mencari koefisien regresi (a) menggunakan rumus(19):

$$a = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{n(\sum x^2) - (\sum x)^2} \quad (19)$$

Untuk mencari konstanta (b) menggunakan rumus(20):

$$b = \frac{(\sum y)(\sum x^2) - (\sum x)(\sum xy)}{n(\sum x^2) - (\sum x)^2} \quad (20)$$

Analisis korelasi digunakan untuk mengetahui besarnya kekuatan hubungan antara dua variabel (Sugiyono, 2015). Koefisien korelasi diperoleh dari hasil akar nilai *R square* (R<sup>2</sup>). Besarnya hubungan ini dinyatakan dengan koefisien korelasi sebagai berikut:

Interval Koefisien Korelasi	Interprestasi Hubungan
0,00-0,19	Sangat Rendah
0,20-0,39	Rendah
0,40-0,59	Cukup Kuat
0,60-0,79	Kuat
0,80-1,00	Sangat Kuat

Tabel 2. Interpretasi Koefisien dan nilai korelasi sumber; sugiyono 2007.

Nilai yang lebih tinggi menunjukkan bahwa hubungan antara variabel yang diteliti semakin kuat, yang berarti uji akurasi untuk pemodelan yang

digunakan lebih representatif terhadap kondisi lingkungan.

Setelah model diperoleh melalui regresi dan korelasi, kemudian dilakukan uji akurasi untuk mengukur sejauh mana hasil prediksi sesuai dengan kondisi sebenarnya. Dalam penelitian ini, menggunakan 30 sampel dari lapangan lalu dibagi menjadi 2 bagian, 15 sampel untuk pemodelan dan 15 sampel lagi untuk uji akurasi.

Uji akurasi mempunyai tujuan yaitu untuk mengetahui nilai error pada data penginderaan jauh. Berikut rumus untuk uji akurasi error adalah sebagai rumus (21), (Chai dan Draxler, 2014) :

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (y - y')^2}{n}} \quad 21$$

Keterangan:

y = Nilai data yang diambil di lapangan

y' = Data model dari hasil rumus regresi dan korelasi

n = Jumlah sampel

Hasil dari RMSE didapatkan dari rata-rata kuadrat total error yang didapatkan pada model prediksi. Semakin kecil nilai RMSE, semakin baik tingkat hasil yang diuji terhadap nilai referensi (nilai lapangan).

#### 15. Integrasi Peta dalam Penentuan Status Berkelanjutan

Untuk menghasilkan peta tematik yang mampu menggambarkan kondisi lingkungan secara menyeluruh, integrasi peta dilakukan melalui teknik *overlay*, yang menggabungkan berbagai parameter spasial sehingga setiap parameter yang memengaruhi status berkelanjutan dapat dianalisis secara menyeluruh.

Overlay merupakan suatu sistem informasi dalam bentuk grafis yang dibentuk dari penggabungan berbagai peta individu (memiliki informasi/database yang spesifik). *Overlay* peta dilakukan minimal dengan 2 jenis peta yang berbeda secara teknis dikatakan harus ada polygon yang terbentuk dari 2 jenis peta yang dioverlaykan dalam Rachmah, dkk (2018). Dalam penelitian ini, setiap lapisan (*layer*) mewakili parameter tertentu, seperti suhu permukaan lahan (LST), indeks vegetasi, indeks kekeringan (TVDI/NDDI), kelembaban (NDWI), dan parameter kualitas udara seperti PM<sub>2.5</sub> atau PM<sub>10</sub>. Dalam penelitian ini, setiap hasil dcantumkan kedalam target dari SDGs 11.

Proses integrasi dalam penelitian ini, pengolahan dan pemberian klasifikasi data parameter, data parameter diolah dan diklasifikasikan menjadi kelas-kelas tertentu (misalnya rendah, sedang, tinggi). dimana parameter yang di *overlay* meliputi data aktual dari lapangan. Penentuan bobot dilakukan untuk menyesuaikan pengaruh relatif tiap parameter

terhadap keberlanjutan lingkungan. Bobot ditentukan menggunakan metode *Analytic Hierarchy Process* (AHP) yang melibatkan perbandingan berpasangan antar parameter dengan skala 1–9, sehingga menghasilkan bobot yang konsisten dan terukur. Selanjutnya tahapan penentuan status berkelanjutan, dengan mempergunakan kelas interval yang dihitung berdasarkan rentang dari nilai tertinggi dan terendah dengan menggunakan tools weighted overlay pada software Arc GIS 10.8 untuk mengoverlay dan menghasilkan peta integrasi pemantauan kondisi lingkungan di Pulau Batam. Maka status, suatu perkotaan sudah berkelanjutan disajikan pada Tabel 3:

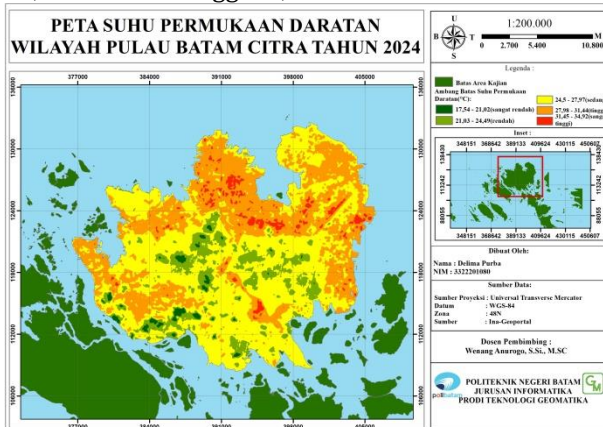
Indeks Berkelanjutan	Kriteria
Berkelanjutan	Nilai total 2,35-3,00 Salah satu nilai pilar tidak boleh kurang dari 0,75.
Tahap Awal Berkelanjutan	Nilai total 1,67-2,34
Belum Berkelanjutan	Nilai total 1,00-1,66

Tabel 3. Indeks komposit pengembangan kota baru berkelanjutan.

### 3. Hasil dan Pembahasan

#### 3.1. Hasil Suhu Permukaan Lahan

Sebaran suhu permukaan lahan berdasarkan pengolahan citra Landsat 8, khususnya Band 10, yang dipilih karena memiliki tingkat absorpsi atmosfer lebih rendah pada tahun 2024, dapat dibuat 5 kelas suhu permukaan lahan di Pulau Batam dengan menggunakan rumus(6). Luas sebaran suhu permukaan lahan di Pulau Batam tahun 2024 dilihat pada Gambar 3. Hasil dari pengolahan Land Surface Temperature menunjukkan bahwa secara spasial permukaan lahan di Pulau Batam pada 16 April 2024 didominasi suhu permukaan lahan yang terendah 17,54°C dan tertinggi 34,92°C.

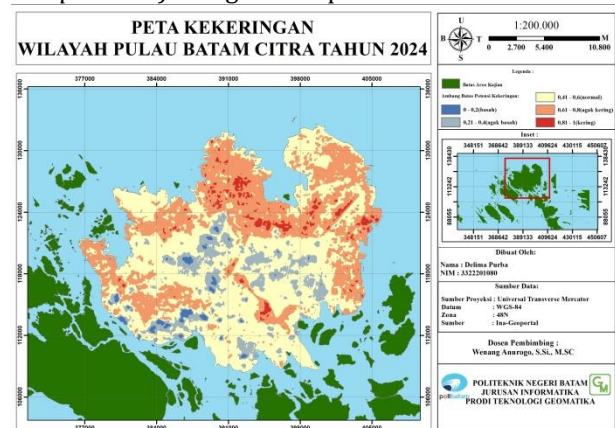


Gambar 3. Hasil Pengolahan LST

Dapat dilihat bahwa suhu permukaan lahan paling tinggi terdapat di pusat kota yang didominasi oleh lahan terbangun, dan daerah pinggiran kota yang didominasi oleh lahan tidak terbangun yang memiliki suhu permukaan lebih rendah, disebabkan oleh kepadatan pusat kota dengan kurangnya ruang terbuka hijau akan menyebabkan suhu yang lebih tinggi. Data suhu permukaan akan digunakan sebagai acuan dalam melakukan observasi lapangan di wilayah Pulau Batam.

#### 3.2. Hasil Indeks Kekeringan

Pemrosesan indeks kekeringan menggunakan metode TVDI (*Temperature Vegetation Dryness Index*). Untuk menemukan parameter persamaan TVDI, Landsat 8 menggunakan regresi linier antara nilai NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) sebagai representasi vegetasi dan LST (*Land Surface Temperature*) sebagai suhu permukaan.



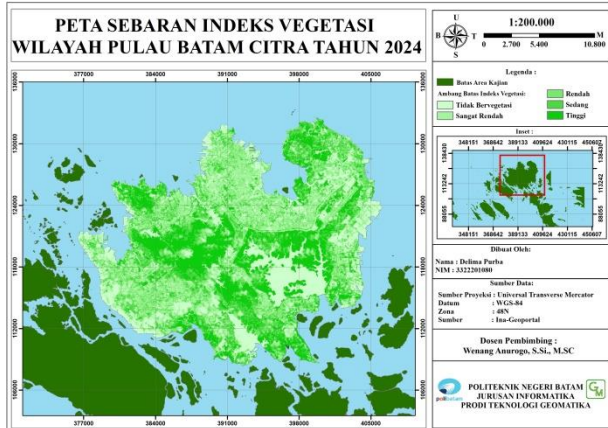
Gambar 4. Hasil Pengolahan TVDI

Gambar diatas merupakan hasil pengolahan TVDI, untuk Indeks kekeringan Pulau Batam cenderung normal dan agak basah, tetapi beberapa wilayah yang padat penduduk memiliki indeks yang agak kering dan kering. Dalam pengolahan TVDI digunakan sebagai acuan dalam melakukan observasi lapangan yaitu berada di wilayah Pulau Batam.

#### 3.3. Hasil Indeks Vegetasi

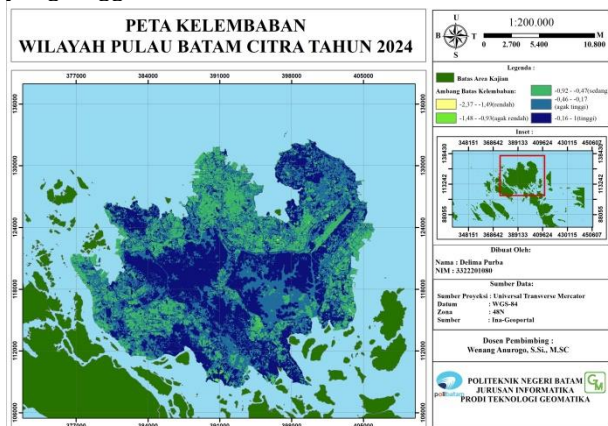
Pengolahan NDVI digunakan untuk melihat kerapatan vegetasi yang ada di Pulau Batam tahun 2024. Berikut adalah hasil pengolah NDVI wilayah Pulau Batam menggunakan citra Landsat 8. Nilai rentang panjang gelombang untuk kerapatan vegetasi NDVI adalah dari -1 sampai 1. Jika panjang gelombang semakin mendekati angka 1, maka kerapatan vegetasi di daerah tersebut semakin tinggi, begitu juga sebaliknya jika nilai panjang

gelombang semakin mendekati angka -1, maka kerapatan vegetasi di daerah tersebut semakin rendah. Hasil pengolahan NDVI pada citra Landsat 8 Pulau Batam menunjukkan bahwa wilayah Pulau Batam memiliki rentang nilai NDVI min -0.769456 dan max 0.833613. Dalam pengolahan NDWI digunakan sebagai acuan dalam melakukan observasi lapangan yaitu berada di wilayah Pulau Batam.



### 3.4. Hasil Indeks Kelembaban

Pada penelitian ini pengolahan NDWI menggunakan citra Landsat 8 dengan asumsi jika semakin besar nilai NDWI maka hasil transformasi indeks kelembaban suatu obyek semakin basah. Asumsi yang digunakan dalam penelitian ini adalah semakin rendah nilai spektral hasil transformasi indeks kebasahan yang ditunjukkan indeks data spasial berwarna cream dan hijau( suatu objek maka objek tersebut tidak ada air dan rendah(kering), sebaliknya degradasi warna berdasarkan nilai NDWI, warna biru menandakan ketersediaan air yang tinggi.

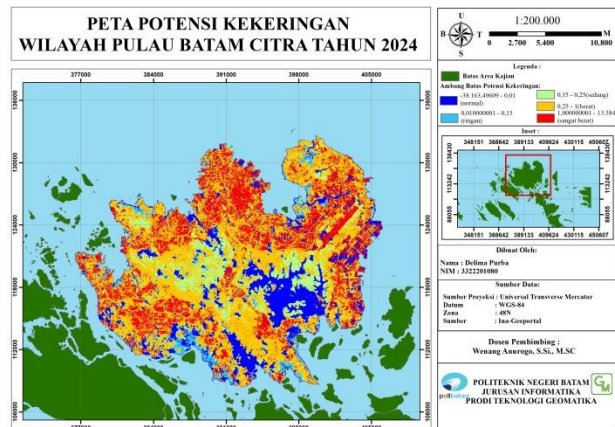


Gambar 5. Hasil Pengolahan NDWI

Berdasarkan hasil transformasi NDWI didapatkan nilai indeks kelembaban terendah -0.47 dan tertinggi 1.07 seperti yang ditunjukkan pada gambar 5. Dalam pengolahan NDWI digunakan sebagai acuan dalam melakukan observasi lapangan yaitu berada di wilayah Pulau Batam.

### 3.5. Hasil Indeks Potensi Kekeringan

Berdasarkan hasil pengolahan citra satelit dengan metode NDDI, diperoleh nilai indeks yang menunjukkan variasi kondisi kelembaban tanah di wilayah kajian. NDDI digunakan untuk mendeteksi potensi kekeringan dengan melihat perbedaan antara kelembaban tanah dan kondisi vegetasi. Nilai NDDI umumnya berkisar dari -1 hingga +1. Nilai NDDI yang lebih tinggi (mendekati +1) menunjukkan area lebih kering atau berpotensi mengalami kekeringan, sedangkan nilai lebih rendah (mendekati -1) menandakan area lebih lembab atau basah.

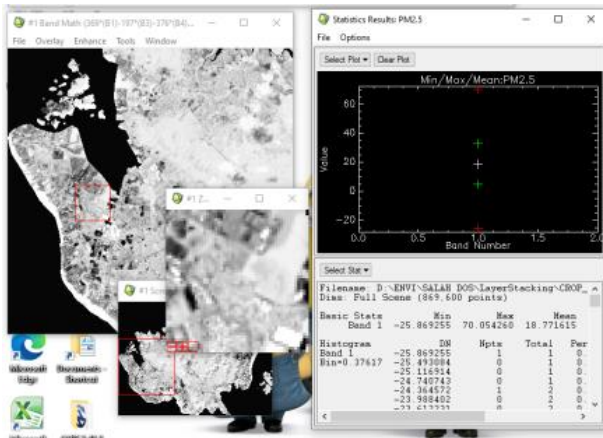


Gambar 6. Hasil Pengolahan NDDI

Gambar 6 hasil pengelolaan NDDI pada tahun 2024 terdeteksi normal, kekeringan ringan, kekeringan sedang, kekeringan berat, dan kekeringan sangat berat. Yang mana hal tersebut disebabkan karena pengelolaan NDDI menguntukkan perpaduan rumus NDVI dan NDWI dimana rumus tersebut adalah indikator vegetasi atau metode tersebut hanya menggunakan data citra landsat yaitu band 4 (RED), band 5 (NIR), dan band 7 (SWIR). Dalam pengolahan NDDI digunakan sebagai acuan dalam melakukan observasi lapangan yaitu berada di wilayah Pulau Batam.

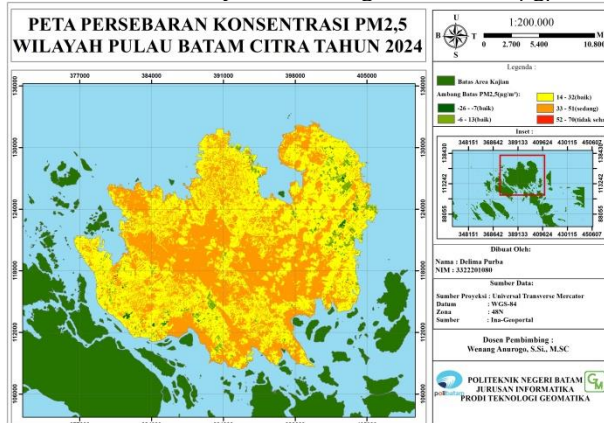
### 3.6. Hasil Distribusi PM2,5

Pada Penelitian ini Pengolahan PM2,5 menggunakan citra landsat 8. Berikut adalah hasil pengolahan algoritma PM2,5 menurut algoritma dari (Hadjimitsis 2009 dalam Mozafari dkk, 2019).



Gambar 7. Histogram PM2,5

Pada gambar histogram, terlihat bahwa nilai minimum PM 2,5 sebesar -25.86 dan maksimum sebesar 70.054260. Selanjutnya dilakukan proses layout peta. Rentang nilai untuk PM 2,5 yang baik berada pada ambang batas 0,0–15,9  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , sedangkan untuk ambang batas 16,0–65,9  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  berada pada kategori “sedang”, dan ambang batas tidak sehat berada pada ambang batas 150,4  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

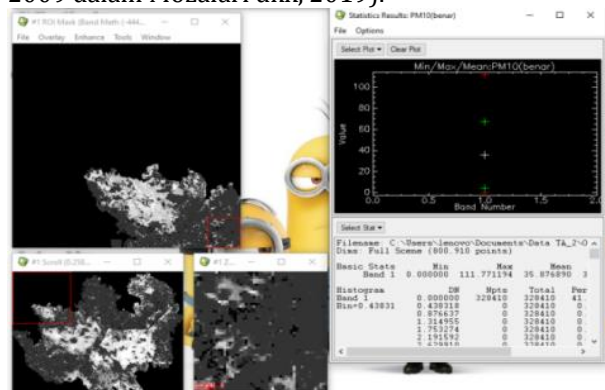


Gambar 8. Hasil Pengolahan PM2,5

Hasil menunjukkan bahwa secara keseluruhan Pulau Batam memiliki persebaran konsentrasi PM 2,5 yang berada pada kategori “tidak sehat” menurut parameter ISPU dengan nilai tertinggi yaitu 70.05  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Tingkat kualitas udara yang bersifat merugikan pada manusia, hewan dan tumbuhan. Artinya, Mengurangi aktivitas fisik yang terlalu lama di luar ruangan (Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor 14 Tahun 2020 tentang indeks standar pencemar udara). Dalam pengolahan PM2,5 digunakan sebagai acuan dalam melakukan observasi lapangan yaitu berada di wilayah Pulau Batam.

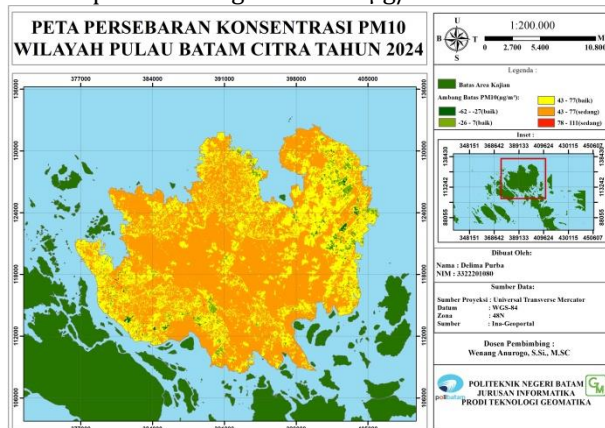
### 3.7. Hasil Distribusi PM10

Pada Penelitian ini Pengolahan PM10 menggunakan citra landsat 8. Berikut adalah hasil pengolahan algoritma PM10 menurut algoritma dari (Hadjimitsis 2009 dalam Mozafari dkk, 2019).



Gambar 9. Histogram PM10

Pada gambar histogram, terlihat bahwa nilai minimum PM 10 sebesar 0.00 dan maksimum sebesar 111.771194. Selanjutnya dilakukan proses layout peta. Rentang nilai untuk PM 2,5 yang baik berada pada ambang batas 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , sedangkan untuk ambang batas 150  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  berada pada kategori “sedang”, dan ambang batas tidak sehat berada pada ambang batas 350  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .



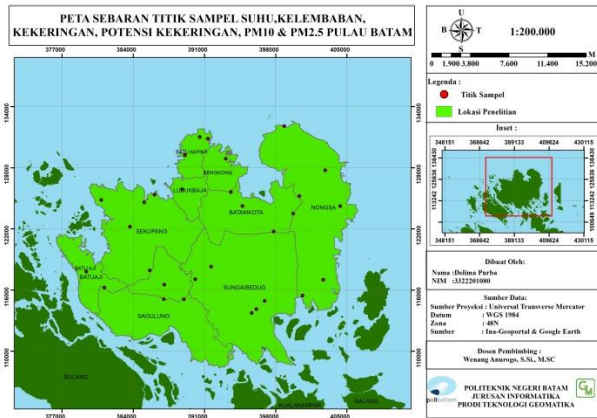
Gambar 10. Hasil Pengolahan PM10

Nilai Ambang Batas (NAB) pada PM 10 yang diperbolehkan berada dalam udara ambien menurut BMKG adalah 150  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Hasil menunjukkan bahwa secara keseluruhan Pulau Batam memiliki persebaran konsentrasi PM 10 yang berada pada kategori “sedang” menurut parameter ISPU, dengan nilai tertinggi yaitu 111,7  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Tingkat kualitas udara masih dapat diterima pada kesehatan manusia, hewan dan tumbuhan. Artinya Kurangi aktivitas fisik yang terlalu lama atau berat. Masih dapat beraktivitas di luar. Dalam pengolahan PM2,5 digunakan sebagai acuan dalam melakukan observasi lapangan yaitu berada di wilayah Pulau Batam

### 3.8. Regresi dan Korelasi

Pemodelan sampel dan uji akurasi dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui nilai keakuratan antara hasil pengolahan yang dilakukan di citra landsat maupun di lapangan. Pada penelitian ini diambil sebanyak 30 titik sampel di Pulau Batam. Dari sampel tersebut nantinya akan dibagi menjadi dua bagian, yaitu 15 untuk data sampel dan 15 lainnya untuk uji akurasi. Adapun data yang digunakan yaitu data citra landsat LST, TVDI, NDVI, NDWI, PM2,5 & PM10 tahun 2024 sebagai variabel x dan data LST, TVDI, NDWI, PM2,5 & PM10 hasil survei lapangan sebagai variabel y.

#### a) Titik Sampel



Gambar 11. Peta Sebaran Titik Sampel

#### b) Pengambilan Sampel Lapangan



Gambar 12. Pengambilan Sampel Lapangan (Dokumen Pribadi)

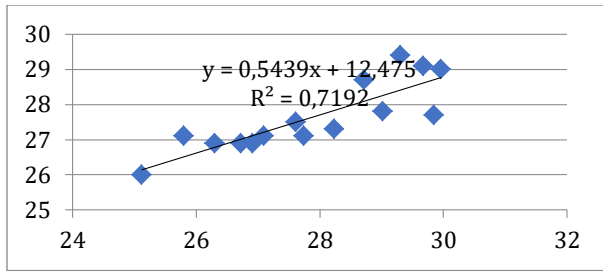
Validasi lapangan dilakukan dengan mencari titik sampel yang telah dibuat menggunakan software ArcMap dengan sampel sebanyak 30 titik sampel yang tersebar di wilayah Pulau Batam. Hasil Survei

lapangan tersebut ditunjukkan pada tabel 4 sebagai berikut:

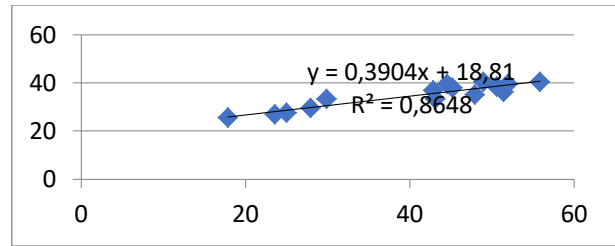
LST	NDVI	NDWI	PM2,5	PM10
29	2,06018	75	27,04	34,02
27,1	3,422	81	27,38	26,85
26,9	2,73	81	27,3	42,93
27,1	3,512	75	33,69	36,87
28,7	2,263157895	73	26,11	34,32
26	4,81625	79	27,11	36,7
27	0,65	75	24,65	39,36
28	2,91	76	24,61	36,98
29	4,49	78	29,32	36,1
29,1	2,263	75	24,5	33,2
27,5	2,375	76	24,43	34,36
30	2,365	81	24,4	34,36
29	2,34	82	24,2	37,58
28	5,12	79	24,45	22,49
30,5	1,62	74	30,06	39,32
29,4	4,25	79	28,97	35,28
28,8	2,838	75	24,42	29,38
28,7	3,192	78	24,4	36,1
29,24	1,9	78	24,34	27,58
25,3	2,83	81	24,29	38,43
27,1	4,62913	82	24,39	38,26
28,1	1,426253	75	29,3	25,49
26,8	6,606821	82	24,53	39,32
28	4,81	79	24,56	38,32
27,9	6,65	84	24,57	40,28
28	4,55	80	24,58	35,66
26,9	4,86	80	30,28	34,98
26	5,58714286	79	30,81	40,32
27,3	3,43	82	30,45	34,98
28,9	3,33	77	25,48	33,25

Tabel 4. Sampel Survei Lapangan

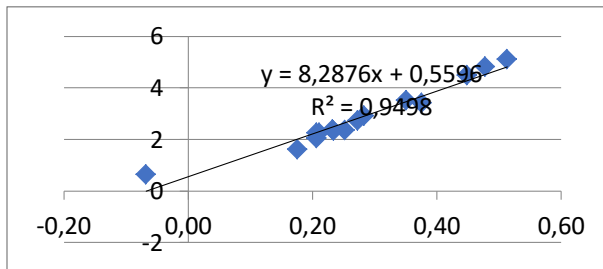
Data hasil pengukuran lapangan, seperti pada tabel di atas, yang dilakukan selama 3 hari dengan total 30 sampel. Data ini kemudian digunakan untuk pemodelan regresi, antara hasil pengukuran di lapangan dengan nilai dari citra. Pemodelan ini juga bertujuan untuk melakukan uji interpretasi dan menghitung nilai RMSE.



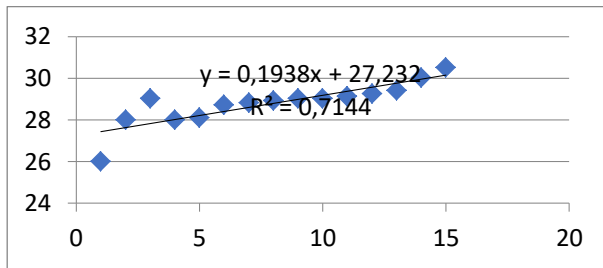
Gambar 13. Uji Interpretasi LST



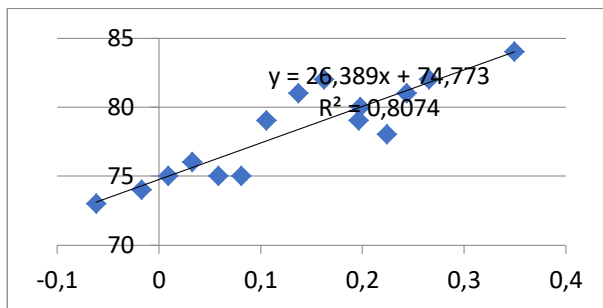
Gambar 18. Hasil Uji Interpretasi PM10



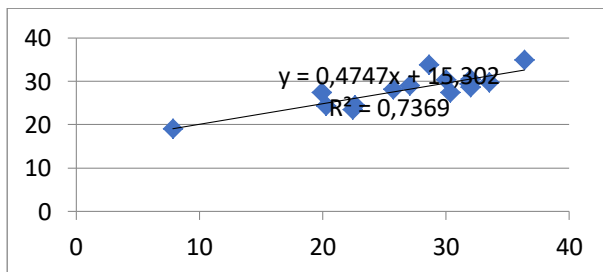
Gambar 14. Hasil Uji Interpretasi NDVI



Gambar 15. Hasil Uji Interpretasi TVDI



Gambar 16. Hasil Uji Interpretasi NDWI



Gambar 17. Hasil Uji Interpretasi PM2,5

Dalam penelitian ini, emodelan data dilakukan dengan menggunakan Microsoft Excel untuk membuat grafik linear untuk melihat hubungan antara hasil perhitungan dari citra dengan data sampel lapangan. Adapun data yang digunakan yaitu data citra landsat LST, NDVI, TVDI, NDWI, PM2,5 & PM 10 tahun 2024 sebagai variabel x dan data LST, NDVI, NDWI, PM2,5 & PM 10 hasil survei lapangan sebagai variabel y. Proses ini dilakukan dengan menampilkan display equation dan display R-squared value. Dari analisis ini, muncul persamaan regresi dan nilai R-squared (R2) yang menunjukkan seberapa kuat hubungan antara kedua variabel tersebut. Hasilnya, nilai R2 dalam penelitian ini masuk dalam kategori korelasi kuat. Artinya, data citra baik dalam merepresentasikan kondisi di lapangan.

Titik	Variabel X	Variabel Y	y'=ax+b	(y-y')^2
1	29,57	26	28,558123	6,54399328
2	26,3	26,9	26,77957	0,01450338
3	26,42	29	26,844838	4,64472325
4	26,82	27	27,062398	0,00389351
5	27,45	28	27,405055	0,35395955
6	29,5	30,7	28,52005	4,752182
7	28,91	30,3	28,199149	4,41357492
8	28,5	28	27,97615	0,00056882
9	30,34	29,4	28,976926	0,17899161
10	30,24	27,5	28,922536	2,02360867
11	25,36	25,3	26,268304	0,93761264
12	28,37	27,1	27,905443	0,64873843
13	28,27	26	27,851053	3,42639721
14	28,65	27,3	28,057735	0,57416233
15	28,21	26,8	27,818419	1,03717726
Jumlah (Y-y')^2				29,5540869
RMSE				0,36242447

Tabel 5. Hasil Uji Akurasi LST

Ti titik	Variabel X	Variabel Y	y'=ax+b	(y-y')^2
2	0,549959	27,1	27,33858	0,056921397
3	0,490070	26,9	27,32698	0,182308134
4	0,482877	27,1	27,32558	0,050887041
7	0,534219	27	27,33553	0,112581483
8	0	28	27,232	0,589824
11	0,579780	27,5	27,34436	0,024223385

18	0,632348	28,7	27,35455	1,810238279
20	0,450451	25,3	27,3193	4,077562005
21	0,587118	27,1	27,34578	0,060409513
23	0,498444	26,8	27,3286	0,279416318
25	0,522669	27,9	27,33329	0,321156538
26	0,639803	28	27,35599	0,414743958
27	0,534175	26,9	27,33552	0,189680384
28	0,449606	26	27,31913	1,740113568
29	0,631836	27,3	27,35445	0,002964783
Jumlah (Y-y')^2				9,913030786
RMSE				0,209899773

Tabel 6. Hasil Uji Akurasi TVDI

Titik	Variabel X	Variabel Y	y'=ax+b	(y-y')^2
16	0,46	4,25	4,379404566	0,016745542
17	0,29	2,838	2,965133913	0,016163032
18	0,32	3,192	3,214226019	0,000493996
19	0,14	1,9	1,683672051	0,046797782
20	0,15	2,83	1,806485995	1,047580918
21	0,46	4,62913	4,396037779	0,054331984
22	0,15	1,426253	1,780056839	0,125177156
23	0,61	6,606821	5,58868972	1,036591304
24	0,48	4,81	4,559038296	0,062981777
25	0,67	6,65	6,08515011	0,319055398
26	0,46	4,55	4,336648837	0,045518719
27	0,48	4,86	4,500262636	0,129410971
28	0,60	5,58714286	5,521319819	0,004332673
29	0,33	3,43	3,270449097	0,025456491
30	0,33	3,3	3,326531286	0,000703909
Jumlah (Y-y')^2				2,93134165
RMSE				0,114141079

Tabel 7. Hasil Uji Akurasi Indeks Vegetasi

Titik	Variabel X	Variabel Y	y'=ax+b	(y-y')^2
1	-0,061724	75	73,14417	3,444122
4	-0,026159	75	74,08269	0,841457
8	0	76	74,773	1,505529
6	0,138688	79	78,43284	0,321673
9	0,153127	78	78,81387	0,662382
12	0,197577	81	79,98686	1,026454
13	0,197577	82	79,98686	4,052735
14	0,197577	79	79,98686	0,973892
19	0,149242	78	78,71135	0,506015
20	0,149242	82	78,71135	10,81524
22	-0,02618	75	74,08214	0,842474
24	0,159957	79	78,99411	3,47E-05
26	0,174982	80	79,3906	0,371368
29	0,157475	82	78,92861	9,43345
30	0,112122	77	77,73179	0,535513
Jumlah (Y-y')^2				35,33234
RMSE				0,396273

Tabel 8. Hasil Uji Akurasi NDWI

Titik	Variabel X	Variabel Y	y'=ax+b	(y-y')^2
-------	------------	------------	---------	----------

1	28,53	28,04	28,845191	0,64833255
4	34,29	30,4	31,579463	1,39113297
6	28,95	27,11	29,044565	3,74254174
8	28,26	26,61	28,717022	4,43954171
10	29,59	28,5	29,348373	0,71973675
11	27,14	27,43	28,185358	0,57056571
12	34,37	30,4	31,617439	1,48215772
13	27,62	29,2	28,413214	0,61903221
14	30,82	29,45	29,932254	0,23256892
20	33,9	32,29	31,39433	0,80222475
21	27,93	30,39	28,560371	3,34754228
22	16,6	23,3	23,18202	0,01391928
23	29,83	28,53	29,462301	0,86918515
24	31,98	28,56	30,482906	3,69756748
26	32,35	28,58	30,658545	4,32034932
Jumlah (Y-y')^2				26,8963985
RMSE				0,34574492

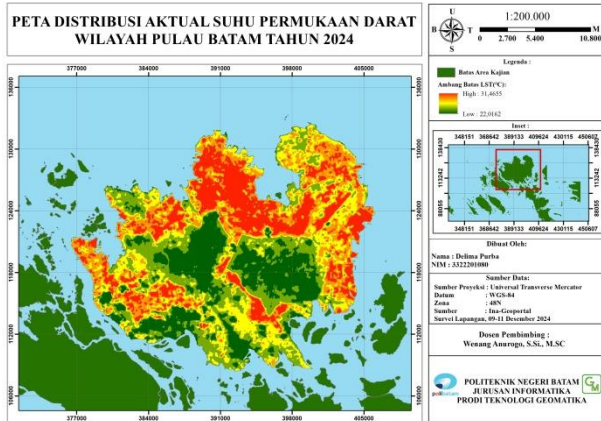
Tabel 9. Hasil Uji Akurasi PM2,5

Titik	Variabel X	Variabel Y	y'=ax+b	(y-y')^2
1	40,36	34,02	34,56654	0,29871
4	45,21	36,87	35,91171	0,91832
5	42,93	34,32	35,11143	0,626361
8	52	36,98	38,295	1,729225
9	40,52	36,1	34,26552	3,365317
11	47,61	34,36	36,75411	5,731763
12	51,34	34,36	38,06334	13,71473
13	47,28	37,58	36,63828	0,886837
14	5,9	22,49	22,1139	0,141451
15	50,64	39,32	37,81764	2,257086
16	44,58	35,28	35,69058	0,168576
21	48,58	38,26	37,09458	1,358204
24	48,98	38,32	37,23498	1,177268
26	47,4	35,66	36,6804	1,041216
27	45,1	34,98	35,8731	0,797628
Jumlah (Y-y')^2				34,21269
RMSE				0,389944

Tabel 10. Hasil Uji Akurasi PM10

Selain itu, dilakukan penghitungan Root Mean Square Error (RMSE) untuk mengukur tingkat kesalahan atau perbedaan antara hasil estimasi citra dengan nilai observasi lapangan. Dari hasil perhitungan, diperoleh nilai RMSE sebesar untuk NDVI yaitu 0,114141, LST yaitu sebesar 0,3624245, TVDI sebesar 0,209899773, NDWI sebesar 0,396273, dan untuk PM2.5 sebesar 0,34574492, dan PM10 sebesar 0,389944, yang menunjukkan tingkat kesalahan yang relatif rendah. Nilai RMSE ini menunjukkan bahwa model yang digunakan baik dalam merepresentasikan kondisi sebenarnya di lapangan. Selanjutnya, hasil dari pemodelan data dari hasil scatter linier akan diolah di ArcGIS dengan raster calculator dan ENVI dengan band math untuk mendapatkan citra hasil aktual LST, NDVI, TVDI, NDWI, NDDI & PM2.5 dan PM10 yang sebenarnya.

### 3.9. Peta Aktual Suhu Permukaan Lahan



Gambar 19. Peta Distribusi Aktual Suhu Permukaan Darat

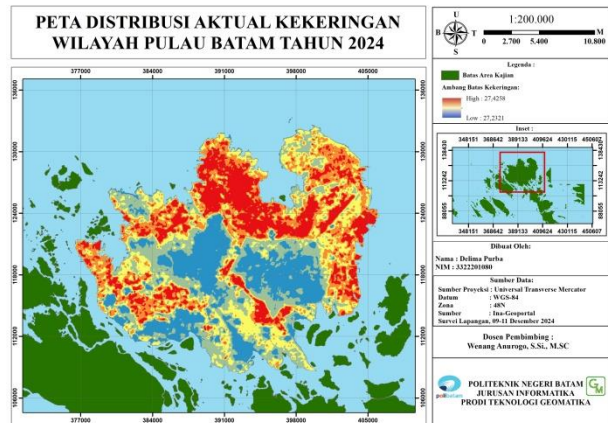
Uji validasi dilakukan untuk mengetahui tingkat korelasi antara nilai LST dari citra Landsat 8 dengan pengamatan suhu lapangan di Pulau Batam. Nilai koefisien korelasi yang tinggi menunjukkan bahwa estimasi LST dapat merepresentasikan kondisi sebenarnya di Lapangan. Pada penelitian ini, validasi lapangan menggunakan pengamatan ke lapangan. Hasil korelasi antara LST dengan suhu lapangan menunjukkan pada angka 0,7192. Berdasarkan kriteria kelas oleh sugiyono 2007, nilai korelasi ini tergolong dalam kelas kuat, yang berarti nilai estimasi LST cukup menggambarkan kondisi sebenarnya di lapangan. Koefisien korelasi bernilai positif yang berarti peningkatan LST diikuti juga dengan peningkatan suhu lapangan. Ada beberapa faktor yang menyebabkan nilai korelasi cukup kecil seperti adanya anomali pada perekaman citra ataupun perbedaan parameter yang digunakan dalam penentuan nilai suhu. Hasil citra pada gambar 20 dapat diketahui bahwa nilai aktual citra LST min adalah 22,01°C maks adalah sebesar 31.46°C.

Suhu permukaan tanah (LST) adalah indikator penting yang menggambarkan tingkat panas pada permukaan Bumi. Fenomena pulau panas perkotaan, juga dikenal sebagai pulau panas perkotaan, disebabkan oleh pola isothermal perkotaan yang terus meningkat, baik secara spasial maupun temporal. Tanda khas fenomena ini adalah suhu yang lebih tinggi di suatu wilayah dibandingkan dengan wilayah sekitarnya. Fenomena ini biasanya terjadi di daerah perkotaan dengan banyak bangunan atau gedung dan jaringan jalan yang rapat, atau di daerah industri yang padat yang dikelilingi oleh pinggiran kota atau lahan bervegetasi. Hal ini berdampak pada meningkatnya risiko bencana hidrometeorologi seperti kekeringan. Suhu yang lebih tinggi juga berdampak pada kualitas hidup masyarakat, terutama pada kelompok rentan seperti anak-anak

dan lansia yang lebih sensitif terhadap stres panas. Untuk mengatasi masalah ini, pendekatan berbasis keberlanjutan diperlukan, salah satunya dengan meningkatkan ruang terbuka hijau dan akses ke ruang publik yang aman dan inklusif. Hal ini sejalan dengan Target SDGs 11.7, yaitu: menyediakan akses universal terhadap ruang terbuka hijau dan publik yang aman, inklusif dan mudah diakses, khususnya bagi perempuan dan anak-anak, manula, dan penyandang disabilitas.

### 3.10. Peta Aktual Kekeringan

Hasil nilai TVDI dari pengolahan citra dilakukan uji akurasi dengan data hasil survey lapangan. Hasil analisis dapat dilihat pada uji interpretasi (Gambar 15) menunjukkan nilai korelasi yang didapatkan antara hasil olahan tvdi dan hasil lapangan dengan menggunakan data suhu permukaan lahan memiliki nilai korelasi sebesar 0,7144 yang tergolong dalam kelas kuat. Hasil yang didapatkan dari uji korelasi menunjukkan adanya hubungan positif antara suhu permukaan daratan dengan nilai TVDI.



Gambar 20. Peta Distribusi Aktual Kekeringan

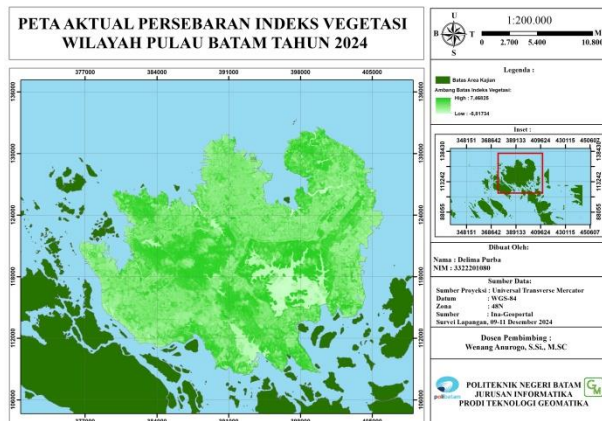
Peta hasil distribusi kekeringan aktual di Pulau Batam pada (Gambar 21), diketahui nilai minimum 27,23 dan maksimum 27,42.

Dalam penelitian ini, nilai kekeringan di Pulau Batam diperoleh melalui validasi antara suhu permukaan tanah (LST) dan citra kekeringan untuk menguji keterkaitannya. Hasil validasi menunjukkan bahwa kenaikan LST sejalan dengan penurunan kelembaban tanah, sehingga dapat dijadikan indikator dalam memetakan kondisi kekeringan. Hal ini menunjukkan bahwa kekeringan di Batam berkaitan erat dengan proses hidrometeorologi, terutama meningkatnya suhu akibat perubahan lahan dan urbanisasi, sehingga memperkuat posisi kekeringan sebagai bencana hidrometeorologi yang harus dimitigasi secara berkelanjutan. Kekeringan termasuk dalam kategori bencana hidrometeorologi yang secara

langsung berkaitan dengan Target SDGs 11.5, yaitu mengurangi jumlah orang terdampak dan kerugian ekonomi akibat bencana, termasuk bencana terkait air. Upaya mitigasi kekeringan, seperti pemantauan wilayah rawan melalui citra penginderaan jauh, sistem peringatan dini, dan pengelolaan sumber daya air yang berkelanjutan, menjadi bagian penting untuk mencapai kota dan permukiman yang lebih tangguh dan berkelanjutan.

### 3.11. Peta Aktual Indeks Vegetasi

Hasil analisis korelasi apabila ditinjau dari tingkat hubungan korelasi, hasil penelitian termasuk korelasi sangat kuat (0,9498). Koefisien korelasi bertanda positif artinya hubungan nilai NDVI pada citra dengan nilai kerapatan jenis, sehingga jika nilai NDVI tinggi, maka nilai kerapatan tajuk juga semakin tinggi. Dapat dimaklumi karena pengukuran dengan penginderaan jauh sudah tentu tidak akan seteliti dengan pengukuran langsung di lapangan.



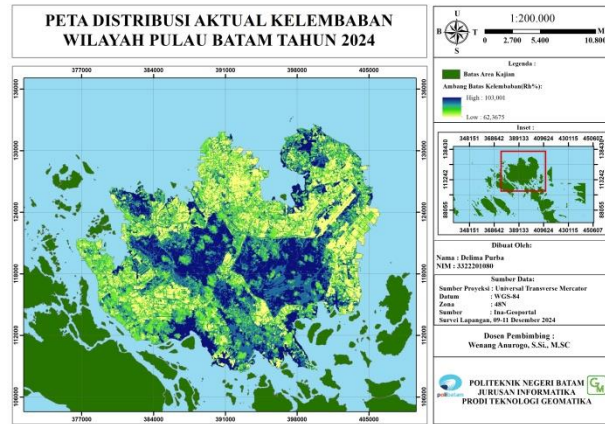
Gambar 21. Peta Indeks Vegetasi

Berdasarkan hasil validasi pada gambar ini dapat disimpulkan bahwa penggunaan NDVI pada citra satelit landsat 8 cukup optimal. Hasil lapangan ndvi digunakan untuk mendapatkan peta potensi kekeringan.

### 3.12. Peta Aktual Kelembaban

Hasil analisis korelasi bila ditinjau dari tingkat hubungan korelasi, hasil penelitian termasuk korelasi yang sangat kuat (0,8074). Koefisien korelasi bernilai positif yang berarti peningkatan LST diikuti juga dengan peningkatan suhu lapangan. Dalam penelitian ini, kelembaban lahan diinterpretasikan menggunakan indeks NDWI (Normalized Difference Water Index) yang dihitung dari citra satelit. Untuk memastikan keakuratan hasil pengolahan citra, dilakukan validasi lapangan

dengan mengukur langsung kelembaban tanah pada titik-titik sampel terpilih. Hasil validasi menunjukkan adanya hubungan positif antara nilai NDWI dengan hasil pengukuran kelembaban tanah di lapangan.



Gambar 22. Peta Distribusi Aktual Kelembaban

Peta hasil distribusi kelembaban aktual di Pulau Batam pada (Gambar 22), diketahui nilai minimum 62.36 dan maksimum 103.

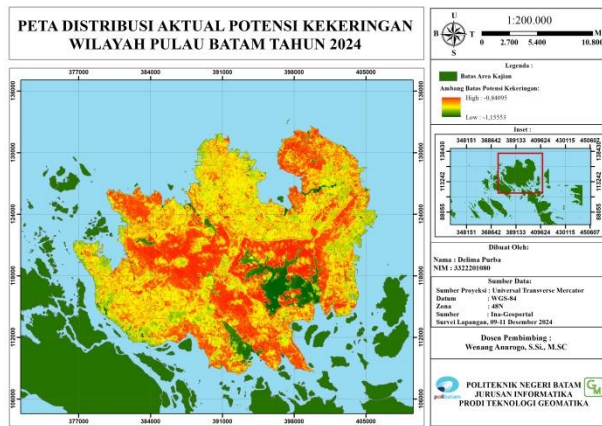
Untuk menguji keakuratan hasil pengolahan citra NDWI, dilakukan pengukuran langsung kelembaban di lapangan menggunakan alat pengukur suhu dan kelembaban (temperature humidity meter). Pengukuran ini dilakukan pada titik-titik sampel yang telah ditentukan, untuk memperoleh data kelembaban relatif (Rh%) sebagai kondisi aktual di lapangan. Dari pengukuran lapangan, didapat nilai kelembaban relatif pada (Gambar 22) maksimum sebesar 103 Rh%. Nilai ini menunjukkan adanya lokasi dengan kelembaban yang sangat tinggi, yang sesuai dengan area bernilai NDWI tinggi pada citra. Hal ini menegaskan kemampuan NDWI untuk membedakan zona lembab dengan tingkat akurasi yang baik. Hal ini membuktikan NDWI mampu memetakan distribusi kelembaban lahan secara akurat, mendukung pemantauan wilayah rawan kekeringan dan mitigasi bencana hidrometeorologi. Pemantauan kelembaban lahan melalui NDWI yang divalidasi dengan data lapangan mendukung pencapaian Target SDGs 11.5, yakni dalam upaya mitigasi risiko bencana hidrometeorologi seperti kekeringan. Selain itu, hasil ini juga berkontribusi pada Target 11.3 dalam hal penyediaan data spasial untuk perencanaan kota yang tangguh dan berkelanjutan. Peta aktual ini juga digunakan untuk mendapatkan nilai potensi kekeringan.

### 3.13. Peta Aktual Potensi Kekeringan

Dalam penelitian ini, metode Normalized Difference Drought Index (NDDI) digunakan untuk menganalisis potensi kekeringan. NDDI adalah indeks kekeringan

berbasis citra satelit yang dibuat dari kombinasi indeks vegetasi dan indeks kelembaban. NDDI sangat sensitif terhadap kondisi fisiologis vegetasi serta tingkat kelembaban tanah, sehingga sangat efektif untuk menemukan daerah di mana tekanan kekeringan terjadi secara spasial.

Studi ini berbeda dari pendekatan berbasis citra sepenuhnya karena nilai NDDI diperoleh dari data pengukuran vegetasi dan kelembaban secara langsung di lapangan. Data vegetasi dikumpulkan melalui pengamatan tutupan vegetasi dan nilai indeks vegetasi (seperti NDVI), sedangkan kelembaban diukur pada titik sampel yang ditentukan dengan alat pengukur kelembaban.



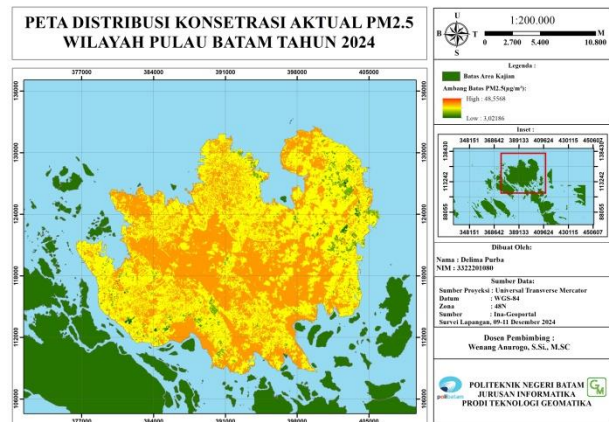
Gambar 23. Peta Distribusi Aktual Potensi Kekeringan

Hasil perhitungan potensi kekeringan di lapangan dengan menggunakan NDDI menghasilkan nilai sebesar  $-0,84095$ , yang menunjukkan kondisi kelembaban lahan masih cukup tinggi atau potensi kekeringan rendah. Pemanfaatan NDDI berbasis data lapangan ini berperan penting dalam mendeteksi dan memetakan potensi kekeringan secara akurat, sehingga dapat membantu upaya mitigasi bencana hidrometeorologi. Kegiatan ini mendukung pencapaian Target SDGs 11.5, yakni mengurangi dampak bencana, termasuk kekeringan, melalui sistem pemantauan yang lebih baik dan perlindungan terhadap masyarakat yang rentan.

### 3.14. Peta Aktual PM<sub>2,5</sub>

Peta aktual konsentrasi Particulate Matter 2.5 (PM<sub>2.5</sub>) disusun melalui integrasi antara pengolahan citra satelit dan data lapangan yang diperoleh menggunakan aplikasi pemantauan kualitas udara Breezometer. PM<sub>2.5</sub> merupakan partikel polutan udara berukuran sangat kecil (diameter  $\leq 2,5$  mikrometer) yang dapat masuk ke dalam saluran pernapasan dan membahayakan kesehatan manusia. Pemantauan PM<sub>2.5</sub> sangat penting terutama di

wilayah perkotaan dengan aktivitas industri, lalu lintas padat. Sebagai bentuk validasi dan penguatan data spasial, pengukuran lapangan dilakukan dengan bantuan aplikasi Breezometer, yang memberikan informasi kualitas udara secara real-time.



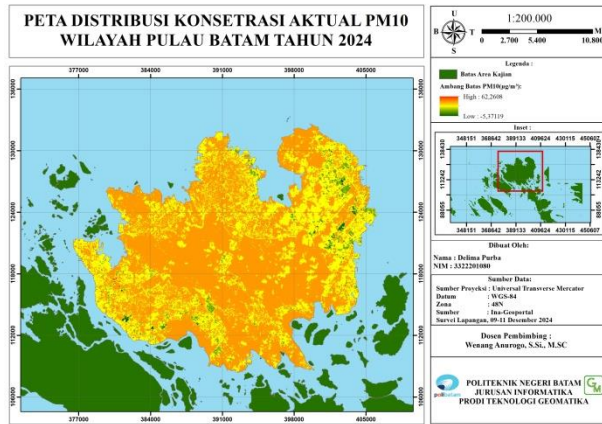
Gambar 24. Peta Distribusi Aktual PM<sub>2.5</sub>

Peta hasil distribusi PM<sub>2,5</sub> aktual di Pulau Batam pada (Gambar 24) diolah menggunakan hasil citra pm<sub>2.5</sub> yang telah diuji akurasi menggunakan data lapangan dapat dilihat pada (Gambar 17) dengan nilai korelasi didapat  $0,7369$  yang termasuk korelasi kuat, diketahui bahwa nilai aktual citra PM<sub>2,5</sub> maksimum adalah sebesar  $48,55\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Nilai ini berada pada kategori sedang hingga tidak sehat untuk kelompok sensitif menurut standar kualitas udara. Jika konsentrasi PM<sub>2.5</sub> meningkat, itu adalah tanda bencana hidrometeorologi perkotaan. Ini memiliki dampak langsung pada kesehatan masyarakat, seperti penyakit pernapasan dan penyakit kardiovaskular. Salah satu risiko lingkungan perkotaan yang kompleks dan saling terkait dengan bencana hidrometeorologi adalah polusi udara PM<sub>2.5</sub>. Pencemaran udara dapat memperburuk efek pulau panas perkotaan (pulau panas kota). Hal ini dapat dicantumkan kedalam Target SDG 11.6, yaitu mengurangi dampak lingkungan kota per kapita dengan perhatian khusus pada kualitas udara, mendukung upaya pemetaan dan pemantauan spasial PM<sub>2.5</sub> melalui citra satelit dan data lapangan. Informasi ini penting untuk perencanaan tata ruang, pengendalian emisi, peningkatan ruang hijau, dan kebijakan pengelolaan kualitas udara untuk membangun kota yang lebih sehat, inklusif, dan berkelanjutan.

### 3.15. Peta Aktual PM<sub>10</sub>

Dalam penelitian ini, peta sebaran PM<sub>10</sub> disusun melalui pengolahan citra satelit yang divalidasi dengan data lapangan, menghasilkan nilai maksimum konsentrasi  $62,26\mu\text{g}/\text{m}^3$  pada wilayah

perkotaan. Nilai ini menunjukkan kualitas udara berada pada kategori sedang hingga tidak sehat untuk kelompok sensitif sesuai standar kualitas udara.



Gambar 25. Peta Distribusi Aktual PM10

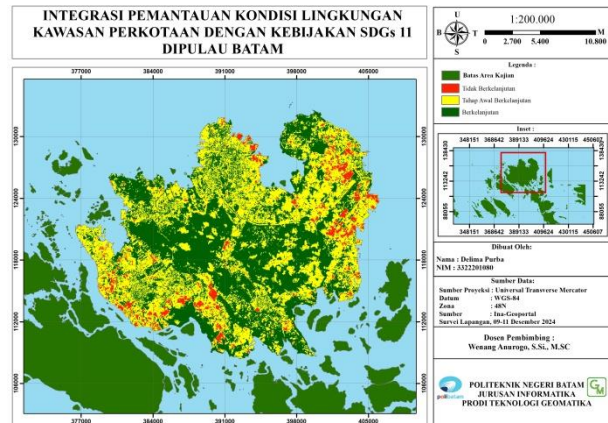
Peta hasil distribusi Pm2,5 aktual di Pulau Batam pada (Gambar 25) diolah menggunakan hasil citra pm10 yang telah diuji akurasi menggunakan data lapangan dapat dilihat pada (Gambar 18) dengan nilai korelasi didapat 0,8648 yang termasuk korelasi sangat kuat. Konsentrasi PM10 yang tinggi di wilayah perkotaan bukan hanya masalah kesehatan, tetapi juga terkait erat dengan bencana hidrometeorologi. Akumulasi polutan udara dapat memperburuk efek urban heat island, meningkatkan suhu permukaan tanah, serta memengaruhi pola curah hujan lokal. Selain itu, aktivitas kebakaran lahan sebagai salah satu sumber PM10 juga termasuk bencana hidrometeorologi yang perlu diantisipasi. Dengan demikian, PM10 menjadi indikator penting dalam memahami keterkaitan antara polusi udara dan risiko bencana hidrometeorologi perkotaan. Upaya pemantauan spasial PM10 mendukung pencapaian Target SDGs 11.6, yaitu mengurangi dampak lingkungan kota per kapita dengan memperhatikan kualitas udara. Informasi ini penting untuk merencanakan kebijakan pengendalian emisi, peningkatan ruang hijau, pengelolaan tata kota, dan perlindungan kesehatan masyarakat secara berkelanjutan.

### 3.16. Overlay

Kriteria	Bobot/prioritas
Suhu Permukaan Daratan	5%
Kekeringan	8%
Kelembaban	15%
Potensi Kekeringan	15%
PM2,5	25%

PM10	32%
------	-----

Tabel 11. Tabel Hasil Pembobotan Menggunakan AHP



Gambar 26. Peta Integrasi Pemantauan Kondisi Lingkungan Kawasan Perkotaan

Berdasarkan hasil peta-peta aktual dalam penelitian ini di Pulau Batam dilakukan weight overlay dari keenam parameter. Oleh karena itu tiap bobot parameter memiliki tingkat kepentingannya. Bobot yang lebih besar diberikan pada parameter kualitas udara (PM2,5 dan PM10) karena polusi partikulat di wilayah perkotaan dianggap memiliki dampak signifikan pada kesehatan masyarakat dan interaksi dengan bencana hidrometeorologi, seperti memperburuk efek pulau panas perkotaan, mengurangi kualitas udara, dan meningkatkan kerentanan penduduk terhadap risiko kesehatan saat terjadi musim kering. Parameter kelembaban dan potensi kekeringan juga diberi bobot cukup besar (masing-masing 15%) karena secara langsung memengaruhi risiko kekeringan, stres air pada vegetasi, dan ketersediaan air. Sementara itu, suhu permukaan daratan memiliki bobot lebih kecil (5%) karena perannya lebih bersifat pendukung dalam interaksi dengan parameter lainnya. Dengan menerapkan bobot ini pada setiap lapisan peta, dilakukan proses weight overlay untuk menghasilkan peta sintesis kerentanan yang menampilkan distribusi spasial wilayah-wilayah dengan tingkat risiko lebih tinggi. Hasil ini mendukung perencanaan tata ruang, mitigasi bencana hidrometeorologi, serta pengelolaan lingkungan berkelanjutan di Pulau Batam.

### 4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan penelitian ini berhasil memantau kondisi lingkungan di Pulau Batam dan mencantumkan parameter kedalam target SDGs 11, dimana hasil analisis overlay dari parameter Suhu Permukaan Lahan, Kekeringan,

Kelembaban, Potensi Kekeringan, PM<sub>2,5</sub> dan PM<sub>10</sub>. Berdasarkan analisis tersebut menghasilkan 3 kelas indeks berkelanjutan, yaitu Berkelanjutan dengan kriteria nilai interval 2,35-2,00 diindikasikan warna Hijau, Tahap Awal Berkelanjutan dengan kriteria interval 1,67-2,34 diindikasikan warna Kuning, dan Belum Berkelanjutan dengan kriteria interval 1,00-1,66 diindikasikan warna merah, dimana nilai interval tersebut hasil dari overlay dengan menggunakan aplikasi ArcGIS, indeks dapat dilihat pada (tabel 3). Penelitian ini memberikan gambaran yang lebih menyeluruh dan terukur mengenai kondisi lingkungan Pulau Batam, mendukung identifikasi wilayah rawan bencana hidrometeorologi, serta membantu pengambilan keputusan untuk mitigasi dan adaptasi. Hal ini sejalan dengan pencapaian Target SDGs 11.5 (mengurangi dampak bencana, termasuk bencana terkait air dan lingkungan), Target SDGs 11.6 (mengurangi dampak lingkungan kota per kapita dengan perhatian khusus pada kualitas udara) dan 11.7 (penyediaan ruang publik hijau yang inklusif dan aman).

## 5. Daftar Pustaka

- Apriyanto, H., Eriyatno, E., Rustiadi, E., & Mawardi, I. (2015). Status Berkelanjutan Kota Tangerang Selatan-Banten Dengan Menggunakan Key Performance Indicators (*Sustainable Status of South Tangerang City-Banten Using Key Performance Indicators*). *Jurnal Manusia dan Lingkungan*, 22(2), 260-270.
- Artis, D. A., & Carnahan, W. H. 1982. Survey of emissivity variability in thermography of urban areas. *Remote Sensing of Environment*, 12(4), 313-329 [https://doi.org/10.1016/00344257\(82\)90043-8](https://doi.org/10.1016/00344257(82)90043-8)
- Carolin, V., & Kurniati, E. (2025). Tantangan Pembangunan Perkotaan Terhadap Urbanisasi, Kemacetan Di Jakarta: Analisis Permasalahan Dan Solusi. *Jurnal Ilmu Ekonomi*, 4(1), 252-273.
- Chai, T., & Draxler, R. (2014). Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? – Arguments against avoiding RMSE in the literature. *Geoscience Model Development*, 7, 1247-1250. <https://doi.org/10.5194/gmd-7-1247-2014>
- Gu, dkk. 2007. *A five-year analysis of MODIS NDVI and NDWI for grassland drought assessment over the central Great Plains of the United States*. *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*, Vol. 34, L06407, doi:10.1029/2006GL029127.
- Hidup, K. L., & Indonesia, K. R. (2020). Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor 14 Tahun 2020 tentang indeks standar pencemar udara.
- Lambin, E. F. & Meyfroidt, P. 2011. *Global land use change, economic globalization, and the looming land scarcity*. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 108(9):3465-3472. doi:10.1073/pnas.1100480108
- Mozafari, S. M., M. Hasanlou, and H. Arefi. "Air pollution estimation using aerosol optical thickness by OLI images in Tehran." *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 42 (2019): 779-782.
- Rachmah, Z., Rengkung, M. M., & Lahamendu, V. (2018).
- Sandholt, I., Andersen, J., Jensen, K.H., Refsgaard, J.C., Gupta, H., (2002). *Perspectives in Using a Remotely Sensed Dryness Index in Distributed Hydrological Models at the River-basin Scale*. *Hydrological Processes*.
- Situmorang, M. T. N., & Hut, S. (2024). MANAJEMEN LINGKUNGAN. Cendikia Mulia Mandiri.
- Sugiyono. 2007., *Metode Penelitian Kuantitatif dan Kualitatif*, R&D. Bandung : CV, Alfabeta
- Sugiyono, D. R. 2015. *Statistika nonparametris untuk penelitian*. Alfabeta. Bandung
- Hadjimitsis, D. G. (2009). *Aerosol optical thickness (AOT) retrieval over land using satellite imagebased algorithm*. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 2(2), 89-97
- USGS. Using the USGS LandsatLevel-1 Data Product. <https://Landsat.usgs.gov/using-usgs-landsat-8-product>. Diakses pada 8 September 2018.