SPATIAL PATTERN OF SULFUR DIOXIDE DISPERSION AND AFFECTED SETTLEMENT AREAS IN SERANG REGENCY BANTEN PROVINCE

POLA SPASIAL DISPERSI GAS SULFUR DIOKSIDA DAN AREA PERMUKIMAN TERDAMPAK DI KABUPATEN SERANG PROVINSI BANTEN

Ahmad Pratama Putra¹

¹ Laboratorium Geodinamika, Pusat Teknologi Reduksi Risiko Bencana, TPSA, BPPT, Gedung 820
Geostek, PUSPIPTEK, Serpong. Telepon :081218942266
e-mail: ahmad.pratama@bppt.go.id

Abstract

In Serang Regency, pollutants and air emissions are produced by industrial activities, including Sulfur Dioxide (SO₂) gas. SO₂-polluted air causes problems to the human respiratory system. This study examine the spatial pattern of SO₂ gas dispersion and its impact on settlements in Serang Regency using geostatistic and Inverse Distance Weighting (IDW) method in Arc GIS. Based on the results of ambient air quality measurements in Serang Regency, which have been measured by the Serang Regency Environmental Agency from 2015 - 2019 for the SO₂ parameter, it can be seen that none of them exceed the standard of the PP No. 41-1999 concerning Air Pollution Control. The results of spatial analysis of gas dispersion show tendencies of high gas concentration in industrial zones, which indicate the contribution of gases from industrial business activities in several monsoons. The most extensive settlement affected by SO₂ gas with the highest value of 40-50 µg / Nm³ is on Cikande District covering an area of 3.173,77 Ha which occurs during the west monsoon from December to February.

Keywords: *spatial patterns, sulfur dioxide dispersion, geostatistic, Serang Regency*

Abstrak

Berbagai kegiatan utama di Kabupaten Serang yang diduga dapat menghasilkan polutan dan emisi udara antara lain adalah dari kegiatan usaha industri dimana polutan yang dihasilkan antara lain berupa gas Sulfur Dioksida (SO₂). Udara yang telah tercemar SO₂ menyebabkan manusia mengalami gangguan pada sistem pernapasan. Oleh karena itu kajian ini menelaah pola spasial dispersi gas SO₂ dan dampaknya terhadap permukiman di Kabupaten Serang dengan metode geostatistik dan interpretasi *Inverse Distance Weighting* (IDW) menggunakan *software Arc GIS*. Berdasarkan hasil pengukuran kualitas udara ambien di Kabupaten Serang yang telah diukur oleh Dinas Lingkungan Hidup Kabupaten Serang dari tahun 2015 – 2019 untuk parameter SO₂, terlihat bahwa tidak ada satupun yang melampaui baku mutu PP No. 41 Tahun 1999 tentang Pengendalian Pencemaran Udara. Hasil analisis spasial dispersi gas menunjukkan adanya suatu kecenderungan bahwa konsentrasi gas relatif tinggi pada zona-zona industri, yang menunjukkan adanya kontribusi gas-gas dari kegiatan usaha industri pada beberapa angin musim. Permukiman paling luas yang terdampak oleh gas SO₂ dengan nilai paling tinggi sebesar 40-50 µg/Nm³ berada pada Kecamatan Cikande seluas 3.173,77 Ha yang terjadi pada saat angin musim barat dari Desember hingga Februari.

Kata kunci: pola spasial, dispersi sulfur dioksida, geostatistik, Kabupaten Serang

1. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Pencemaran udara merupakan salah satu bentuk kerusakan lingkungan, berupa penurunan kualitas udara karena masuknya unsur-unsur berbahaya ke dalam udara atau atmosfer bumi yang berdampak kepada kesehatan manusia.

Pencemaran udara, khususnya di kota-kota besar, merupakan masalah yang perlu segera ditanggulangi. Hal ini akibat dari peningkatan aktivitas manusia, pertambahan jumlah penduduk, perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi, serta pertambahan industri dan sarana transportasi (KLH, 2004). Pencemaran udara ini dari waktu ke waktu diperkirakan akan semakin meningkat seiring dengan laju pertumbuhan pembangunan di berbagai sektor seperti sektor industri, perhubungan/transportasi, dan pariwisata. Demikian juga halnya yang terjadi di Kabupaten Serang, dimana permasalahan terkait polusi udara yang terjadi terkait erat dengan sumber-sumber utama penyebab pencemaran udara seperti industri dan transportasi. Perkembangan yang pesat dari kegiatan-kegiatan utama tersebut secara nyata akan memberikan dampak terhadap meningkatnya kondisi polusi udara.

Berbagai kegiatan utama di Kabupaten Serang yang diduga dapat menghasilkan polutan dan emisi udara salah satunya adalah kegiatan usaha industri dimana polutan yang dihasilkan antara lain asap, debu, *grit* (pasir halus), dan gas-gas. Selain itu dari proses peleburan pada proses industri, misalnya pada industri peleburan baja, pembuatan soda, semen, keramik, aspal, dengan polutan yang dihasilkannya meliputi debu, uap, dan gas.

Industri merupakan salah satu sumber pencemaran udara, baik di perkotaan maupun di pedesaan. Emisi pencemar udara terutama berasal dari pembakaran bahan bakar di berbagai kegiatan industri termasuk pembangkit tenaga listrik, produksi kimia, dan lainnya, pengolahan logam, insenerasi, penggunaan bahan bakar industri, dan lain-lain (Muhammad dan Nurbianto, 2006).

Kegiatan industri dengan cerobongnya menghasilkan emisi yang sangat tinggi. Dengan semakin banyaknya jenis kegiatan industri maka emisi cerobong yang dihasilkan akan semakin besar, terutama untuk kegiatan industri yang menghasilkan bahan berbahaya dan beracun (KLH, 2008).

Begitupun dengan pembangkit listrik, Walaupun pembangkit listrik telah mempunyai alat pembersih endapan (*presipitator*) untuk membersihkan partikel-partikel kecil dari asap pembakaran batubara, namun senyawa-senyawa seperti SO_x, NO_x dan partikel debu (PM₁₀) yang berbentuk gas dengan bebasnya naik melewati cerobong dan terlepas ke udara bebas (Witono, 2003). Gas SO_x dan NO_x dapat bereaksi dengan uap air yang ada di udara membentuk asam sulfat (H₂SO₄) dan asam nitrat (HNO₃). Kedua asam tersebut dapat jatuh bersama-sama air hujan sehingga mengakibatkan hujan asam yang dapat merusak lingkungan dan mengganggu kesehatan.

Udara yang telah tercemar SO_x menyebabkan manusia mengalami gangguan pada sistem pernapasan. Hal ini karena gas SO_x yang mudah menjadi asam tersebut menyerang selaput lendir pada hidung, tenggorokan, dan saluran pernapasan yang lain sampai ke paru-paru. Serangan gas SO_x tersebut menyebabkan iritasi pada bagian tubuh yang terkena. Daya iritasi SO₂ pada setiap orang tidak sama. Ada orang yang sensitif dan sudah akan mengalami iritasi apabila terkena SO₂ berkonsentrasi 1-2 ppm, namun ada pula orang yang baru akan mengalami iritasi tenggorokan apabila terkena SO₂ berkonsentrasi 6 ppm (KLH, 2009).

Sulfur dioksida merupakan gas pencemar yang bersifat korosif dan beracun. Bila konsentrasinya di atmosfer tinggi, akan menyebabkan terjadinya hujan asam. Sebagian kecil bahan bakar sulfur yang dapat dioksidasi menjadi SO₃ juga memberikan konsekuensi terhadap lingkungan, seperti timbulnya kabut biru butiran asam sulfur yang diemisikan dari pemanas (*boiler*), mempercepat korosi pada logam, serta akumulasi partikel asap (KLH, 2009).

1.2. Tujuan

Udara dapat digolongkan menjadi dua yaitu udara emisi atau udara yang keluar dari sumber pencemar dan udara ambien. Hasil-hasil pemantauan kualitas udara ambien terutama parameter gas SO₂ yang telah dilakukan di Kabupaten Serang memerlukan kajian pola spasial dispersinya.

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui pola spasial dispersi gas SO₂ serta menganalisis dampak persebaran SO₂ tersebut terhadap pemukiman. Hasil analisis nantinya akan dibagi menjadi 4 periode musim angin.

2. METODOLOGI

2.1. Area Studi

Lokasi kajian ini adalah di Kabupaten Serang. Kabupaten Serang terletak antara $5^{\circ} 50'$ sampai $6^{\circ} 21'$ Lintang Selatan dan $105^{\circ} 0'$ sampai $106^{\circ} 22'$ Bujur Timur. Kabupaten Serang memiliki luas wilayah $1.467,35 \text{ Km}^2$. Kondisi Geografis Kabupaten Serang menjadi salah satu keuntungan bagi Kabupaten Serang karena menjadi pintu gerbang atau transit perhubungan darat antar pulau Jawa dan pulau Sumatera. Jarak Kabupaten Serang dengan Kota Jakarta adalah kurang lebih 70 Km, hal ini membuat Kabupaten Serang menjadi salah satu daerah penyangga Ibukota Indonesia.

Kabupaten Serang memiliki 29 Kecamatan dan 326 Desa dengan batas administrasi:

- Sebelah Utara : Laut Jawa, Kota Cilegon, Kota Serang.
- Sebelah Timur: Kabupaten Tangerang
- Sebelah Barat: Kota Cilegon dan Selat Sunda
- Sebelah Selatan: Kabupaten Lebak dan Kabupaten Pandeglang

Gambar 1. Peta Administrasi Kabupaten Serang, Banten.

2.2. Pengumpulan dan Pengolahan Data

Untuk mengetahui dispersi penyebaran gas dibutuhkan data kualitas udara ambien. Data tersebut diperoleh hasil pemantauan kualitas udara ambien yang dilakukan oleh Dinas Lingkungan Hidup Kabupaten Serang. Peta-peta dasar seperti administrasi dan sebaran permukaan diperoleh dari Revisi RTRW Kab. Serang 2011-2031.

Data kualitas udara yang digunakan adalah data kualitas udara ambien dari tahun 2015 sampai 2019. Selama periode tersebut dilakukan pengukuran kualitas udara sebanyak 104 kegiatan pemantauan pada 78 lokasi pengamatan pemantauan di Kabupaten Serang.

Dari 78 lokasi tersebut, beberapa lokasi titik sampel memiliki koordinat yang tetap setiap tahun dan beberapa lokasi titik sampel lainnya memiliki koordinat yang berpindah-pindah. Data kualitas udara yang diperoleh tersebut dapat dikelompokkan pada tiga kondisi data berkaitan dengan informasi lokasi sebagai berikut:

- Data kualitas udara ambien yang memiliki koordinat, langsung di-plot pada peta sesuai koordinatnya.
- Data kualitas udara ambien yang tidak memiliki koordinat titik sampel namun memiliki informasi lokasi yang spesifik, perkiraan koordinatnya dapat diidentifikasi lokasinya berdasarkan informasi yang diperoleh dari peta *google earth*.
- Data kualitas udara ambien yang tidak memiliki koordinat namun hanya memiliki informasi nama desa, diperkirakan dengan menggunakan teknik *centroid* pada software *Arc Map* pada setiap desa.

Dari 104 data pemantauan kualitas udara yang tersebar pada 78 lokasi pemantauan dari tahun 2015 hingga tahun 2019, dikelompokkan menjadi 5 klaster regional (zona) yang dipertimbangkan berdasarkan kondisi topografi dan sebaran industrinya sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 2.

Gambar 2. Lokasi Pengamatan dan Klaster-Regional Pola Sebaran Dispersi Gas Dan Partikulat Berdasarkan Kondisi Topografi Dan Sebaran Industri.

Pembagian zona didasarkan atas beberapa alasan dengan penjelasan bahwa zonasi (ring berwarna ungu) ditentukan berdasarkan 2 parameter :

1. Persebaran lokasi pengamatan kualitas udara yang telah dilakukan oleh DLH Kab Serang dari tahun 2015-2019.
2. Berdasarkan data DEMNAS (*Digital Elevation Model Nasional*) yang diperoleh dari instansi BIG.

Zonasi ini dibuat untuk keperluan interpolasi dengan asumsi bahwa pengaruh arah dan kecepatan angin yang akan mempengaruhi kualitas udara dibatasi oleh topografi. Arah dan kecepatan angin tidak akan dapat membawa partikel kualitas udara melampaui topografi yang lebih tinggi seperti perbukitan atau pegunungan. Sehingga zonasi tersebut dibuat sebagai batas wilayah interpolasi data kualitas udara. Semua zona relatif datar hanya saja batas zona tersebut dibentuk karena adanya pembatas perbukitan/topografi tinggi sehingga pergerakan anginnya terbatas.

Selain pembagian berdasarkan klaster-klaster regional, model juga akan dikelompokkan berdasarkan musim. Dalam hal ini ketersediaan dan distribusi data menentukan jumlah musim yang akan digunakan dalam analisis pola sebaran.

2.3. Metode Analisis

2.3.1. Metode Analisis Pola Dispersi Gas

Setelah diketahui data sekunder konsentrasi polutan di beberapa titik yang berasal dari hasil pengukuran kualitas udara ambien di beberapa titik sampel, selanjutnya dilakukan analisis data untuk mengetahui pola sebaran polutan parameter gas SO₂ di udara yang dianalisis. Pola sebaran polutan industri dianalisis dengan membuat kontur dispersi untuk parameter pencemar SO₂. Kontur dispersi ini akan memberikan gambaran informasi mengenai nilai konsentrasi pada area penelitian melalui garis kontur yang saling terhubung pada area yang memiliki nilai konsentrasi yang sama (*Isohyet*). Analisis pola sebaran udara tersebut menggunakan *Software Arcgis* dengan hasil berupa peta.

Dalam konteks fenomena keruangan terdapat perbedaan kenampakan, struktur, pola dan proses. Pola merupakan pola persebaran suatu fenomena di ruang muka bumi. Analisis keruangan mencoba menelaah tentang lokasi dan persebaran gejala-gejala di ruang muka bumi. Untuk memperoleh gambaran sesuatu di muka bumi, atau untuk memberikan gambaran tentang sesuatu di

muka bumi, alat yang terbaik adalah peta (Sandy, 1973).

Dalam analisis keruangan perlu dilakukan perwilayahan. Wilayah pada hakekatnya menyangkut sebagian dari muka bumi yang batasnya ditetapkan atas dasar kriteria tertentu. Salah satu cara untuk melakukan perwilayahan adalah dengan interpolasi.

Interpolasi adalah suatu metode atau fungsi matematika yang menduga nilai pada lokasi-lokasi yang datanya tidak tersedia. Interpolasi spasial mengasumsikan bahwa atribut data bersifat kontinu di dalam ruang (space) dan atribut ini saling berhubungan (dependence) secara spasial. (Anderson dalam Prasasti et al, 2005). Kedua asumsi tersebut mengindikasikan bahwa pendugaan atribut data dapat dilakukan berdasarkan lokasi-lokasi di sekitarnya dan nilai pada titik-titik yang berdekatan akan lebih mirip dari pada nilai pada titik-titik yang terpisah lebih jauh.

Metode geostatistik merupakan salah satu bentuk model yang dapat dipergunakan untuk menginterpolasikan nilai dari suatu variabel yang terdistribusi dalam ruang. Teknik interpolasi dengan model geostatistik lazim dilakukan untuk memperkirakan suatu nilai yang terdistribusi secara spasial pada titik yang tidak dapat diambil sampel yaitu dengan cara mengukur suatu nilai dari nilai yang berdekatan (Wahono, 2003). Untuk menduga nilai kualitas udara parameter gas SO₂ di Kabupaten Serang pada kajian ini digunakan metode geostatistik interpolasi spasial IDW (Inverse Distance Weighted). Metode ini dilakukan dengan menggunakan *Software Arc Map* dengan mengkalkulasi nilai rata-rata parameter gas SO₂ per musim selama tahun pengamatan 2015-2019.

Metode ini memiliki asumsi bahwa setiap titik input mempunyai pengaruh yang bersifat lokal akan berkurang terhadap jarak. Metode IDW umumnya dipengaruhi oleh inverse jarak yang diperoleh dari persamaan matematika. Pada metode interpolasi ini dapat menyesuaikan pengaruh relatif dari titik-titik sampel. Nilai power pada interpolasi IDW ini menentukan pengaruh terhadap titik-titik masukan (input), dimana pengaruh akan lebih besar pada titik-titik yang lebih dekat sehingga menghasilkan permukaan yang lebih detail. Bobot yang digunakan untuk rata-rata adalah turunan fungsi jarak antara titik sampel dan titik yang diinterpolasi (Philip dan Watson, 1982 dalam Merwade et al, 2006). Fungsi umum pembobotan adalah inverse dari

kuadrat jarak, dan persamaan ini digunakan pada metode *Inverse Distance Weighted* yang dirumuskan dalam formula berikut ini (Azpurua dan Ramos, 2010):

$$Z^* = \sum_{i=1}^N \omega_i Z_i$$

Dimana Z_i ($i = 1, 2, 3, \dots, N$) merupakan nilai ketinggian data yang ingin diinterpolasi sejumlah N titik, dan bobot (*weight*) ω_i yang dirumuskan sebagai:

$$\omega_i = \frac{h_i^{-p}}{\sum_{j=0}^n h_j^{-p}}$$

p adalah nilai positif yang dapat diubah-ubah yang disebut dengan parameter power (biasanya bernilai 2) dan h_j merupakan jarak dari sebaran titik ke titik interpolasi yang dijabarkan sebagai:

$$h_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}$$

(x, y) adalah koordinat titik interpolasi dan (x_i, y_i) adalah koordinat untuk setiap sebaran titik. Fungsi peubah *weight* bervariasi untuk keseluruhan data sebaran titik sampai pada nilai yang mendekati nol dimana jarak bertambah terhadap sebaran titik.

Kelebihan dari metode interpolasi IDW ini adalah karakteristik interpolasi dapat dikontrol dengan membatasi titik-titik masukan yang digunakan dalam proses interpolasi. Titik-titik yang terletak jauh dari titik sampel dan yang diperkirakan memiliki korelasi spasial yang kecil atau bahkan tidak memiliki korelasi spasial dapat dihapus dari perhitungan. Titik-titik yang digunakan dapat ditentukan secara langsung atau ditentukan berdasarkan jarak yang ingin diinterpolasi. Kelemahan dari interpolasi IDW adalah tidak dapat mengestimasi nilai di atas nilai maksimum dan dibawah nilai minimum dari titik-titik sampel (Pramono, 2008).

Dalam menentukan luas daerah yang dipengaruhi titik sampel dalam teknik IDW kali ini menggunakan metode *variable search radius*. Titik-titik yang digunakan dalam

interpolasi ini ditentukan oleh *user*, sehingga nilai *search radius* bervariasi untuk setiap interpolasi. Hal ini bergantung pada seberapa jauh titik tersebut mencari sel-sel yang berada disekitarnya, sehingga beberapa bagian akan menjadi lebih besar dan beberapa bagian lain akan menjadi lebih kecil, tergantung pada kerapatan titik-titik disekitar sel yang diinterpolasi (Watson dan Philip, 1985).

2.3.2. Metode Analisis Dampak Terhadap Permukiman

Hasil analisis pola sebaran sebaran SO_2 , akan ditampilkan dengan sebaran permukiman di Kabupaten Serang. Hal ini bertujuan untuk mengetahui dampak sebaran konsentrasi gas tersebut terhadap kawasan permukiman Kabupaten Serang (Gambar 3).

Rahmawati (1999) menganalisis pola sebaran polutan udara untuk tiap-tiap musim dan menginformasikan pada periode musim yang berbeda akan menghasilkan pola persebaran polutan yang berbeda pula.

Gambar 3. Sebaran Lokasi Permukiman Kabupaten Serang.

Dampak terhadap permukiman sangat bergantung kepada kondisi meteorologis untuk setiap musim. Untuk itu digunakan diagram mawar angin (*Wind Rose*) untuk mengidentifikasi kawasan permukiman yang terkena dampak dari sebaran gas untuk setiap musimnya. Arah dan kecepatan angin menjadi pertimbangan dalam penentuan kawasan permukiman yang terkena dampak.

3. ANALISIS DAN PEMBAHASAN

3.1. Analisa *Wind Rose* Kabupaten Serang

Untuk melakukan analisis dampak pencemaran udara dari kegiatan usaha di

Kabupaten Serang, dibutuhkan analisa arah dan kecepatan angin dominan untuk setiap musim. Arah angin dibutuhkan untuk menetapkan wilayah-wilayah permukiman mana saja yang akan terkena dampak.

Berdasarkan hasil *wind rose* pada musim barat dan musim timur diperoleh informasi bahwa frekuensi dominan kejadian angin barat di Kabupaten Serang mencapai 23%, dengan kecepatan maksimum 8,8 m/detik. Selain angin barat terdapat pula kontribusi angin barat daya dan angin barat laut dengan frekuensi yang lebih kecil. Angin barat (Gambar 4) ini terjadi pada bulan Desember, Januari, dan Februari yang biasa disebut dengan musim barat (Wyrski, 1961). Dengan demikian wilayah permukiman yang kemungkinan terkena dampak dominan pencemaran udara berada di timur dan juga timur laut serta tenggara.

Gambar 4. *Wind Rose* di Kabupaten Serang (Wyrski, 1961).

Dominasi yang kedua adalah angin yang biasa disebut dengan musim angin yang bergerak dari arah utara dengan frekuensi kejadian mencapai 13% dan kecepatan maksimum 8,8 m/detik. Selain angin utara, terdapat pula kontribusi angin timur laut dengan frekuensi yang lebih kecil. Angin ini terjadi pada bulan Juni, Juli, dan Agustus dan biasa disebut sebagai angin musim timur (Wyrski, 1961). Pada kondisi ini wilayah permukiman yang kemungkinan terkena dampak dominan pencemaran udara berada di selatan dan juga barat daya.

Data kualitas udara dikelompokkan menjadi empat berdasarkan musim yaitu data pada saat angin musim barat (Desember-Februari); pada saat angin musim peralihan barat-timur (Maret-Mei); pada saat angin musim timur (Juni-Agustus); dan pada saat angin musim peralihan timur-barat (September-November).

3.2. Pola Dispersi Spasial SO_2 dan Dampaknya Terhadap Permukiman

3.2.1. Saat Angin Musim Barat (Desember-Februari)

Konsentrasi SO_2 yang ditetapkan pada baku mutu dalam Peraturan Pemerintah No. 41 Tahun 1999 tentang Pengendalian Pencemaran Udara untuk parameter SO_2 adalah sebesar $900 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$ untuk pengukuran selama 1 Jam. Nilai konsentrasi SO_2 tertinggi yang terukur selama angin musim barat adalah $50 - 60 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$. Dengan membandingkan nilai tertinggi tersebut dengan baku mutu, menunjukkan bahwa selama angin musim barat dari tahun 2015 – 2019 tidak terukur konsentrasi SO_2 yang melampaui baku mutu di semua titik pemantauan di Kabupaten Serang.

Berdasarkan hasil analisis pola spasial sebaran gas SO_2 selama angin musim barat 2015 – 2019 diperlihatkan gambaran pola dispersi gas SO_2 yang sudah dibagi dalam Zona A, B, C, D, dan E sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 5. Pada saat angin musim barat (Desember – Februari) tidak terdapat titik sampel pada zona E.

Konsentrasi SO_2 di Zona A di Kecamatan Kramatwatu dan Bojonegara yang berada pada kisaran $30 - 40 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$ relatif lebih tinggi daripada di bagian utara (Kecamatan Pulo Ampel) yang berkisar antara $20 - 30 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$. Di Kecamatan Pulo Ampel banyak terdapat industri petrokimia yang memiliki potensi emisi gas SO_2 ke udara ambien. Apabila diperhatikan pola angin selama angin musim barat yang dominan bertiup dari barat dan barat laut, maka konsentrasi SO_2 yang teremisi ke udara akan terbawa ke arah laut dan mengalami pengenceran sehingga konsentrasi SO_2 di Zona A relatif rendah.

Gambar 5. Pola Sebaran Gas SO₂ pada Angin Musim Barat di Kabupaten Serang Tahun 2015 – 2019.

Konsentrasi gas SO₂ tertinggi mencapai 50 – 60 µg/Nm³ di zona B terkonsentrasi disekitar zona industri Cikande. Pola sebaran gas SO₂ menunjukkan adanya kontribusi gas SO₂ dari kegiatan usaha industri di sekitar kawasan industri Cikande. Dari pola dispersi gas SO₂ disekitar Cikande terlihat adanya kecenderungan penyebaran gas SO₂ ke arah Timur yang menunjukkan adanya pengaruh pola angin selama musim barat yang bertiup dari Barat ke Timur. Radius penyebarannya gas SO₂ masih disekitar Zona Indutri Cikande. Konsentrasi SO₂ di bagian Utara (Kecamatan Tirtayasa, Tanara, Pontang dan Lebakwangi) relatif lebih rendah daripada konsentrasi SO₂ di bagian Selatan, hal ini disebabkan oleh pengaruh angin laut yang lebih dominan di bagian Utara yang dapat mengencerkan konsentrasi SO₂ di kawasan tersebut.

Pada zona C konsentrasi penyebaran SO₂ relatif rendah, konsentrasi maksimum berkisar antara 20 – 30 µg/Nm³ di bagian utara zona, dan sedikit konsentrasi 10 – 20 µg/Nm³ di bagian selatan zona, namun diperkirakan sumber SO₂ yang terukur bukan berasal dari kegiatan usaha industri berdasarkan data jenis-jenis industri dari DLH Kabupaten Serang.

Pada zona D konsentrasi SO₂ tertinggi di bagian selatan zona, diperkirakan karena tingginya aktivitas perekonomian non usaha industri di lokasi tersebut. Konsentrasi SO₂ ini menurun ke arah Utara. Di Zona D tidak ditemukan adanya kegiatan industri dan sebagian besar sumber SO₂ di area ini berasal dari sektor transportasi. Pada angin musim barat (Desember – Februari) tidak terdapat titik sampel pada zona E.

Pada zona A mayoritas berwarna kuning (memiliki nilai SO₂ berkisar antara 30 – 40 µg/Nm³). Pada zona B mayoritas berwarna kuning (memiliki nilai SO₂ berkisar antara 30 – 40 µg/Nm³), Hijau Muda (20 – 30 µg/Nm³), dan Oranye (40 – 50 µg/Nm³). Pada Zona C mayoritas berwarna Hijau Muda (20 – 30 µg/Nm³), dan pada zona D mayoritas berwarna kuning (memiliki nilai SO₂ 30 – 40 µg/Nm³) dan Oranye (40 – 50 µg/Nm³). Pada peta sebaran tersebut dapat diketahui bahwa tidak ada daerah dengan konsentrasi gas SO₂ nya melebihi ambang baku mutu. Akan tetapi, pada zona B dan D terdapat daerah yang nilainya lebih tinggi dan lebih luas dibanding wilayah lainnya.

Tabel 1. Luas Permukiman Terdampak (Ha) Pada Rentang Kualitas Udara SO_2 ($\mu\text{g}/\text{Nm}^3$) Periode Desember-Februari Tahun 2015-2019.

Kecamatan	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	Total
Bandung			1934,19	591,28		2525,47
Bojonegara			2062,41	11,03		2073,44
Cikande		55,71	1520,55	3173,77	104,18	4854,22
Ciruas		3061,30	1261,80			4323,10
Jawilan			4437,10			4437,10
Kibin			531,15	2440,42	23,80	2995,38
Kopo			3587,89	198,02		3785,91
Kragilan		833,93	2884,57	738,92		4457,43
Kramatwatu		313,74	4484,29			4798,03
Pulo Ampel	161,73	1320,53	534,61			2016,87
Total	161,73	5585,22	23238,57	7153,45	127,98	36266,95

Tabel 1 menunjukkan bahwa pada musim Barat terdapat beberapa daerah permukiman di Kecamatan wilayah kajian yang terdampak dari sebaran Gas SO_2 . Permukiman paling luas yang terdampak oleh Gas SO_2 dengan nilai paling tinggi berada pada Kecamatan Cikande, yaitu 104,18 Ha (50-60 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$) dan 3173,77 Ha (40-50 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$).

3.2.2. Saat Angin Musim Peralihan Barat – Timur (Maret – Mei)

Baku mutu yang ditetapkan dalam Peraturan Pemerintah No. 41 Tahun 1999 tentang Pengendalian Pencemaran Udara untuk parameter SO_2 adalah sebesar 900 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ untuk pengukuran selama 1 Jam. Nilai konsentrasi SO_2 tertinggi yang terukur selama angin musim peralihan barat - timur adalah 50 – 60 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ di Kecamatan Kibin. Hal ini menunjukkan bahwa selama angin musim peralihan barat – timur dari tahun 2015 – 2019 tidak terukur konsentrasi SO_2 yang melampaui Kabupaten Serang.

Gambar 6. Pola Sebaran Gas SO_2 pada Angin Musim Peralihan Barat – Timur di Kabupaten Serang Tahun 2015 – 2019.

Berdasarkan pola sebaran sebaran gas SO₂ selama angin musim peralihan barat – timur tahun 2015 – 2019 diperlihatkan gambaran pola dispersi gas SO₂ yang sudah dibagi dalam Zona A, B, C, D, dan E sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 6. Pada saat angin musim peralihan barat – timur (Maret-Mei) tidak terdapat titik sampel pada zona C dan D.

Dari pola sebaran (Gambar 6) tersebut terlihat bahwa konsentrasi SO₂ tertinggi di Zona A di Kecamatan Bojonegara dan sebagian Kramatwatu yang berada pada kisaran 40 – 50 µg/Nm³. Konsentrasi SO₂ di Kecamatan Pulo Ampel relatif lebih rendah yang berada pada rentang 20 – 30 µg/Nm³ dan lebih kecil lagi di bagian paling utara zona A yaitu berkisar antara 10 – 20 µg/Nm³. Di Kecamatan Pulo Ampel banyak terdapat industri petrokimia yang memiliki potensi emisi gas SO₂ ke udara ambien akan tetapi tidak memberikan kontribusi pada meningkatkan konsentrasi SO₂ pada saat angin musim peralihan barat – timur. Keberadaan posisi industri yang berada di Pulo Ampel dan Bojonegara yang terletak di pinggir pantai mengakibatkan konsentrasi SO₂ yang teremisikan ke udara akan terbawa ke arah laut dan mengalami pengenceran sehingga konsentrasi SO₂ di bagian Utara Zona A

(Kecamatan Pulo Ampel) relatif rendah daripada bagian Selatan.

Konsentrasi gas SO₂ tertinggi (40 – 50 µg/Nm³) di zona B terukur di Kecamatan Kibin. Konsentrasi SO₂ yang berkisar antara 30 – 40 µg/Nm³ terukur juga disekitar zona industri di Kecamatan Kibin, Cikande dan Bandung. Hal ini menunjukkan adanya kontribusi sumber emisi gas SO₂ dari Zona Industri Serang Barat selama angin musim peralihan barat – timur 2015 – 2019, meskipun penyebarannya tidak terlalu luas pada saat angin musim peralihan barat – timur.

Di zona C konsentrasi gas SO₂ (30 – 40 µg/Nm³) cenderung merata dan lebih tinggi di bagian selatan. Sumber emisi gas SO₂ di zona ini berasal dari kegiatan usaha non usaha industri.

Pada zona A mayoritas berwarna kuning (memiliki nilai SO₂ berkisar antara 40 – 50 µg/Nm³). Pada zona B mayoritas berwarna hijau muda (memiliki nilai SO₂ berkisar antara 30 – 40 µg/Nm³). Pada Zona E mayoritas berwarna Hijau Muda (30 – 40 µg/Nm³). Pada peta sebaran tersebut dapat diketahui bahwa tidak ada daerah yang Gas SO₂ melebihi ambang baku mutu. Akan tetapi, pada zona A dan B terdapat daerah yang nilainya lebih tinggi dan lebih luas dibanding wilayah lainnya (Gambar 6).

Tabel 2. Luas Permukiman Terdampak (Ha) Pada Rentang Kualitas Udara SO₂ (µg/Nm³) Periode Maret – Mei Tahun 2015-2019.

Kecamatan	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	Total
Bandung			2091,72	433,75		2525,47
Bojonegara			89,52	1978,92		2068,44
Cikande		117,71	4506,02	230,49		4854,22
Ciruas			4323,10			4323,10
Jawilan		683,30	3670,27	83,53		4437,10
Kibin	74,82	958,41	1569,20	382,60	10,35	2995,38
Kopo			3025,10	760,81		3785,91
Kragilan	22,17	388,77	4046,49			4457,43
Kramatwatu	4,72		2745,64	1735,06		4485,42
Pulo Ampel	611,43	691,82	691,08	11,55		2005,89
Total	713,14	2840,01	26758,15	5616,71	10,35	35938,35

Tabel 2 menunjukkan bahwa pada musim Peralihan Barat-Timur terdapat beberapa daerah permukiman di Kecamatan wilayah kajian yang terdampak dari sebaran Gas SO₂. Permukiman paling luas yang terdampak oleh Gas SO₂ dengan nilai paling tinggi berada pada Kecamatan Kibin, yaitu 10,35 Ha (50 –

60 µg/Nm³), Bojonegara 1978,92 Ha (40 – 50 µg/Nm³) dan Kramatwatu 1735,06 Ha (40 – 50 µg/Nm³).

3.2.3. Saat Angin Musim Timur (Juni – Agustus)

Nilai konsentrasi SO_2 tertinggi yang terukur selama angin musim timur berkisar pada rentang 50 – 60 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ yaitu di Kecamatan Cikande dan Kibin. Baku mutu yang ditetapkan dalam Peraturan Pemerintah No. 41 Tahun 1999 tentang Pengendalian Pencemaran Udara untuk parameter SO_2 adalah sebesar 900 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ untuk pengukuran selama 1 Jam. Hal ini menunjukkan bahwa selama angin musim Timur dari tahun 2015 – 2019 tidak terukur konsentrasi SO_2 yang

melampaui baku mutu di semua titik pemantauan di Kabupaten Serang.

Berdasarkan hasil pola sebaran gas SO_2 untuk angin musim Timur 2015 – 2019 diperlihatkan gambaran pola dispersi gas SO_2 yang sudah dibagi dalam Zona A, B, C, D, dan E sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 7. Pada angin musim timur (Juni-Agustus) tidak terdapat titik sampel pada zona C, D, dan E.

Gambar 7. Pola Sebaran Gas SO_2 pada Angin Musim Timur di Kabupaten Serang Tahun 2015 – 2019.

Dari hasil analisis pola sebaran tersebut terlihat bahwa konsentrasi SO_2 tertinggi di Zona A di Kecamatan Bojonegara dan sebagian Kramatwatu yang berada pada kisaran 40 – 50 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$. Konsentrasi SO_2 di Kecamatan Pulo Ampel relatif lebih rendah yang berada pada rentang 30 – 40 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$, 20 – 30 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ dan paling kecil lagi dibagian paling utara zona A yaitu berkisar antara 10 – 20 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$. Di Kecamatan Pulo Ampel banyak terdapat industri petrokimia yang memiliki potensi emisi gas SO_2 ke udara ambien akan tetapi tidak memberikan kontribusi pada peningkatan konsentrasi SO_2 pada saat angin musim timur. Keberadaan posisi industri yang berada di Pulo Ampel dan Bojonegara yang

terletak di pinggir pantai mengakibatkan konsentrasi SO_2 yang teremisi ke udara akan terbawa ke arah laut dan mengalami pengenceran sehingga konsentrasi SO_2 di bagian Utara Zona A (Kecamatan Pulo Ampel) relatif rendah daripada bagian Selatan.

Konsentrasi gas SO_2 tertinggi di zona B terukur di Kecamatan Cikande dan Kibin sebesar 50 – 60 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$. Berdasarkan model penyebaran gas SO_2 pada saat angin musim timur terlihat bahwa dispersi terjadi ke arah selatan dan barat daya zona industri Serang Timur. Hal ini bersesuaian dengan arah pergerakan angin yang terjadi pada saat angin musim timur yang bergerak dari utara ke selatan dan juga dari timur laut ke barat daya.

Hal ini menunjukkan juga adanya kontribusi emisi gas dari zona industri Cikande yang terdispersi oleh angin ke arah selatan dan barat daya.

Pada zona A mayoritas berwarna oranye (memiliki nilai SO_2 berkisar antara 40 – 50 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$). Pada zona B mayoritas berwarna hijau muda (memiliki nilai SO_2 berkisar antara 20 – 30 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$) dan Kuning (30 – 40 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$). Pada peta sebaran tersebut dapat diketahui bahwa tidak ada daerah yang Gas SO_2 melebihi ambang baku mutu. Akan tetapi,

pada zona A terdapat daerah yang nilainya lebih tinggi dibanding wilayah lainnya.

Tabel 3 menunjukkan bahwa pada saat angin musim timur terdapat beberapa daerah permukiman di kecamatan wilayah kajian yang terdampak dari sebaran Gas SO_2 . Permukiman paling luas yang terdampak oleh Gas SO_2 dengan nilai paling tinggi berada pada Kecamatan Cikande, yaitu 104,18 Ha (50 – 60 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$.) dan 3173,77 Ha (40 – 50 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$) serta Kecamatan Kibin 2440,42 Ha (40 – 50 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$).

Tabel 3. Luas Permukiman Terdampak (Ha) Pada Rentang Kualitas Udara SO_2 ($\mu\text{g}/\text{Nm}^3$) Periode Juni-Agustus Tahun 2015-2019.

Kecamatan	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	Total
Bandung			1934,19	591,28		2525,47
Bojonegara			2062,41	11,03		2073,44
Cikande		55,71	1520,55	3173,77	104,18	4854,22
Ciruas		3061,30	1261,80			4323,10
Jawilan			4437,10			4437,10
Kibin			531,15	2440,42	23,80	2995,38
Kopo			3587,89	198,02		3785,91
Kragilan		833,93	2884,57	738,92		4457,43
Kramatwatu		313,74	4484,29			4798,03
Pulo Ampel	161,73	1320,53	534,61			2016,87
Total	161,73	5585,22	23238,57	7153,45	127,98	36266,95

3.2.4. Saat Angin Musim Peralihan Timur – Barat (September – November)

Nilai konsentrasi SO_2 tertinggi yang terukur selama angin musim peralihan timur – barat adalah 40 – 50 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ di Kecamatan Kramatwatu dan Pulo Ampel. Hal ini menunjukkan bahwa selama angin musim peralihan timur – barat dari tahun 2015 – 2019 tidak terukur konsentrasi SO_2 yang melampaui baku mutu (900 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$) di semua titik pemantauan di Kabupaten Serang.

Berdasarkan hasil analisis sebaran gas SO_2 selama angin musim peralihan barat – timur tahun 2015 – 2019 diperlihatkan gambaran pola dispersi gas SO_2 yang sudah dibagi dalam Zona A, B, C, D, dan E sebagaimana diperlihatkan pada gambar 8. Pada musim peralihan timur-barat (September-November) tidak terdapat titik sampel pada zona C, D, dan E.

Dari hasil analisis pola sebaran tersebut terlihat bahwa konsentrasi SO_2 tertinggi di zona A di Kecamatan Pulo Ampel dan sebagian Kramatwatu yang berada pada kisaran 30 – 40 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$. Adanya pengaruh

angin laut di Utara zona A mengakibatkan konsentrasi di Selatan zona lebih tinggi daripada bagian utara. Di Kecamatan Pulo Ampel banyak terdapat industri petrokimia yang memiliki potensi emisi gas SO_2 ke udara ambien akan tetapi tidak memberikan kontribusi pada peningkatan konsentrasi SO_2 pada saat angin musim peralihan timur – barat.

Di zona B, terlihat bahwa konsentrasi tertinggi terukur di sekitar zona industri Serang Timur yang terdispersi ke arah selatan dengan konsentrasi berkisar antara 30 – 40 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$.

Pada zona A mayoritas berwarna oranye (memiliki nilai SO_2 berkisar antara 30-40 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$). Pada zona B mayoritas berwarna hijau muda (memiliki nilai SO_2 berkisar antara 20 – 30 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$) dan oranye (30 – 40 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$). Pada peta sebaran tersebut dapat diketahui bahwa tidak ada daerah yang gas SO_2 nya melebihi ambang baku mutu. Akan tetapi, pada zona A dan B terdapat daerah yang memiliki nilai lebih tinggi dibanding wilayah lainnya.

Gambar 8. Pola Sebaran Gas SO₂ pada Angin Musim Peralihan Timur – Barat di Kabupaten Serang Tahun 2015 – 2019.

Tabel 4. Luas Permukiman Terdampak (Ha) Pada Rentang Kualitas Udara SO₂ (µg/Nm³) Periode September – November Tahun 2015-2019.

Kecamatan	0-20	20-30	30-40	40-50	Total
Bandung		1558,29	967,17		2525,47
Bojonegara		122,48	1945,96		2068,44
Cikande		3227,66	1626,56		4854,22
Ciruas		4322,96			4322,96
Jawilan		1316,13	3120,97		4437,10
Kibin		2417,68	577,70		2995,38
Kopo	59,79	2147,76	1578,36		3785,91
Kragilan		4452,71	4,72		4457,43
Kramatwatu			3758,25	735,39	4493,64
Pulo Ampel	281,83	1507,98	182,41	117,61	2089,83
Total	341,62	21073,65	13762,11	852,99	36030,37

Tabel 4 menunjukkan bahwa pada musim peralihan Timur-Barat terdapat beberapa daerah permukiman di kecamatan wilayah kajian yang terdampak dari sebaran Gas SO₂. Permukiman paling luas yang terdampak oleh gas SO₂ dengan nilai paling tinggi berada pada Kecamatan Kramatwatu, yaitu 735,39 Ha (40 – 50 µg/Nm³), Kecamatan Pulo Ampel 117,61 Ha (40 – 50 µg/Nm³) serta Kecamatan Jawilan 3120,97 Ha (30 – 40 µg/Nm³).

4. KESIMPULAN

1. Berdasarkan hasil pengukuran kualitas udara ambien di Kabupaten Serang yang telah diukur oleh Dinas Lingkungan Hidup Kabupaten Serang dari tahun 2015 – 2019 untuk parameter SO₂, terlihat bahwa tidak ada satupun yang melampaui baku mutu PP No. 41 Tahun 1999 tentang Pengendalian Pencemaran Udara.

2. Berdasarkan hasil analisis pola dispersi gas SO₂ menunjukkan adanya suatu kecenderungan bahwa konsentrasi gas relatif tinggi pada zona-zona industri, yang menunjukkan adanya kontribusi gas-gas dari kegiatan usaha industri pada beberapa angin musim yaitu: angin musim barat, peralihan barat – timur, musim timur dan peralihan timur – barat.
3. Permukiman paling luas yang terdampak oleh gas SO₂ dengan nilai paling tinggi (40-50 µg/Nm³) berada pada Kecamatan Cikande, yaitu 3.173,77 Ha. Begitupun dengan nilai gas SO₂ sebesar 30-40 µg/Nm³ seluas 4.506,02 Ha juga berada di Kecamatan Cikande.

PERSANTUNAN

Terima kasih Kami sampaikan kepada Dinas Lingkungan Hidup (DLH) Kabupaten Serang atas segala dukungan moril maupun materil terhadap pemenuhan data pada kajian ini. Tulisan ini adalah sebagian hasil dari kerjasama antara Pusyantek BPPT dengan DLH Kabupaten Serang dengan Nomor Kontrak: SPK/11-JK.11/KPA-DLH/2019 dan 120/PKS/PB/BPPT/VIII/2019.

DAFTAR PUSTAKA

- Azpurua, M.A. and Ramos, K.D. 2010. A Comparison of Spatial Interpolation Methods for Estimation of Average Electromagnetic Field Magnitude. *Progress in Electromagnetics Research*, 14, 135-145. <https://doi.org/10.2528/PIERM10083103>.
- KLH. Kementerian Lingkungan Hidup. 2004. Status Lingkungan Hidup Daerah 2004. Jakarta: KLH.
- KLH. Kementerian Lingkungan Hidup. 2008. Status Lingkungan Hidup Indonesia 2008. Jakarta: KLH.
- KLH. Kementerian Lingkungan Hidup. 2009. Modul Diklat Pengendalian Pencemaran Udara Evaluasi Data Hasil Pemantauan Kualitas Udara. Jakarta: Penerbit Pusat Pendidikan dan Pelatihan.
- Merwade V. M., Maidment D. R., and J. A. Golff. 2006. Anisotropic Considerations while Interpolating River Channel Bathymetry. *Journal of Hydrology*, Vol.331, pp.731-741.
- Muhammad, A. dan Nurbianto, B. 2006. Jakarta Kota Polusi (menggugat hak atas udara bersih). Jakarta: LP3S.
- Peraturan Pemerintah No 41 tahun 1999 mengenai Pengendalian Pencemaran Udara.
- Pramono, G. 2008. Akurasi Metode IDW dan Kriging Untuk Interpolasi Sebaran Sedimen Tersuspensi. *Jurnal Forum Geografi* Hal 97-110. Bogor: Bakosurtanal.
- Prasasti, I. Wijayanto, H. dan Christanto, M. 2005. Analisis Penerapan Metode Kriging dan Invers Distance Pada Interpolasi Data Dugaan Suhu, Air Mampu Curah (AMC) dan Indeks stabilitas Atmosfer (ISA) dari Data NOAA-TOVS. *Jurnal Pertemuan Ilmiah Tahunan MAPIN XIV* Hal 316-317. Surabaya: ITS.
- Rahmawati, F. 1999. Kualitas Udara di Jakarta Tahun 1997. Skripsi. Depok: Departemen Geografi FMIPA UI.
- Sandy, I.M. 1973. Esensi Geografi. Depok: Jurusan Geografi FMIPA-UI.
- Wahono, G. (2003). Kajian Dinamika Spatial Zat Pencemar Udara (Studi Kasus di Lokasi PT. National Gobel). Skripsi. Depok: Departemen Geografi FMIPA UI.
- Watson, D. F., and G. M. Philip. 1985. A Refinement of Inverse Distance Weighted Interpolation. *Geo-processing*, Vol.2, pp.315-327.
- Witono, D. 2003. Karakteristik Pencemaran Udara di PLTGU UJB-I Tambak Lorok Semarang (Studi Kasus Pencemaran SO₂ dan Partikel Debu). Tesis. Jakarta: Program Studi Ilmu Lingkungan UNDIP.
- Wyrtki, K. 1961. *Physical Oceanography of the Southeast Asian Waters*. Scripps Institution of Oceanography, The University of California, La Jolla.