

MODEL GEOGRAPHICALLY-TEMPORALLY WEIGHTED REGRESSION PADA PENCEMARAN UDARA KONSENTRASI KARBON MONOKSIDA DI WILAYAH BOGOR

Julia Maulida Muslimah Julfikar¹, Tabah Heri Setiawan²

^{1,2} Prodi Matematika, Universitas Pamulang, Banten

Email: juliamaau30@gmail.com, tabah.ibnubara@gmail.com

HP: +087886543065

ABSTRAK: Pencemaran udara akibat emisi kendaraan bermotor dan aktivitas industri menjadi salah satu permasalahan serius di wilayah perkotaan, termasuk Kota dan Kabupaten Bogor. Penelitian ini bertujuan untuk memodelkan konsentrasi karbon monoksida (CO) dengan metode Geographically-Temporally Weighted Regression (GTWR) menggunakan pembobot Gaussian, serta menganalisis pengaruh variabel meteorologis terhadap sebaran konsentrasi CO. Data diperoleh dari Stasiun Klimatologi Jawa Barat (Kota Bogor) dan Stasiun Meteorologi Citeko (Kabupaten Bogor) selama periode 12 bulan, dengan variabel prediktor berupa suhu udara (X_1), kelembapan udara (X_2), kecepatan angin (X_3), dan arah angin (X_4). Hasil penelitian menunjukkan bahwa model GTWR memiliki kinerja lebih baik dibandingkan regresi linier berganda, dengan nilai R^2 meningkat dari 0,223 menjadi 0,3108 dan MSE menurun dari 66.985,69 menjadi 47.031,45. Uji signifikansi memperlihatkan bahwa di Stasiun Citeko, kelembapan udara (X_2) berpengaruh signifikan terhadap konsentrasi CO, sedangkan di Stasiun Klimatologi Jawa Barat terdapat tiga variabel signifikan, yaitu suhu udara (X_1) dan kelembapan udara (X_2) dengan pengaruh negatif, serta kecepatan angin (X_3) dengan pengaruh positif. Variabel arah angin (X_4) tidak berpengaruh signifikan di kedua lokasi. Simpulan dari penelitian ini adalah pengaruh variabel meteorologis terhadap konsentrasi CO bersifat bervariasi secara spasial dan temporal, sehingga GTWR dengan pembobot Gaussian lebih relevan digunakan dalam analisis pencemaran udara di wilayah Bogor.

Kata kunci: karbon monoksida, GTWR, meteorologi, spasial-temporal

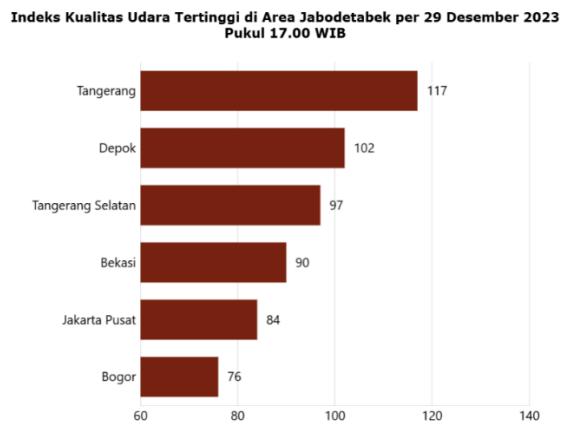
ABSTRACT: Air pollution caused by motor vehicle emissions and industrial activities is a major problem in urban areas, including Bogor City and Regency. This study aims to model carbon monoxide (CO) concentrations using the Geographically-Temporally Weighted Regression (GTWR) method with a Gaussian kernel and to analyze the influence of meteorological variables on CO distribution. Data were collected from the West Java Climatology Station (Bogor City) and the Citeko Meteorological Station (Bogor Regency) over a 12-month period, with predictors including air temperature (X_1), humidity (X_2), wind speed (X_3), and wind direction (X_4). The results show that the GTWR model outperforms multiple linear regression, with R^2 increasing from 0.223 to 0.3108 and MSE decreasing from 66,985.69 to 47,031.45. The significance test revealed that at Citeko Station, humidity (X_2) significantly affected CO concentrations, while at the West Java Climatology Station, three variables were significant: air temperature (X_1) and humidity (X_2) with negative effects, and wind speed (X_4) with a positive effect. Wind direction (X_3) was not significant at both locations. In conclusion, the influence of meteorological variables on CO concentration varies spatially and temporally, making GTWR with a Gaussian kernel more relevant for air pollution analysis in the Bogor region.

Keywords: Bogor, carbon monoxide, GTWR, meteorology, spatial-temporal

PENDAHULUAN

Pencemaran udara merupakan salah satu isu lingkungan yang semakin mendapat perhatian global karena dampaknya terhadap kesehatan manusia, ekosistem, dan kualitas hidup. Salah satu polutan yang banyak diperhatikan adalah karbon monoksida (CO), gas beracun yang dihasilkan dari pembakaran tidak sempurna bahan bakar fosil (PP No. 41 Tahun 1997). Di wilayah perkotaan seperti Kota dan Kabupaten Bogor, peningkatan jumlah kendaraan bermotor, aktivitas industri, serta pertumbuhan penduduk turut berkontribusi terhadap potensi pencemaran udara. Selain itu, faktor meteorologis seperti suhu udara, kelembapan, arah angin, dan kecepatan angin juga berperan penting dalam memengaruhi distribusi dan akumulasi CO di atmosfer (Sangkertadi, 2014). Pencemaran udara di kota besar sebagian besar disebabkan oleh aktivitas lalu lintas, industri, maupun perumahan. Emisi gas buang kendaraan bermotor penyumbang utama pencemaran udara terutama di perkotaan, karena emisi gas mengandung polutan seperti nitrogen oksida (NO_X), karbon monoksida (CO), dan juga partikel. Selain itu, aktivitas industri maupun aktivitas rumah juga tak luput dari penyebab pencemaran udara seperti pembangkit listrik, asap dari pabrik, maupun pembakaran sampah (Okello, 2018).

Kota Bogor adalah salah satu kota besar di Indonesia yang mengalami pertumbuhan penduduk yang cukup tinggi dan perkembangan transportasi yang sangat cepat. Jumlah kendaraan motor di kota Bogor pada tahun 2016 sebanyak 434.044 unit, pada tahun 2017 sebanyak 473.587 unit. Konsentrasi karbon monoksida di kecamatan Bogor pada pagi hari memiliki rata-rata sebesar $8016,36 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$. Tingkat konsentrasi karbon monoksida terbesar ditemukan di stasiun Bogor (Ramadhana Yuda, 2020).



Gambar 1 Indeks Kualitas Udara di daerah Jabodetabek
(Sumber: Artikel KataData.co.id)

Menurut Waluyo (2024) Kota Bogor tercatat memiliki indeks kualitas udara sebesar 76. Walaupun nilai tersebut berada pada peringkat terendah dibandingkan wilayah lain di Jabodetabek, angka ini tetap termasuk dalam kategori kualitas udara tidak sehat bagi kelompok sensitif yang berisiko menimbulkan gangguan kesehatan pada masyarakat, khususnya kelompok rentan seperti anak-anak, lansia, dan penderita penyakit pernapasan. Bogor memiliki karakteristik unik dibandingkan kota lain di Jabodetabek, yaitu topografi pegunungan, curah hujan yang relatif tinggi, serta kepadatan penduduk dan aktivitas transportasi yang terus meningkat.

Menurut Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (1997), Indeks Standar Pencemaran Udara (ISPU) merupakan angka tanpa satuan yang digunakan untuk merepresentasikan kualitas udara ambien di suatu wilayah. Nilai ISPU ditetapkan dengan cara mengubah kadar pencemar terukur menjadi angka yang tidak berdimensi sehingga lebih mudah dipahami oleh masyarakat. Rentang nilai ISPU dibagi menjadi beberapa kategori, yaitu Baik (0–50) yang menunjukkan kualitas udara tidak menimbulkan dampak kesehatan, Sedang (51–100) yang relatif aman namun dapat memengaruhi tumbuhan sensitif, Tidak Sehat (101–199) yang dapat berdampak pada kelompok rentan, Sangat Tidak Sehat (200–299)

yang merugikan kesehatan sebagian besar populasi, serta Berbahaya (≥ 300) yang dapat menimbulkan dampak serius bagi kesehatan. Dengan adanya kategorisasi ini, masyarakat dan pemerintah dapat lebih mudah memahami kondisi udara ambien serta mengambil langkah antisipatif untuk mengurangi risiko paparan pencemar udara.

Efek polusi udara selain berdampak pada kesehatan manusia, namun juga dapat berdampak pada kerusakan lingkungan yang serius. Buruknya kualitas udara mengakibatkan kerusakan ekosistem, mengancam keberlangsungan hidup flora dan fauna. Meningkatnya suhu permukaan bumi dan perubahan iklim global akibat konsentrasi karbon monoksida dan gas rumah kaca yang meningkat. Jumlah tanaman dan hutan yang semakin berkurang juga mengurangi kapasitas bumi dalam menyerap karbon dioksida dan menghasilkan oksigen. Selain itu, peningkatan suhu akibat pemanasan global mengakibatkan perubahan cuaca secara drastis, merusak ekosistem alami (Ibrahim, 2011).

Dampak polusi udara di setiap daerah berbeda karena dapat dipengaruhi oleh kondisi grafis, tingkat kegiatan industri, jumlah penduduk bahkan faktor cuaca. Oleh karena itu, dibutuhkan pendekatan analisis untuk memahami variasi dari ruang dan waktu. Salah satu pendekatan adalah dengan menggunakan model Geographically-Temporally Weighted Regression (GTWR). Dengan demikian model ini dapat menggambarkan pengaruh variabel dengan rinci dan juga realistik dengan mempertimbangkan bahwa hubungan antar variabel bukanlah tetap, namun bisa berubah seiring waktu dan tempat serta bagaimana perubahan tersebut.

Penerapan model *Geographically-Temporally Weighted Regression* (GTWR) menjadi penting dalam analisis pencemaran udara, khususnya untuk memahami dinamika konsentrasi karbon monoksida (CO) yang dipengaruhi oleh faktor meteorologis di berbagai wilayah. Melalui pendekatan ini, diharapkan diperoleh gambaran yang lebih komprehensif mengenai variasi spasial dan temporal kualitas udara di wilayah Bogor, sehingga hasil penelitian ini dapat menjadi dasar dalam pengambilan kebijakan pengendalian pencemaran udara yang lebih tepat sasaran.

METODE

Penelitian ini menggunakan rancangan pemodelan statistik dengan pendekatan *Geographically-Temporally Weighted Regression* (GTWR). Model ini dipilih karena mampu memperhitungkan variasi spasial dan temporal secara bersamaan, sehingga lebih sesuai untuk menganalisis konsentrasi karbon monoksida (CO) yang dipengaruhi oleh kondisi lingkungan dan dinamika cuaca. Dalam penelitian ini, variabel terikat adalah konsentrasi CO, sedangkan variabel bebas yang diduga memengaruhi meliputi suhu udara (X_1), kelembaban udara (X_2), kecepatan angin (X_3), dan arah angin (X_4). Data yang digunakan diperoleh dari dua lokasi pengamatan, yaitu Stasiun Klimatologi Jawa Barat yang mewakili wilayah Kota Bogor, dan Stasiun Meteorologi Citeko yang mewakili wilayah Kabupaten Bogor. Data dikumpulkan secara deret waktu selama periode 12 bulan, sehingga dapat menangkap fluktuasi musiman dan harian dari faktor-faktor meteorologis maupun konsentrasi CO. Sumber data berasal dari instansi resmi, sehingga dapat dipertanggungjawabkan akurasi dan validitasnya.

Analisis data dilakukan menggunakan perangkat lunak *Google Colab* dengan pemrograman *R*, yang memungkinkan penerapan model GTWR secara komputasional. Hasil analisis berupa nilai koefisien regresi pada masing-masing lokasi dan waktu, uji signifikansi variabel, serta evaluasi kinerja model melalui nilai koefisien determinasi (R^2) dan *Mean Square Error* (MSE). Informasi tersebut digunakan untuk menilai pengaruh variabel meteorologis terhadap konsentrasi CO, sekaligus membandingkan kinerja model GTWR dengan regresi linier berganda sebagai model global.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis pemodelan dilakukan menggunakan metode *Geographically-Temporally Weighted Regression* (GTWR) dengan pembobot Gaussian untuk mengidentifikasi pengaruh faktor-faktor meteorologis terhadap konsentrasi karbon monoksida (CO) di wilayah Bogor. Sebelum pemodelan dilakukan, data diuji melalui uji asumsi klasik yang meliputi normalitas, multikolinieritas, autokorelasi, dan

heteroskedastisitas. Hasil pengujian menunjukkan bahwa seluruh data memenuhi asumsi regresi, sehingga layak digunakan untuk analisis lebih lanjut.

Hasil pemodelan menunjukkan bahwa metode GTWR dengan pembobot *Gaussian* memberikan kinerja yang lebih baik dibandingkan model regresi linier berganda. Nilai koefisien determinasi (R^2) model GTWR sebesar 0,3108 dan *Mean Square Error* (MSE) sebesar 47.031,45, sedangkan model regresi linier berganda menghasilkan R^2 sebesar 0,223 dan MSE sebesar 66.985,69. Peningkatan nilai R^2 disertai penurunan MSE menunjukkan bahwa GTWR mampu menjelaskan variasi konsentrasi CO dengan akurasi yang lebih tinggi dibandingkan model global.

Tabel 1. Perbandingan Kinerja Model Regresi Linier Berganda dan GTWR

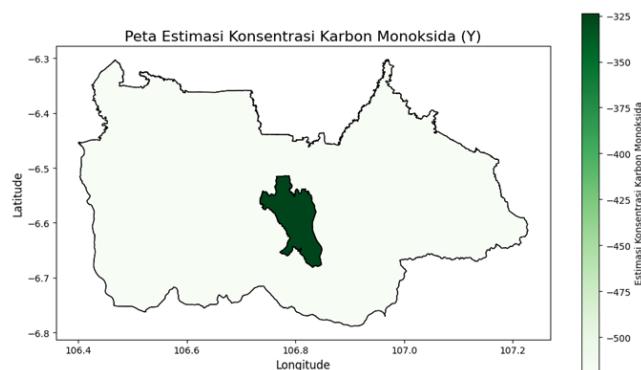
Model	R^2	Mean Square Error
Regresi Linier Berganda	0,223	66.985,69.
Geographically-Temporally Weighted Regression	0,3108	47.031,45

Berdasarkan hasil uji signifikansi, pengaruh variabel meteorologis terhadap konsentrasi CO tidak seragam antarwilayah. Di Stasiun Meteorologi Citeko, hanya kelembapan udara (X_2) yang menunjukkan pengaruh signifikan terhadap konsentrasi CO ($p\text{-value} < 0,05$). Sementara itu, di Stasiun Klimatologi Jawa Barat, tiga variabel signifikan ditemukan, yaitu suhu udara (X_1) dan kelembapan udara (X_2) dengan arah pengaruh negatif, serta arah angin (X_4) dengan arah pengaruh positif. Variabel kecepatan angin (X_3) tidak berpengaruh signifikan di kedua lokasi pengamatan.

Peta hasil estimasi GTWR menunjukkan bahwa variasi spasial konsentrasi CO lebih tinggi di kawasan perkotaan dibandingkan wilayah pinggiran. Nilai estimasi yang lebih besar terdapat di area Kota Bogor yang padat aktivitas transportasi dan permukiman, sedangkan nilai lebih rendah muncul di wilayah Kabupaten Bogor yang memiliki vegetasi lebih luas dan sirkulasi udara lebih baik.

Hasil ini sejalan dengan teori dispersi atmosfer yang menyebutkan bahwa peningkatan suhu dan kelembapan dapat mempercepat pengenceran polutan di udara, sedangkan kecepatan angin yang tinggi dapat membawa polutan dari wilayah lain sehingga meningkatkan akumulasi CO di area tertentu. Dengan demikian, GTWR terbukti efektif dalam menggambarkan variasi spasial dan temporal pengaruh faktor meteorologis terhadap konsentrasi CO di wilayah Bogor secara lebih detail dibandingkan model regresi global.

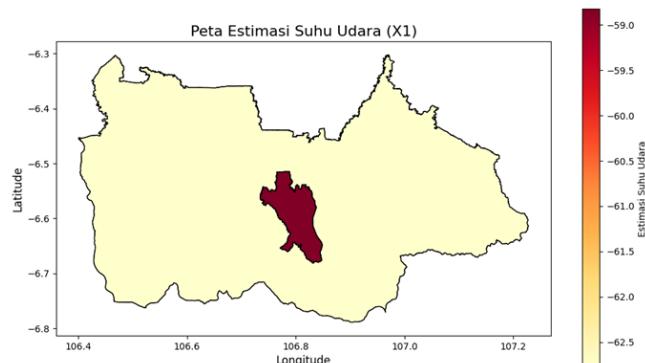
Untuk memperlihatkan variasi spasial pengaruh faktor meteorologis terhadap konsentrasi karbon monoksida (CO), dilakukan pemetaan hasil estimasi model GTWR.



Gambar 2 distribusi nilai estimasi konsentrasi CO di wilayah Kota dan Kabupaten Bogor.

Pada gambar 2 menunjukkan peta estimasi konsentrasi karbon monoksida (CO) di wilayah Bogor berdasarkan model GTWR, dengan Kota Bogor berada di bagian tengah dan Kabupaten Bogor mengelilinginya. Warna yang lebih gelap menggambarkan konsentrasi CO yang lebih tinggi. Hasil estimasi menunjukkan konsentrasi CO di Kota Bogor berada pada kisaran -325 hingga $-350 \mu\text{g}/\text{m}^3$, sedangkan di Kabupaten Bogor dapat mencapai $-500 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Nilai negatif ini merepresentasikan arah dan besar pengaruh variabel meteorologis, bukan konsentrasi absolut

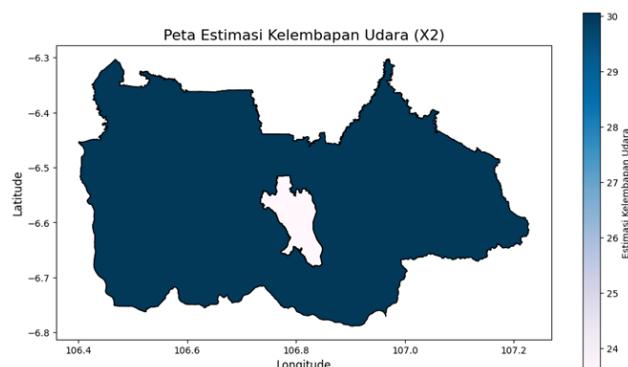
Setelah dilakukannya pemetaan estimasi konsentrasi karbon monoksida, gambar berikut menunjukkan distribusi pengaruh suhu udara (X_1) terhadap konsentrasi CO berdasarkan hasil model GTWR



Gambar 3 peta Estimasi Suhu Udara (X_1) di wilayah Bogor.

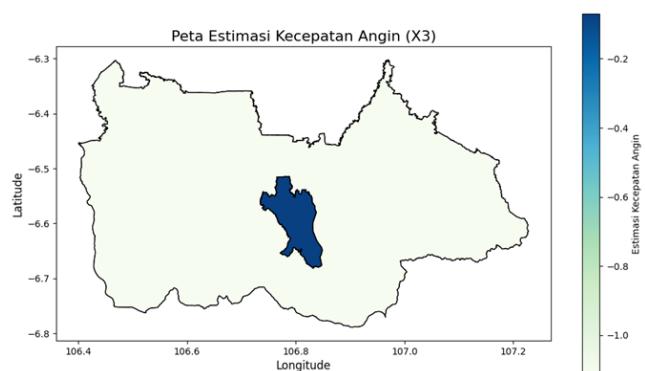
Gambar 3 menunjukkan bahwa suhu udara (X_1) pada Stasiun Klimatologi Jawa Barat dengan warna merah tua bagian dalam peta. Variabel yang berpengaruh karena peningkatan suhu mempercepat proses dispersi polutan ke atmosfer.

Faktor lain yang mempengaruhi karbon monoksida adalah kelembapan udara (X_2) yang mempengaruhi karbon monoksida pada kedua stasiun dengan hasil pemetaan sebagai berikut:



Gambar 4 peta Estimasi Kelembapan Udara (X_2) di wilayah Bogor.

Gambar 4 menunjukkan bahwa kelembapan udara (X_2) mempengaruhi karena tingginya uap air membantu mengencerkan polutan di udara. Faktor lain yang mempengaruhi karbon monoksida pada Stasiun Klimatologi Jawa Barat adalah Kecepatan Angin (X_3) dengan pemetaan sebagai berikut:



Gambar 5 peta Estimasi Kelembapan Udara (X_3) di wilayah Bogor.

Pada gambar 5 menunjukkan bahwa kecepatan angin (X_3) mempengaruhi karena angin dapat membawa polutan dari wilayah lain menuju area pengamatan, sehingga konsentrasi CO meningkat.

SIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh faktor-faktor meteorologis terhadap konsentrasi karbon monoksida (CO) di wilayah Bogor dengan menggunakan metode *Geographically-Temporally Weighted Regression* (GTWR). Hasil penelitian menunjukkan bahwa model GTWR dengan pembobot Gaussian mampu memberikan hasil yang lebih akurat dibandingkan model regresi linier berganda. Hal ini terlihat dari peningkatan nilai koefisien determinasi (R^2) dari 0,223 menjadi 0,3108 dan penurunan nilai *Mean Square Error* (MSE) dari 66.985,69 menjadi 47.031,45. Temuan ini menegaskan bahwa model GTWR efektif dalam menangkap variasi spasial dan temporal, sehingga mampu menggambarkan dinamika konsentrasi CO secara lebih realistik di wilayah Bogor.

Hasil analisis menunjukkan bahwa pengaruh faktor meteorologis terhadap konsentrasi CO tidak bersifat seragam antarwilayah. Pada Stasiun Meteorologi Citeko, hanya kelembapan udara yang berpengaruh signifikan terhadap kadar CO, sedangkan pada Stasiun Klimatologi Jawa Barat, suhu udara dan kelembapan udara berpengaruh negatif, sementara kecepatan angin menunjukkan pengaruh positif. Secara umum, wilayah perkotaan dengan kepadatan penduduk dan aktivitas transportasi tinggi cenderung memiliki kadar CO lebih tinggi dibandingkan wilayah dengan tutupan vegetasi luas. Kelebihan metode GTWR terletak pada kemampuannya mengidentifikasi pengaruh lokal secara rinci, namun keterbatasannya adalah kebutuhan data spasial-temporal yang lengkap dan konsisten agar hasilnya lebih optimal.

Penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar dalam pengambilan kebijakan pengendalian polusi udara di wilayah Bogor dan sekitarnya. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan agar model GTWR dikembangkan dengan memasukkan variabel lain seperti kepadatan lalu lintas, kondisi topografi, dan penggunaan lahan. Pendekatan ini akan memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai faktor-faktor yang memengaruhi kualitas udara, serta menjadi acuan dalam upaya pengelolaan lingkungan yang berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

Buku

- Ashar. (2012). Analisis Konsentrasi Debu dan Keluhan Kesehatan pada Masyarakat di Sekitar Pabrik Semen di Desa Kuala Indah Kecamatan Sei Suka Kabupaten Batu Bara Tahun 2012.
- Cakara. (2017). Geographically Weighted Regression (GWR).
- Ghozali. (2018). Aplikasi Analisis Multivariate dengan progam IBM SPSS 25.
- Ghozali, I. (2011). Aplikasi Analisis Multivariate dengan Program IBM SPSS 25 Edisi ke sembilan . Semarang: Universitas Diponegoro.
- Greenstone, M. (2019). Kualitas Udara Indonesia yang Memburuk dan Dampaknya terhadap Harapan Hidup.
- Gujarati. (2004). Basic Economy.
- Huang B, W. B. (2010). Geographically and temporally weighted regression for modeling spatio-temporal variation in house prices.
- Ibrahim. (2022). Identifikasi Kualitas Udara Ambien Disekitar Wilayah Kota Gorontalo.
- Jayadri. (2024). Determinants of PM2.5 Concentration in DKI Jakarta Province: A VAR Model Approach.
- Okello. (2018). Women and Girls in Resource Poor Countries Experience Much Greater Exposure to Household Air Pollutants Than Men: Results from Uganda and Ethiopia.
- Persulessy. (2016). Penilaian Cara Mengajar Menggunakan Rancangan Acak Lengkap.
- Sangkertadi. (2014). Kepadatan Bangunan dan Karakteristik Iklim Mikro.

- Sihombing. (2021). Statistik Multivariat dalam Riset.
- Swarinoto. (2011). Pemanfaatan Suhu Udara dan Kelembapan Udara Dalam Persamaan Regresi Untuk Simulasil Prediksi Total Hujan Bulanan di Bandar Lampung.
- Vallero. (2008). Fundamentals of Air Pollution .
- Vallero. (n.d.). Fundamentals of Air Pollution . 2008.
- Yuda, R. (2020). Pola Sebaran Gas Karbon Monoksida (CO) Polutandi Kecamatan Bogor Tengah.
- Jurnal/Prosiding/Disertasi/Tesis/Skripsi
- Yasin, H. (2011). Pemilihan Variabel Model Geographically Weighted Regression. *Media Statistika*, 4(2), 111-129.