



STUDI POLUSI CAHAYA DI KOTA PANGKALPINANG BERBASIS MACHINE LEARNING MENGGUNAKAN DATA SATELIT VIIRS UNTUK PERENCANAAN PEMBANGUNAN INFRASTRUKTUR BERKELANJUTAN

Mega Sukma^{1*}, Yudistira Bagus Pratama²

¹ Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik dan Sains, Universitas Muhammadiyah Bangka Belitung

² Program Studi Ilmu Komputer, Fakultas Teknik dan Sains, Universitas Muhammadiyah Bangka Belitung

Jl. KH A Dahlan No.Km.4, Kota Pangkalpinang, Kepulauan Bangka Belitung, Indonesia 33134

*Email: mega.sukma@unmuhbabel.ac.id

Diajukan: 29/05/2025 Direvisi: 25/02/2026 Diterima: 13/04/2026

Abstrak

Penelitian ini bertujuan menganalisis tingkat polusi cahaya di Kota Pangkalpinang guna mendukung perencanaan infrastruktur berkelanjutan. Tahap awal penelitian meliputi identifikasi batas administrasi, pemetaan jaringan jalan, serta wawancara dengan pemangku kepentingan untuk memahami persepsi mengenai masalah over-lighting dan under-lighting. Data utama yang digunakan adalah citra satelit VIIRS Day/Night Band yang merekam radiansi cahaya buatan pada malam hari. Pemrosesan citra dilakukan untuk kalibrasi nilai radiansi, kemudian dilakukan klasifikasi zona polusi cahaya menggunakan pendekatan machine learning. Hasil klasifikasi dikonversi menjadi layer poligon dalam Google Earth Engine untuk analisis spasial. Temuan menunjukkan bahwa perkembangan perkotaan meningkatkan intensitas radiansi malam, terutama di area tertentu yang mengalami polusi cahaya tinggi. Integrasi data lapangan, citra satelit, dan machine learning meningkatkan akurasi analisis spasial. Penelitian ini memberikan dasar ilmiah bagi pemerintah daerah dalam merancang strategi pencahayaan kota yang lebih efisien, hemat energi, serta mengurangi dampak lingkungan dan kesehatan.

Kata kunci: Polusi Cahaya, Kecerdasan Buatan, Penginderaan Jauh, Infrastruktur, Keberlanjutan

Abstract

This research aims to analyze the level of light pollution in Pangkalpinang City to support sustainable infrastructure planning. The study began with preliminary activities including boundary identification, road network mapping, and stakeholder interviews to capture perceptions of over-lighting and under-lighting issues. The main dataset used was VIIRS Day/Night Band satellite imagery, which records artificial radiance at night. Image processing was conducted to calibrate radiance values, followed by classification of light pollution zones using a machine learning approach. The classification results were transformed into polygon layers in Google Earth Engine for spatial analysis. Findings show that urban development has increased nighttime radiance, particularly in areas with high levels of light pollution. The integration of field data, satellite imagery, and machine learning improved the accuracy of spatial analysis. This study provides a scientific basis for local government to design efficient urban lighting strategies, save energy, and mitigate environmental and health impacts.

Keywords: Light Pollution, Artificial Intelligence, Remote Sensing, Infrastructure, Sustainability

1. PENDAHULUAN

Kota Pangkalpinang sebagai pusat pemerintahan, perdagangan, dan aktivitas ekonomi di Provinsi Kepulauan Bangka Belitung mengalami peningkatan intensitas

cahaya buatan pada malam hari selama beberapa tahun terakhir. Pengamatan awal pada beberapa ruas jalan utama seperti Jalan Jenderal Sudirman, Jalan Ahmad Yani, dan kawasan Pangkalbalam menunjukkan adanya

titik-titik *over-lighting* yang menyebabkan silau berlebih, terutama pada lampu jalan dengan arah pancaran yang tidak terkontrol. Beberapa masyarakat juga melaporkan gangguan kenyamanan visual saat berkendara pada malam hari, sedangkan pelaku usaha di pusat kota menyoroti penggunaan lampu komersial yang cenderung berlebihan. Selain itu, hasil diskusi dengan Dinas Perhubungan dan Dinas Pekerjaan Umum menunjukkan adanya ketidaksesuaian intensitas lampu jalan pada beberapa koridor kota, termasuk area yang justru mengalami *under-lighting* sehingga membahayakan keselamatan lalu lintas. Temuan awal ini menunjukkan bahwa polusi cahaya merupakan isu nyata di Pangkalpinang dan tidak hanya berkaitan dengan pemborosan energi, tetapi juga berdampak pada keselamatan, kenyamanan, dan kualitas lingkungan malam hari. Fenomena ini sejalan dengan tren global, di mana kota-kota dengan pertumbuhan infrastruktur pesat mengalami peningkatan signifikan pada intensitas cahaya buatan. Polusi cahaya secara global telah terbukti memengaruhi kesehatan manusia, mengganggu ritme sirkadian, menurunkan kualitas langit malam, serta mengubah perilaku satwa malam. Dengan adanya dinamika serupa di Pangkalpinang—meskipun skala dan karakternya berbeda—kontekstualisasi lokal menjadi sangat penting untuk memahami bagaimana pembangunan kota, peningkatan aktivitas ekonomi, dan penggunaan energi mempengaruhi kondisi pencahayaan malam hari. Polusi cahaya semakin menjadi permasalahan global seiring dengan pesatnya urbanisasi dan pertumbuhan infrastruktur di perkotaan (Ye et al., 2024). Cahaya buatan yang berlebihan tidak hanya mengganggu pengamatan astronomi, tetapi juga berdampak pada kesehatan manusia, keseimbangan ekosistem, serta efisiensi energi (Perez Vega, 2024). Penelitian mengenai polusi cahaya di Indonesia umumnya dilakukan menggunakan metode manual seperti *Sky Quality Meter* (SQM), sebagaimana diterapkan oleh Putraga et al. (2023) dan Firdaus et al. (2022) dalam pemantauan kecerlangan langit di Medan dan Barus. Meskipun metode SQM mampu memberikan pengukuran intensitas cahaya dengan akurasi titik yang tinggi, pendekatan ini memiliki sejumlah keterbatasan ketika diterapkan pada wilayah perkotaan yang luas

dan heterogen seperti Kota Pangkalpinang. Pengukuran SQM hanya merepresentasikan kondisi pada titik-titik tertentu sehingga tidak dapat menggambarkan variasi spasial secara menyeluruh di seluruh kawasan kota. Selain itu, cakupan area Pangkalpinang yang meliputi pusat kota, pelabuhan, kawasan perdagangan, dan permukiman padat menuntut jumlah titik pengukuran yang sangat banyak untuk memperoleh gambaran yang representatif, yang pada praktiknya sulit dilakukan karena tuntutan waktu, biaya, serta keterbatasan akses lapangan pada malam hari. Kondisi tersebut menjadikan metode manual kurang efektif untuk menghasilkan peta polusi cahaya yang komprehensif. Oleh karena itu, penggunaan citra satelit VIIRS dengan cakupan luas dan resolusi temporal tinggi dipandang lebih sesuai untuk konteks Pangkalpinang. Integrasi VIIRS dengan algoritma *machine learning* memberikan keunggulan dalam mendeteksi pola spasial dan temporal polusi cahaya secara lebih efisien dan akurat dibanding pendekatan manual. Kota Pangkalpinang, sebagai pusat pemerintahan dan ekonomi di Provinsi Kepulauan Bangka Belitung, mengalami urbanisasi yang pesat, yang berkontribusi terhadap peningkatan intensitas cahaya buatan. Penggunaan pencahayaan buatan yang berlebihan, terutama di kawasan perkotaan, tidak hanya menyebabkan pemborosan energi, tetapi juga berdampak pada lingkungan dan kesehatan manusia (Sousa et al., 2024). Polusi cahaya dapat mengganggu ekosistem alami, menghambat pengamatan astronomi, serta berpotensi menyebabkan gangguan tidur dan masalah kesehatan lainnya bagi manusia (Rahmadhan et al., 2023; Navqi et al., 2024). Oleh karena itu, diperlukan kajian yang komprehensif untuk memahami tingkat polusi cahaya di Kota Pangkalpinang agar dapat merumuskan strategi pembangunan infrastruktur yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan. Dalam penelitian ini, pendekatan berbasis *machine learning* digunakan untuk menganalisis data satelit *Visible Infrared Imaging Radiometer Suite* (VIIRS) (Lebakula et al., 2024). Data VIIRS memungkinkan pemetaan distribusi polusi cahaya dengan cakupan area yang luas dan resolusi yang cukup tinggi (Gorniak et al., 2024). Dengan memanfaatkan teknik *machine learning*, pola intensitas cahaya dapat dianalisis

secara lebih akurat, sehingga dapat diketahui area yang mengalami pencemaran cahaya tertinggi serta faktor-faktor yang mempengaruhinya (Riza et al., 2022). Analisis ini juga akan memberikan wawasan terkait hubungan antara perkembangan infrastruktur, aktivitas ekonomi, dan intensitas pencahayaan di Kota Pangkalpinang.

Dengan memahami pola distribusi polusi cahaya, pemerintah daerah dapat merumuskan kebijakan yang lebih efektif dalam pengelolaan pencahayaan kota, seperti penggunaan lampu hemat energi, pengaturan intensitas pencahayaan di kawasan tertentu, serta pengembangan sistem penerangan yang lebih efisien (Lamphar, 2023). Urgensi penelitian ini sangat tinggi mengingat dampak negatif polusi cahaya yang terus meningkat. Salah satu alasan utama adalah perlunya dukungan terhadap konsep pembangunan berkelanjutan. Dengan meminimalkan dampak polusi cahaya, efisiensi energi dapat ditingkatkan dan keseimbangan ekosistem dapat terjaga (Jagerbrand et al., 2021). Selain itu, pemanfaatan teknologi canggih seperti *machine learning* dalam analisis data satelit dapat memberikan hasil yang lebih akurat dibandingkan metode konvensional (Pratama et al., 2025).

Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya memberikan wawasan baru dalam bidang lingkungan dan teknologi, tetapi juga dapat menjadi alat bantu dalam pengambilan keputusan bagi pemerintah daerah. Mitigasi polusi cahaya juga sangat penting untuk mengurangi konsumsi energi yang berlebihan serta dampak buruk terhadap lingkungan dan kesehatan manusia (Sahoo et al., 2024). Dengan adanya kajian yang berbasis data, kebijakan yang lebih tepat sasaran dapat diterapkan, seperti perencanaan pencahayaan kota yang lebih hemat energi dan berbasis kebutuhan (Sari et al., 2024; Wei et al., 2024). Studi ini juga memiliki relevansi yang tinggi terhadap perencanaan infrastruktur Kota Pangkalpinang, terutama dalam mengatur pencahayaan jalan, bangunan, dan ruang publik agar lebih efisien dan sesuai dengan prinsip pembangunan berkelanjutan. Dengan mengidentifikasi faktor-faktor yang mempengaruhi polusi cahaya berbasis *machine learning*, penelitian ini bertujuan untuk memberikan rekomendasi kebijakan terkait

perencanaan infrastruktur yang lebih berkelanjutan guna mengurangi dampak negatif polusi cahaya.

Penelitian Studi Polusi Cahaya di Kota Pangkalpinang Berbasis Machine Learning Menggunakan Data Satelit VIIRS untuk Perencanaan Pembangunan Infrastruktur Berkelanjutan menawarkan solusi inovatif dibandingkan penelitian sebelumnya. Berbeda dengan metode manual seperti *Sky Quality Meter* yang digunakan oleh Hariyadi Putranga et al. (2023) dalam analisis peningkatan polusi cahaya di Kota Medan, serta penelitian Muhammad Dimas Firdaus et al. (2022) yang meneliti dampak polusi cahaya di Barus, Sumatera Utara. Penelitian ini mengintegrasikan Machine Learning dengan data satelit VIIRS untuk analisis yang lebih akurat dan otomatis. Pendekatan ini memungkinkan prediksi tren polusi cahaya, sehingga dapat digunakan dalam perencanaan kota yang lebih strategis. Selain itu, penelitian ini memiliki cakupan yang lebih luas dibandingkan studi sebelumnya yang lebih fokus pada dampak polusi cahaya terhadap pengamatan astronomi, seperti yang dilakukan oleh Ahdian Azri Bustari et al. (2022) yang menganalisis polusi cahaya menggunakan peta *Light Pollution Map* di berbagai observatorium di Indonesia. Sebaliknya, penelitian ini juga mempertimbangkan dampak polusi cahaya terhadap pembangunan infrastruktur, efisiensi energi, dan kesehatan masyarakat. Dengan menggunakan analisis spasial, penelitian ini memungkinkan pemetaan polusi cahaya secara lebih rinci, sementara algoritma *Random Forest* membantu mengidentifikasi pola serta memprediksi perubahan polusi cahaya ke depan. Penelitian ini tidak hanya memahami kondisi polusi cahaya saat ini tetapi juga menawarkan solusi berbasis ilmiah untuk mengelola pencahayaan kota secara berkelanjutan, mendukung efisiensi energi, serta menjaga keseimbangan lingkungan di Kota Pangkalpinang.

2. METODOLOGI

Penelitian ini dilaksanakan melalui empat tahapan utama, yaitu persiapan lapangan, pemrosesan citra satelit, klasifikasi tingkat polusi cahaya, dan pemetaan polusi cahaya. Tahap persiapan lapangan meliputi studi awal wilayah penelitian untuk

mengidentifikasi karakteristik spasial dan aktivitas sumber cahaya, validasi visual kondisi lapangan, serta wawancara dengan *stakeholder* terkait guna memperoleh informasi pendukung mengenai penggunaan sistem penerangan dan potensi sumber polusi cahaya. Tahap ini bertujuan untuk memastikan kesesuaian antara kondisi faktual di lapangan dengan data spasial yang akan dianalisis. Tahap selanjutnya adalah pemrosesan citra satelit menggunakan data VIIRS *Day/Night Band* (DNB) yang meliputi proses koreksi radiometrik dan geometrik, pemotongan wilayah studi, normalisasi nilai intensitas cahaya, serta reduksi *noise* untuk meningkatkan kualitas data. Hasil tahap ini berupa citra malam hari yang siap digunakan pada proses klasifikasi. Tahap klasifikasi tingkat polusi cahaya dilakukan menggunakan pendekatan *machine learning* dengan mengelompokkan nilai intensitas cahaya ke dalam beberapa kelas tingkat polusi. Proses ini melibatkan penyusunan data latih, pelatihan model, serta pengujian akurasi untuk memastikan keandalan hasil klasifikasi. Tahap akhir adalah pemetaan polusi cahaya dengan mengonversi hasil klasifikasi ke dalam bentuk layer poligon untuk menghasilkan peta tematik sebaran polusi cahaya. Peta ini digunakan sebagai dasar analisis spasial dan perumusan rekomendasi pengelolaan pencahayaan wilayah.

Data utama dalam penelitian ini adalah citra satelit VIIRS *Day/Night Band* (DNB) yang diunduh melalui platform NOAA *Earth Observation Group* dengan resolusi spasial 500 meter dan resolusi temporal bulanan. Rentang waktu data yang digunakan mencakup periode Januari 2012 hingga Desember 2024, sehingga memungkinkan analisis temporal jangka panjang terhadap dinamika intensitas radiansi cahaya buatan di Kota Pangkalpinang. Variabel radiansi diekstraksi dalam satuan $nW/cm^2/sr$ sesuai standar pengolahan VIIRS.

Data pendukung meliputi batas administrasi Kota Pangkalpinang yang diperoleh dari RTRW Bappeda, jaringan jalan dari *Open Street Map*, serta dokumentasi foto udara malam hari sebagai validasi visual. Selain itu, pengumpulan data lapangan dilakukan melalui wawancara terstruktur dengan delapan pemangku kepentingan yang dipilih berdasarkan keterlibatan langsung dalam perencanaan dan pengelolaan

pencahayaan kota, yaitu perwakilan Dinas Pekerjaan Umum, Dinas Perhubungan, dua lurah dari wilayah padat penduduk, tiga pelaku usaha di pusat kota, serta dua perwakilan masyarakat. Wawancara difokuskan pada persepsi mengenai efektivitas pencahayaan, titik *over-lighting* dan *under-lighting*, serta kebutuhan teknis pencahayaan. Data wawancara dianalisis menggunakan pendekatan *thematic coding* untuk menarik pola isu yang relevan dan diintegrasikan dengan hasil analisis spasial citra.

2.2 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian terdiri atas tiga tahapan utama:

1. Pra-pemrosesan Citra (*Preprocessing*)

Tahap ini meliputi pemotongan citra (*clipping*) ke batas administratif Kota Pangkalpinang, koreksi radiometrik untuk memastikan konsistensi nilai radiansi, serta reproyeksi ke sistem koordinat nasional (EPSG: 4326). Seluruh proses dilakukan dalam *Google Earth Engine* (GEE).

2. Klasifikasi Zona Polusi Cahaya Berbasis *Machine Learning*

Klasifikasi dilakukan menggunakan algoritma *Random Forest*, dipilih karena kemampuannya menangani data non-linear dan heterogen. Algoritma *baseline* berupa *Linear Regression* turut digunakan sebagai pembanding. Parameter *Random Forest* ditentukan melalui proses *hyperparameter tuning*, terutama pada variabel jumlah pohon (*n_estimators*) dan kedalaman maksimum (*max_depth*). Validasi model dilakukan menggunakan skema *train-test* split 80:20 untuk memastikan replikasi yang konsisten.

Pemilihan algoritma lain seperti SVM atau *Neural Network* tidak diterapkan pada penelitian ini karena kompleksitas *computational* yang lebih tinggi dan kebutuhan interpretabilitas yang sesuai dengan karakteristik data VIIRS.

3. Pemetaan Spasial dan Konversi Layer Poligon

Hasil klasifikasi berupa raster intensitas polusi cahaya kemudian dikonversi menjadi layer poligon menggunakan JavaScript API di

dalam *Google Earth Engine*. Proses konversi meliputi transformasi *raster-to-vector* berdasarkan interval nilai radiansi yang telah ditentukan. Layer poligon selanjutnya diekspor dan dianalisis untuk menghasilkan zonasi polusi cahaya Kota Pangkalpinang.

2.3 Landasan Teori dan Kesesuaian Metode

Penelitian ini didasarkan pada teori polusi cahaya yang mengacu pada standar *International Dark-Sky Association* (IDA) dan *Commission Internationale de l'Éclairage* (CIE) yang menekankan pentingnya reduksi uplight, pengendalian arah cahaya, serta efisiensi pencahayaan. Data VIIRS digunakan karena kemampuannya mendeteksi radiansi cahaya buatan dengan stabil pada skala kota. Algoritma *Random Forest* dipilih karena sesuai untuk klasifikasi berbasis nilai radiansi yang memiliki distribusi non-linear, sementara citra VIIRS yang memiliki resolusi menengah lebih tepat dianalisis menggunakan pendekatan ensemble daripada model linier. Dengan demikian, metode yang diterapkan sesuai secara teoritis maupun teknis untuk mengidentifikasi zona polusi cahaya dan mendukung perencanaan infrastruktur berkelanjutan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Tahap awal penelitian dimulai dengan identifikasi batas wilayah administrasi Kota Pangkalpinang sebagai area studi, yang menjadi dasar dalam menentukan ruang lingkup analisis polusi cahaya. Proses ini dilanjutkan dengan studi awal terhadap dokumen Rencana Tata Ruang Wilayah (RTRW) serta kondisi jaringan jalan guna memastikan relevansi data dengan perencanaan tata kota. Informasi kualitatif juga dikumpulkan melalui wawancara dengan stakeholder terkait, seperti Dinas Pekerjaan Umum, Dinas Perhubungan, dan masyarakat setempat, guna memahami kebijakan, kendala teknis, serta persepsi terhadap pencahayaan kota. Sejalan dengan pengumpulan data lapangan, data satelit VIIRS *Day/Night Band* (DNB) multi-tahun diunduh sebagai sumber utama dalam analisis distribusi radiansi malam hari. Data tersebut kemudian diproses melalui tahap *clipping* sesuai batas administratif kota, dilanjutkan dengan koreksi radiometrik dan

geometrik untuk mengurangi distorsi nilai spektral dan spasial. Nilai radiansi dikalibrasi ke dalam satuan standar ($\text{nW/cm}^2/\text{sr}$) agar konsisten untuk analisis temporal maupun spasial. Selanjutnya, data direproyeksi ke dalam sistem koordinat nasional. Kombinasi antara data lapangan dan citra satelit yang telah terkoreksi menghasilkan basis data komprehensif, yang menjadi fondasi penting dalam tahap klasifikasi zona polusi cahaya pada penelitian ini.

```
var gaul2 = ee.FeatureCollection('FAO/GAUL/2015/level2')
  .filter(ee.Filter.stringContains('ADM1_NAME', 'Bangka')));-

var pangkalpinang = gaul2.filter(ee.Filter.or(
  ee.Filter.stringContains('ADM2_NAME', 'Pangkalpinang'),
  ee.Filter.stringContains('ADM2_NAME', 'Pangkal Pinang')
));

var roi = pangkalpinang.geometry();

Map.centerObject(roi, 11);
Map.addLayer(roi, {color: 'red'}, 'ROI Pangkalpinang');

// =====
// 2. DATASET VIIRS NTL (Monthly)
// =====
// Versi V1 tersedia sejak 2012
var viirs = ee.ImageCollection('NOAA/VIIRS/DNB/MONTHLY_V1/CMCFG')
  .select('avg_rad')
  .filterDate('2012-01-01', '2024-12-31');

// =====
// 3. TIME SERIES (MEAN ROI)
// =====
var ts = ui.Chart.image.series({
  imageCollection: viirs,
  region: roi,
  reducer: ee.Reducer.mean(),
  scale: 500,
  xProperty: 'system:time_start'
})
.setOptions({
  title: 'Time Series VIIRS avg_rad - Pangkalpinang',
  vAxis: {title: 'Nighttime Lights (avg_rad)'},
  hAxis: {title: 'Tahun'},
  lineWidth: 2,
  pointSize: 3
});
```

Gambar 1. Pengambilan Data Satelite

Gambar 1 menunjukkan kode yang merupakan skrip *Google Earth Engine* (GEE) yang digunakan untuk menampilkan analisis deret waktu (*time series*) cahaya malam berbasis dataset VIIRS *Nighttime Lights* (NTL) di wilayah Kota Pangkalpinang; tahap awal dilakukan pemanggilan data batas administratif Kabupaten/Kota dari *FeatureCollection* GAUL level 2 yang kemudian difilter untuk mendapatkan geometri ROI (*Region of Interest*) Pangkalpinang, selanjutnya dipanggil dataset VIIRS NTL bulanan (versi V1) dari periode Januari 2012 hingga Desember 2024 dengan variabel utama avg_rad, lalu dibuat visualisasi grafik deret waktu dengan menghitung nilai rata-rata cahaya malam dalam ROI menggunakan *Reducer.mean()* pada skala 500 meter, sehingga hasilnya berupa grafik interaktif yang menampilkan tren

intensitas cahaya malam dari tahun ke tahun sebagai indikator aktivitas perkotaan dan dinamika pembangunan di Kota Pangkalpinang.

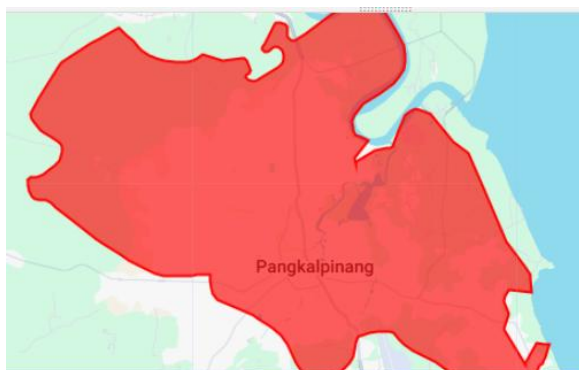
```
// =====
// 4. VISUALISASI PETA
// =====
// Contoh: rata-rata 2024
var viirs2024 = viirs.filterDate('2024-01-01', '2024-12-31').mean().clip(roj);
Map.addLayer(viirs2024, {min:0, max:50, palette:['000000','000033','202080','4080FF','FF7F50','FF7F50','FF0000']}, 'VIIRS 2024');

// =====
// 5. OPSIONAL: EKSPOR CSV
// =====
var byMonth = viirs.map(function(img){
  var mean = img.reduceRegion({
    reducer: ee.Reducer.mean(),
    geometry: roj,
    scale: 500,
    maxPixels: 1e13
  });
  return ee.Feature(null, {
    date: ee.Date(img.get('system:time_start')).format('YYYY-MM'),
    avg_rad: mean
  });
});

Export.table.toDrive({
  collection: byMonth,
  description: 'VIIRS_Pangkalpinang_2012_2024',
  fileNamePrefix: 'viirs_pangkalpinang_2012_2024',
  fileFormat: 'CSV'
});
```

Gambar 2. Proses Visualisasi Data

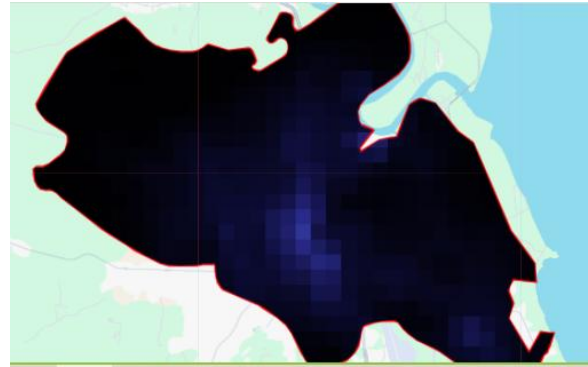
Gambar 2 merupakan kode yang digunakan untuk memvisualisasikan intensitas cahaya malam (*Nighttime Lights*) di Kota Pangkalpinang pada tahun 2024 sekaligus menyiapkan data deret waktu dalam format CSV untuk analisis lebih lanjut; pada bagian pertama, data VIIRS difilter untuk periode Januari–Desember 2024 kemudian dihitung rata-ratanya, dipotong sesuai batas ROI, dan ditampilkan di peta dengan skema warna gradasi dari hitam hingga merah untuk merepresentasikan tingkat kecerahan; pada bagian kedua, dilakukan iterasi per bulan untuk menghitung rata-rata nilai *avg_rad* dalam ROI dengan *reduceRegion*, lalu setiap hasil disimpan sebagai fitur beratribut tanggal dan nilai rata-rata, sehingga menghasilkan *FeatureCollection* yang dapat diekspor ke *Google Drive* sebagai file CSV berisi data bulanan intensitas cahaya malam di Pangkalpinang dari 2012 hingga 2024.



Gambar 3. Batas ROI Wilayah Pangkalpinang

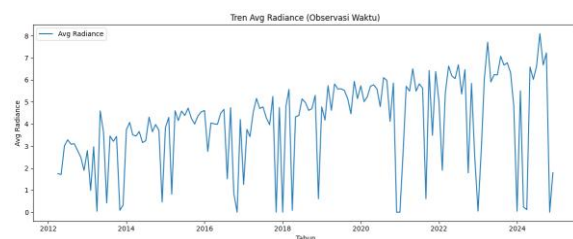
Gambar 3 menunjukkan representasi spasial wilayah administratif Kota Pangkalpinang, yang ditandai dengan poligon

berwarna merah. Kota Pangkalpinang terletak di bagian timur Pulau Bangka dan secara geografis berbatasan langsung dengan Laut Cina Selatan di sebelah timur. Batas wilayah pada peta ini menggambarkan cakupan keseluruhan Kota Pangkalpinang, yang mencakup area pusat kota hingga wilayah pinggiran.



Gambar 4. Peta VIIRS Pangkalpinang

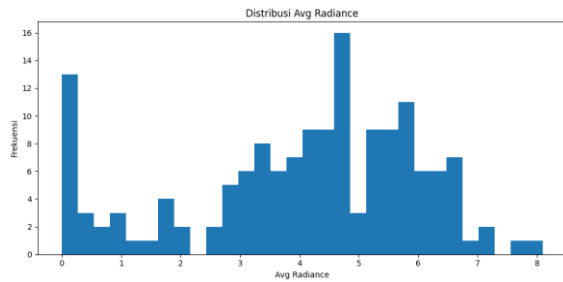
Gambar 4 menunjukkan representasi spasial wilayah administratif Kota Pangkalpinang yang dibatasi poligon merah, dengan visualisasi data raster berbasis piksel berwarna biru gelap hingga biru terang yang merepresentasikan variasi nilai spasial di dalam wilayah tersebut; perbedaan intensitas warna menunjukkan distribusi parameter yang tidak merata, di mana area lebih terang menandakan nilai yang relatif lebih tinggi, sehingga peta ini tidak hanya menampilkan batas administratif, tetapi juga memberikan gambaran awal mengenai pola distribusi data lingkungan yang dapat dianalisis lebih lanjut dalam kajian geospasial.



Gambar 5. Analisis Tren *Radiance*

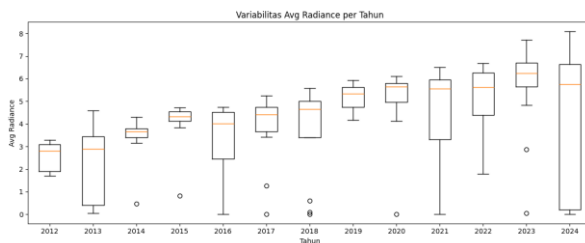
Analisis Tren Jangka Panjang (2012–2025) sebagai indikator intensitas cahaya buatan berdasarkan monitoring pada malam hari, Gambar 5 di atas menunjukkan tren pergerakan nilai rata-rata pancaran cahaya pada tahun 2012–2025. Meskipun dalam

kenyataannya, nilai deviasi aktual setiap tahun berubah, pola makro lebih mendukung kemiringan periode jangka panjang.



Gambar 6. Distribusi *Radiance*

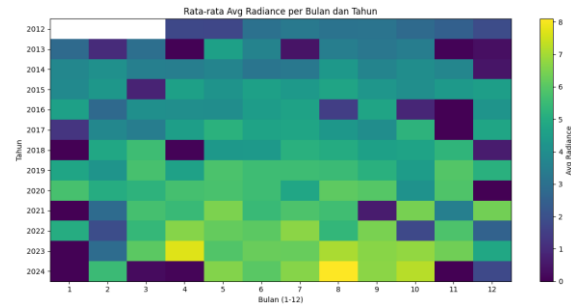
Gambar 6 menunjukkan histogram distribusi cahaya rata-rata, yang nilai-fit sekitar 0 hingga 8 nW/cm²/sr. Karena frekuensi-puncak di sekitar 5, kedua titik-titik distribusi menunjukkan bahwa nilai sedang adalah yang paling terkonsentrasi. Sebagian besar cahaya tersebut berasal dari kota, dan garis dan bangunan menjadi sumber cahaya urutan pertama. Daerah gelap, seperti berdampingan dengan kota, lahan hijau, lahan kosong, dan zona konservasi, memiliki frekuensi tinggi di sekitar nol.



Gambar 7. *Boxplot Radiance*

Secara umum, tren *radiance* cenderung meningkat dari tahun ke tahun, ditandai dengan kenaikan median dan sebaran data yang semakin lebar, khususnya setelah 2018 (Gambar 7). Pada periode awal (2012–2015), distribusi relatif stabil dengan rentang yang sempit, sedangkan mulai 2016 hingga 2024 terlihat peningkatan nilai median sekaligus variasi yang lebih besar, menandakan adanya intensifikasi sumber cahaya buatan. *Outlier* juga muncul pada beberapa tahun, seperti 2014, 2017, dan 2020, yang mengindikasikan adanya titik cahaya ekstrem di luar pola umum. Puncak variasi terlihat pada 2024 dengan rentang nilai yang sangat lebar, mencerminkan adanya peningkatan signifikan

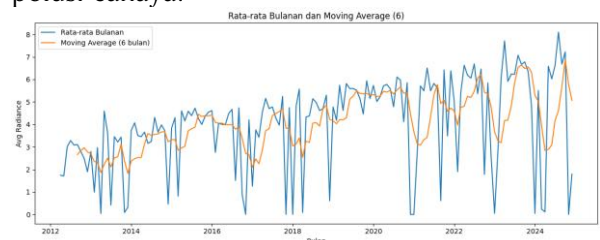
dalam intensitas dan ketidakmerataan polusi cahaya di wilayah penelitian.



Gambar 8. *Heatmap Radiance*

Gambar 8 adalah *Heatmap* yang menunjukkan variabilitas rata-rata intensitas radiance dalam perjalanan waktu bulanan dari Januari – Desember, tahun sejak 2012 hingga 2024. Pola warna yang kian cerah dari tahun ke tahun menunjukkan tren peningkatan cahaya buatan pada malam hari yang memiliki hubungan langsung dengan urbanisasi, pembesaran infrastruktur, serta aktivasi ekonomi di kawasan penelitian. Pada periode awal 2012-2014, intensitas *radiance comparative* rendah dan tersebar tidak merata di antar bulan.

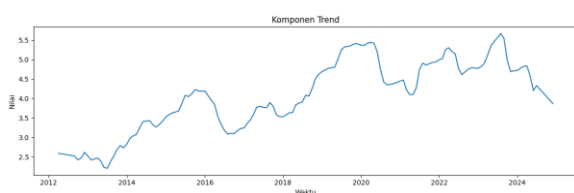
Heatmap bulan-tahun ini berkontribusi terhadap pemahaman polusi cahaya dari sudut pandang yang berbeda. Selain mencakup tren jangka panjang dilimpahi, tetapi juga menyoroti pola temporal musiman yang dapat bermanfaat untuk teknik sipil sambil mengoptimalkan strategi tata ruang, konservasi energi, dan pengendalian eksitasi buatan-buatan terkait lingkungan. Dengan kata lain, data *Radiance* akan menjadi alat yang berdaya guna untuk perencanaan perkotaan berkelanjutan, dalam hal ini terutama penerangan yang merata tanpa paparan ekspos polusi cahaya.



Gambar 9. *Heatmap Radiance*

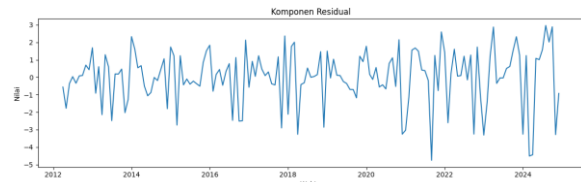
Gambar 9 merupakan grafik yang menampilkan rata-rata bulanan nilai *radiance* dari tahun 2012 hingga 2024 (garis biru)

dengan *smoothing* menggunakan *moving average* 10 bulan (garis oranye). Terlihat bahwa data bulanan memiliki fluktuasi cukup tajam dari waktu ke waktu, dengan puncak nilai radiance yang berulang hampir setiap tahun, mencerminkan variasi intensitas cahaya buatan. Garis *moving average* memperlihatkan tren umum yang cenderung meningkat secara bertahap dari awal periode hingga 2024, meskipun terdapat periode penurunan sementara pada beberapa tahun. Hal ini mengindikasikan bahwa secara jangka panjang, intensitas polusi cahaya di wilayah penelitian terus meningkat dengan pola musiman yang relatif konsisten.



Gambar 10. Trend Komponen *Radiance*

Gambar 10 menyajikan rata-rata *radiance* khusus setelah terpisah dari fluktuasi siklik musiman dan anomali antara 2012 dan 2025. Gambar tersebut memperlihatkan suatu ketegangan umum polusi cahaya yang berguna untuk memecahkan dinamika pembangunan infrastruktur dan kota. Selama 2012-2013, tren pada kisaran rendah 2,5-2,7 nW/cm²/sr dikaitkan dengan kondisi relatif buruk dari infrastruktur penerangan, yang memiliki dominasi kota pedesaan dan tingkat pencahayaannya yang kasar dan tidak merata. Selama 2014-2016, grafik menampilkan peningkatan yang jelas ke 4 nW/cm²/sr. *Upward spike* diinterpretasikan sebagai dampak perkembangan urbanisasi, termasuk pertumbuhan jaringan jalan, banyak permukiman, dan pusat ekonomi. Selama 2017 tren sedikit menurun, tapi pada 2018-2020 menampilkan peningkatan drastis ke 5 nW/cm²/sr. *Upwards* adalah hasil dari fase konsolidasi urbanisasi dengan luasnya infrastruktur kota, intensifikasi berbagai kegiatan ekonomi, dan peningkatan permintaan layanan energi pencahayaan.



Gambar 11. Komponen Residual

Bagian dari *radiance* yang bernilai variasi masih berada pada data setelah tren jangka panjang dan efek pola musiman tahunan dibagi (Gambar 11). Seperti yang dijelaskan di atas, angka ini akan menampilkan hal-basis fluktuasi acak yang mengejutkan dan tidak berguna, dengan beberapa variabilitas dari sekitar -5 dan +3. Komponen residu ini pula juga menandakan bahwa ada faktor eksternal yang memengaruhi pengendalian pemanfaatan cahaya buatan sementara. Dalam konteks teknik sipil, komponen ini spesial dikarenakan itu merasa melibatkan keadaan naluri sinyal tak terduga atau aral dalam infrastruktur penerangan.

```

=== Model Baseline ===
LinearRegression -> MAE: 1.9934 | RMSE: 2.7264 | R2: -0.0726

=== Tuning Random Forest ===
Params: {'max_depth': None, 'n_estimators': 100} -> R2: 0.2158, MAE: 1.9231, RMSE: 2.3312
Params: {'max_depth': None, 'n_estimators': 300} -> R2: 0.2187, MAE: 1.9514, RMSE: 2.3270
Params: {'max_depth': None, 'n_estimators': 500} -> R2: 0.2072, MAE: 1.9720, RMSE: 2.3440
Params: {'max_depth': 5, 'n_estimators': 100} -> R2: 0.1982, MAE: 1.9632, RMSE: 2.3573
Params: {'max_depth': 5, 'n_estimators': 300} -> R2: 0.1971, MAE: 2.0022, RMSE: 2.3589
Params: {'max_depth': 5, 'n_estimators': 500} -> R2: 0.2018, MAE: 1.9931, RMSE: 2.3520
Params: {'max_depth': 10, 'n_estimators': 100} -> R2: 0.2321, MAE: 1.8749, RMSE: 2.3069
Params: {'max_depth': 10, 'n_estimators': 300} -> R2: 0.2275, MAE: 1.9224, RMSE: 2.3138
Params: {'max_depth': 10, 'n_estimators': 500} -> R2: 0.2230, MAE: 1.9376, RMSE: 2.3205

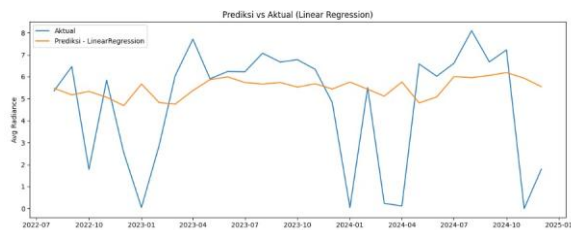
Best Params: {'max_depth': 10, 'n_estimators': 100}
Best R2: 0.23210626729501826
RandomForest (Best) -> MAE: 1.8749 | RMSE: 2.3069 | R2: 0.2321

```

Gambar 12. Pengujian Model *Machine Learning*

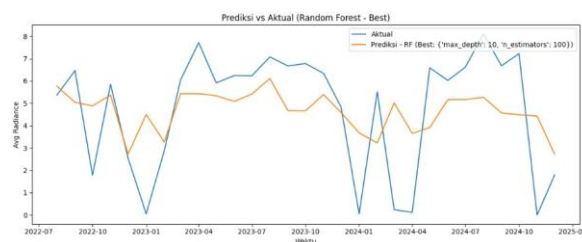
Gambar 12 menunjukkan hasil pengujian model bahwa regresi linear sebagai model *baseline* menghasilkan nilai MAE sebesar 1,9934, RMSE sebesar 2,7264, serta koefisien determinasi (R^2) negatif sebesar -0,0726, yang mengindikasikan bahwa model ini kurang mampu menjelaskan variabilitas data. Selanjutnya, dilakukan *tuning* pada algoritma *Random Forest* dengan variasi parameter jumlah estimator dan kedalaman maksimum pohon keputusan. Dari berbagai kombinasi, diperoleh performa terbaik pada konfigurasi $\text{max_depth} = 10$ dan $\text{n_estimators} = 100$, dengan nilai MAE 1,8749, RMSE 2,3069, serta peningkatan R^2 sebesar 0,2321. Hasil ini menunjukkan bahwa model *Random Forest* mampu memberikan peningkatan akurasi prediksi dibandingkan *baseline*,

meskipun nilai R^2 masih relatif rendah, yang mengindikasikan bahwa kompleksitas fenomena yang dimodelkan memerlukan pengembangan pendekatan lanjutan untuk memperoleh performa prediksi yang lebih optimal.



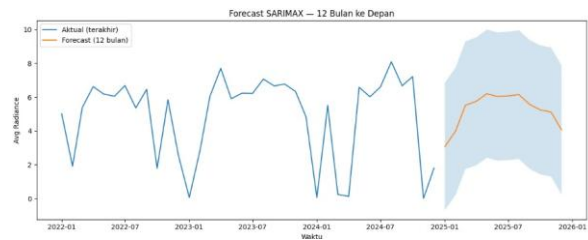
Gambar 13. Prediksi Regresi Linear

Gambar 13 menunjukkan hasil prediksi yang menggunakan model regresi linear menunjukkan keterbatasan dalam menangkap dinamika temporal radiansi malam hari. Grafik perbandingan antara nilai aktual dan prediksi mengindikasikan bahwa model cenderung menghasilkan pola yang stabil dan menghaluskan variasi, sehingga gagal merepresentasikan fluktuasi ekstrem yang nyata pada data lapangan.



Gambar 14. Prediksi *Random Forest*

Gambar 14 merupakan grafik yang menunjukkan perbandingan antara nilai aktual dan hasil prediksi *Random Forest* dengan parameter terbaik ($\text{max_depth} = 10$, $\text{n_estimators} = 100$) menunjukkan bahwa model mampu merepresentasikan pola umum dinamika radiansi malam hari secara lebih akurat dibandingkan regresi linear. Meskipun terdapat deviasi pada beberapa periode dengan fluktuasi ekstrem, kurva prediksi *Random Forest* tetap mengikuti tren utama data aktual, terutama pada periode pertengahan 2023 hingga pertengahan 2024.



Gambar 15. *Time Series Forecasting*

Dengan membandingkan hasil ramalan SARIMAX dengan model *machine learning* sebelumnya seperti *Linear Regression* dan *Random Forest* (Gambar 15), terlihat bahwa SARIMAX memiliki keunggulan dalam menangkap pola temporal serta fluktuasi musiman yang muncul pada data radiansi malam. Model ini tidak hanya memperhatikan hubungan linier antar variabel, tetapi juga memasukkan unsur keterkaitan waktu, sehingga mampu memberikan proyeksi yang lebih realistis terhadap dinamika polusi cahaya di masa mendatang. Meskipun ketidakpastian prediksi meningkat seiring bertambahnya horizon waktu, rentang interval kepercayaan yang dihasilkan tetap memberikan informasi penting bagi pengambil kebijakan mengenai potensi skenario terburuk dan terbaik yang mungkin terjadi. Dengan demikian, SARIMAX dapat diposisikan sebagai model pendukung dalam perencanaan jangka menengah hingga panjang, khususnya untuk merumuskan kebijakan pencahayaan kota yang adaptif, efisien energi, dan minim dampak terhadap lingkungan malam. Pendekatan ini melengkapi analisis berbasis *machine learning*, sehingga menghasilkan gambaran komprehensif mengenai kondisi aktual sekaligus arah perkembangan polusi cahaya di Kota Pangkalpinang.

4. KESIMPULAN

Hasil penelitian ini menggarisbawahi pentingnya penerapan prinsip rekayasa pencahayaan yang sesuai standar teknis, seperti SNI 7391:2008 dan rekomendasi *Illuminating Engineering Society* (IES). Penggunaan *model machine learning* terbukti mampu meningkatkan akurasi dalam mengidentifikasi pola spasial polusi cahaya dan memberikan dasar ilmiah untuk perencanaan tata kelola kota yang lebih adaptif. Temuan ini juga memberikan kontribusi nyata bagi upaya peningkatan keselamatan transportasi malam,

efisiensi penggunaan energi listrik, serta kualitas lingkungan perkotaan. Secara keseluruhan, penelitian ini menegaskan posisi keilmuan teknik sipil tidak hanya dalam pembangunan infrastruktur fisik, tetapi juga dalam pengelolaan infrastruktur berbasis data yang mendukung keberlanjutan. Hasilnya diharapkan dapat menjadi masukan strategis bagi pemerintah daerah dalam merumuskan kebijakan pencahayaan kota yang lebih efisien, ramah lingkungan, dan berorientasi pada kesejahteraan masyarakat.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Direktorat Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat, Direktorat Jenderal Riset dan Pengembangan, Kementerian Pendidikan Tinggi, Sains, dan Teknologi Republik Indonesia atas pendanaan yang diberikan pada Tahun 2025, sehingga penelitian ini dapat terlaksana dengan baik

DAFTAR PUSTAKA

- Bustari, A.A., Pratama, R.B. & Al-Aryachiyah, C.J. 2022. Analisis Tingkat Polusi Cahaya Berdasarkan Light Pollution Map dan Implikasinya terhadap Pengamatan Astronomi Indonesia. *KIST UIN SUKA*, 1(1), pp.45–58.
- Firdaus, M.D., Butar-Butar, A.J.R., Putraga, H. & Hidayat, M. 2022. Analisis Dampak Polusi Cahaya Lampu Artifisial Terhadap Kecelakaan Langit Malam Menggunakan Sky Quality Meter. *Elfalaky*, 6(2), pp.197–206.
- Górniak-Zimroz, J., Romańczukiewicz, K., Sitarska, M. & Szrek, A. 2024. Light-Pollution-Monitoring Method for Selected Environmental and Social Elements. *Remote Sensing*, 16(5).
- Jägerbrand, A.K. & Bouroussis, C.A. 2021. Ecological Impact of Artificial Light at Night: Effective Strategies and Measures to Deal with Protected Species and Habitats. *Sustainability*, 13(11).
- Lamphar, H. 2023. A Recommendation for Light Pollution Legislation in Mexican Cities: Protecting Human Health, Promoting Sustainable Practices, and Conserving Wildlife. *SSRN Electronic Journal*.
- Latifa, A. & Marsisno, W. 2024, November. Perbandingan Algoritma dan Pemetaan Total Suspended Solid di Kawasan Pesisir Indonesia Berdasarkan Data Penginderaan Jauh Berbasis Google Earth Engine. In *Seminar Nasional Official Statistics* (Vol. 2024, No. 1, pp.471-480).
- Lebakula, V., Datla, V., Wanik, D.W. & Cosby, A.G. 2024. Predicting County-Level Population From VIIRS Nighttime Light Imagery With Deep Learning. *IEEE Sensors Journal*, 24(8), pp.13477–13487.
- Naqvi, S.K.H., Soban, M., Arshad, F. & Bashir, F. 2024. Unveiling the Spatial Dimensions of Light Pollution in Pakistan: An Emerging Environmental Challenge. *Pakistan Journal of Humanities and Social Sciences*, 12(2), pp.1252–1263.
- Pérez Vega, C. 2024. The environmental impact of artificial lighting in urban settings: gaps, challenges, and sustainable lighting design.
- Prastyo, H.A. & Herdiwijaya, D. 2023. Analisis Dinamika Polusi Cahaya di Sekitar Observatorium Bosscha Berdasarkan Citra Satelit VIIRS-DNB. [Artikel].
- Pratama, Y.B., Dalimunthe, N.P. & Sukma, M. 2025. Prediksi Spasial Kerapatan Vegetasi Perkotaan dengan Pendekatan Algoritma Time Series Untuk Mendukung Pertumbuhan Ekonomi Hijau. *Journal of Information System Research*, 6(2), pp.1495–1507.
- Putraga, H., Raisal, A.Y., Firdaus, M.D. & Rakhmadi, A.J. 2023. Analisis Peningkatan Polusi Cahaya Berdasarkan Pembacaan SQM dan Citra Satelit VIIRS Tahun 2017–2022 di Kota Medan. *AL-AFAQ Jurnal Ilmu Falak dan Astronomi*, 5(1), pp.28–41.
- Rahmadhan, A.M., Marlina, A. & Mustaqimah, U. 2023. Konsep Penanggulangan Polusi Cahaya pada Observatorium Bintang di Kabupaten Karanganyar. *Senthong*, 6(3).
- Riza, L.S., Izzuddin, A., Utama, J.A., Samah, K.A.F.A., Herdiwijaya, D., Hidayat, T. et al. 2022. Data analysis techniques in light pollution: A survey and taxonomy. *New Astronomy Reviews*, 95, p.101663.
- Sahoo, S.K., Mohankumar, N., Manivannan, K.K., Sindhuja, K., Mouleeswaran, S.K.

- & Srinivasan, C. 2024. Enhanced Public Safety and Well-Being through IoT-Enabled Light Pollution Mitigation with Reinforcement Learning. In: 2024 Second International Conference on Intelligent Cyber Physical Systems and Internet of Things (ICoICI). pp.406–411.
- Sari, D.A.H., Rahayu, M.J. & Pujantiyo, B.S. 2024. Kajian kesesuaian penerapan konsep smart environment sebagai bagian dari smart city (Studi kasus: Kota Semarang). *Desa-Kota: Jurnal Perencanaan Wilayah, Kota, dan Permukiman*, 6(1), pp.154-170.
- Sousa, R. de, Bragança, L., da Silva, M.V. & Oliveira, R.S. 2024. Challenges and Solutions for Sustainable Food Systems: The Potential of Home Hydroponics. *Sustainability*, 16(2).
- Susanto, A.W. 2024. Analisis Keefektifan Pencapaian Buatan dalam Ruang Menggunakan Machine Learning (Studi Kasus Data Sensor Lingkungan dan Konsumsi Listrik Smart Building). *Jurnal Arsitektur ARCADE*, 8(1).
- Wei, Z., Nie, J. & Zhang, W. 2024. Intelligent lighting design of cloud computing platform based on digital twin historic landscape blocks—Take Yu Garden commercial street in Shanghai as an example. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, 36(7), p.e7975.
- Ye, Y., Tong, C., Dong, B., Huang, C., Bao, H. & Deng, J. 2024. Alleviate light pollution by recognizing urban night-time light control area based on computer vision techniques and remote sensing imagery. *Ecological Indicators*, 158, p.111591.