

PENERAPAN METODE *UNIVERSAL KRIGING* (UK) UNTUK PREDIKSI KONSENTRASI *PARTICULATE MATTER 2.5* (PM_{2.5}) DI KOTA BANDUNG

Application of Universal Kriging (UK) Method for Prediction of Particulate Matter 2.5 (PM_{2.5}) Concentration in the City of Bandung

Salsabila Eka Putri¹, Dianne Amor Kusuma², Bambang Suhandi³, Budi Nurani Ruchjana^{4*}

^{1,2,4} Departemen Matematika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Padjadjaran
Jalan Raya Bandung Sumedang km 21 Jatinanagor, Sumedang, 45363, Indonesia

³Balai Observatorium Nasional Kupang, Desa Oelnasi, Kec. Kupang Tengah, Kab. Kupang, Nusa Tenggara Timur

e-mail: ¹ salsabila16001@mail.unpad.ac.id ; ² amor@unpad.ac.id ; ³ bsuhandi63@gmail.com ;

^{4*} budi.nurani@unpad.ac.id

Corresponding author*

Abstrak

Kecenderungan peningkatan aktifitas industri dan penduduk di Kota Bandung menimbulkan penurunan kualitas udara. Salah satu material penyebab polusi udara yang sangat berbahaya bagi kesehatan adalah *particulate matter 2.5* (PM_{2.5}). Upaya pengendalian dan penanggulangan konsentrasi PM_{2.5} dilakukan melalui pengukuran di beberapa lokasi. Namun karena keterbatasan alat pengukur dan biaya, sehingga tidak seluruh lokasi di Kota Bandung dapat dilakukan pengukuran konsentrasi PM_{2.5}. Data konsentrasi PM_{2.5} cenderung tidak stasioner. Oleh karena itu perlu dilakukan interpolasi terhadap data konsentrasi PM_{2.5} dengan menggunakan metode *Universal Kriging*. Dalam paper ini, metode *Universal Kriging* dapat diterapkan untuk memprediksi konsentrasi PM_{2.5} pada lokasi yang tidak tersampel dikarenakan data konsentrasi PM_{2.5} yang diamati merupakan data spasial yang memiliki konsentrasi PM_{2.5} yang berbeda pada setiap lokasi. Data dianalisis dengan bantuan *software R 3.5.3* dan *ArcGIS 10.4* untuk membuat peta kontur. Berdasarkan hasil prediksi konsentrasi PM_{2.5} pada lokasi yang tidak tersampel, diperoleh persamaan *trend* orde satu lebih baik digunakan untuk memprediksi konsentrasi PM_{2.5} dikarenakan memiliki nilai variansi eror *Universal Kriging* yang minimum dibandingkan persamaan *trend* orde dua. Hasil Penelitian menunjukkan bahwa lokasi dengan konsentrasi PM_{2.5} yang tinggi berada di sebelah barat laut Kota Bandung. Pada peta kontur diperlihatkan lokasi yang memiliki konsentrasi PM_{2.5} rendah hingga tinggi.

Kata Kunci: Kota Bandung, PM_{2.5}, *Universal Kriging*, *Trend (drift)*, Kontur.

Abstract

The tendency of increasing industrial and population activities in the city of Bandung causes a decrease in air quality. One material that causes air pollution which is very dangerous for health is *particulate matter 2.5* (PM_{2.5}). Efforts to control and overcome PM_{2.5} concentration are carried out through measurements in several locations. However, due to limitations of measuring devices and costs, so not all locations in the city of Bandung can be measured PM_{2.5} concentration. PM_{2.5} concentration data tends not to be stationary. Therefore it is necessary to interpolate the PM_{2.5} concentration data using the *Universal Kriging* method. In this paper, the *Universal Kriging* method can be applied to predict PM_{2.5} concentrations in locations that are not sampled because the observed PM_{2.5} concentration data are spatial data that have different PM_{2.5} concentrations at each location. Data were analyzed with the help of *software R 3.5.3* and *ArcGIS 10.4* to create contour maps. Based on the prediction results of PM_{2.5} concentrations at locations that were not sampled, obtained a first order *trend* equation is better used to predict PM_{2.5} concentrations because it has a minimum *Universal Kriging* error variance value compared to the second order *trend* equation. The results showed that the location with high PM_{2.5} concentration was in the northwest of Bandung City. Contour maps show locations that have low to high PM_{2.5} concentrations.

Keywords: Bandung City, PM_{2.5}, *Universal Kriging*, *Trend (drift)*, Contour

Submitted: 19th April 2020

Accepted: 10th May 2020

This is an open access article under the [CC-BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license



1. PENDAHULUAN

Polusi udara dapat didefinisikan sebagai kondisi atmosfer dimana konsentrasi material yang terdapat di dalamnya cukup tinggi, melebihi kondisi normal udara ambien sehingga dapat menimbulkan dampak yang terukur bagi manusia, hewan, vegetasi maupun substansi lainnya [11]. Salah satu material penyebab pencemaran udara yang sangat berbahaya bagi kesehatan adalah *particulate matter 2.5* (PM_{2.5}). PM_{2.5} merupakan polutan yang berukuran kurang dari 2.5 mikrometer. Konsentrasi PM_{2.5} dapat melayang di udara dalam berbagai bentuk komponen dan senyawa kimia diantaranya adalah Al, As, Br Ca, Cl, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, Ni, P, Pb, S, Si, Ti, V, Zn [10]. Sumber konsentrasi PM_{2.5} berasal dari kegiatan industri, asap kendaraan, kebakaran hutan, pembakaran sampah, dan aktifitas lainnya yang menimbulkan polusi udara. Tingkat konsentrasi PM_{2.5} yang tinggi dapat menyebabkan beberapa penyakit ISPA (infeksi saluran pernafasan akut) dan kematian. Pada skala global, diperkirakan polusi udara menyebabkan lebih dari 4,2 juta kematian pada tahun 2016 [14].

Berbicara mengenai kualitas udara di Indonesia, dalam dua dekade terakhir berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh [5] mengalami perubahan yang drastis. Konsentrasi polusi udara di Indonesia dari tahun 1998 hingga 2016 meningkat sebanyak 171 persen. Hal ini menjadikan Indonesia menjadi salah satu dari dua puluh negara tercemar di dunia.

Kota Bandung merupakan salah satu kota metropolitan terbesar di Jawa Barat dan berdasarkan data dari Badan Pusat Statistik (BPS) jumlah penduduk, industri, dan kendaraan mengalami peningkatan setiap tahunnya [2]. Kecenderungan peningkatan aktifitas penduduk dan industri di Kota Bandung menimbulkan penurunan kualitas udara. Berdasarkan data AQMS (*Air Quality Monitoring System*) konsentrasi PM_{2.5} di Kota Bandung mencapai angka 127 AQI dengan *status unhealthy for sensitive group*. Hal ini menunjukkan perlunya perhatian lebih dari pemerintah untuk bertindak dalam menangani polusi udara.

Upaya untuk meningkatkan efektifitas dalam penanggulangan masalah pencemaran udara khususnya konsentrasi PM_{2.5} adalah dengan cara memberikan perhatian lebih pada lokasi yang kadar pencemarannya tinggi. Namun, karena keterbatasan alat pengukur dan biaya yang mahal, sehingga tidak seluruh lokasi di Kota Bandung dapat dilakukan pengukuran dan pengujian konsentrasi PM_{2.5}. Oleh karena itu dibutuhkan metode untuk memprediksi konsentrasi PM_{2.5} di lokasi yang tidak tersampel.

Kriging adalah suatu metode pengestimasi variabel terestimasiasi (*regionalized variable*), dimana variabel tersebut dapat memiliki nilai yang berbeda sesuai dengan berubahnya lokasi atau tempat. Metode *Kriging* dapat dibedakan dalam beberapa macam, yaitu: *Simple Kriging*, *Ordinary Kriging*, *Universal Kriging* dan *Co-Kriging*. Metode *Universal Kriging* merupakan metode *Kriging* yang memiliki asumsi data tidak harus stasioner. Beberapa penelitian sebelumnya yang meneliti polusi udara dengan metode *Kriging* diantaranya, [6] memprediksi konsentrasi *particulate matter* di 7 kota Korea Selatan dengan menggunakan metode *Ordinary Kriging*. Selanjutnya [9] melakukan penerapan metode *Ordinary Kriging* pada pendugaan kadar NO₂ di udara. Sedangkan [4] melakukan penerapan metode *Universal Kriging* untuk memprediksi polutan menggunakan GSTAT R. Selanjutnya penelitian mengenai konsentrasi PM_{2.5} dan NO₂ di Tiongkok dengan membandingkan metode regresi, pengukuran satelit, dan *Universal Kriging* [13].

Data konsentrasi PM_{2.5} memiliki kecenderungan tidak stasioner dalam rata-rata, sehingga berdasarkan uraian penggunaan metode *Kriging* yang telah dilakukan para peneliti terdahulu, maka pada penelitian ini penulis menganalisis data spasial konsentrasi PM_{2.5} di Kota Bandung menggunakan metode *Universal Kriging* untuk memprediksi pengamatan di lokasi tidak tersampel. Pada penelitian ini diprediksi konsentrasi PM_{2.5} pada lokasi yang tidak tersampel di wilayah Kota Bandung menggunakan metode *Universal Kriging* dengan persamaan *trend* orde satu dan orde dua. Data hasil prediksi digunakan untuk membuat peta kontur sehingga dapat diketahui lokasi mana yang memerlukan perhatian khusus.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Semivariogram

Semivariogram adalah suatu perangkat untuk menggambarkan, memodelkan, dan menghitung korelasi spasial antara variabel random $Z(x_i)$ dan $Z(x_i + h)$ [1].

2.1.1 Semivariogram Eksperimental

Semivariogram eksperimental adalah semivariogram yang diperoleh dari data yang diamati atau data hasil pengukuran. Taksiran semivariogram eksperimental pada jarak h , dapat dituliskan sebagai berikut [1]:

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i + h) - Z(x_i)]^2 \quad (1)$$

dengan:

$\hat{\gamma}(h)$: Nilai semivariogram pada jarak h
 $Z(x_i)$: Nilai pengamatan di lokasi x
 $Z(x_i + h)$: Nilai pengamatan di lokasi $x + h$
 $N(h)$: Banyaknya pasangan titik yang mempunyai jarak h

2.1.2 Semivariogram Teoretis

Model semivariogram teoretis yang digunakan yaitu [1]:

1. Model *Spherical*

$$\gamma(h) = \begin{cases} c \left[\left(\frac{3h}{2a} \right) - \left(\frac{h^3}{2a^3} \right) \right], & h \leq a \\ c, & h > a \end{cases} \quad (2)$$

2. Model *Exponential*

$$\gamma(h) = \begin{cases} c \left[1 - \exp\left(\frac{-h}{a}\right) \right], & h \leq a \\ c, & h > a \end{cases} \quad (3)$$

3. Model *Gaussian*

$$\gamma(h) = \begin{cases} c \left[1 - \exp\left(\frac{-h^2}{a^2}\right) \right], & h \leq a \\ c, & h > a \end{cases} \quad (4)$$

dengan:

h : Jarak antar dua lokasi

c : *Sill*

a : *Range*

2.2 Metode *Universal Kriging*

Metode *Universal Kriging* merupakan metode *Kriging* dengan asumsi rata-rata (*mean*) tidak konstan dan data yang mempunyai kecenderungan *trend (drift)* tertentu [7]. Estimator *Universal Kriging* $\hat{Z}(x_0)$ untuk fungsi random $Z(x_i)$ adalah

$$\hat{Z}(x_0) = \sum_{i=1}^k \lambda_i Z(x_i) \quad (5)$$

jika $m(x)$ adalah persamaan *trend (drift)*, dengan persamaan sebagai berikut:

$$m(x) = \sum_{l=0}^n a_l f_l(x) \quad (6)$$

dengan:

a_l : koefisien *trend*

$f_l(x)$: koordinat lokasi

n : banyaknya orde dalam persamaan *trend*.

Penaksir atau estimator *Universal Kriging* memiliki sifat:

a. *Linear*

Estimator *Universal Kriging* yang diperoleh dari n observasi data yang digunakan membentuk model linear, yaitu:

$$\hat{Z}(x_0) = \sum_{i=1}^k \lambda_i Z(x_i). \tag{7}$$

b. *Unbiased*

Estimator *Universal Kriging* bersifat tak bias jika memenuhi persamaan $E[\hat{Z}(x_0) - Z(x_0)] = 0$. Menurut [7] estimator *Universal Kriging* akan bersifat sebagai estimator yang tak bias jika dan hanya jika:

$$\sum_{i=1}^k \lambda_i f_l(x_i) = f_l(x_0) \text{ untuk } l = 0, 1, \dots, n. \tag{8}$$

c. *Best*

Best adalah estimator *Universal Kriging* memiliki variansi estimator minimum. Persamaan variansi estimator adalah sebagai berikut:

$$\sigma^2(x_0) = 2 \sum_{i=1}^k \lambda_i \gamma_Y(x_0 - x_i) - \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \lambda_i \lambda_j \gamma_Y(x_i - x_j). \tag{9}$$

Untuk memperoleh nilai minimum dari variansi *error* menggunakan *Lagrange Multiplier* dengan parameter *Lagrange* μ_l . Persamaan *Lagrange Multiplier* untuk *Universal Kriging* dinyatakan sebagai berikut [7]:

$$L(\lambda_i, \mu_l) = \sigma^2(x_0) + 2\mu_0 \left(\sum_{i=1}^k \lambda_i - 1 \right) + 2 \sum_{l=1}^n \mu_l \left(\sum_{i=1}^k \lambda_i f_l(x_i) - f_l(x_0) \right). \tag{10}$$

Bentuk matriks untuk penyelesaian metode *Universal Kriging* adalah sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_k \\ \mu_0 \\ \mu_1 \\ \mu_2 \\ \vdots \\ \mu_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma_Y(x_1 - x_1) & \gamma_Y(x_2 - x_1) & \cdots & \gamma_Y(x_k - x_1) & 1 & f_1(x_1) & f_2(x_1) & \cdots & f_n(x_1) \\ \gamma_Y(x_1 - x_2) & \gamma_Y(x_2 - x_2) & \cdots & \gamma_Y(x_k - x_2) & 1 & f_1(x_2) & f_2(x_2) & \cdots & f_n(x_2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \gamma_Y(x_1 - x_k) & \gamma_Y(x_2 - x_k) & \cdots & \gamma_Y(x_k - x_k) & 1 & f_1(x_k) & f_2(x_k) & \cdots & f_n(x_k) \\ 1 & 1 & \cdots & 1 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ f_1(x_1) & f_1(x_2) & \cdots & f_1(x_k) & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ f_2(x_1) & f_2(x_2) & \cdots & f_2(x_k) & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_n(x_1) & f_n(x_2) & \cdots & f_n(x_k) & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \gamma_Y(x_0 - x_1) \\ \gamma_Y(x_0 - x_2) \\ \vdots \\ \gamma_Y(x_0 - x_k) \\ 1 \\ f_1(x_0) \\ f_2(x_0) \\ \vdots \\ f_n(x_0) \end{bmatrix}$$

dengan:

- $\gamma_Y(x_i - x_j)$: semivariogram antar titik-titik tersampel
- $\gamma_Y(x_0 - x_i)$: semivariogram antar titik-titik tersampel dengan titik ekstrim
- $f_l(x_i), f_l(x_j)$: koordinat lokasi dari data tersampel
- (x_i, x_j) : lokasi dari data tersampel
- λ_i : bobot $Z(x_i)$ untuk prediksi lokasi x_0
- μ_l : nilai dari parameter *Lagrange*
- x_0 : lokasi data yang akan diestimasi
- n : banyaknya order dalam persamaan *trend*.

Pada penelitian ini persamaan *trend (drift)* yang digunakan adalah sebagai berikut [7]:

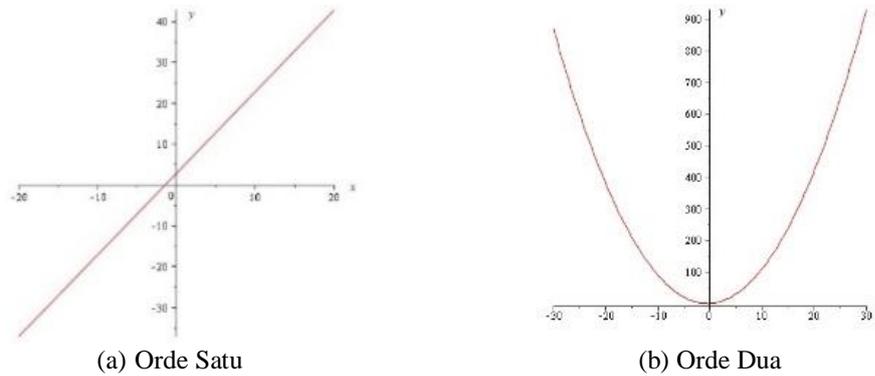
Persamaan *trend (drift)* orde satu di $D \subset R^2$ adalah sebagai berikut:

$$m(x) = m(x_i, y_i) = a_0 + a_1 x_i + a_2 y_i \tag{11}$$

Persamaan *trend (drift)* orde dua di $D \subset R^2$ adalah sebagai berikut:

$$m(x) = m(x_i, y_i) = a_0 + a_1 x_i + a_2 y_i + a_3 x_i^2 + a_4 y_i^2 + a_5 x_i y_i \tag{12}$$

Contoh grafik persamaan *trend* sebagai berikut:



Gambar 1. Grafik Polinomial Berorde Satu dan Dua

2.3 Objek Penelitian

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data sekunder mengenai polusi udara, yaitu data konsentrasi $PM_{2.5}$ di Kota Bandung pada tahun 2014 yang diperoleh dari Badan Pengelolaan Lingkungan Hidup (BPLH). Data yang ada di lembaga tersebut untuk tahun yang terdekat tidak selengkap data tahun 2014. Mengingat yang akan dianalisis adalah data spasial di lokasi-lokasi wilayah Kota Bandung, maka pemilihan data temporal 2014 tetap dapat digunakan untuk penerapan Metode *Universal Kriging*. Data tersebut berjumlah 25 lokasi tersampel yang terdiri dari (x, y) koordinat lokasi dan konsentrasi $PM_{2.5}$ di udara. Variabel penelitian yang digunakan adalah:

- x : Titik koordinat *easting*
- y : Titik koordinat *northing*
- $PM_{2.5}$: Konsentrasi $PM_{2.5}$ di udara ($\mu g/m^3$)

2.4 Tahap Analisis Data

Tahap analisis data yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Melakukan input data konsentari $PM_{2.5}$ di Kota Bandung.
2. Memeriksa kestasioneran data dengan menggunakan plot konsentrasi $PM_{2.5}$ terhadap *easting* dan *northing*. Pada tahap ini, data dicek apakah stasioner atau tidak. Jika data stasioner artinya derajat *trend* nol, sebenarnya masih dapat digunakan metode *Universal Kriging*. Namun ada umumnya metode *Universal Kriging* digunakan untuk derajat *trend* 1 atau lebih. Dengan kata lain umumnya data bersifat tidak stasioner [7].
3. Menghitung persamaan *trend* dengan menggunakan model linear. Pada penelitian ini persamaan *trend* yang digunakan adalah persamaan *trend* orde satu dan orde dua dari data konsentrasi $PM_{2.5}$ [3].
4. Menghitung semivariogram eksperimental dengan menggunakan persamaan (1). Semivariogram eksperimental digunakan untuk menggambarkan, memodelkan, dan menghitung korelasi spasial dari data yang diamati [1]. Perhitungan semivariogram eksperimental dibantu dengan menggunakan *software R*.
5. Mencocokkan model semivariogram eksperimental dengan model semivariogram teoretis untuk mendapatkan model semivariogram yang paling sesuai dengan data. Mencari model Semivariogram teoretis menggunakan persamaan (2), (3), dan (4). Model semivariogram teoretis yang paling cocok dengan data dipilih berdasarkan nilai *Sum of Squared Errors* (SSE) yang paling minimum [7].
6. Memprediksi konsentari $PM_{2.5}$ pada lokasi yang tersampel di Kota Bandung untuk melihat akurasi dari prediksi yang dilakukan dengan metode *Universal Kriging*. Setelah hasil prediksi pada lokasi yang tersampel didapat, maka langkah selanjutnya adalah memprediksi konsentrasi $PM_{2.5}$ pada lokasi yang tidak tersampel.
7. Membuat peta kontur berdasarkan hasil prediksi yang diperoleh dengan bantuan *software ArcGIS 10.4*.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Statistika Deskriptif Data Konsentrasi PM_{2.5}

Data yang digunakan dalam penelitian ini sebanyak 25 data konsentrasi PM_{2.5} di Kota Bandung. Perhitungan dengan bantuan *software* R, didapat statistika deskriptif sebagai berikut:

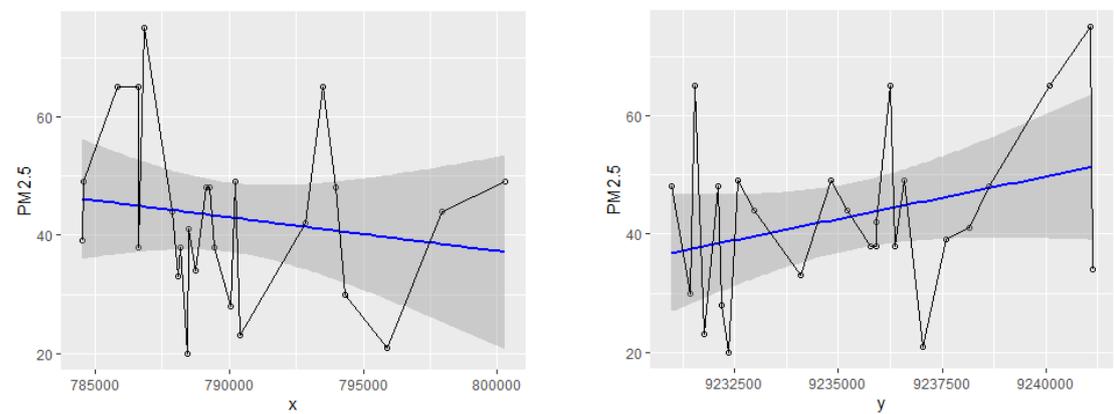
Tabel 1. Statistika Deskriptif Data Konsentrasi PM_{2.5}

	<i>Easting</i> (x)	<i>Northing</i> (y)	PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Minimum	784525	9230982	20,00
1st Quartil	787856	9232343	34,00
Median	789118	9235767	42,00
Mean	790079	9235299	42,96
3rd Quartil	792828	9237045	49,00
Maximum	800298	9241130	75,00
Variansi	-	-	197,7067

Berdasarkan Tabel 1, terlihat bahwa nilai rata-rata konsentrasi PM_{2.5} di Kota Bandung cukup tinggi yaitu, sebesar $42,96 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dengan *status unhealthy for sensitive group*. Konsentrasi minimum PM_{2.5} terdapat di Jl. Barisan Keamanan Rakyat (BKR) sebesar $20,00 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Hal ini menunjukkan kemungkinan pengambilan sampel konsentrasi PM_{2.5} di Jl. BKR merupakan kawasan dengan aktifitas industri dan kepadatan lalu lintas yang rendah. Konsentrasi maksimum PM_{2.5} terdapat di Terminal Ledeng sebesar $75,00 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Hal ini menunjukkan tingginya aktifitas yang memicu tingginya konsentrasi PM_{2.5} seperti kepadatan lalu lintas, aktifitas insdutri, dan lain-lain.

3.2 Kestasioneran Data Konsentrasi PM_{2.5}

Pada *Ordinary Kriging* diperlukan asumsi data bersifat stasioner orde dua, sedangkan pada *Universal Kriging* stasioner orde dua tidak berlaku [7], sehingga dilakukan *plotting* data konsentrasi PM_{2.5} terhadap *easting* dan *northing* untuk melihat apakah data stasioner atau tidak. Gambar 3 memperlihatkan *plotting* data konsentrasi PM_{2.5}.



Gambar 3. Plot Konsentrasi PM_{2.5} Berdasarkan *Easting* dan *Northing*

Hasil plot pada Gambar 3 terlihat bahwa data konsentrasi PM_{2.5} memiliki kecenderungan *trend (drift)*. Hal tersebut menunjukkan bahwa data konsentrasi PM_{2.5} di Kota Bandung tidak stasioner, sehingga data tersebut dapat dianalisis dengan menggunakan metode *Universal Kriging*.

3.3 Menentukan Persamaan *Trend (Drift)*

Universal kriging merupakan metode *kriging* dari data yang memiliki kecenderungan *trend (drift)* tertentu. Pada penelitian ini orde dari persamaan *trend (drift)* dibatasi yaitu orde satu dan orde dua. Perhitungan dengan bantuan *software R Studio*, didapat koefisien dari persamaan *trend (drift)* sebagai berikut:

Tabel 2. Koefisien Persamaan Trend (Drift) Orde Satu

Koefisien		
Intercept	x	y
-11970	-0,0002876	0,001326

Berdasarkan Tabel 2 diperoleh hasil dari persamaan *trend (drift)* berorde satu sebagai berikut:

$$m(x, y) = -11970 - 0,000287x + 0,00132y$$

Pada persamaan *trend (drift)* orde satu, $m(x, y)$ merupakan konsentrasi $PM_{2.5}$ dan x adalah koordinat *easting*, sedangkan y adalah koordinat *northing*, artinya ketika nilai x sama dengan nol dan nilai y sama dengan nol, maka konsentrasi $PM_{2.5}$ akan sama dengan nilai *intercept*. Jika nilai x bertambah satu satuan maka konsentrasi $PM_{2.5}$ akan berkurang sebesar 0,000287, sedangkan jika nilai y bertambah satu satuan maka konsentrasi $PM_{2.5}$ akan bertambah sebesar 0,00132.

Tabel 3. Koefisien Persamaan Trend (Drift) Orde Dua

Koefisien					
Intercept	x	y	x^2	y^2	xy
$2,66 \times 10^7$	$-2,95 \times 10^{-2}$	-5,75	$1,92 \times 10^{-7}$	$3,13 \times 10^{-7}$	$-2,98 \times 10^{-8}$

Berdasarkan Tabel 3 diperoleh hasil dari persamaan *trend (drift)* berorde dua sebagai berikut:

$$m(x, y) = (2,66 \times 10^7) - (2,95 \times 10^{-2})x - 5,75y + (1,92 \times 10^{-7})x^2 + (3,13 \times 10^{-7})y^2 - (2,98 \times 10^{-8})xy$$

Pada persamaan *trend (drift)* orde dua, $n(x, y)$ merupakan konsentrasi $PM_{2.5}$ dan x adalah koordinat *easting*, sedangkan y adalah koordinat *northing*, artinya ketika nilai x, y, x^2, y^2 dan xy sama dengan nol, maka konsentrasi $PM_{2.5}$ akan sama dengan nilai *intercept*. Jika nilai x bertambah satu satuan maka konsentrasi $PM_{2.5}$ akan berkurang sebesar $2,95 \times 10^{-2}$, jika nilai y bertambah satu satuan maka konsentrasi $PM_{2.5}$ akan berkurang sebesar 5,75, jika nilai x^2 bertambah satu satuan maka konsentrasi $PM_{2.5}$ akan bertambah sebesar $1,92 \times 10^{-7}$, jika nilai y^2 bertambah satu satuan maka konsentrasi $PM_{2.5}$ akan bertambah sebesar $3,13 \times 10^{-7}$, dan jika nilai xy bertambah satu satuan maka konsentrasi $PM_{2.5}$ akan berkurang sebesar $-2,98 \times 10^{-8}$.

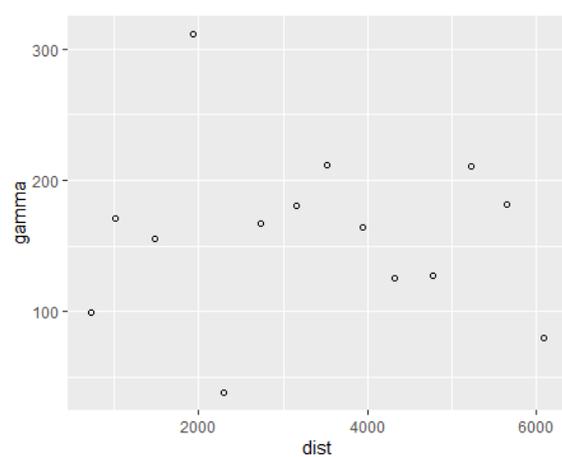
3.4 Semivariogram Eksperimental

Nilai semivariogram eksperimental atau sering disebut $\gamma(h)$ dihitung berdasarkan semua pasangan jarak yang mungkin dimana fungsi jarak yang digunakan adalah jarak *Euclidean*, dengan menggunakan persamaan (1) dapat diperoleh nilai semivariogram beserta banyaknya pasangan jarak. Pada penelitian ini data konsentrasi $PM_{2.5}$ yang tersampel terdiri dari 25 lokasi sehingga membuat proses perhitungan secara manual untuk nilai semivariogram eksperimental konsentrasi $PM_{2.5}$ menjadi sulit. Perhitungan semivariogram eksperimental dengan bantuan *software R Studio* sebagai berikut:

Tabel 4. Nilai Semivariogram Beserta Pasangan Data dan Jaraknya

No	Banyaknya pasangan data yang berjarak sama	Jarak (m)	Semivariogram Eksperimental PM _{2,5}
1	5	724,1058	98,89491
2	2	1012,2549	170,77238
3	7	1474,8394	155,30337
4	7	1935,1288	311,6633
5	9	2292,9559	38,10753
6	13	2736,5427	167,09706
7	12	3153,8177	180,24385
8	10	3519,9141	211,68195
9	16	3934,9342	164,27715
10	9	4318,7915	125,51119
11	22	4769,4213	127,09749
12	20	5226,8506	210,92228
13	20	5653,0663	181,31619
14	14	6089,4098	80,14284

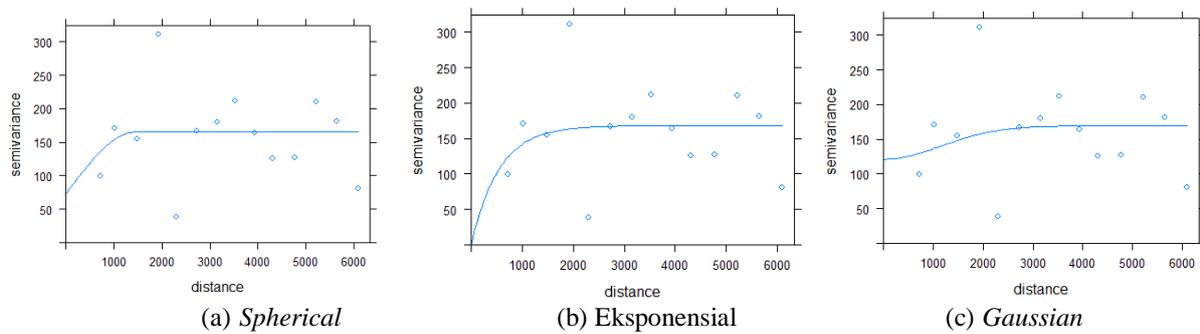
Tabel 4 memperlihatkan bahwa dari 25 lokasi tersampel terdapat 14 kriteria banyaknya pasangan data yang berjarak sama dan memiliki nilai semivariogram setiap jaraknya. Selanjutnya diperoleh plot yang dapat dilihat pada Gambar 4. dari nilai semivariogram eksperimental $\gamma(h)$ terhadap jaraknya (h).

**Gambar 4. Semivariogram Eksperimental**

Dari Gambar 4 selanjutnya dilakukan pemilihan model semivariogram teoretis yang terbaik dengan cara yang *fitting* model semivariogram teoretis yang sesuai dengan semivariogram pada Gambar 4.

3.5 *Fitting* Model Semivariogram Teoretis

Tahap pertama dalam *fitting* model semivariogram teoretis adalah menentukan model dasar semivariogram teoretis. Model semivariogram teoretis yang digunakan pada penelitian ini yaitu model semivariogram teoretis *spherical*, eksponensial, dan *gaussian*. Dengan bantuan *software R Studio*, didapat ketiga model semivariogram teoretis untuk data konsentrasi PM_{2,5} sebagai berikut:



Gambar 5. Semivariogram Teoretis

Selanjutnya didapat nilai *nugget effect sill* dan *range* dari model semivariogram teoretis sebagai berikut:

Tabel 5. Nilai *Nugget Effect*, *Sill* dan *Range* Model Semivariogram Teoretis

Model	<i>Nugget effect</i>	<i>Sill</i>	<i>Range</i>
<i>Spherical</i>	72,847	91,998	1433,085
Eksponensial	0	168,210	541,39
<i>Gaussian</i>	120,908	48,267	1637,165

3.6 Penentuan Model Semivariogram Terbaik

Model semivariogram terbaik diperoleh dengan menghitung *Sum of Squared Errors* (SSE) disetiap *lag*. Besarnya *error* diperoleh dari selisih nilai semivariogram eksperimental dengan nilai semivariogram teoretis di setiap *lag*. Hasil nilai *error* dari model semivariogram adalah sebagai berikut:

Tabel 6 Perhitungan *Sum of Squared Errors* (SSE) Model Semivariogram

SSE Model Semivariogram	
Model	Nilai
<i>Spherical</i>	0,01414573
Eksponensial	0,01186995
<i>Gaussian</i>	0,01250706

Berdasarkan Tabel 6 dari ketiga model semivariogram teoretis tersebut, terlihat bahwa model semivariogram teoretis terbaik yang dipilih adalah model semivariogram eksponensial, karena memiliki nilai *Sum of Squared Errors* (SSE) paling minimum diantara model semivariogram *spherical* dan *gaussian*, karena semakin kecil nilai SSE maka semakin baik model tersebut, dengan nilai SSE sebesar 0,01186995.

3.7 Penerapan Metode *Universal Kriging* Untuk Prediksi Konsentrasi $PM_{2.5}$

Data yang diprediksi sebanyak 10 lokasi yang sebelumnya telah diketahui lokasi sampelnya dengan asumsi lokasi tersebut tidak tersampel. Data hasil prediksi kemudian dibandingkan dengan data konsentrasi $PM_{2.5}$ yang tersampel untuk mencari nilai residual pada masing-masing persamaan orde *trend*. Nilai residual dapat dilihat pada Tabel 7 dan Tabel 8.

Tabel 7. Hasil Prediksi dan Residual Konsentrasi PM_{2.5} pada Lokasi tersampel Orde Satu

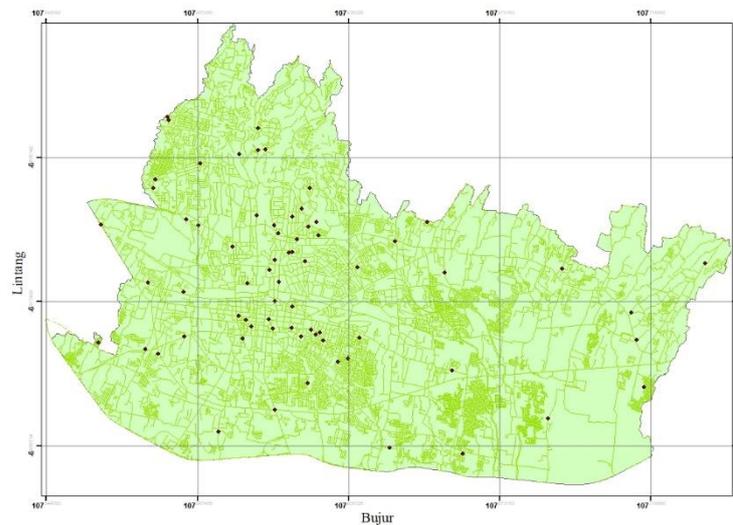
No	Koordinat	PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Prediksi PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Residual
1	(794319.6, 9231427)	30	30,00652	0,0000425
2	(785819.1, 9240091)	65	64,99670	0,0000109
3	(795880.9, 9237045)	21	21,00527	0,0000278
4	(797935.2, 9235203)	44	43,99862	0,0000019
5	(786612.8, 9231531)	65	64,99092	0,0000824
6	(786808.6, 9241060)	75	74,98005	0,0003980
7	(793507.6, 9236250)	65	64,98232	0,0003126
8	(788090.4, 9234099)	33	33,00810	0,0000656
9	(784524.7, 9237596)	39	39,00532	0,0000283
10	(788158.3, 9235909)	38	38,00317	0,0000100
<i>Sum of Squared Errors (SSE)</i>				0,00098

Tabel 8. Hasil Prediksi dan Residual Konsentrasi PM_{2.5} pada Lokasi tersampel Orde Dua

No	Koordinat	PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Prediksi PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Residual
1	(794319.6, 9231427)	30	30,01022	0,0001044
2	(785819.1, 9240091)	65	64,99802	0,0000039
3	(795880.9, 9237045)	21	21,00361	0,0000130
4	(797935.2, 9235203)	44	43,99773	0,0000052
5	(786612.8, 9231531)	65	64,98997	0,0001006
6	(786808.6, 9241060)	75	74,98200	0,0003240
7	(793507.6, 9236250)	65	64,97961	0,0004158
8	(788090.4, 9234099)	33	33,00737	0,0000543
9	(784524.7, 9237596)	39	39,00706	0,0000498
10	(788158.3, 9235909)	38	38,00301	0,0000091
<i>Sum of Squared Errors (SSE)</i>				0,00108

Berdasarkan Tabel 7 dan Tabel 8 diperoleh nilai residual dari data sampel dan data prediksi di 10 lokasi sampel dengan asumsi tidak tersampel. Nilai SSE yang diperoleh untuk orde satu sebesar 0,00098007 dan untuk orde dua sebesar 0,00108. Persamaan *trend* orde satu memiliki nilai SSEI yang lebih kecil dibandingkan persamaan *trend* orde dua, sehingga metode *Universal Kriging* menggunakan persamaan *trend* orde satu lebih akurat digunakan untuk memprediksi konsentrasi PM_{2.5}.

Setelah melakukan prediksi pada lokasi tersampel dan hasilnya mendekati nilai sebenarnya dengan koefisien korelasi yang sangat kuat sebesar 99,97% , selanjutnya diprediksi konsentrasi PM_{2.5} pada lokasi yang tidak tersampel. Banyaknya lokasi yang diprediksi konsentrasi PM_{2.5} di Kota Bandung adalah 69 lokasi. Lokasi yang diprediksi konsentrasi PM_{2.5} ditunjukkan pada Gambar 6, sebagai berikut:



Gambar 6 Peta Lokasi Prediksi Konsentrasi PM_{2.5} di Kota Bandung

Statistika deskriptif dari hasil prediksi konsentrasi PM_{2.5} pada lokasi yang tidak tersampel dapat dilihat sebagai berikut:

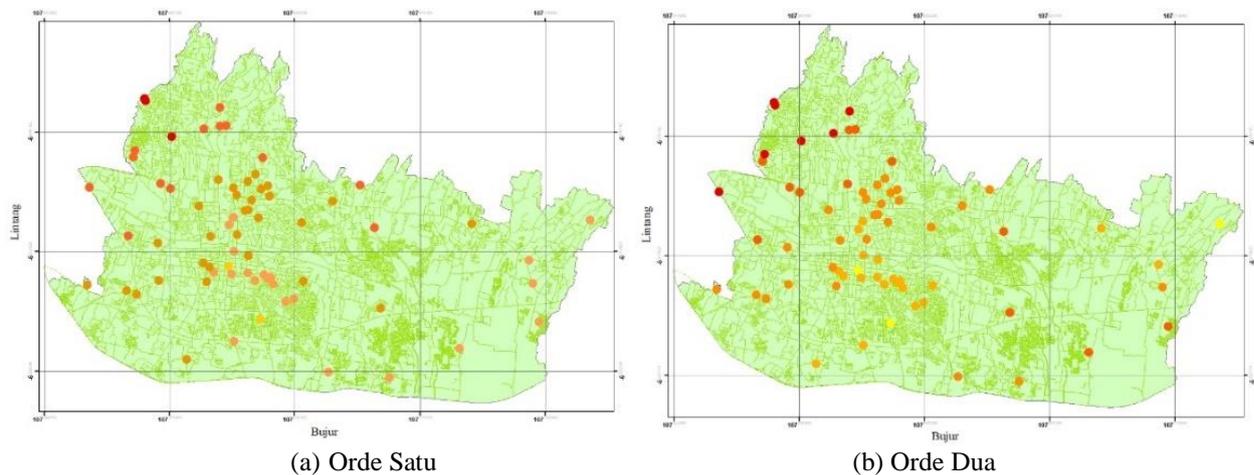
Tabel 9. Statistika Deskriptif Hasil Prediksi Konsentrasi PM_{2.5} pada Lokasi Tidak Tersampel

	PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	
	Orde Satu	Orde Dua
Minimum	34,56	33,62
1st Quartil	39,65	39,42
Median	42,17	41,21
Mean	42,58	42,78
3rd Quartil	44,93	45,11
Maximum	54,35	59,79
Rata-rata Variansi Error Universal Kriging	167,22	172,7

Tabel 9 memperlihatkan bahwa hasil prediksi memiliki nilai rata-rata konsentrasi PM_{2.5} di Kota Bandung cukup tinggi dengan *status unhealthy for sensitive group*. Nilai rata-rata untuk orde satu sebesar $42,58 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dan untuk orde dua sebesar $42,78 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Hasil prediksi konsentrasi minimum PM_{2.5} untuk orde satu terdapat di Jl. Kaum sebesar $34,56 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dan orde dua terdapat di Jl. Cigagak sebesar $33,62 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Hasil prediksi konsentrasi maksimum PM_{2.5} untuk orde satu terdapat di Jl. Tonggoh sebesar $54,35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dan orde dua terdapat di Jl. Geger Kalong sebesar $59,79 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Hasil prediksi dan variansi kriging konsentrasi PM_{2.5} pada lokasi yang tidak tersampel dengan metode *Universal Kriging* orde satu dan orde dua memiliki nilai yang bervariasi. Hal ini disebabkan oleh data hasil pengamatan yang memiliki kecenderungan *trend(drift)* tertentu. Persamaan *trend* orde satu memiliki nilai variansi eror yang minimum dibandingkan persamaan *trend* orde dua yaitu sebesar 167,22, sehingga metode *Universal Kriging* menggunakan persamaan *trend* orde satu lebih baik digunakan untuk memprediksi konsentrasi PM_{2.5} pada lokasi yang tidak tersampel.

3.8 Peta Kontur

Peta kontur dibuat untuk memvisualisasikan hasil prediksi konsentrasi PM_{2.5} yang berfungsi untuk mempermudah dalam melihat lokasi dengan pencemaran tinggi maupun rendah. Peta kontur yang dibangun memperlihatkan seluruh 69 lokasi prediksi serta konsentrasi PM_{2.5}. Peta kontur yang dihasilkan dengan bantuan menggunakan *software ArcGIS 10.4* [8] untuk metode *Universal Kriging* dengan persamaan *trend* orde satu dan orde dua dapat dilihat pada Gambar 7 sebagai berikut:



Gambar 7. Peta Kontur Konsentrasi PM_{2.5} di Kota Bandung

Warna dalam peta pada Gambar 7 menunjukkan tinggi rendahnya konsentrasi PM_{2.5} di lokasi tersebut. Warna yang lebih gelap atau merah menunjukkan bahwa di lokasi tersebut memiliki konsentrasi PM_{2.5} yang tinggi, sedangkan warna yang lebih cerah atau kuning menunjukkan bahwa di lokasi tersebut memiliki konsentrasi PM_{2.5} yang lebih rendah. Pada peta kontur dapat diketahui warna yang lebih gelap atau merah untuk orde satu dan orde dua berada di sebelah barat laut Kota Bandung. Hal ini menunjukkan bahwa lokasi di sebelah barat laut Kota Bandung memiliki konsentrasi PM_{2.5} yang tinggi, sehingga dibutuhkan penanganan yang lebih khusus dari pemerintah. Berdasarkan hasil prediksi di lokasi tidak tersampel terdapat 3 lokasi dengan status *unhealthy* untuk orde satu, yaitu Jl. Geger Kalong, Jl. Tonggoh, dan Jl. Ir. Sutami dan 7 lokasi dengan status *unhealthy* untuk orde dua, yaitu Jl. Negla Sari, Jl. Raya Cimindi, Jl. Geger Kalong, Jl. Tonggoh, Jl. Ir. Sutami, Jl. Sari Wangi, dan Jl. Kapt. Tendea, sedangkan lokasi lainnya dalam status *moderate* hingga *unhealthy for sensitive groups*. Lokasi-lokasi tersebut ditunjukkan dengan titik-titik berwarna merah (*unhealthy*) dan warna kuning (*moderate*). Hasil peta kontur ini dapat digunakan sebagai petunjuk wilayah yang memiliki konsentrasi PM_{2.5} yang tinggi atau rendah, sehingga diharapkan menjadi masukan bagi instansi terkait dalam menangani pencemaran udara di Kota Bandung.

4. KESIMPULAN

1. Metode *Universal Kriging* dengan semivariogram eksponensial dapat diterapkan pada data konsentrasi PM_{2.5} di Kota Bandung dikarenakan data konsentrasi PM_{2.5} yang diamati tidak stasioner. Berdasarkan hasil perbandingan persamaan *trend* orde satu dan orde dua pada 10 lokasi tersampel dengan asumsi lokasi tersebut tidak tersampel, diperoleh persamaan *trend* orde satu lebih baik digunakan untuk memprediksi konsentrasi PM_{2.5} dikarenakan memiliki nilai SSE yang minimum dibandingkan persamaan *trend* orde dua. Berdasarkan hasil prediksi konsentrasi PM_{2.5} pada lokasi yang tidak tersampel, diperoleh persamaan *trend* orde satu lebih akurat digunakan untuk memprediksi konsentrasi PM_{2.5} dikarenakan memiliki nilai variansi eror *Universal Kriging* yang minimum dibandingkan persamaan *trend* orde dua.
2. Pada peta kontur dapat dilihat warna yang lebih gelap atau merah untuk orde satu dan orde dua berada di sebelah barat laut Kota Bandung. Berdasarkan hasil prediksi di lokasi tidak tersampel terdapat 3 lokasi dalam status *unhealthy* untuk orde satu, dan 7 lokasi dalam status *unhealthy* untuk orde dua, sedangkan lokasi lainnya dalam status *moderate* hingga *unhealthy for sensitive groups*.
3. Hasil penelitian dapat digunakan sebagai masukan bagi pengambil kebijakan dalam menangani masalah pencemaran di kota Bandung. Diharapkan dilakukan survey dan pengolahan data secara rutin sehingga diperoleh dampak usaha penanganan pencemaran lingkungan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Rektor Universitas Padjadjaran yang telah memberikan dukungan dalam diseminasi hasil penelitian dosen dan mahasiswa melalui Hibah Internal *Academic Leadership Grant* (ALG) dengan nomor kontrak: 1427/UN6.3.1/LT/2020 dan *reviewer* yang telah memberikan masukan untuk perbaikan paper ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Armstrong, *Basic Linear Geostatistics*, Jerman: Springer, 1998.
- [2] Badan Pusat Statistik, *Kota Bandung dalam Angka. Bandung*: Badan Pusat Statistik Provinsi Jawa Barat, 2018
- [3] N. Cressie, *Statistics for Spatial Data*, Revised Edition, New York: John Wiley and Sons. Inc, 1993.
- [4] A. N. Falah, B. Subartini, dan B. N. Ruchjana, "Application of Universal Kriging for Prediction Pollutant using GStat R". *Journal of Physics: Conf. Series* 893 012022, 2017.
- [5] M. Greenstone, dan F. Qing, "Kualitas Udara Indonesia yang Memburuk dan Dampaknya terhadap Harapan Hidup", Indonesia report: Energy Policy Institute at the University of Chicago, 2019.
- [6] S. Y. Kim, S. J. Yi, Y. S. Eum, H. J. Choi, H. Shin, H. G. Ryou, dan H. Kim, "Ordinary Kriging Approach to Predicting Long-term Particulate Matter Concentrations in Seven Major Korean Cities". *Environmental Health and Toxicology*, Vol. 29, eISSN: 2233-6567, 2014.
- [7] R. A. Olea, *Geostatistics for Engineers and Earth Scientists*, United States of America: Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [8] A. Prasetyo, *Modul Dasar ArcGIS 10 Aplikasi Pengelolaan Sumberdaya Alam*, Bogor: Institut Pertanian Bogor, 2011.
- [9] G. Rozalia, Y. Hasbi, dan D. Ispriyanti, "Penerapan Metode Ordinary Kriging pada Pendugaan Kadar NO₂ di Udara (Studi Kasus: Pencemaran Udara di Kota Semarang)", *Jurnal Gaussian*, Vol.5, No. 1, ISSN: 2339-2541, 2016.
- [10] M. Santoso, D. D. Lestiani, R. Mukhtar, E. Hamonangan, H. Syafrul, A. Markwitz, dan P. K. Hopke "Preliminary Study of the Sources of Ambient Air Pollution in Serpong Indonesia", *Atmospheric Pollution Research* 2 190-196, 2011.
- [11] J. H. Seinfeld, dan S. N. Pandis, *Atmospheric Chemistry and Physics, From Air Pollution to Climate Change*. Wiley-Interscience, 1997.
- [12] Suhartono, *Analisis Data Statistik dengan R*, Surabaya: Lab. Statistik Komputasi, ITS, 2008.
- [13] H. Xu, M. J. Bechle, M. Wang, A. A. Szpiro, S. Vedal, Y. Bai, dan J. D. Marshall, "PM_{2.5} and NO₂ Exposure Models for China Based on Land use Regression, Satellite Measurement, and Universal Kriging", *Science of the Total Environment* 655, 2019.
- [14] World Health Organization, *Monitoring Health for The SDGs, Sustainable Development Goals*. Geneva: World Health Organization, 2018.

