

BAB 2

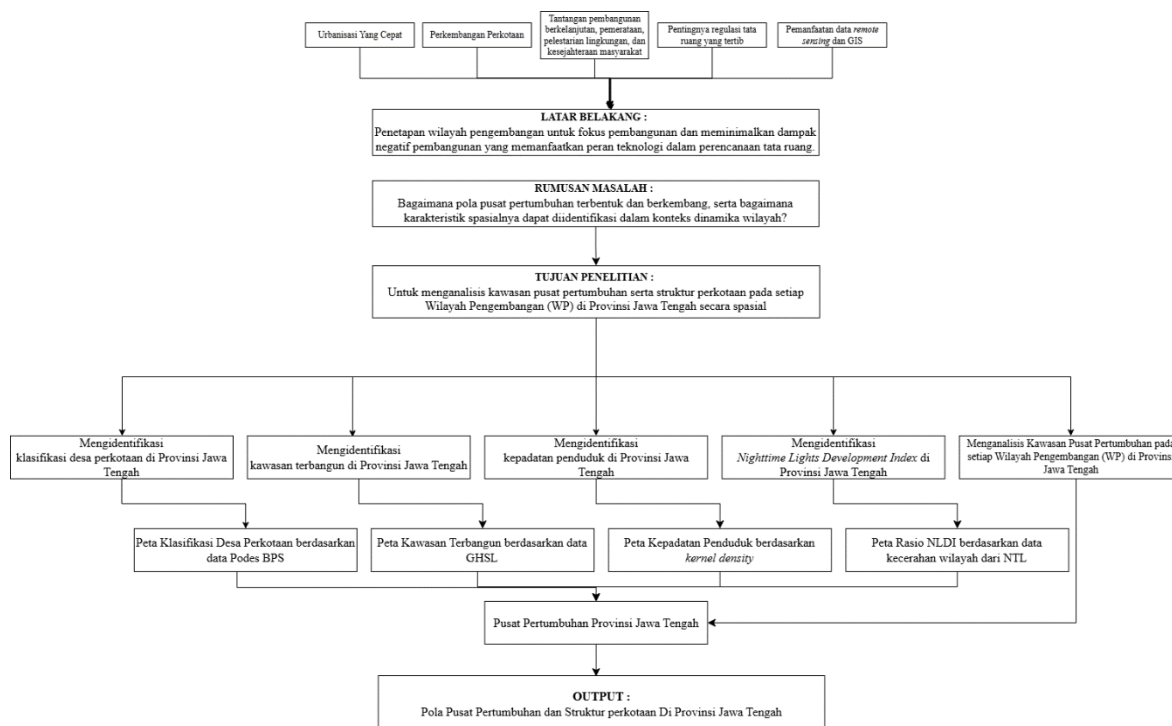
KONSEP PERENCANAAN

2.1 Kerangka Pemikiran

Tugas akhir ini disusun dengan tujuan utama untuk melakukan identifikasi dan analisis pola pusat pertumbuhan dan struktur perkotaan di Provinsi Jawa Tengah dengan memanfaatkan teknologi penginderaan jauh (*remote sensing*) dan Sistem Informasi Geografis (SIG). Tujuan ini dirumuskan berdasarkan hasil identifikasi terhadap latar belakang permasalahan yang menunjukkan bahwa Provinsi Jawa Tengah mengalami pertumbuhan wilayah terbangun yang cukup pesat sebagai akibat dari dinamika urbanisasi dan peningkatan aktivitas ekonomi. Pertumbuhan ini, apabila tidak disertai dengan kebijakan penataan ruang yang berbasis data dan responsif terhadap dinamika spasial, berpotensi menimbulkan berbagai permasalahan seperti ketimpangan pembangunan, tekanan terhadap sumber daya alam, serta penurunan kualitas lingkungan hidup.

Kerangka berpikir dalam penelitian ini disusun secara sistematis, dimulai dari pemahaman terhadap fenomena urbanisasi cepat yang melatarbelakangi kebutuhan akan penataan ruang yang efektif. Selanjutnya, dirumuskan masalah yang diajukan dalam penelitian ini adalah: bagaimana pola pusat pertumbuhan terbentuk dan berkembang, serta bagaimana karakteristik spasialnya dapat diidentifikasi dalam konteks dinamika wilayah? Untuk menjawab pertanyaan tersebut, tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk mengidentifikasi dan menganalisis pola pusat pertumbuhan serta struktur perkotaan di Provinsi Jawa Tengah secara spasial. Pendekatan ini diharapkan dapat memberikan gambaran menyeluruh mengenai persebaran pusat aktivitas dan pola pertumbuhan wilayah secara faktual.

Dengan menyusun kerangka berpikir semacam ini, diharapkan hasil dari tugas akhir ini tidak hanya memberikan gambaran kondisi eksisting, tetapi juga mampu memberikan rekomendasi berbasis data untuk peningkatan efektivitas penetapan pusat pelayanan dan wilayah pengembangan di masa mendatang. Pendekatan ini juga sekaligus menegaskan pentingnya integrasi teknologi geospasial dalam proses perencanaan wilayah dan kota, terutama dalam konteks pembangunan yang berkelanjutan dan berkeadilan. Berikut merupakan konsep perencanaan dari disusunnya tugas akhir ini.



Sumber: Penulis, 2025

Gambar 2. 1. Kerangka Pemikiran

Perkembangan perkotaan yang pesat akibat urbanisasi menimbulkan berbagai tantangan dalam pembangunan wilayah, terutama dalam menjaga keseimbangan antara pertumbuhan ekonomi, pelestarian lingkungan, dan kesejahteraan masyarakat. Oleh karena itu, penataan ruang yang berbasis data menjadi semakin penting agar pembangunan tidak berlangsung secara sporadis dan merusak daya dukung wilayah. Salah satu pendekatan yang relevan untuk menjawab tantangan ini adalah dengan memanfaatkan teknologi *remote sensing* dan Sistem Informasi Geografis (GIS), yang memungkinkan analisis spasial dan temporal terhadap dinamika perkotaan.

Dalam mencapai tujuan untuk mendapatkan kawasan pusat pertumbuhan dan struktur kota secara spasial tersebut, penelitian ini menempuh beberapa tahapan analitis. Pertama, identifikasi status desa dan kota di Provinsi Jawa Tengah dilakukan dengan menggunakan data Podes BPS 2010 untuk memahami klasifikasi permukiman dan tingkat keperkotaan secara administratif. Kedua, kawasan terbangun dipetakan menggunakan data *Global Human Settlement Layer* (GHSL) yang merepresentasikan intensitas fisik pembangunan. Ketiga, analisis kepadatan penduduk dilakukan menggunakan metode *Kernel Density Estimation* (KDE) untuk mengidentifikasi konsentrasi spasial penduduk dalam bentuk raster kepadatan. Keempat, indeks pembangunan dihitung berdasarkan data

kecerahan malam hari dari citra *Nighttime Light* (NTL) yang diperoleh dari sensor VIIRS, dengan satuan $\text{nW/cm}^2/\text{sr}$, untuk mendeteksi area yang menunjukkan aktivitas manusia dan perkembangan wilayah secara intensif.

Setelah semua komponen spasial utama seperti status desa/kota, kawasan terbangun, kepadatan penduduk, dan indeks urbanisasi berhasil diidentifikasi dan divisualisasikan dalam bentuk peta tematik, langkah selanjutnya adalah melakukan analisis integratif untuk mengidentifikasi pusat pertumbuhan di Provinsi Jawa Tengah. Proses ini mencakup sintesis berbagai indikator spasial guna menentukan lokasi pusat-pusat aktivitas yang potensial dan eksisting, serta keterkaitannya dalam struktur wilayah. Output akhir dari penelitian ini adalah peta pola pusat pertumbuhan dan struktur perkotaan di Provinsi Jawa Tengah, yang dapat dijadikan dasar perencanaan tata ruang yang lebih tepat sasaran, berbasis data, serta responsif terhadap dinamika pembangunan wilayah.

2.2 Kajian Literatur

2.2.1. Pusat Pertumbuhan

Konsep pusat pertumbuhan (*growth pole*) merupakan pendekatan penting dalam studi perencanaan wilayah dan pembangunan ekonomi regional. Gagasan ini pertama kali diperkenalkan oleh ekonom Prancis François Perroux pada tahun 1955, yang menyatakan bahwa pertumbuhan ekonomi tidak terjadi secara merata di seluruh ruang, melainkan terkonsentrasi pada titik-titik tertentu yang disebut sebagai “*poles of growth*” atau pusat pertumbuhan. Pusat-pusat ini memiliki kapasitas untuk mendorong aktivitas ekonomi di sekitarnya melalui efek pendorong (*spread effects*) dan efek penarik (*polarization effects*) terhadap wilayah yang lebih luas (Perroux, 1955).

Pusat pertumbuhan umumnya dikaitkan dengan wilayah perkotaan yang menunjukkan konsentrasi tinggi terhadap infrastruktur fisik, kegiatan industri unggulan, tenaga kerja terampil, serta tingkat aksesibilitas yang relatif tinggi. Pusat pertumbuhan tidak hanya merepresentasikan akumulasi aktivitas ekonomi, tetapi juga berperan sebagai simpul perkembangan regional yang memengaruhi wilayah sekitarnya melalui mekanisme difusi pertumbuhan. Konsep ini mengalami perkembangan dalam ranah geografi ekonomi dan perencanaan wilayah, antara lain melalui kontribusi Boudeville (1966) yang mengadopsi teori pusat pertumbuhan dari Perroux dengan menambahkan dimensi spasial. Pendekatan Boudeville menekankan bahwa pertumbuhan ekonomi tidak terjadi secara merata di seluruh ruang, melainkan terkonsentrasi pada lokasi-lokasi tertentu yang memiliki kapasitas untuk

memicu pertumbuhan di wilayah *hinterland*-nya melalui hubungan fungsional dan jaringan spasial. Teori Pusat Pertumbuhan (Growth Pole Theory) memiliki hubungan erat dengan model struktur kota klasik, seperti Teori Konsentris (Burgess, 1925), Teori Sektoral (Hoyt, 1939), dan Teori Multiple Nuclei (Harris & Ullman, 1945). Ketiganya menjelaskan pola perkembangan kota, sementara teori pusat pertumbuhan memberikan kerangka ekonomi-spasial tentang bagaimana pertumbuhan tersebut terjadi dan menyebar. Dalam studi geospasial modern, identifikasi pusat pertumbuhan kerap dilakukan dengan pendekatan kuantitatif, seperti analisis kerapatan spasial (*spatial clustering*), pengukuran keterjangkauan, serta model interaksi spasial berbasis data geolokasi dan citra penginderaan jauh.

2.2.2. Struktur Kota

Perkotaan merupakan kawasan yang berkembang dengan pesat serta segala aktivitasnya. Perkembangan ini akan berimplikasi terhadap pertumbuhan dan kepadatan penduduknya. Perkembangan perkotaan secara fisik dapat ditandai dengan pesatnya pertumbuhan pada kawasan pinggiran kota (Resantie & Santoso, 2021). Dinamika perkembangan kota memiliki 3 hal dasar yaitu rupa, massa dan ruang sebagai produk, waktu sebagai proses, dan kota sebagai wadah manusia dalam melakukan aktivitasnya. Selain 3 hal tersebut, terdapat hal yang harus diperhatikan dalam berkembangnya suatu kota, yaitu perkembangan kuantitas dan perkembangan kualitas. Perkembangan kuantitas dan kualitas sendiri memiliki hubungan erat dan kompleks karena masing - masing saling memiliki pengaruh dan harus berjalan beriringan. Secara teknis perkembangan kota dibagi menjadi 3 jenis yaitu perkembangan horizontal, perkembangan *vertical*, dan perkembangan *interstiasi*. Berkembangnya kota secara *vertical*, *horizontal*, dan *interstiasial* menyebabkan terbentuknya pola- pola tertentu yang akan membedakan antara perkembangan kota satu dengan kota lainnya (Larasati dkk., 2022).

Struktur kota menurut Undang – Undang Nomor 26 Tahun 2007 adalah susunan pusat-pusat permukiman dan sistem jaringan prasarana dan sarana yang berfungsi sebagai pendukung kegiatan sosial ekonomi masyarakat yang secara hirarki memiliki hubungan fungsional. Struktur terbentuk berdasarkan persebaran kegiatan secara spasial. Kota yang berkembang akan membentuk model tertentu, pola sentralisasi (terpusat), pola desentralisasi (menjauh dari inti pusat), pola nukleasi (mirip dengan sentralisasi, tetapi dalam ukuran yang minimalis), model segregasi (pola yang dipisahkan berdasarkan kondisi ekonomi, sosial, budaya, dan sebagainya) (Siahay dkk., 2024). Terdapat model struktur kota klasik, seperti

Teori Konsentris (Burgess, 1925), Teori Sektoral (Hoyt, 1939), dan Teori *Multiple Nuclei*/Inti Ganda (Harris & Ullman, 1945). Teori konsentris yaitu teori yang pertama kali muncul yang dikemukakan oleh burgess, dimana struktur perkotaan berkembang secara teratur dari pusat kota sampai pinggiran kota yang menciptakan pola tata ruang yang meluas atau ekspansi radial (Burgess, 2008; Siahay dkk., 2024). Teori sektoral pertama kali dikemukakan oleh Homer Hoyt, berbeda dengan teori konsentris, pertumbuhan perkotaan ini tidak hanya dari pusat kota, tetapi juga dari zona sektoral yang meluas ke pinggiran yang menciptakan pola tata ruang dan ekspansi memanjang (Hoyt, 1939; Siahay dkk., 2024). Teori inti ganda dikemukakan pertama kali oleh C.D. Harris dan F.L. Ullman yang berpendapat bahwa perkotaan tidak hanya berkembang dengan satu pusat kegiatan, pola yang dibentuk tersebar dan *independent* (Siahay dkk., 2024).



Sumber: (Loewen, 2017)

Gambar 2. 2. Model Struktur Spasial Wilayah Perkotaan

Gambar tersebut menggambarkan dua model struktur spasial wilayah perkotaan, yaitu *monocentric* dan *polycentric*. Model *monocentric* ditunjukkan oleh konsentrasi aktivitas yang terpusat pada satu pusat utama, yang berperan sebagai inti pertumbuhan wilayah. Dalam struktur ini, pergerakan penduduk dan arus komoditas sebagian besar terfokus menuju satu titik pusat, yang menyebabkan tingginya tekanan pada infrastruktur dan transportasi menuju inti tersebut. Sebaliknya, model *polycentric* menunjukkan konfigurasi wilayah dengan beberapa pusat aktivitas yang saling terhubung. Tiap pusat dalam struktur *polycentric* memiliki peran fungsional tersendiri dan berinteraksi secara relatif seimbang satu sama lain, sehingga menghasilkan distribusi pembangunan yang lebih merata serta potensi pengurangan beban pada pusat kota utama. Dalam konteks perencanaan wilayah, pergeseran dari model *monocentric* ke *polycentric* sering dipandang sebagai strategi untuk mewujudkan pembangunan yang berkelanjutan dan mengurangi ketimpangan antar wilayah.

2.2.3. *Remote Sensing*

Remote Sensing atau Penginderaan jauh merupakan teknik yang berlandaskan pada penggunaan gelombang elektromagnetik (Pasaribu dkk., 2022). *Remote sensing* juga dapat didefinisikan sebagai ilmu dan seni untuk memperoleh suatu objek, daerah, atau fenomena melalui analisis data yang diperoleh dengan suatu alat tanpa kontak langsung dengan objek. Secara singkat penginderaan jauh juga dapat diartikan sebagai teknik yang digunakan untuk memperoleh data terkait permukaan bumi yang menggunakan media satelit atau pesawat terbang (Ninghtyas, 2022). Teknologi penginderaan jauh semakin berkembang melalui kehadiran berbagai system satelit dengan berbagai misi dan teknologi sensor.

Penginderaan jauh memiliki berbagai keunggulan dalam berbagai bidang salah satunya kecepatan estimasi hingga keakuratan estimasi (Musfiza dkk., 2023). Selain memiliki keunggulan penginderaan jauh memiliki berbagai manfaat yaitu untuk pemanfaatan lingkungan seperti perubahan hutan, perluasan wilayah perkotaan, pencemaran laut, kebakaran hutan, ruang terbuka hijau, penurunan muka tanah (*land subsidence*) yang telah banyak dilakukan dengan bantuan teknologi penginderaan jauh. Teknologi Penginderaan jauh dapat menghasilkan citra/gambar yang diperoleh dengan cara membangun suatu relasi antara *flux* yang diterima oleh sensor yang dibawa oleh satelit dengan sifat-sifat fisik obyek yang diamati/obyek yang ada di permukaan bumi (Pasaribu dkk., 2022).

2.2.4. *GIS (Geographic Information System)*

Geographic Information System (GIS) atau Sistem Informasi Geografis (SIG) merupakan sistem informasi pemetaan berbasis komputer yang digunakan untuk memasukkan, menyimpan, memanggil kembali, mengolah, menganalisis dan menghasilkan data bereferensi geografis atau data geospasial, untuk mendukung pengambilan keputusan dalam perencanaan dan pengelolaan penggunaan lahan, sumber daya alam, lingkungan, transportasi, fasilitas kota dan pelayanan umum lainnya (Rozak, 2021). Sistem Informasi Geografi (SIG) juga dapat diartikan sebagai suatu sistem informasi yang dirancang untuk bekerja dengan data ter-referensi dengan koordinat-koordinat spasial atau geografis, dan dalam perencanaan tata guna lahan, ketersediaan data ter-referensi secara spasial menjadi persyaratan yang utama (Rachmah dkk., 2018). Sistem informasi geografis merupakan bentuk sistem informasi yang menyajikan informasi dalam bentuk grafis dengan

menggunakan peta sebagai antar muka. SIG tersusun atas konsep beberapa lapisan (layer) dan relasi.

Sistem Informasi Geografis (SIG) atau sering dikenal dengan Geografis Informasi System (GIS) pertama pada tahun 1960 dengan tujuan untuk menyelesaikan permasalahan geografis. 40 tahun kemudian GIS terus berkembang tidak hanya bertujuan untuk menyelesaikan permasalahan geografis saja tetapi merambah ke berbagai bidang seperti analisis kejahatan dan analisis kepariwisataan. Kemampuan dasar dari SIG sendiri yaitu mengintegrasikan berbagai operasi basis data seperti *query*, menganalisisnya serta menampilkan dalam bentuk pemetaan berdasarkan letak geografisnya (Hamdani & Utomo, 2021). SIG juga memiliki keunggulan utama yaitu kemampuan untuk menyatukan informasi geografis dengan non- geografis. Dalam hal ini, SIG tidak hanya menjadi pemersatu dua jenis data tetapi lebih dari itu yaitu mampu menciptakan sinergi yang menghasilkan wawasan mendalam (Rahmawati dkk., 2024).

2.2.5. Kepadatan Penduduk

Kepadatan penduduk adalah sebuah keadaan yang menggambarkan jumlah penduduk berbanding dengan luas daerah. Kepadatan penduduk suatu wilayah akan dikatakan semakin padat apabila jumlah manusia pada suatu ruang tertentu semakin banyak dibandingkan luas ruangnya (Irham & Putri, 2023). Kepadatan Penduduk juga dapat diartikan sebagai data distrik yang berkaitan dengan wilayah administrasi (Jasmine, 2014). Menurut Badan Pusat Statistik (BPS), kepadatan penduduk merupakan jumlah penduduk dibagi dengan luas wilayah. Kepadatan Penduduk biasanya dinyatakan sebagai jumlah orang per kilometer persegi atau mil persegi. Kepadatan Penduduk dapat dihitung menggunakan rumus sebagai berikut.

$$KP = \frac{\text{Jumlah penduduk suatu wilayah}}{\text{Luas wilayah}}$$

Kepadatan penduduk suatu wilayah dapat memberikan gambaran mengenai distribusi penduduk di suatu wilayah dan membantu dalam analisis sosial, ekonomi serta perencanaan tata ruang. Semakin tinggi angka kepadatan penduduk, menunjukkan bahwa semakin banyak jumlah penduduk yang tinggal di area tersebut, yang sering kali berkaitan dengan pusat- pusat aktivitas ekonomi dan sosial.

2.2.6. Kepadatan Bangunan

Kepadatan bangunan dapat diartikan sebagai proses pertambahan kepadatan bangunan yang bersifat *vertical* dan *horizontal*. Adanya kepadatan bangunan merupakan salah satu upaya untuk meratakan perkembangan fisik kota yang harus dikendalikan (Sukmono, 2019). Secara sederhana kepadatan bangunan dapat diartikan sebagai perbandingan jumlah rumah dengan luas permukiman. Kepadatan bangunan dapat dilakukan perhitungan melalui perhitungan rumah pada setiap satuan pemetaan (blok permukiman) yang telah dibatasi sebelumnya. Berikut merupakan rumus yang dapat digunakan pada setiap satuan pemetaannya.

$$\text{Kepadatan Bangunan} = \frac{\text{Jumlah Permukiman}}{\text{Luas Blok Permukiman}} \times 100\%$$

Hasil perhitungan kepadatan bangunan akan menunjukkan bahwa semakin besar nilainya maka semakin besar kualitas lingkungan permukimannya, sedangkan nilai semakin kecil akan menunjukkan sebaliknya yaitu kualitas lingkungan permukiman tersebut tidak baik.

2.2.7. GHSL

GHSL atau *Global Human Settlement Layer* merupakan satu proyek yang dikembangkan oleh komisi eropa, khususnya Pusat Penelitian Bersama (*Joint Research Center*), yang bertujuan untuk menghasilkan informasi spasial global mengenai permukiman manusia. Data spasial GHSL ini menunjukkan distribusi dan kepadatan populasi, yang dinyatakan sebagai jumlah orang per sel dengan resolusi spasial 250 meter. Informasi GHSL diperoleh dengan menggunakan data penginderaan jauh multitemporal selama kurun waktu 40 tahun terakhir dari berbagai jenis citra, seperti Sentinel 1 dan landsat, selain itu digunakan data lapangan berupa data sensus kependudukan untuk dianalisis SIG yang menghasilkan GHS-POP untuk populasi penduduk dan GHS-SMOD untuk model klasifikasi desa-kota yang mengintegrasikan data area terbangun dan data populasi (Sari & Tambunan, 2022).

Global Human Settlement Layer Built-Up Area salah satu komponen dari *Global Human Settlement Layer* (GHSL) yang menyajikan data mengenai area terbangun di seluruh dunia yang menggambarkan presentase area yang dibangun di setiap grid berukuran 30 *arc-second* atau sekitar 1 km di ekuator. GHS-Built juga dapat didefinisikan sebagai peta global area terbangun pada resolusi 10 m dan 100 m. Data GHS-Built diperoleh melalui komposit citra global Sentinel-2 untuk tahun referensi 2018 menggunakan *convolution Natural*

Networks. GHS-Built memiliki berbagai aplikasi dalam perencanaan kota, pengelolaan sumberdaya, dan penelitian lingkungan. Selain itu GHS-Built berkontribusi pada pemantauan dampak aktivitas manusia terhadap lingkungan dan membantu dalam perencanaan mitigasi resiko bencana.

A. Data Masukan Pengolahan GHSL

- Landsat

Informasi GHSL (*Global Human Settlement Layer*) diperoleh melalui proses pengolahan data penginderaan jauh multitemporal yang mencakup kurun waktu lebih dari 40 tahun terakhir, dimulai dari era 1980-an hingga saat ini. Data tersebut dihasilkan dari berbagai sumber citra satelit dengan resolusi dan karakteristik berbeda, termasuk citra radar seperti Sentinel-1 yang mampu menangkap kondisi permukaan bumi dalam segala cuaca, citra optis resolusi tinggi seperti Sentinel-2 yang menyediakan informasi spektral detail, serta seri data Landsat mulai dari MSS (*Multispectral Scanner System*), TM (*Thematic Mapper*), hingga sensor ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper Plus*) yang memberikan rekaman historis dengan cakupan global. Integrasi berbagai jenis data ini memungkinkan analisis spasiotemporal yang komprehensif untuk memantau perkembangan permukiman manusia, perubahan tutupan lahan, dan dinamika urbanisasi secara akurat.

Tabel 2. 1. Spesifikasi Jenis Jenis Landsat

Satellite	Landsat 8		Landsat 7		Landsat 4/5		Landsat 1-3/4-5	
Thematic relevance of the spectral bands	Land Imager Thermal Infrared Sensor (OLI)		Enhanced Thematic Mapper (ETM)		Thematic Mapper (TM)		Multi Spectral Scanner (MSS)	
Data Type	12-bit (4096 levels)		8-bit (256 levels)		8-bit (256 levels)		6-bit (64 levels)	
	Band and Resolution	Wave length (µm)	Band and Resolution	Wave length (µm)	Band and Resolution	Wave length (µm)	Band and Resolution	Wave length (µm)
Coastal Aerosol	1 (30m)	0.43–0.45 µm	-	-	-	-	-	-

Blue Band	2 (30m)	0.45–0.51 μm	1 (30m)	0.45–0.52 μm	1 (30m)	0.45–0.52 μm	4/1 (60m)	0.5–0.6 μm
Green	3 (30m)	0.53–0.59 μm	2 (30m)	0.52–0.60 μm	2 (30m)	0.52–0.60 μm	5/2 (60m)	0.6–0.7 μm
Red	4 (30m)	0.64–0.67 μm	3 (30m)	0.63–0.69 μm	3 (30m)	0.63–0.69 μm	6/3 (60m)	0.7–0.8 μm
NIR	5 (30m)	0.85–0.88 μm	4 (30m)	0.77–0.90 μm	4 (30m)	0.77–0.90 μm	7/4 (60m)	0.8–1.1 μm
Cirrus	9 (30m)	1.36–1.38 μm	-	-	-	-	-	-
SWIR 1	6 (30m)	1.57–1.65 μm	5 (30m)	1.55–1.90 μm	5 (30m)	1.55–1.75 μm	-	-
SWIR 2	7 (30m)	2.11–2.29 μm	7 (30m)	2.09–2.35 μm	7 (30m)	2.08–2.35 μm	-	-
Thermal Infrared 1	10 (100m)	10.60–11.19 μm	6 (60m)	10.40–12.50 μm	6 (120m)	10.40–12.50 μm	-	-
Thermal Infrared 2	11 (100m)	11.50–12.51 μm	-	-	-	-	-	-
Panchromatic	8 (15m)	0.50–0.68 μm	8 (15m)	0.52–0.90 μm	-	-	-	-

Sumber: Corbane dkk, 2019

Citra satelit Landsat memiliki peran krusial dalam pengembangan produk *Global Human Settlement Layer* (GHSL), terutama dalam mendeteksi dan memetakan permukiman manusia secara global. Tabel band spektral Landsat menunjukkan bahwa sensor pada setiap generasi Landsat memiliki karakteristik unik yang berpengaruh terhadap ketelitian pemetaan permukaan terbangun (*built-up*). Band spektral yang paling sering digunakan dalam analisis GHSL mencakup band merah, hijau, biru (RGB), inframerah dekat (NIR), serta inframerah gelombang

pendek (SWIR). Band-band ini digunakan untuk membedakan antara permukiman, vegetasi, air, dan tanah kosong berdasarkan perbedaan spektralnya (Pesaresi, Ehrlich, dkk., 2016).

Sensor Landsat-8 (OLI/TIRS) menawarkan resolusi spasial 30 meter dengan kedalaman radiometrik 12-bit, yang memberikan peningkatan signifikan dalam kemampuan klasifikasi permukiman dibandingkan generasi sebelumnya seperti Landsat-4/5 dan Landsat-7. Band panchromatic pada Landsat-7 dan 8, dengan resolusi 15 meter, memungkinkan proses *pan-sharpening* untuk menghasilkan citra dengan resolusi lebih tinggi, yang sangat bermanfaat untuk meningkatkan akurasi delineasi area terbangun (Corbane dkk., 2019).

Selain resolusi spasial, keberadaan band SWIR pada Landsat-5 hingga 8 sangat penting dalam mengidentifikasi perbedaan kelembaban antara lahan vegetasi dan lahan terbangun. Perbandingan resolusi temporal antara generasi Landsat juga memungkinkan analisis spasial jangka panjang dari tahun 1975 hingga saat ini, yang merupakan salah satu kekuatan utama GHSL dalam studi dinamika permukiman global. Dengan demikian, pemilihan band spektral yang tepat dari setiap sensor Landsat menjadi dasar penting dalam pengolahan GHSL yang akurat dan konsisten.

- Sentinel

Sensor Landsat telah berhasil digunakan dalam pemrosesan global pertama untuk memetakan dan memantau dinamika permukiman manusia dalam rentang waktu lebih dari empat dekade. Keberhasilan ini menandai tonggak penting dalam pengembangan basis data spasial global seperti *Global Human Settlement Layer* (GHSL). Selain itu, citra dari satelit Sentinel, khususnya Sentinel-2, juga mulai diterapkan dalam pemetaan permukaan terbangun secara global. Sentinel-2 menawarkan keunggulan dalam hal resolusi spasial yang lebih tinggi dan frekuensi akuisisi yang lebih cepat dibandingkan Landsat, sehingga memberikan peluang signifikan untuk meningkatkan akurasi dan detail pemetaan permukiman manusia di berbagai skala wilayah.

Meskipun demikian, proses seleksi citra terbaik, pengunduhan dari pusat data resmi, serta kebutuhan penyimpanan dan komputasi menjadi tantangan utama dalam pemetaan berskala besar. Salah satu solusi yang diterapkan adalah pendekatan

komposit berbasis piksel (*pixel-based compositing*), yang memungkinkan pemanfaatan volume data yang sangat besar sambil mengurangi kontaminasi akibat awan dan aerosol, serta mengatasi kekosongan data dalam arsip. Metode ini terbukti efektif dalam aplikasi penginderaan jauh berskala luas menggunakan citra optik resolusi tinggi (Pesaresi, Corbane, dkk., 2016).

Proses pembuatan komposit citra dilakukan melalui platform *Google Earth Engine* (GEE), menggunakan pendekatan berbasis data (*data-driven*) untuk memilih citra dan membentuk komposit. Teknik ini mengandalkan statistik ringkasan dari deret waktu piksel, khususnya menggunakan nilai percentile ke-25 sebagai dasar agregasi. Penjelasan lebih rinci mengenai alur kerja ini tersedia dalam dokumentasi teknis yang relevan (Pesaresi, Corbane, dkk., 2016).

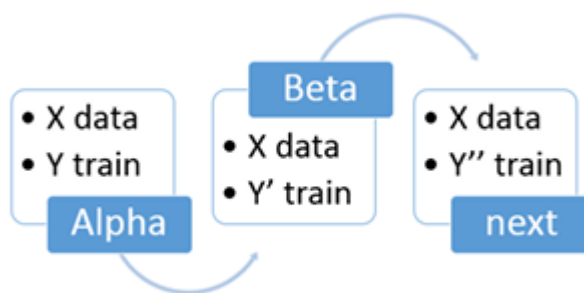
Output akhir berupa grid raster berskala global yang terdiri atas empat kanal spektral dari Sentinel-2: band B2 (biru), B3 (hijau), B4 (merah), dan B8 (*Near Infrared/Visible-NIR*), semuanya pada resolusi spasial 10 meter. Citra ini disusun dalam sistem proyeksi *Universal Transverse Mercator* (UTM/WGS84) berdasarkan zona UTM masing-masing, mencakup total 615 zona grid yang meliputi daratan utama dan pulau-pulau. Total ukuran dataset mencapai 15 *terabyte* dan disimpan dalam format GeoTIFF 16-bit, serta dihosting di platform Big Data milik *Joint Research Centre* (JEODPP). Dataset ini tersedia secara bebas melalui Open Data Catalogue dari Komisi Eropa.

B. Pembelajaran *Symbolic Machine Learning* Untuk Analisis Skala Besar

GHSL terus berkembang menjadi fondasi penting dalam analisis spasial dan perencanaan wilayah modern. Dengan resolusi spasial tinggi-10 meter (Sentinel-2), 30 meter (Landsat), dan 100 meter (produk agregat global)-GHSL menawarkan data multitemporal dari tahun 1975 hingga proyeksi 2030, sehingga memungkinkan pemantauan perubahan lahan terbangun, volume, dan tinggi bangunan secara detail dan historis. Kemampuan ini sangat krusial untuk memahami dinamika urbanisasi, mengidentifikasi tren ekspansi kota, serta memetakan perubahan permukiman yang cepat di berbagai belahan dunia. Integrasi GHSL dengan platform Sistem Informasi Geografis (SIG) serta sumber data tambahan seperti *OpenStreetMap* menjadi bagian penting dalam alur kerja pemrosesan, karena memungkinkan pengayaan informasi

spasial dan peningkatan akurasi klasifikasi dalam skema evolusi yang didukung oleh mekanisme retroaksi.

Alur kerja pemrosesan data secara umum didasarkan pada pendekatan klasifikasi terbimbing (*supervised classification*), di mana model dilatih menggunakan data berlabel untuk mengenali pola-pola tertentu dalam data. Proses klasifikasi ini kemudian dimasukkan ke dalam suatu skema evolusi, yaitu kerangka kerja iteratif yang memungkinkan model berkembang seiring waktu melalui pembaruan hasil prediksi. Dalam skema ini, diterapkan pula mekanisme retroaksi (*feedback mechanism*), di mana hasil dari satu tahap pemrosesan digunakan kembali sebagai masukan untuk tahap berikutnya. Hal ini memungkinkan adanya peningkatan akurasi secara bertahap dan adaptasi terhadap dinamika data yang kompleks, terutama dalam konteks data spasial multitemporal seperti citra satelit.



Sumber: Pesaresi, Ehrlich,dkk., 2025

Gambar 2. 3. Alur Kerja Umum yang Diterapkan dalam Percobaan

Alur kerja iteratif yang umum digunakan dalam percobaan pembelajaran mesin berjenjang atau berurutan, khususnya dalam skenario di mana model digunakan untuk menghasilkan pelatihan lanjutan bagi model berikutnya. Proses dimulai dari tahap pertama yang disebut sebagai Alpha, di mana model dilatih menggunakan data input (X data) dan *label ground truth* (Y train) yang berasal dari data global skala kasar (penutup lahan beresolusi rendah) yang telah tersedia sebelum percobaan, sementara sebagai output dihasilkan mosaik GHSL Alpha multitemporal dengan resolusi penuh. Setelah model Alpha dilatih, hasil prediksinya terhadap data yang sama digunakan sebagai label baru (Y' train) untuk melatih model selanjutnya, yaitu model Beta. Pada tahap ini, meskipun data input tetap sama, label pelatihan bukan lagi label asli, melainkan hasil prediksi dari model sebelumnya. Set pembelajaran global yang digunakan sebelumnya ditingkatkan dengan penambahan

mosaik GHSL Alpha multitemporal sebagai umpan balik retroaksi, serta data berskala halus tambahan yang diperoleh dari beberapa sumber, yaitu: (i) hasil klasifikasi tak terbimbing pada kanal pankromatik citra Landsat 8 (L8), (ii) data sumber terbuka seperti *OpenStreetMap* (OSM), dan (iii) data tambahan yang disediakan oleh mitra GHSL. Proses pengolahan ini memasuki siklus kedua, yang pada akhirnya menghasilkan mosaik global GHSL Beta, yang menjadi fokus pembahasan pada tahap ini.

Siklus Alpha berfungsi sebagai pendekatan awal terhadap solusi, yang dinilai masih konservatif dan belum mampu merepresentasikan secara optimal pola permukiman kecil dan tersebar, mengingat keterbatasan skala data pelatihan yang digunakan. Sebaliknya, siklus Beta difokuskan untuk menyempurnakan dan memperluas informasi latar belakang yang sudah stabil dan teridentifikasi pada GHSL Alpha, dengan mengambil risiko memasukkan sampel positif baru dari data resolusi tinggi. Namun, karena beberapa sumber data pelatihan resolusi tinggi, seperti OSM, hanya tersedia secara tidak merata di beberapa lokasi dengan tingkat kelengkapan dan pembaruan yang tidak diketahui secara pasti, ketergantungan penuh terhadap sumber-sumber ini dapat menyebabkan ketidakstabilan dalam performa sistem secara keseluruhan.

Proses ini kemudian berlanjut ke tahap berikutnya, yang ditunjukkan sebagai “next”, dengan pola yang sama: data input (X data) tetap digunakan, tetapi label pelatihan kini berasal dari prediksi model Beta (Y" train). Alur ini bersifat siklik dan dapat diulang beberapa kali, tergantung pada strategi eksperimen yang diterapkan. Pendekatan seperti ini bertujuan untuk memperbaiki kualitas pelatihan model secara bertahap, menyebarkan label dari data berlabel ke data tidak berlabel, atau memperkuat generalisasi model melalui pembelajaran dari hasil prediksi sebelumnya.

Pengelolaan set pelatihan dirancang secara konsisten dengan kerangka eksperimen yang bersifat evolusioner dan mengandalkan mekanisme umpan balik (retroaksi). Dalam proses ini, area terbangun yang teridentifikasi oleh GHSL Alpha ditentukan melalui analisis asosiasi terhadap *instance* data citra (X), dengan referensi pelatihan BUref yang terdiri dari dua komponen utama (Ymds dan Ylsc), sebagai dasar pelatihan model. Pendekatan ini memungkinkan pengembangan model yang

adaptif dan mampu memperbarui diri berdasarkan hasil deteksi sebelumnya. BUref dikembangkan melalui metode pembelajaran adaptif yang berfokus pada identifikasi ambang batas populasi yang paling efektif untuk membedakan kawasan terbangun berdasarkan data Ylsc, dengan Ymds digunakan sebagai acuan pelatihan awal. Di sisi lain, deteksi area terbangun dalam produk GHSL Beta dilakukan menggunakan pendekatan analisis asosiasi terhadap data citra (X), namun dengan memperluas cakupan data pelatihan. Data pelatihan ini mencakup informasi resolusi tinggi dan hasil klasifikasi GHSL Alpha sebelumnya, sehingga memungkinkan model untuk terus belajar dan menyesuaikan diri melalui mekanisme umpan balik, guna meningkatkan akurasi deteksi kawasan terbangun secara bertahap (Pesaresi dkk., 2013; Pesaresi, Ehrlich, dkk., 2016).

Dalam rangkaian eksperimen ini, digunakan dua kelompok utama data pengujian: yaitu set validasi dan set perbandingan silang. Set validasi berisi sumber data geospasial yang diharapkan memiliki tingkat resolusi spasial dan keandalan tematik yang lebih tinggi dibandingkan dengan hasil yang dihasilkan oleh GHSL berbasis Landsat, sehingga digunakan untuk mengukur akurasi secara absolut. Sementara itu, set perbandingan silang terdiri dari sumber data yang memiliki kemiripan dari segi skala dan isi dengan data GHSL, namun tidak dapat dijadikan acuan tunggal karena keterbatasan dalam kualitas atau cakupan tematik. Kedua kelompok data tersebut disiapkan secara independen dan tidak digunakan dalam proses pelatihan model klasifikasi. Hal ini memastikan bahwa proses evaluasi dilakukan secara objektif tanpa bias dari data pelatihan. Meski demikian, pemanfaatan set ini tetap dipengaruhi oleh batasan ketersediaan data dan sumber daya teknis selama pelaksanaan eksperimen (Pesaresi, Ehrlich, dkk., 2016).

Eksperimen klasifikasi data yang digunakan dalam penelitian ini mengandalkan metode klasifikasi terbimbing yang baru, sebagaimana diperkenalkan oleh (Pesaresi dkk., 2015). Metode ini dikembangkan sebagai pendekatan yang efisien dan dapat diskalakan untuk mengolah data satelit dari berbagai lokasi (*multi-scene*) yang kompleks dan berukuran besar. Teknik ini memanfaatkan prinsip *Symbolic Machine Learning* (SML) dan bekerja melalui dua tahap utama. Tahap pertama adalah kuantisasi dan penyusunan urutan data citra menjadi format yang dapat dianalisis secara sistematis. Tahap kedua melibatkan analisis aturan asosiasi

untuk menemukan pola-pola keterkaitan dalam data, yang kemudian digunakan untuk mendeteksi dan mengklasifikasikan area berdasarkan karakteristik citra satelit tersebut. Informasi yang diekstraksi dari seluruh citra (*scene*) mencakup tiga komponen utama, yaitu:

- Awan
- Air
- Area Terbangun

Proses pengenalan otomatis dilakukan dengan pendekatan hierarkis untuk setiap *scene* secara individual, di mana setiap komponen dikumpulkan berdasarkan urutan tertentu, dan informasi yang diperoleh pada setiap tahap dipropagasi atau diteruskan ke tahap berikutnya. Untuk pengenalan komponen air dan area terbangun, prosedur ini dirancang dalam tiga langkah utama yang diterapkan pada seluruh data citra (X) dari semua periode waktu (*epoch*):

- Pengumpulan data pelatihan yang tersedia dengan geometri yang sesuai (resolusi dan proyeksi) terhadap masing-masing *scene* X.
- Penyempurnaan dan peningkatan otomatis data pelatihan, berdasarkan karakteristik spesifik *scene* X yang sedang diproses dan pendekatan berbasis teori (*theory-driven reasoning*).
- Klasifikasi terbimbing (*supervised classification*) terhadap *scene* X berdasarkan pendekatan berbasis data (*data-driven reasoning*), yaitu melalui analisis asosiasi, dengan menggunakan set pelatihan yang telah disempurnakan.

Pendekatan pemrosesan per *scene* ini dirancang untuk mengurangi permasalahan yang biasanya muncul ketika model klasifikasi diterapkan lintas *scene* yang berbeda musim atau lokasi geografis. Dengan demikian, pendekatan ini meningkatkan keandalan dalam proses ekstraksi informasi secara otomatis dari citra satelit.

Deteksi awan mengidentifikasi domain data citra yang valid yang akan diproses lebih lanjut yang menerapkan adaptasi metode *Automatic Cloud Cover Assessment* (ACCA), mirip dengan yang digunakan dalam (Pesaresi dkk., 2013). Dalam tahap perancangan sistem, dilakukan evaluasi terhadap informasi dalam pita QA, yang mengungkapkan bahwa permukaan atap yang memantulkan cahaya secara tinggi seperti pada bangunan industri atau komersial baru sering kali keliru dikenali sebagai awan cirrus atau awan biasa. Hal ini berpotensi menyebabkan area tersebut

salah diklasifikasikan sebagai data kosong (*no data*). Untuk mencegah kesalahan klasifikasi tersebut secara berulang, diterapkan metode penyaringan morfologis berbasis komponen terhubung terhadap data awan dan cirrus yang diidentifikasi dari QA. Penyaringan ini didasarkan pada kriteria ukuran area untuk membedakan antara patch besar yang benar-benar merupakan awan dan dimasukkan ke dalam *cloud mask* (*Mcloud*), dan patch kecil dan tersebar yang hanya merupakan sisa pantulan tinggi yang salah diklasifikasikan, yang kemudian disimpan dalam masker pantulan tinggi (*Mhigh*). Pendekatan ini membantu meningkatkan akurasi deteksi awan dan mengurangi kehilangan data yang penting seperti bangunan terbangun (Pesaresi, Ehrlich, dkk., 2016). Untuk permukaan air dikenali dengan klasifikasi asosiatif menggunakan topeng Boolean *Mw* sebagai set pelatihan penyaringan berdasarkan morfologi (Pesaresi, Ehrlich, dkk., 2016).

Metodologi evaluasi dan penyempurnaan set pelatihan (*training set*) dalam proyek GHSL (*Global Human Settlement Layer*), khususnya untuk mendeteksi area terbangun (*built-up areas*) berdasarkan data citra satelit Landsat. Metrik kepercayaan (*confidence-like metric*) untuk mendeteksi area terbangun dalam produk GHSL α dihitung menggunakan data pelatihan awal berupa *BU_ref*, yang terdiri dari himpunan data *Y_mds* dan *Y_lsc*. Sementara itu, dalam GHSL β , metrik yang sama dihitung menggunakan set pelatihan yang lebih komprehensif, hasil agregasi dari dua skema pelatihan, yaitu *Mb_u0* (pendekatan ketat) dan *Mb_u1* (pendekatan longgar), melalui metode voting. Data input yang digunakan berupa citra multispektral Landsat, dengan kanal pankromatik jika tersedia dimanfaatkan untuk memperkaya pelatihan melalui analisis tekstur, bukan untuk klasifikasi langsung. Sebelum dilakukan klasifikasi, seluruh set pelatihan disempurnakan terlebih dahulu menggunakan analisis *instance* citra dan pendekatan *unsupervised*. Set pelatihan yang telah disempurnakan dibagi menjadi dua bagian: pertama, data yang dibersihkan dari elemen pengganggu seperti awan (*Mw0*), area dengan vegetasi tinggi (*Mndvi0*), dan titik noise (*Mptx0*); dan kedua, interseksi antara area noise yang valid (*Mptx1*) dengan area ber-NDVI rendah (*Mndvi1*) yang mengindikasikan kemungkinan area terbangun. Masker *Mndvi* dan *Mptx* dihitung secara khusus untuk data koleksi tahun 2014, ketika metadata yang diperlukan tersedia. Dalam proses ini, nilai NDVI dihitung dari reflektansi Top-of-Atmosphere (TOA) untuk membedakan vegetasi lebat ($NDVI > 0,65$) dari area berpotensi terbangun ($NDVI < 0,3$). Selain

itu, kanal pankromatik Landsat 8 dengan resolusi 15 meter digunakan untuk analisis tekstur multi-skala guna memperkaya data pelatihan. Seluruh proses ini dirancang untuk meningkatkan akurasi dalam mendeteksi area terbangun, sekaligus meminimalkan kesalahan klasifikasi akibat variabilitas spasial dan temporal dalam data citra satelit (Pesaresi, Ehrlich, dkk., 2016).

2.2.8. Night Time Light Satellite Images

Night Time Light satellite images merupakan salah satu metode penginderaan jauh. *Night Time Lights* (NTL) merupakan salah satu produk pengindraan malam hari yang menggunakan citra satelit oleh *Suomi National Polar-orbiting Partnership* (SuomiNPP). Satelit yang digunakan merupakan satelit cuaca yang dioperasikan oleh NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) (Christopher D. Elvidge dkk., 2021). Suomi NPP diluncurkan pada tahun 2011 dengan membawa sensor terkenal *Visible Infrared Imaging Radiometer Suite* (VIIRS). VIIRS menangkap citra dari panjang gelombang tampak dan inframerah dengan total 22 kanal yang salah satunya dapat melihat NTL. Data NTL VIIRS dikumpulkan oleh *Earth Observation Group* yang menyediakan data harian, bulanan dan tahunan. *Night Time Light* (NTL) adalah gambar-gambar yang diambil oleh satelit yang menunjukkan intensitas cahaya pada malam hari di seluruh dunia. Gambar-gambar ini dihasilkan oleh sensor cahaya yang sensitif terhadap radiasi elektromagnetik dari permukaan bumi pada rentang spektrum cahaya tampak dan inframerah dekat. Intensitas cahaya dalam gambar-gambar NTL menggambarkan kepadatan populasi dan aktivitas manusia di suatu wilayah. Gambar-gambar ini sering digunakan dalam analisis urbanisasi, pengembangan kota, dan pemantauan kegiatan manusia lainnya pada malam hari, seperti kegiatan ekonomi, transportasi, dan keamanan.

Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) *Day/Night Band* (DNB) mengumpulkan data pencitraan cahaya rendah global yang memiliki peningkatan signifikan dibandingkan data sejenis yang dikumpulkan selama 40 tahun oleh *DMSP Operational Linescan System*. Salah satu fitur menonjol dari data DNB adalah deteksi pencahayaan listrik yang ada di permukaan Bumi. Sebagian besar cahaya ini berasal dari pemukiman manusia. VIIRS mengumpulkan data sumber yang dapat digunakan untuk menghasilkan peta radiasi global tingkat sains bulanan dan tahunan dari pemukiman manusia dengan pencahayaan listrik. Ada sejumlah besar langkah yang terlibat dalam memproduksi produk yang telah dibersihkan untuk mengecualikan kebisingan latar belakang, kontaminasi matahari dan

bulan, data yang terdegradasi oleh tutupan awan, dan fitur yang tidak terkait dengan pencahayaan listrik (misalnya kebakaran, suar, gunung berapi).

Citra satelit VIIRS-DNB (*Visible Infrared Imaging Radiometer Suite-Day/Night Band*) merupakan citra satelit malam hari yang dikelola oleh *Earth Observation Group, National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), dimana citra satelit ini mengukur radiansi dari pencahayaan malam hari yang dipancarkan ke atas dari permukaan dan ditransformasikan oleh atmosfer (Duriscoe dkk., 2018; Netzel & Netzel, 2016). Komposit bebas awan bulanan yang dihasilkan oleh VIIRS *Day/Night band* yang dikelola oleh *Earth Observation Group, National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) digunakan untuk pengukuran radiansi ke atas. Komposit ini adalah rata-rata radiansi pita Siang/Malam untuk pengamatan yang dianggap bebas awan dan dikumpulkan dalam kondisi bulan baru. Untuk penilaian cepat di area geografis yang luas, komposit bebas awan bulanan dengan radiasi ke atas dari sensor pita VIIRS Siang/Malam menyediakan sumber informasi terkalibrasi yang tersedia secara mudah mengenai cahaya buatan yang hilang di malam hari (Christopher D Elvidge dkk., 2021). Data seluruh bumi dari tahun 2013 hingga sekarang telah dikalibrasi dan disiapkan untuk disebarluaskan ke publik, tersedia di https://www.ngdc.noaa.gov/eog/viirs/download_dnb_composites.html.

Informasi *Nighttime Light* (NTL) diperoleh melalui pemanfaatan data penginderaan jauh multitemporal yang mencakup rentang waktu lebih dari tiga dekade, yaitu sejak awal tahun 1990-an hingga periode terkini. Data ini memberikan wawasan penting mengenai dinamika aktivitas manusia dan pertumbuhan kawasan perkotaan dalam jangka panjang. Sumber utama data NTL berasal dari satelit yang dilengkapi sensor khusus, seperti DMSP-OLS (*Defense Meteorological Satellite Program - Operational Linescan System*) dan VIIRS (*Visible Infrared Imaging Radiometer Suite*). Sensor DMSP-OLS telah digunakan secara luas sejak dekade 1990-an untuk memantau pencahayaan buatan pada malam hari sebagai proksi dari aktivitas ekonomi, kepadatan penduduk, serta pola urbanisasi. Meskipun memiliki resolusi spasial yang terbatas dan belum dilengkapi dengan kalibrasi radiometrik absolut, data DMSP-OLS tetap berperan penting dalam menyediakan informasi historis yang berharga. Sementara itu, sensor VIIRS yang lebih modern, khususnya pada kanal *Day/Night Band* (DNB), menawarkan peningkatan signifikan dalam hal resolusi spasial, jangkauan dinamis, dan akurasi pengukuran radiasi. Dengan kemampuan tersebut, VIIRS mampu

menangkap variasi intensitas cahaya secara lebih rinci, bahkan di wilayah dengan cahaya rendah seperti pedesaan atau area maritim.

Perbandingan kemampuan kedua sensor ini menunjukkan evolusi signifikan dalam teknologi pengamatan cahaya malam. Sensor DMSP-OLS telah digunakan secara luas sejak dekade 1990-an untuk memantau pencahayaan buatan pada malam hari sebagai proksi dari aktivitas ekonomi, kepadatan penduduk, serta pola urbanisasi. Sensor DMSP-OLS ini memiliki beberapa keterbatasan utama, termasuk resolusi spasial yang rendah. Keberadaan sensor VIIRS-DNB yang diperkenalkan pada tahun 2011 menghadirkan peningkatan teknis yang revolusioner. Berikut merupakan komparasi dari kedua sensor NTL.

Tabel 2. 2. Perbandingan Sensor DMSP-OLS dan Sensor VIIRS-DNB

Perbandingan	Sensor DMSP-OLS	Sensor VIIRS-DNB
Resolusi Spasial	5 km at nadir dengan 2,7 km area sampling	742 m at nadir dengan kemampuan deteksi hingga 500 m setelah proses resampling
Sensitivitas Radiometrik	6-bit quantization (64 nilai digital/DN). Tidak mampu mendeteksi cahaya <5 nW/cm ² /sr	14-bit quantization mampu mendeteksi dengan threshold hingga 2 nW/cm ² /sr
Swath	3000 km	3000 km
Temporal	Dari Tahun 2019 – 2013 Pengamatan dilakukan sekitar 19.30 – 21.30	Dari tahun 2011 – sekarang Pengamatan lebih fleksibel dengan waktu lintas sekitar 01:30 dan 13:30 serta menyediakan data harian skala global.
Kalibrasi	Tidak memiliki kalibrasi radiometrik onboard	Dilengkapi kalibrasi radiometrik onboard

Sumber: Christopher D. Elvidge dkk., 2013

2.2.9. Kernel Density

Kernel density merupakan metode perhitungan yang digunakan untuk mengestimasi kepadatan data secara non-parametrik. Dalam konteks statistik, istilah non-parametrik

merujuk pada pendekatan yang tidak bergantung pada asumsi distribusi tertentu. Artinya, bentuk distribusi data tidak menjadi faktor utama yang harus diperhatikan dalam analisis. Selain itu, karena bersifat non-parametrik, metode ini tidak memerlukan penggunaan parameter spesifik sebagai dasar perhitungan (Handayani & Rudiarto, 2011). Rumus dasar untuk estimasi kerapatan non-paramterik adalah sebagai berikut

$$P(x) = \frac{k}{N.V}$$

- V adalah volume (area disekitar titik x)
- N adalah jumlah total sampel dataset
- k adalah jumlah titik sampel yang berada dalam volume V

Secara prinsip, terdapat dua pendekatan utama dalam penerapan rumus dasar ini:

- *Kernel Density Estimation (KDE)*

Metode ini menggunakan volume V yang telah ditentukan, biasanya ditentukan berdasarkan radius atau *bandwith* tertentu di sekitar titik x. selanjutnya, dihitung jumlah titik k yang berada dalam volume tersebut untuk mengestimasi kerapatan. KDE menghasilkan estimasi fungsi kerapatan probabilitas yang halus dan kontinu, serta sangat efektif dalam mengidentifikasi pola spasial (Handayani & Rudiarto, 2011; Silverman, 2003).

- *K-Nearest Neighbor*

Sebaliknya, metode ini menetapkan jumlah titik k terlebih dahulu, lalu menghitung volume V yang diperlukan untuk mencakup k tetangga terdekat dari titik x. teknik adaptif ini memungkinkan volume estimasi bervariasi sesuai konsentrasi data, bermanfaat pada distribusi data yang tidak merata (Handayani & Rudiarto, 2011).

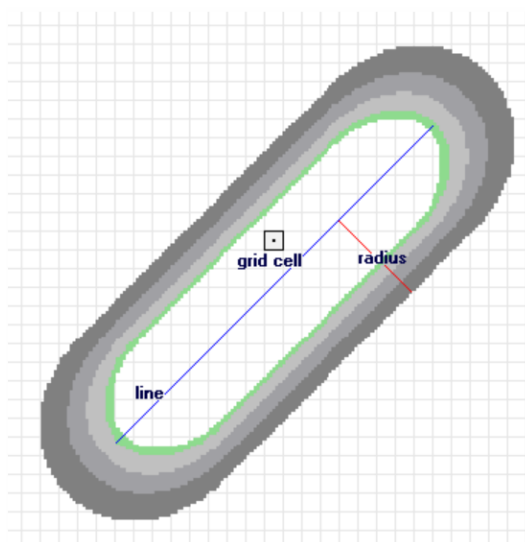
Secara matematis, KDE untuk titik spasial didefinisikan sebagai berikut:

$$f(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x - X_i}{h}\right)$$

- $f(x)$ = estimasi densitas pada titik x
- n = jumlah titik
- h = bandwith (parameter penghalus) atau radius
- K = fungsi kernel (misalnya Gaussian)
- X_i = lokasi titik ke-i

Bandwith (h) adalah parameter kunci dalam KDE karena mengontrol tingkat penghalusan. *Bandwidth* yang terlalu kecil akan menghasilkan peta yang sangat granular dan mungkin menonjolkan noise, sedangkan *bandwidth* yang terlalu besar akan mengaburkan variasi lokal dan menghasilkan permukaan yang terlalu halus (Silverman, 2003). Oleh karena itu, pemilihan *bandwidth* yang optimal sangat penting dan sering kali dilakukan percobaan untuk mendapatkan hasil yang sesuai dengan keinginan. Selain *bandwidth* (radius), ukuran *grid* juga memengaruhi resolusi hasil KDE. Ukuran i yang lebih kecil akan memberikan resolusi spasial yang lebih tinggi namun memerlukan lebih banyak komputasi, sedangkan *grid* yang lebih besar menghasilkan permukaan yang lebih kasar namun lebih cepat diproses (O'Sullivan, and J. Unwin, 2008).

Dalam analisis spasial berbasis *Kernel Density Estimation* (KDE), terdapat dua aspek teknis yang sangat krusial dalam menentukan hasil visualisasi dan interpretasi pola persebaran kepadatan, yakni ukuran *grid cell* (raster) dan radius (*bandwidth*). Keduanya memiliki pengaruh langsung terhadap kehalusan (*smoothness*), resolusi spasial, serta keakuratan representasi distribusi objek atau fenomena yang dianalisis. Hal ini dapat digambarkan sebagai berikut:



Sumber: (Desktop ArcGIS, 2021)

Aspek pertama yang perlu diperhatikan adalah ukuran *grid cell*, yaitu dimensi satuan spasial terkecil dalam peta raster yang dihasilkan dari perhitungan KDE. Ukuran *grid* ini menentukan tingkat detail dan ketajaman visualisasi output. Semakin kecil ukuran *grid*, maka peta kepadatan yang dihasilkan akan memiliki resolusi lebih tinggi dan mampu

menampilkan variasi spasial yang lebih halus. Namun demikian, penggunaan grid terlalu kecil dapat menyebabkan *noise* berlebihan, terutama jika jumlah titik data tidak memadai. Sebaliknya, ukuran *grid* yang terlalu besar berisiko mengaburkan detail lokal dan menghasilkan pola kepadatan yang terlalu umum atau terlalu halus. Oleh karena itu, dalam praktiknya tidak terdapat standar baku yang dapat dijadikan acuan tunggal dalam menentukan ukuran *grid cell* yang paling optimal. Pemilihan ukuran *grid* umumnya bergantung pada kualitas dan kuantitas data titik yang dianalisis, serta tujuan spesifik dari pemetaan kepadatan itu sendiri.

Aspek kedua adalah penentuan radius (*bandwidth*), yaitu jangkauan pengaruh dari masing-masing titik dalam menghitung nilai kepadatan di sekelilingnya. Radius memegang peran penting dalam membentuk pola hasil KDE, karena menentukan seberapa luas kontribusi nilai dari suatu titik akan dihitung dalam distribusi kepadatan. Sama halnya dengan ukuran *grid*, pemilihan radius juga bersifat kontekstual dan sangat tergantung pada skala analisis, sifat sebaran data, dan kebutuhan interpretatif dari hasil analisis. Radius yang terlalu kecil dapat menghasilkan peta kepadatan yang terfragmentasi dan sulit dibaca karena pola yang terbentuk sangat lokal dan diskret. Sementara radius yang terlalu besar dapat menyamarkan perbedaan lokal dan menghasilkan visualisasi yang terlalu *general*, sehingga kehilangan informasi spasial penting. Pendekatan yang lazim digunakan untuk menentukan ukuran grid dan radius yang sesuai adalah melalui metode *eksploratif iteratif*, seperti teknik *trial and error*.

Dengan demikian, proses penentuan parameter dalam analisis KDE bukan hanya bersifat teknis, tetapi juga metodologis, karena melibatkan pertimbangan atas konteks data, tujuan analisis, serta validitas interpretasi hasil akhir. Pendekatan yang fleksibel namun sistematis dalam mengatur ukuran *grid* dan radius menjadi syarat utama untuk menghasilkan visualisasi kepadatan yang bermakna dan dapat digunakan dalam pengambilan keputusan spasial secara lebih tepat dan berbasis bukti.