

Dampak Emisi PLTU Suralaya terhadap Konsentrasi PM_{2.5} di Jakarta Raya: Analisis Spasio-Temporal Berbasis Citra Satelit MODIS (2019-2022)

The Impact of Suralaya Power Plant Emissions on PM_{2.5} Concentrations in the Greater Jakarta Region: A Spatio-Temporal Analysis Utilizing MODIS Satellite Imagery (2019-2022)

Lalu Teguh Purnama Ramdhanu, Shada Salsabila dan *Lalu Muhamad Jaelani
Departemen Teknik Geomatika, Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan dan Kebumihan (FTSPK),
Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Kampus ITS, Surabaya, Jawa Timur, Indonesia

Article Info:

Received: 27 - 07 - 2023
Accepted: 25 - 10 - 2024
Published: 30 - 10 - 2024

Kata Kunci:

Citra Satelit,
Kualitas Udara,
MODIS,
PM_{2.5},
PLTU.

DOI:

[10.31315/imagi.v4i2.13765](https://doi.org/10.31315/imagi.v4i2.13765)



This article is licensed under a
[Creative Commons Attribution
4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Abstrak: Salah satu polutan udara yang menjadi perhatian utama adalah Particulate Matter 2.5 (PM_{2.5}), yang salah satunya bersumber dari pembakaran bahan bakar fosil, seperti pembangkit listrik tenaga uap (PLTU). Penelitian ini mengkaji dampak emisi PLTU Suralaya, yang berlokasi di Banten, terhadap konsentrasi PM_{2.5} di Jakarta Raya. Lokasi PLTU yang relatif dekat dengan Jakarta Raya menjadi dasar pemilihan objek studi ini. Penelitian ini memanfaatkan data citra satelit karena keunggulannya dalam hal cakupan wilayah, frekuensi pengamatan, dan efisiensi biaya operasional. Data satelit yang digunakan adalah Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) untuk menganalisis konsentrasi PM_{2.5} yang diperoleh dari Aerosol Optical Depth (AOD) melalui konversi menggunakan algoritma R. Li dkk. Hasil analisis menunjukkan bahwa tidak terdapat hubungan yang signifikan antara arah angin dengan konsentrasi PM_{2.5} di Jakarta Raya. Berdasarkan temuan ini, dapat disimpulkan bahwa PLTU Suralaya tidak terbukti secara signifikan mempengaruhi konsentrasi PM_{2.5} di Jakarta Raya.

Abstract: A major air pollutant of concern is Particulate Matter 2.5 (PM_{2.5}), which is generated in part by the combustion of fossil fuels in power plants. This study investigates the impact of emissions from the Suralaya coal-fired power plant, located in Banten, on PM_{2.5} concentrations in Greater Jakarta. The power plant's proximity to this densely populated area makes it a critical subject for examining the influence of industrial emissions on regional air quality. This study utilizes satellite imagery data due to its advantages in spatial coverage, observation frequency, and cost-effectiveness. Specifically, MODIS data is used to analyze PM_{2.5} concentrations. Aerosol Optical Depth (AOD) measurements from MODIS are converted to PM_{2.5} concentrations using the algorithm developed by R. Li et al. The analysis reveals no significant relationship between wind direction and PM_{2.5} concentrations in Greater Jakarta. Therefore, the study concludes that emissions from the Suralaya power plant do not have a statistically significant impact on PM_{2.5} concentrations in the study area.

How to Cite:

Ramdhanu, L. T. P., Salsabila, S., Jaelani, L. M. (2024). Dampak Emisi PLTU Suralaya terhadap Konsentrasi PM_{2.5} di Jakarta Raya: Analisis Spasio-Temporal Berbasis Citra Satelit MODIS (2019-2022). *Jurnal Ilmiah Geomatika*, 4(2), 90-101. <https://doi.org/10.31315/imagi.v4i2.13765>.

*Corresponding Author:

Email : lmjaelani@its.ac.id
Address : Jl. Teknik Kimia, Keputih, Kec. Sukolilo, Surabaya, Jawa Timur 60111

PENDAHULUAN

Salah satu tantangan lingkungan yang umum di pusat-pusat kota besar adalah masalah polusi udara. Polusi udara mengacu pada masuknya atau bercampurnya unsur-unsur yang berbahaya ke dalam atmosfer, yang dapat mengakibatkan degradasi lingkungan dan penurunan kualitas lingkungan berikutnya, yang pada akhirnya menyebabkan gangguan pada kesehatan manusia. Ada dua kategori utama sumber polusi udara: yang pertama meliputi polusi yang berasal dari sumber-sumber alami, seperti letusan gunung berapi, sedangkan yang kedua berasal dari aktivitas manusia, khususnya yang terkait dengan transportasi. Udara merupakan komponen penting untuk menopang kehidupan dan dapat memengaruhi kesehatan manusia, organisme hidup, dan elemen lingkungan lainnya secara signifikan. Seiring dengan terus meluasnya pembangunan perkotaan dan industrialisasi, kualitas udara telah mengalami perubahan yang signifikan (Soedomo, 2006). Kualitas udara menggambarkan keadaan atmosfer, meliputi komposisi gas atau partikulat tertentu, yang secara langsung berdampak pada kesehatan manusia. Evaluasi kualitas udara dilakukan dengan mengukur konsentrasi parameter polutan udara dan membandingkannya dengan standar kualitas udara ambien yang ditetapkan. Standar ini memberikan batasan yang jelas untuk berbagai polutan udara, yang berfungsi sebagai tolok ukur untuk menilai kualitas udara (WHO, 2023). Standar kualitas udara ambien merujuk pada batas atau konsentrasi polutan udara yang ditetapkan yang ada di lingkungan sekitar. Meskipun kerangka regulasi sering kali berfokus terutama pada penanganan polusi udara antropogenik (aktivitas manusia), sumber alami juga berkontribusi signifikan terhadap kontaminasi atmosfer. Faktanya, fenomena alam seperti letusan gunung berapi, kebakaran hutan, dan badai debu, dalam beberapa kasus, dapat menyebabkan tantangan kualitas udara utama yang sebanding atau bahkan melampaui tantangan yang berasal dari aktivitas manusia. (Godish, 2004)

Salah satu jenis penyebab rendahnya kualitas udara adalah polutan. Adapun salah satu jenis polutan yang dapat mempengaruhi kualitas udara adalah Partikulat. Materi partikulat mencakup berbagai macam polutan udara, termasuk partikel padat atau cair kecil yang menunjukkan variasi dalam ukuran dan komposisi kimia. Partikel-partikel ini dapat berasal dari sumber alami dan antropogenik. Sumber alami mencakup fenomena seperti garam laut, debu, asap, dan abu vulkanik. Sumber utama materi partikulat antropogenik, atau yang disebabkan oleh manusia, mencakup kegiatan industri, proses pembakaran, transportasi jalan, praktik pertanian, konstruksi, dan berbagai operasi penggilingan dan penghancuran. Di antara sumber-sumber ini, pembakaran bahan bakar (fosil) pada kendaraan bermotor dan pembangkit listrik diakui sebagai penyumbang paling signifikan terhadap partikel materi partikulat yang lebih kecil, khususnya partikel materi partikulat halus, yang diyakini menimbulkan risiko kesehatan potensial terbesar karena kemampuannya menembus jauh ke dalam sistem pernapasan manusia. (CEC, 1997). Salah satu jenis particulate adalah Particulate Matter_{2.5} (PM_{2.5}). PM_{2.5} adalah partikel udara halus yang berukuran lebih kecil dari atau sama dengan 2.5 μm yang dapat menimbulkan dampak negatif bagi kesehatan manusia dan lingkungan. PM_{2.5} dapat berasal dari berbagai sumber (WHO, 2006).

Pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) merupakan salah satu penyumbang dari polusi udara, termasuk PM_{2.5}. Pembangkit listrik tersebut menggunakan berbagai macam bahan bakar, dengan batu bara dan bahan bakar minyak sebagai sumber utamanya, terutama selama fase awal pengoperasian. Pembakaran bahan bakar ini di fasilitas tersebut menghasilkan gas buang dalam jumlah besar, terutama CO₂, yang dapat menyebabkan peningkatan kadar polutan di atmosfer sekitar (Hammada Abbas, 1976). Keunggulan utama pembangkit listrik berbahan bakar batu bara adalah kemampuannya untuk beroperasi terus-menerus selama pasokan bahan bakar tersedia, dan biaya investasi awal yang relatif rendah untuk konstruksi. Meskipun pembangkit ini memiliki waktu mulai yang cepat, biaya operasi yang terkait dengan bahan bakarnya bisa sangat tinggi. Namun, biaya pengembangan awal yang terjangkau memungkinkannya untuk memenuhi permintaan listrik yang mendesak di daerah-daerah terpencil (Nurmalita, 2012).

PLTU Suralaya diduga merupakan salah satu dari penyebab timbulnya PM_{2.5} di Jakarta Raya, hal ini dikarenakan PLTU ini menggunakan bahan bakar batubara. PLTU Suralaya adalah salah satu PLTU terbesar di Indonesia yang terletak di Kecamatan Pulo Merak, Kota Cilegon, Banten. PLTU ini memiliki kapasitas terpasang sebesar 4.025 megawatt (MW) dan beroperasi 20 sejak tahun 1984. PLTU Suralaya diduga menjadi salah satu penyumbang PM_{2.5} di wilayah sekitarnya, termasuk Jakarta Raya yang merupakan pusat aktivitas ekonomi, sosial, dan budaya di Indonesia. Jakarta Raya memiliki tingkat urbanisasi yang tinggi dan padat penduduk, sehingga rentan terhadap pencemaran udara. Menurut studi yang dilakukan oleh Centre for Research on Energy and Clean Air (CREA) pada tahun 2022, dikatakan bahwa polusi udara yang dihasilkan PLTU Suralaya di Provinsi Banten diduga berkontribusi pada ribuan angka kematian dan kerugian kesehatan hingga belasan triliun rupiah. Polusi udara dari PLTU Suralaya, mengandung partikel halus PM_{2.5}, nitrogen dioksida, sulfur dioksida dan ozon. Studi ini juga mencatat bahwa PLTU Suralaya menjadi salah satu penyumbang utama polusi udara di Jakarta dan sekitarnya (CREA, 2022).

Salah satu pendekatan untuk melacak perubahan kualitas udara adalah dengan melibatkan penggunaan citra satelit penginderaan jauh sebagai bagian dari upaya pemantauan lingkungan. Citra satelit penginderaan jauh menawarkan berbagai sensor yang dapat disesuaikan dengan kebutuhan khusus pemantauan lingkungan, dan menyediakan cakupan spasial dan temporal yang luas (Martin, R. V., 2008). Data satelit penginderaan jauh memiliki keunggulan dalam hal cakupan wilayah, frekuensi pengamatan, dan biaya operasional yang relatif rendah. Salah satu data satelit penginderaan jauh yang dapat digunakan untuk mengestimasi konsentrasi PM_{2.5} adalah data Moderate Resolution Imaging spectroradiometer (MODIS). MODIS adalah sensor kembar yang dibawa oleh dua satelit (Terra dan Aqua) yang mengorbit polar pada ketinggian 705 km. Satelit Terra mengorbit dari arah utara ke selatan dan akan melewati katulistiwa pada pagi hari (Jam 10:30), sementara Satelit Aqua mengorbit dengan arah sebaliknya (selatan ke utara) yang melewati katulistiwa pada jam 22:30 waktu lokal (Justice, 2006). Lebar cakupan area pada permukaan bumi setiap perekamannya sekitar 2330 Kilometer. Sensor Modis bekerja pada gelombang elektromagnetik mulai dari 0,4 mikrometer hingga 14,4 mikrometer yang direkam dengan menggunakan 36 kanal.

MODIS merupakan citra satelit hiperspektral generasi baru yang dapat digunakan untuk pengamatan daratan dan perairan. Citra satelit MODIS merupakan salah satu sensor yang dimiliki oleh Earth Observing System (EOS) dan dibawa oleh dua wahana yaitu Terra (diluncurkan 18 Desember 1999) dan Aqua (4 Mei 2002) (Darmawan, A., 2006). Data MODIS adalah data yang dikumpulkan oleh instrumen yang beroperasi pada satelit Terra dan Aqua. Pada penelitian ini akan digunakan kedua satelit tersebut, yaitu Terra dan Aqua, Satelit Terra/Aqua yang diluncurkan 18 Desember 1999 (Terra) dan 4 Mei 2002 (Aqua) merupakan misi National Aeronautics and Space Administration (NASA) terdiri dari beberapa instrumen seperti MODIS yang dapat mengobservasi fenomena-fenomena di darat, laut, dan atmosfer. Data MODIS dapat digunakan untuk studi berbagai disiplin ilmu, termasuk kesehatan vegetasi, perubahan tutupan dan penggunaan lahan, oseanografi, suhu permukaan laut, dan analisis awan (Pettorelli dkk., 2005).

Metode yang digunakan untuk mengetahui kandungan PM_{2.5} dalam penelitian ini adalah dengan melakukan konversi nilai PM_{2.5} dari nilai Aerosol Optical Depth (AOD) yang didapat dari citra MODIS. AOD adalah ukuran jumlah cahaya insiden yang dihamburkan atau diserap oleh partikel di udara. Secara formal, AOD adalah kuantitas tak berdimensi yang merepresentasikan integral dari produk konsentrasi jumlah partikel dan penampang lintang kepunahan partikel (yang memperhitungkan hamburan dan penyerapan partikel individual), pada lintasan panjang melalui atmosfer, biasanya diukur secara vertikal dari puncak atmosfer ke permukaan bumi. Nilai AOD yang lebih tinggi menunjukkan atmosfer yang lebih keruh atau lebih banyak aerosol di udara (Kahn, 2009). Model yang digunakan untuk konversi nilai AOD menjadi PM_{2.5} dalam penelitian ini adalah dengan menggunakan model konversi dari Li dkk.

(2015) yang melibatkan beberapa komponen penting untuk memastikan estimasi yang akurat tentang konsentrasi PM2.5 di permukaan menggunakan data satelit.

Platform yang bisa digunakan untuk mengakses data MODIS yaitu Google Earth Engine (GEE). GEE merupakan sebuah platform pemrosesan dan komputasi informasi geografis berbasis awan yang berbasis cloud (Gorelick dkk., 2017). GEE memungkinkan pengguna untuk mengakses set data penginderaan jauh satelit PB yang sudah matang dan memanfaatkan sumber daya komputasi berkinerja tinggi, sehingga tidak perlu mengunduh data citra penginderaan jauh dalam jumlah yang sangat banyak dan untuk pemrosesan citra yang rumit, dan telah digunakan secara luas dalam penelitian geosains global dan regional (Senay dkk., 2022). GEE adalah platform yang kuat untuk melihat dan menganalisis data MODIS. Platform ini menyediakan koleksi data MODIS yang luas, memungkinkan analisis skala planet, dan memfasilitasi pelacakan perubahan seperti suhu permukaan dan cakupan vegetasi. Selain itu, GEE dirancang untuk memudahkan akses dan analisis lebih dari 600 dataset penginderaan jarak jauh. Ini juga merupakan alat yang sangat mampu dalam memantau lingkungan dan melihat perubahan relief suatu daerah pada masa lalu. Terakhir, GEE telah memungkinkan untuk pertama kalinya untuk memproses dengan cepat dan akurat sejumlah besar data citra satelit.

METODE PENELITIAN

Wilayah yang digunakan dalam penelitian ini adalah Jakarta Raya, yang meliputi Provinsi DKI Jakarta (Jakarta Pusat, Jakarta Barat, Jakarta Selatan, Jakarta Timur, dan Jakarta Utara), Provinsi Jawa Barat (Kabupaten Bogor, Kota Bogor, Kabupaten Bekasi, Kota Bekasi, dan Kota Depok) dan Provinsi Banten (Kabupaten Tangerang, Kabupaten Tangerang Selatan dan Kota Tangerang). Wilayah ini dipilih karena merupakan pusat ekonomi terbesar di Indonesia dengan populasi penduduk yang tinggi.

Penelitian ini dilatarbelakangi tingginya konsentrasi PM2.5 di Jakarta Raya, yang berpotensi membahayakan kesehatan masyarakat. Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini dilakukan melalui pendekatan ilmiah yang sistematis dan komprehensif, meliputi dua tahapan persiapan dan pengolahan data. Tahap Persiapan: Tahap awal penelitian difokuskan pada identifikasi akar permasalahan dan pengumpulan data awal melalui studi literatur. Kajian literatur yang komprehensif memberikan landasan teoritis dan metodologis yang kuat, meliputi metode pengukuran, analisis data, serta penelitian-penelitian relevan sebelumnya. Terdapat 4 data utama yang digunakan, diantaranya: citra MODIS yang diperoleh dari GEE periode 2019-2022, data vektor batas administrasi Jakarta Raya dari Ina-Geoportal BIG, data vektor kawasan PLTU Suralaya, dan data arah angin dari BMKG Stasiun Serang. Tahap Pengolahan Data: Tahap selanjutnya adalah pengolahan data yang diperoleh dari data satelit [MCD19A2.061](https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/MODIS_061_MCD19A2_GRANULES) (https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/MODIS_061_MCD19A2_GRANULES: Terra & Aqua MAIAC Land Aerosol Optical Depth Daily 1 Km), yang merupakan produk data satelit MODIS yang menggabungkan data dari satelit Terra dan Aqua untuk menghasilkan data AOD di darat secara harian dengan resolusi 1 Km. Data satelit ini dipilih karena kemampuannya dalam mengukur Aerosol Optical Depth (AOD) dengan resolusi spasial menengah, sehingga memungkinkan analisis fenomena polusi udara secara lebih detail dan akurat. Data mentah yang diperoleh selanjutnya melalui proses filtering untuk menghilangkan noise atau gangguan, sehingga diperoleh data yang valid dan reliabel. Tahap berikutnya adalah konversi data AOD menjadi PM2.5 menggunakan rumus (1), yang kemudian dianalisis secara statistik untuk mengidentifikasi pola-pola spasial dan temporal dari konsentrasi PM2.5.

$$PM2.5 = 48,343 * AOD + 27,474$$

Dimana, PM2.5 adalah konsentrasi PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) dan AOD adalah nilai AOD (μm)

Model yang digunakan untuk konversi nilai AOD menjadi PM_{2,5} di atas diperoleh dari model konversi nilai dari R. Li dkk. (2015), dengan memanfaatkan AOD yang berasal dari data satelit.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Nilai AOD pada tabel 1 diperoleh dari data citra satelit MODIS tahun 2019–2022 di Jakarta Raya, dilakukan dengan cara mengumpulkan data harian, yang kemudian dirata-ratakan untuk menghasilkan data bulanan. Setelah itu, nilai yang diperoleh dikonversi dengan mengalikan faktor skala 0,001, yang diambil dari informasi skala (kuantifikasi) pada band satelit MODIS. Nilai AOD tertinggi pada tahun 2019 adalah pada bulan September dengan nilai 0,42, sedangkan yang terendah ada di bulan April serta Mei dengan 0,31. Nilai AOD tertinggi pada tahun 2020 adalah pada bulan Juni dengan nilai 0,32, sedangkan yang terendah ada di bulan Mei dengan nilai 0,20. Nilai AOD tertinggi pada tahun 2021 adalah pada bulan Mei dengan nilai 0,36, sedangkan yang terendah ada di bulan Februari dengan nilai 0,173. Nilai AOD tertinggi pada tahun 2022 adalah pada bulan April dengan nilai 0,35, sedangkan yang terendah ada di bulan Desember dengan nilai 0,13 μm .

Hasil Pemetaan AOD Bulanan

Pemetaan PM_{2.5} dilakukan dengan memanfaatkan hasil perhitungan menggunakan Raster Calculator di ArcGIS, dengan mengalikan Nilai AOD dengan rumus (1) yang telah diketahui sebelumnya. Nilai AOD diperoleh melalui proses ekstraksi dari citra satelit Terra & Aqua MAIAC Land Aerosol Optical Depth Daily 1km dengan sensor MODIS. Pengolahan dilakukan untuk tahun 2019 sampai dengan 2022. Proses pengolahan citra MODIS dilakukan dengan Google Earth Engine menggunakan fungsi median. Fungsi median digunakan untuk mengurangi nilai outlier pada data citra satelit. Selain itu nilai median dapat mengisi celah pada gambar berawan menggunakan metrik median. Pemetaan persebaran konsentrasi PM_{2.5} dilakukan secara bulanan. Berikut merupakan hasil pemetaan persebaran PM_{2.5} bulanan dan tahunan di Jakarta Raya.

Tabel 1
Nilai AOD (μm) pada Tahun 2019-2022 Jakarta Raya

Bulan	2019	2020	2021	2022
Januari	0,23	0,22	0,24	0,17
Februari	0,19	0,26	0,17	0,29
Maret	0,18	0,26	0,24	0,30
April	0,31	0,27	0,27	0,35
Mei	0,31	0,20	0,36	0,28
Juni	0,35	0,32	0,34	0,26
Juni	0,36	0,29	0,31	0,33
Agustus	0,40	0,24	0,31	0,29
September	0,42	0,29	0,27	0,32
Oktober	0,36	0,31	0,33	0,22
November	0,34	0,28	0,21	0,21
Desember	0,36	0,23	0,29	0,13

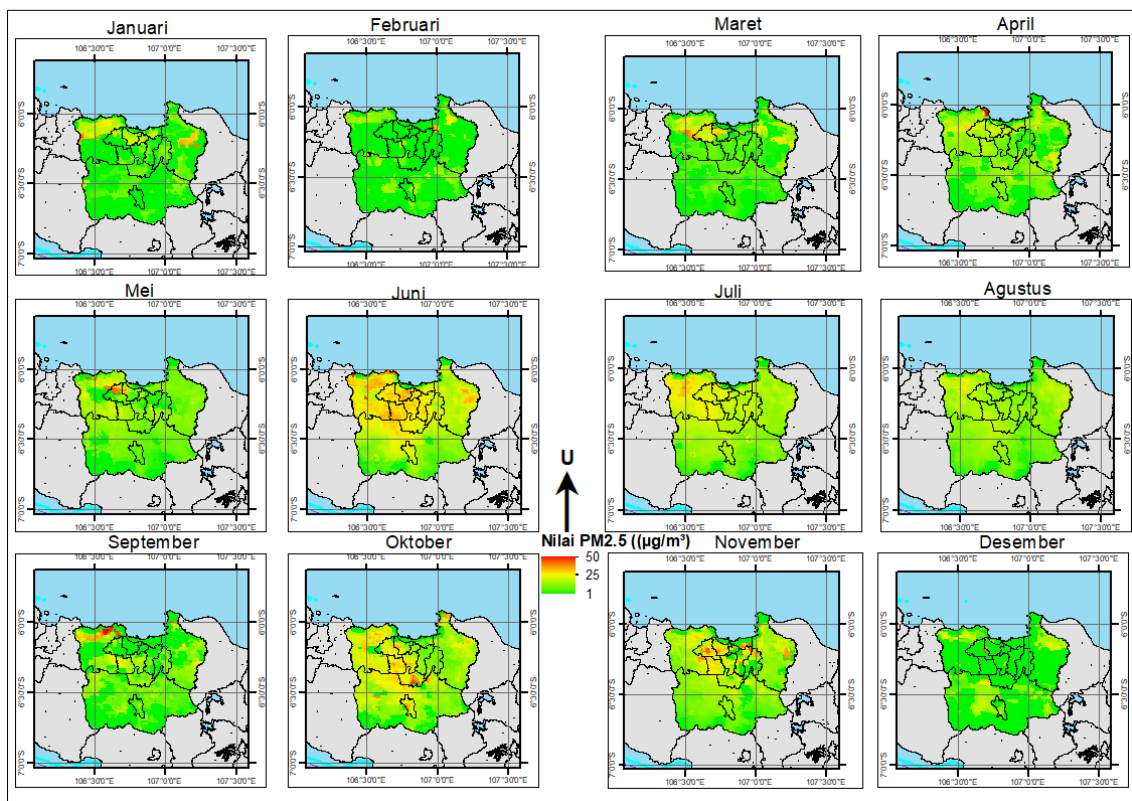
Sumber: Data Diolah

Pemetaan AOD Bulanan Tahun 2019

Gambar 1 memvisualisasikan nilai PM2.5 di Jakarta Raya pada bulan Januari sampai Desember untuk tahun 2019. Warna merah menggambarkan nilai PM2.5 yang tinggi, warna kuning untuk sedang, dan warna hijau menggambarkan nilai PM2.5 yang rendah. Pada peta terlihat bahwa PM2.5 di Jakarta Raya di Tangerang cenderung lebih tinggi dibandingkan dengan daerah lain, terutama pada bulan Juni, Juli serta Oktober. Sedangkan daerah yang paling rendah persebarannya adalah daerah lain di provinsi Banten di mana hampir setiap bulan persebarannya rendah. Sedangkan di provinsi DKI Jakarta persebarannya terlihat dalam rentang sedang, kecuali pada bulan Juni, serta Oktober, di mana persebarannya berada di rentang tinggi, adapun di bulan Juni persebarannya tergolong tinggi.

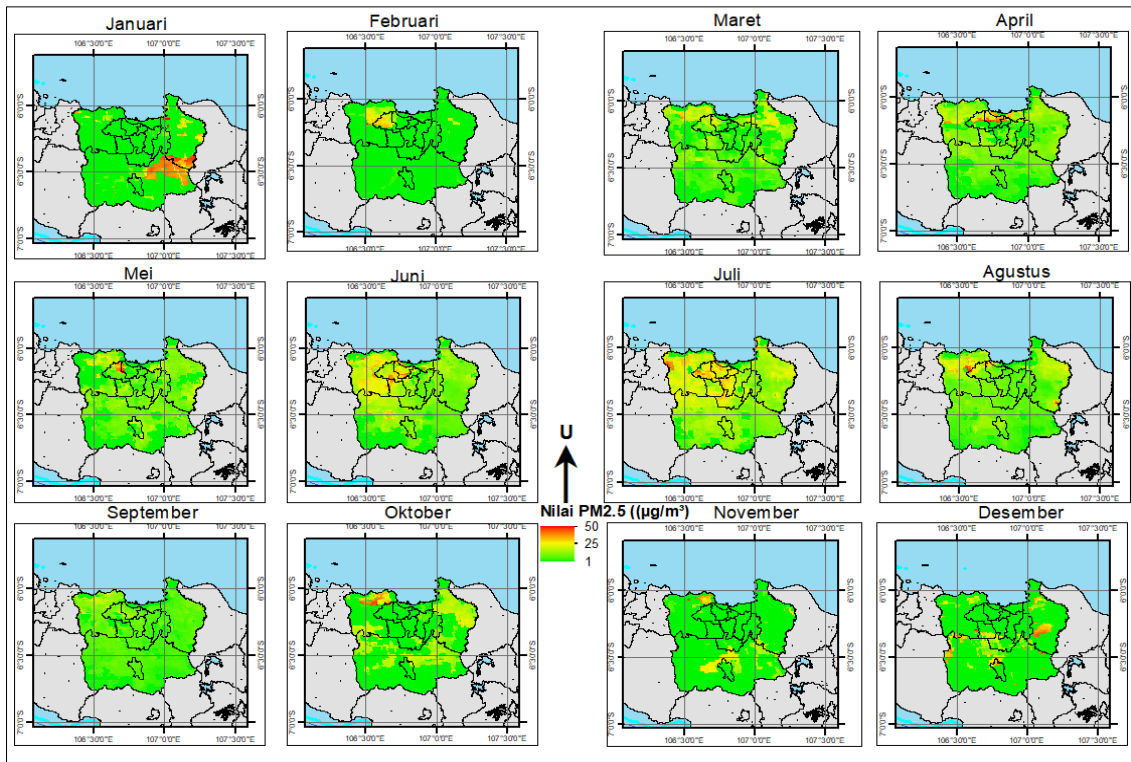
Pemetaan AOD Bulanan Tahun 2020

Gambar 2 memvisualisasikan nilai PM2.5 di Jakarta Raya pada bulan Januari sampai Desember untuk tahun 2020. Warna merah menggambarkan nilai PM2.5 yang tinggi, warna kuning untuk sedang, dan warna hijau menggambarkan nilai PM2.5 yang rendah. Pada peta terlihat bahwa PM2.5 di Jakarta Raya di Tangerang cenderung lebih tinggi dibandingkan dengan daerah lain, terutama pada bulan Juni, serta Juli. Sedangkan daerah yang paling rendah persebarannya adalah daerah lain di provinsi Banten di mana hampir setiap bulan persebarannya rendah. Kecuali pada bulan Januari, di mana pada bulan tersebut persebarannya jauh lebih tinggi dibandingkan dengan bulan lainnya. Sedangkan di provinsi DKI Jakarta persebarannya terlihat dalam rentang sedang, kecuali pada bulan Januari, Februari, serta November, di mana persebarannya berada di rentang rendah, adapun di bulan Juli persebarannya tergolong tinggi, serta pada bulan Januari dan November tergolong rendah.

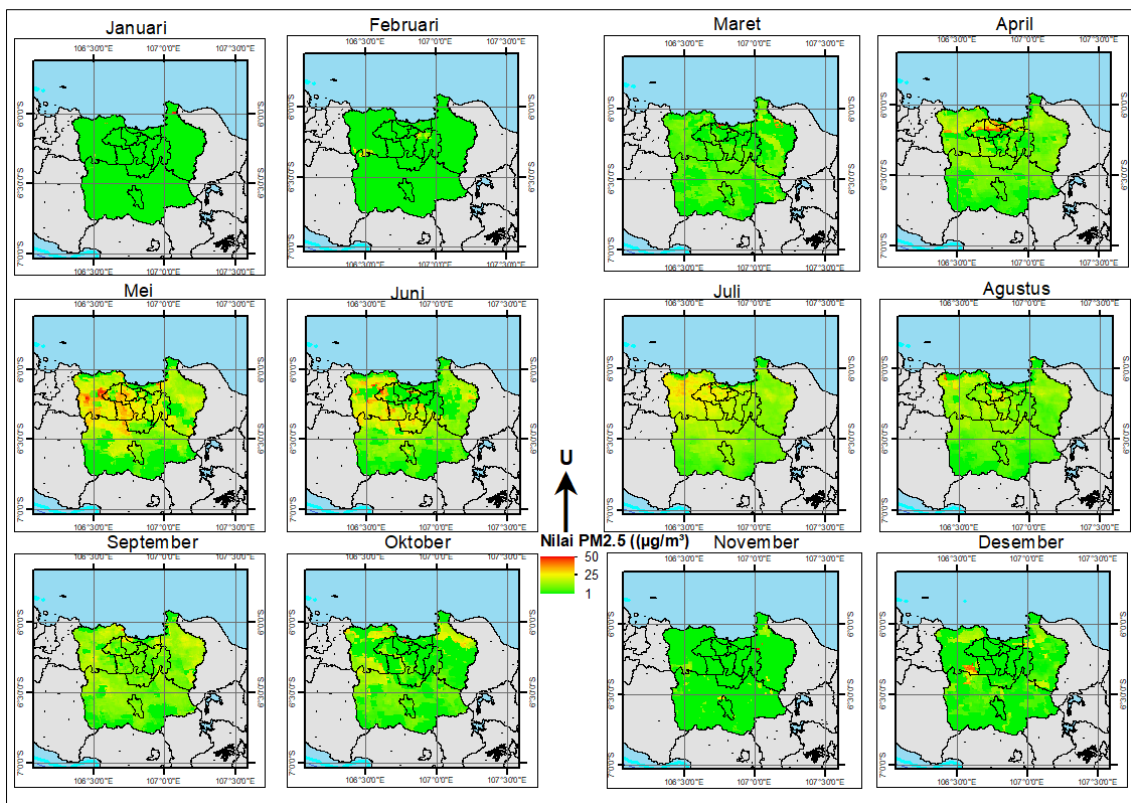


Gambar 1. Persebaran Nilai PM2.5 Bulanan Tahun 2019

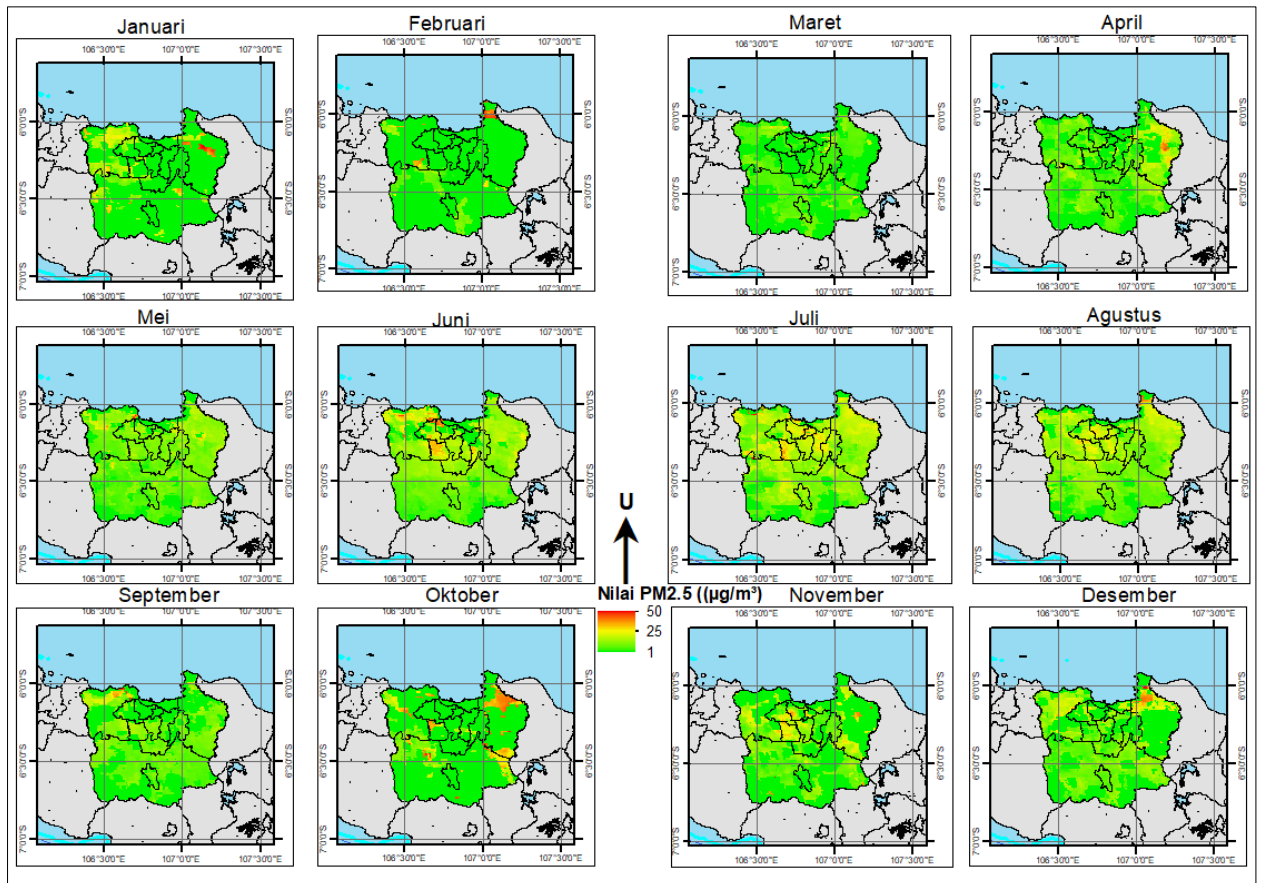
Sumber: Data Diolah



Gambar 2. Persebaran Nilai PM2.5 Bulanan Tahun 2020
Sumber: Data Diolah



Gambar 3. Persebaran Nilai PM2.5 Bulanan Tahun 2021
Sumber: Data Diolah



Gambar 4. Persebaran Nilai PM2.5 Bulanan Tahun 2022
Sumber: Data Diolah

Pemetaan AOD Bulanan Tahun 2021

Gambar 3 memvisualisasikan nilai PM2.5 di Jakarta Raya pada bulan Januari sampai Desember untuk tahun 2021. Warna merah menggambarkan Nilai PM2.5 yang tinggi, warna kuning untuk sedang, dan warna hijau menggambarkan nilai PM2.5 yang rendah. Jakarta Raya memiliki nilai PM2.5. Pada peta terlihat bahwa PM2.5 di Jakarta Raya di Tangerang cenderung tinggi dibandingkan dengan daerah lain, terutama pada bulan Mei, Juni, serta Juli, adapun di bulan Januari, Februari, Maret serta November persebarannya tergolong rendah. Sedangkan daerah lain di provinsi Banten persebarannya tergolong rendah di hampir setiap bulannya. Sedangkan di provinsi DKI Jakarta persebarannya terlihat dalam rentang sedang, adapun di bulan Mei persebarannya tergolong tinggi, serta pada bulan Januari, Februari, Maret serta November tergolong rendah.

Pemetaan AOD Bulanan Tahun 2022

Gambar 4 memvisualisasikan nilai PM2.5 di Jakarta Raya pada bulan Januari sampai Desember untuk tahun 2022. Warna merah menggambarkan Nilai PM2.5 yang tinggi, warna kuning untuk sedang, dan warna hijau menggambarkan nilai PM2.5 yang rendah. Pada peta terlihat bahwa PM2.5 di Jakarta Raya di Bekasi cenderung lebih tinggi dibandingkan dengan daerah lain, namun di bulan Januari, Februari serta Maret berada di rentang rendah. Sedangkan daerah yang paling rendah persebarannya adalah provinsi Banten di mana hampir setiap bulan persebarannya rendah, kecuali pada bulan Juli dan Agustus berada di rentang sedang. Sedangkan di Provinsi DKI Jakarta persebarannya terlihat dalam rentang sedang di setiap bulannya, kecuali pada bulan Januari, Februari, Maret yang berada di rentang rendah.

Arah Angin Rata-rata bulanan 2019-2022

Data arah angin yang digunakan dalam penelitian ini adalah dengan menggunakan arah angin dari BMKG stasiun serang. Data arah angin dari Stasiun BMKG Serang dapat digunakan sebagai acuan awal untuk mempekirakan arah polusi dari PLTU Suralaya ke Jakarta Raya. Dalam konteks meteorologi, arah angin dapat diklasifikasikan ke dalam 16 arah atau penjurur mata angin. Klasifikasi ini meliputi Utara (360°), Utara Timur Laut (22,5°), Timur Laut (45°), Timur Timur Laut (67,5°), Timur (90°), Timur Tenggara (112,5°), Tenggara (135°), Selatan Tenggara (157,5°), Selatan (180°), Selatan Barat Daya (202,5°), Barat Daya (225°), Barat Barat Daya (247,5°), Barat (270°), Barat Barat Laut (292,5°), Barat Laut (315°), dan Utara Barat Laut (337,5°). Pembagian ini memungkinkan analisis yang lebih terperinci dan akurat mengenai arah angin dalam berbagai aplikasi ilmiah dan praktis. Penentuan polusi udara yang bersumber dari PLTU Suralaya yang menuju ke arah Jakarta Raya adalah ketika arah angin berada pada rentang 100° sampai 140° atau dari Timur Laut sampai Barat Daya.

Arah angin yang ada pada tabel di dapatkan dari pantauan arah angin di Stasiun Serang yang ada di Banten, stasiun ini berjarak dekat dengan lokasi PLTU Suralaya dan daerah Jakarta Raya, hal ini kemudian dapat digunakan sebagai acuan dalam menentukan hubungan antara polusi udara dari PLTU suralaya dengan PM2.5 yang ada di Jakarta Raya. Angin timur merupakan angin yang bertiup dari arah timur menuju barat, Sedangkan angin barat merupakan angin yang bertiup dari arah barat menuju timur. Angin Barat pada tabel berarti arah tersebut ada dalam rentang 100° sampai 140°, yang menandakan bahwa polusi udara dari PLTU Suralaya terbang ke arah Jakarta Raya. Sedangkan angin Timur berada di rentang 141° sampai 99°, yang menandakan bahwa polusi udara pada PLTU Suralaya tidak terbang ke Jakarta Raya.

Tabel 2
Arah Angin Bulanan 2019-2022

Bulan	2019	2020	2021	2022
Januari	234°	225°	243°	113°
Februari	199°	185°	201°	66°
Maret	218°	196°	189°	55°
April	131°	161°	170°	52°
Mei	90°	156°	48°	52°
Juni	155°	144°	41°	48°
Juni	61°	95°	144°	12°
Agustus	125°	99°	113°	38°
September	113°	93°	93°	166°
Oktober	132°	196°	106°	167°
November	183°	168°	130°	67°
Desember	170°	248°	125°	52°

Keterangan : = Angin Timur = Angin Barat

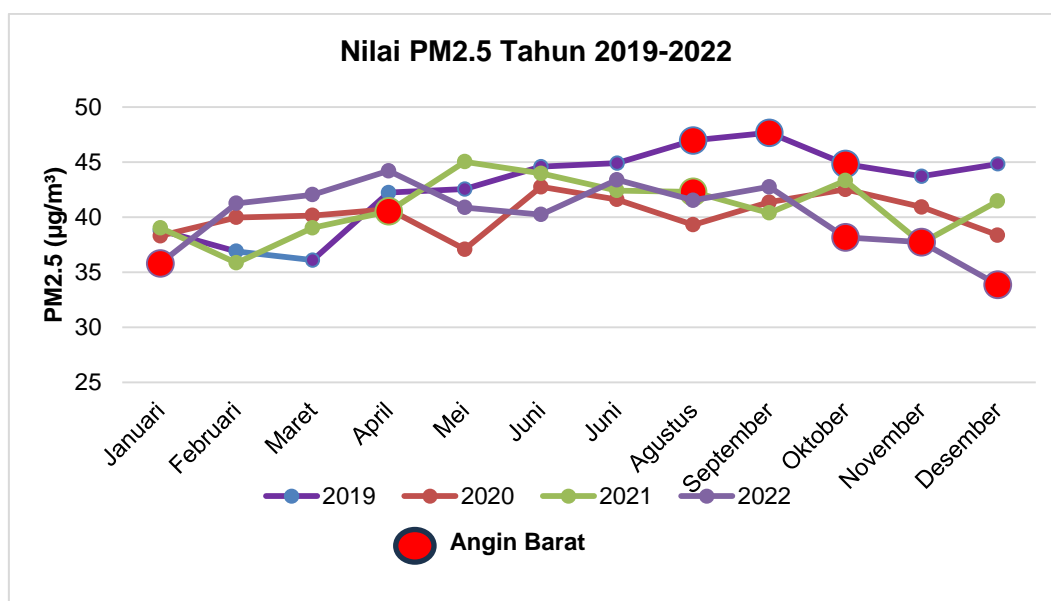
Sumber: Data Diolah

Tabel 3
Nilai PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) Tahun 2019-2022

Bulan	2019	2020	2021	2022
Januari	38,79	38,3	39,0	35,8
Februari	36,9	40,0	35,8	41,3
Maret	36,1	40,1	39,0	42,0
April	42,2	40,7	40,5	44,2
Mei	42,6	37,1	45,0	40,9
Juni	44,6	42,8	44,0	40,2
Juni	44,9	41,6	42,4	43,4
Agustus	47,0	39,3	42,3	41,5
September	47,7	41,3	40,4	42,8
Oktober	44,8	42,5	43,3	38,2
November	43,7	40,9	37,6	37,7
Desember	44,8	38,4	41,4	33,9

Keterangan: = Angin Timur = Angin Barat

Sumber: Data Diolah



Gambar 5. Grafik Nilai PM2.5 Tahun 2019-2022

Sumber: Data Diolah

Nilai PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) Tahun 2019-2022

Berdasarkan tabel 3 nilai PM2.5 tersebut dapat dilihat Nilai PM2.5 di Jakarta Raya berada pada rentang sedang, yakni pada kisaran 33,9 – 47,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. hal ini berarti Kualitas udara di Jakarta Raya tidak ideal, namun tidak berbahaya bagi kebanyakan orang. Sedangkan pola konsentrasi PM2.5 bulanan di Jakarta Raya menunjukkan tren yang bervariasi setiap tahunnya. Puncak konsentrasi PM2.5 tertinggi secara berturut-turut terjadi pada bulan September 2019, Februari 2020, Mei 2021, dan Maret 2022. Di sisi lain, konsentrasi PM2.5 terendah tercatat pada bulan April 2019, Mei 2020, Februari 2021, dan Desember 2022. jika dilihat arah anginnya diketahui bahwa arah angin didominasi oleh angin timur, yaitu angin yang bergerak dari timur ke barat. Pada tabel terlihat hubungan antara arah angin dengan Nilai PM2.5 di Jakarta Raya, di mana

dapat diketahui bahwa tidak ada hubungan antara Arah angin dengan nilai PM2.5 di Jakarta Raya. Hal tersebut didasarkan bahwa ketika angin barat terjadi nilai PM2.5 di Jakarta Raya tidak mengalami penurunan sama sekali. Pada angin barat nilai PM2.5 justru lebih besar daripada angin timur, hal ini dapat dilihat pada bulan Juni dan Agustus di mana nilai PM2.5 pada angin barat jauh lebih besar daripada pada angin timur.

SIMPULAN

Nilai AOD dari data citra satelit MODIS tahun 2019–2022 di Jakarta Raya ditentukan dengan cara mengumpulkan data harian, yang kemudian dirata-ratakan untuk menghasilkan data bulanan. Setelah itu, nilai yang diperoleh dikonversi dengan mengalikan faktor skala 0,001, yang diambil dari informasi skala pada band satelit MODIS. Untuk mengonversi Nilai AOD menjadi nilai PM2.5 digunakan konversi dari R. Li dkk. (2015), yang melibatkan beberapa komponen penting untuk memastikan estimasi konsentrasi PM2.5 di permukaan yang akurat menggunakan data satelit. Secara keseluruhan, peta menunjukkan bahwa persebaran PM2.5 di daerah Tangerang cenderung lebih tinggi dibandingkan dengan daerah yang masuk di wilayah lain di Provinsi Banten dan Provinsi DKI Jakarta. Dengan tidak terdapatnya hubungan yang signifikan antara arah angin dengan nilai PM2.5 di Jakarta Raya, serta tabel dan grafik terkait memperlihatkan bahwa tidak semua angin barat (yang membawa polutan dari PLTU Suralaya) mempunyai nilai PM2.5 lebih besar dari angin timur, dapat disimpulkan bahwa PLTU Suralaya tidak berperan langsung terhadap keberadaan PM2.5 yang ada di Jakarta Raya.

DAFTAR PUSTAKA

- Adisasmitha, M., Nurcahyo, A., & Kusuma, H. (2018). *Pengenalan Penginderaan Jauh*. Penerbit Andi
- CEC. (1997). *Continental Pollutant Pathways*. Quebec, Canada COMMISSION FOR ENVIRONMENTAL COOPERATION.
- Dicky, M. (2013). Penggunaan Data Citra Satelit MODIS untuk Pemantauan Perubahan Penggunaan Lahan di Daerah Aliran Sungai Citarik, Sukabumi. *Jurnal Sumber Daya Alam dan Lingkungan*, 1(1), 1-10.
- Danoedoro, P. (2010). *Penginderaan Jauh: Dasar-Dasar dan Penerapannya*. ITB Press.
- Fordiasiko, A. H., & Soedarto, T. (2002). Pengaruh Pencemaran Udara Terhadap Kesehatan Paru. *Jurnal Kedokteran Indonesia*, 52(11), 537-542.
- Lodovici, M., & Bigagli, E. (2011). Oxidative stress and air pollution exposure. *Journal of toxicology*, 2011, 487074. <https://doi.org/10.1155/2011/487074>.
- Godish, T. (2004). *Air Quality 4th Edition*. CRC Press LLC.
- Hartono. (2021), Emisi Gas Rumah Kaca PLTU Suralaya dan Dampaknya pada Perubahan Iklim. *Jurnal Lingkungan dan Keberlanjutan*, 10(2), 22-32
- Justice, C. O., Holben, B. N., & Townshend, J. R. G. (2006). MODIS: A New Era in Earth Observations from Space. *Remote Sensing of Environment*, 103(1), 1-6.
- Kahn, R. A. (2009). A Review of Methods for Aerosol Optical Depth Determination. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2(1), 1-27.

- Kazadzis, S. (2017). *Aerosol optical depth from satellite measurements. In Remote Sensing of Aerosols, Clouds, and Precipitation*. CRC Press.
- Kusuma, H. (2008). Pemetaan Perubahan Penggunaan Lahan di Kabupaten Jember Menggunakan Data Satelit MODIS. *Jurnal Bumi Lestari*, 8(2), 99-106.
- Mutanga, P., Ndlovu, N., & Mbohwa, C. (2019). *A Review of Google Earth Engine as a Platform for Earth Observation. Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 11, 100166.
- M. Soedomo, (2006). *Pencemaran Udara dan pengendaliannya*. PT Gramedia Pustaka Utama.
- Matharaarachchi, H. S., & Dassanayake, D. S. (2016). Remote Sensing for Air Quality Monitoring: A Review of Approaches and Applications. *Atmospheric Environment*, 142, 406-424.
- Martin, R. V. (2008). Satellite Remote Sensing of Surface Air Quality: Aerosol Optical Depth and PM2.5. *Remote Sensing of Environment*, 112(10), 3423-3434.
- Pemerintah Republik Indonesia. (2021). Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup.
- Li, R., Gong, J., Chen, L., & Wang, Z. (2015). Estimating Ground-level PM2.5 Using Fineresolution Satellite Data in the Megacity of Beijing, China. *Aerosol and Air Quality Research*, 15(4), 1347-1356
- Senay, S., Funk, C., Pape, J., Verdin, A., Egorov, S., Sienkiewicz, J., ... & Sheffield, (2022). *Global Surface Water Extent and Variability in the 21st Century*. Nature Communications