

PENERAPAN METODE *UNIVERSAL KRIGING* UNTUK MENGESTIMASI LAJU PENURUNAN MUKA TANAH DKI JAKARTA

Nabilah Sofieyanti¹, Dwi Agustin Nuriani Sirodj^{2*}

^{1,2} Prodi Statistika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Islam Bandung, Indonesia

*e-mail: dwi.agustinnuriani@unisba.ac.id

DOI: 10.14710/j.gauss.13.2.431-442

Article Info:

Received: 2024-08-26

Accepted: 2024-12-17

Available Online: 2024-12-19

Keywords:

Interpolation; universal kriging;
land subsidence rate

Abstract: DKI Jakarta is one of the provinces experiencing land subsidence problems. Monitoring the rate of land subsidence is very important to mitigate and control environmental impacts. One of the main problems in tracking the rate of land subsidence is the limitation of monitoring tools. Therefore, the Universal Kriging spatial interpolation method can be used to estimate the rate of land subsidence at unsampled locations. This research uses secondary data on the rate of land subsidence in DKI Jakarta Province in 2022. This research aims to produce an estimated value of the land subsidence rate at an unsampled location so that vulnerable areas with unknown land subsidence rates can also be monitored more effectively. Based on the results, the Spherical theoretical semivariogram is the best model because it has the smallest RMSE value compared to other models. The estimation results show that the average subsidence rate is 0,03512 cm/year. The largest subsidence rate is 0,05355 cm/year in Duri Kosambi, and the smallest subsidence rate is 0,03054 cm/year in Tangki. The Universal Kriging method effectively estimates the subsidence rate in unsampled locations. This method can be used as a first step in mitigating, controlling, and preventing the impacts of land subsidence.

1. PENDAHULUAN

Geostatistika adalah bidang yang menggabungkan ilmu pertambangan, geologi, matematika, dan statistika (Cressie, 1993). Geostatistika memanfaatkan data spasial yang mencakup informasi geografis untuk menganalisis fenomena yang dipengaruhi oleh titik lokasi. Dikarenakan data spasial dikumpulkan dari berbagai lokasi, sehingga ada indikasi ketergantungan antara nilai pengukuran data dengan lokasi tersebut. Oleh karena itu, metode geostatistik banyak diterapkan sebagai alat untuk memperkirakan atribut spasial pada lokasi yang tidak teramati seperti estimasi elevasi tanah (Respatti dkk., 2014), sumber daya alam seperti batu bara (Dika Hadi Anugrah dkk., 2022), curah hujan (Ega Hermawan dkk., 2020), polutan udara seperti PM 2.5 (Eka Putri dkk., 2020), dan lain-lain.

Metode *kriging* adalah salah satu metode atau teknik geostatistik yang digunakan untuk memperkirakan nilai di lokasi yang belum teramati berdasarkan data teramati di sekitarnya. *Universal Kriging* termasuk dalam metode *Kriging* yang merupakan pengembangan dari *Ordinary Kriging* untuk menangani data dengan kecenderungan atau *trend* spasial (data tidak stasioner). *Universal Kriging* dikembangkan dengan tepat untuk mengidentifikasi dan menghitung *trend* dalam data (Kiš, 2016).

Pengaplikasian metode *kriging* memerlukan semivariogram untuk melihat keragaman spasial antar data yang diamati (Djuraidah dkk., 2019). Ada dua jenis semivariogram yaitu eksperimental dan teoritis. Semivariogram eksperimental dihasilkan dari data pengamatan

dan divisualisasikan dalam grafik, kemudian dicocokkan dengan kurva model teoritis seperti *Spherical*, *Ekspensial*, atau *Gaussian*.

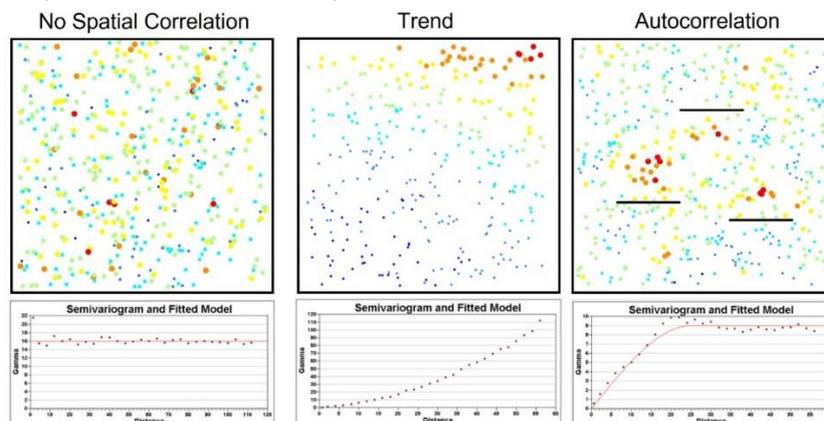
Data laju penurunan muka tanah juga termasuk data spasial karena pengukurannya melibatkan informasi dari lokasi pengamatan. DKI Jakarta menjadi salah satu provinsi yang mengalami permasalahan penurunan tanah yang dapat disebabkan karena faktor alam maupun akibat aktivitas manusia (Khoirunisa dkk., 2015). Tentu dengan adanya permasalahan ini menyebabkan kerugian bagi wilayah yang mengalaminya, seperti rusaknya infrastruktur, adanya amblesan tanah, genangan air, bahkan menyebabkan banjir rob (Kasfari dkk., 2018).

Pengamatan laju penurunan muka tanah harus dilakukan secara kontinu dan memperbanyak jumlah titik pengamatan agar dapat dilakukan upaya mitigasi, pengendalian, dan pencegahan terjadinya penurunan muka tanah (Kasfari dkk., 2018). Akan tetapi, melakukan pengamatan laju penurunan tanah pada banyak titik monitoring membutuhkan biaya, waktu, dan sumber daya manusia yang tidak sedikit. Oleh karena itu, untuk mendapatkan data pada lokasi yang tidak tersampel dapat dilakukan suatu metode interpolasi spasial seperti *Universal Kriging*. Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi semivariogram teoritis terbaik untuk estimasi dan mengetahui hasil estimasi laju penurunan muka tanah pada lokasi tidak tersampel DKI Jakarta tahun 2022.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Himpunan variabel acak $\{Z(s), s \in D\}$ diasumsikan memenuhi asumsi stasioner apabila mean dan variansnya konstan dari variabel terregional di lokasi tertentu $Z(s_1), Z(s_2), \dots, Z(s_n)$ sama untuk setiap penambahan jarak sebesar h yaitu $Z(s_1 + h), Z(s_2 + h), \dots, Z(s_n + h)$. Jika data spasial memenuhi stasioneritas, maka metode *Ordinary Kriging* dapat dilakukan. Namun jika stasioneritas tidak dapat terpenuhi atau terdapat *trend* maka dapat menggunakan metode *Universal Kriging* (Salwa R dkk., 2020). Adanya *trend* atau kestasioneritasan, dapat dilihat melalui plot dari nilai data terhadap titik koordinatnya. Kemudian, untuk mengidentifikasi *trend* atau kecenderungan dapat dilihat berdasarkan gradasi warna dari besaran nilai pengukuran data.

Jika data menunjukkan pola yang konsisten di seluruh area, dapat mengindikasikan bahwa data memenuhi stasioneritas spasial. Jika terlihat ada *trend*, yang mengindikasikan adanya pola tertentu maka tidak memenuhi stasioneritas spasial seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1 (Charles Holbert, 2023).



Gambar 1. (a) Tidak Terdapat Korelasi Spasial (b) *Trend* (c) Terdapat Korelasi Spasial

Semivariogram eksperimental memperkirakan variabilitas spasial antara nilai-nilai dalam kumpulan data spasial dengan membandingkan jarak antara titik pengamatan. Rumus untuk membentuk semivariogram eksperimental sebagai berikut (Webster & Oliver, 2007) :

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

Keterangan :

- $\gamma(h)$ = Semivarian
- $Z(s_i + h)$ = Nilai yang diamati di titik $s_i + h$
- $Z(s_i)$ = Nilai yang diamati di titik s_i
- $N(h)$ = Jumlah pasangan titik yang memiliki jarak h

Adapun untuk semivariogram eksperimental jika terdapat *trend* atau untuk *Universal Kriging*, semivariogram didasarkan pada residu. Semivariogram eksperimental residu dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut (Falsh dkk., 2017):

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

Di mana $m(s)$ merupakan persamaan *trend/drift*.

Untuk analisis lanjutan, semivariogram eksperimental digantikan oleh semivariogram teoritis yang sesuai. Penyesuaian dilakukan dengan melihat bentuk kurva semivariogram teoritis yang mirip dengan semivariogram eksperimental. Komponen-komponen yang dipertimbangkan sebagai berikut (Respatti dkk., 2014):

- a) Efek *nugget* (C_0), efek *nugget* merujuk pada nilai semivariogram ketika jaraknya mendekati nol.
- b) *Sill* ($C_0 + C$), *sill* adalah nilai semivariogram pada titik di mana tidak terjadi peningkatan yang signifikan lagi, yaitu ketika semivariogram mencapai nilai konstan atau stabil).
- c) *Range* (A), *range* merupakan jarak (h) maksimum di mana semivariogram mencapai *sill* yang menunjukkan batas di mana masih terdapat korelasi antar data.

Umumnya beberapa jenis model semivariogram teoritis yang sering digunakan sebagai berikut (Robertson, 2008):

1. Model *Spherical*

$$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + C \left[1,5 \left(\frac{h}{A} \right) - 0,5 \left(\frac{h}{A} \right)^3 \right] & , h \leq A \\ C_0 + C & , h > A \end{cases} \quad (3)$$

2. Model *Eksponensial*

$$\gamma(h) = C_0 + C \left[1 - \exp \left(-\frac{h}{A} \right) \right] \quad (4)$$

3. Model *Gaussian*

$$\gamma(h) = C_0 + C \left[1 - \exp \left(-\frac{h^2}{A^2} \right) \right] \quad (5)$$

Metode *Universal Kriging* merupakan salah satu macam metode *kriging* dengan asumsi jika rata-rata (μ) tidak diketahui dan datanya mengandung *trend* atau data yang non-

stasioner(Cressie, 1990). Estimasi nilai pada lokasi atau titik yang tidak tersampel dengan data yang memiliki *trend*, digunakan estimator *Universal Kriging* sebagai berikut:

$$\hat{Z}(s_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(s_i) \quad \text{dengan} \quad \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad (6)$$

Keterangan :

- $\hat{Z}(s_0)$ = Nilai estimasi pada titik s_0
- λ_i = Bobot estimator kriging pada lokasi ke- i
- $Z(s_i)$ = Nilai dari variabel sampel s_i pada lokasi ke- i
- n = Banyaknya titik sampel data

Jika dituliskan secara rinci, matriks untuk *Universal Kriging* sebagai berikut:

$$\begin{pmatrix} \gamma(s_1 - s_1) & \gamma(s_2 - s_1) & \cdots & \gamma(s_n - s_1) & 1 & f_1(s_1) & \cdots & f_p(s_1) \\ \gamma(s_1 - s_2) & \gamma(s_2 - s_2) & \cdots & \gamma(s_n - s_2) & 1 & f_1(s_2) & \cdots & f_p(s_2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \gamma(s_1 - s_n) & \gamma(s_2 - s_n) & \cdots & \gamma(s_n - s_n) & 1 & f_1(s_n) & \cdots & f_p(s_n) \\ 1 & 1 & \cdots & 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ f_1(s_1) & f_1(s_2) & \cdots & f_1(s_n) & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_p(s_1) & f_p(s_2) & \cdots & f_p(s_n) & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_n \\ m_0 \\ m_1 \\ \vdots \\ m_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma(s_1 - s_0) \\ \gamma(s_2 - s_0) \\ \vdots \\ \gamma(s_n - s_0) \\ 1 \\ f_1(s_0) \\ \vdots \\ f_p(s_0) \end{pmatrix} \quad (7)$$

Nilai estimasi bobot kriging λ_i berdasarkan Persamaan (7) sebagai berikut :

$$\begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_n \\ m_0 \\ m_1 \\ \vdots \\ m_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma(s_1 - s_1) & \gamma(s_2 - s_1) & \cdots & \gamma(s_n - s_1) & 1 & f_1(s_1) & \cdots & f_p(s_1) \\ \gamma(s_1 - s_2) & \gamma(s_2 - s_2) & \cdots & \gamma(s_n - s_2) & 1 & f_1(s_2) & \cdots & f_p(s_2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \gamma(s_1 - s_n) & \gamma(s_2 - s_n) & \cdots & \gamma(s_n - s_n) & 1 & f_1(s_n) & \cdots & f_p(s_n) \\ 1 & 1 & \cdots & 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ f_1(s_1) & f_1(s_2) & \cdots & f_1(s_n) & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_p(s_1) & f_p(s_2) & \cdots & f_p(s_n) & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \gamma(s_1 - s_0) \\ \gamma(s_2 - s_0) \\ \vdots \\ \gamma(s_n - s_0) \\ 1 \\ f_1(s_0) \\ \vdots \\ f_p(s_0) \end{pmatrix} \quad (8)$$

Keterangan :

- $\gamma(s_i - s_j)$ = Semivarian dari semivariogram teoritis antar titik tersampel i dan j
- $\gamma(s_i - s_0)$ = Semivarian dari semivariogram teoritis antar titik tersampel dengan titik estimasi
- $f_p(s_i)$ = Titik koordinat bujur dan lintang pengambilan sampel data
- λ_i = Bobot $Z(s_i)$ untuk prediksi lokasi s_0
- m = Nilai parameter *Lagrange*
- s_0 = Titik lokasi data yang akan diestimasi
- n = Banyaknya titik sampel
- p = Banyaknya order dalam persamaan *trend*

Dalam *Universal Kriging*, persamaan *trend* dimodelkan dengan fungsi monomial dari koordinat lokasi s_i . Maka untuk *trend* linier, $p = 3$ yaitu $f_0(s_i) = 1$, $f_1(s_i)$ adalah koordinat x (bujur atau *longitude*) dari lokasi s_i dan $f_2(s_i)$ adalah koordinat y (lintang atau *latitude*) dari lokasi s_i .

Setelah nilai-nilai bobot *Kriging* λ_i telah diperoleh, maka penaksiran nilai di lokasi yang ingin diketahui s_0 dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan *Universal Kriging* yaitu pada Persamaan (6).

Sebelum interpolasi sesungguhnya dilakukan, penting untuk mengetahui seberapa akurat model semivariogram teoritis yang akan digunakan dengan validasi silang. Salah satu validasi silang yang dapat digunakan yaitu metode *Leave-One-Out-Cross-Validation* (LOOCV) di mana data sebanyak n dihilangkan 1 sebagai data testing, kemudian sisa data $n - 1$ tersebut dijadikan sebagai data training. Sebagai contoh $Z(s_1), Z(s_2), \dots, Z(s_n)$

merupakan titik data pengamatan ke- n yang salah satunya sementara dihapus. Pengujian dilakukan pada $n - 1$ data pengamatan. Nilai aktual $Z(s_i)$ dibandingkan dengan nilai estimasi $\hat{Z}_{-i}(s_i)$ dari data yang dihapus. Kesalahan (galat) estimasi untuk titik pengamatan yang dihilangkan dapat dihitung dengan rumus berikut:

$$e(s_i) = Z(s_i) - \hat{Z}_{-i}(s_i), i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (9)$$

Di mana $Z(s_i)$ adalah nilai aktual dan $\hat{Z}_{-i}(s_i)$ adalah nilai estimasi pada saat data ke- i dihapus. RMSE dapat digunakan sebagai ukuran untuk membandingkan keakuratan model. Berikut merupakan rumus perhitungan nilai RMSE:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \{Z(s_i) - \hat{Z}_{-i}(s_i)\}^2} \quad (10)$$

Nilai RMSE model yang lebih kecil menunjukkan tingkat presisi estimasi yang lebih baik dan sebaliknya.

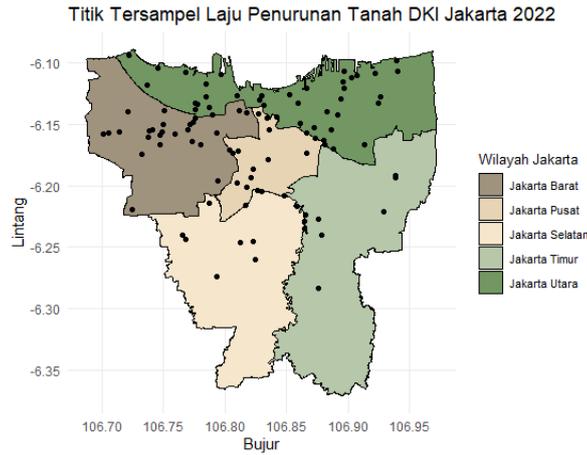
3. METODE PENELITIAN

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data sekunder tingkat/laju penurunan muka tanah DKI Jakarta tahun 2022 yang bersumber dari Dinar Sumber Daya Air pada laman Satu Data Jakarta. Terdapat tiga variabel yang digunakan yaitu titik koordinat bujur (X), titik koordinat lintang (Y), dan laju penurunan tanah dalam cm/tahun (Z). Langkah-langkah yang dilakukan sebagai berikut:

- a) Melakukan persiapan data spasial laju penurunan tanah di DKI Jakarta tahun 2022.
- b) Membuat statistik deskriptif untuk memperoleh informasi mengenai nilai-nilai pemusatan seperti rata-rata, variansi, standar deviasi, nilai maksimal dan nilai minimum.
- c) Mengidentifikasi stasioneritas atau memeriksa *trend* dari data dengan melihat plot variabel laju penurunan tanah (Z) berdasarkan warna besaran nilai laju penurunan terhadap titik koordinat bujur (X) dan titik koordinat (Y) seperti pada Gambar 1.
- d) Membentuk semivariogram eksperimental seperti pada Persamaan (1) dan jika terdapat *trend* pada data maka semivariogram eksperimental dibentuk dengan Persamaan (2).
- e) Mencocokkan semivariogram teoritis berdasarkan hasil semivariogram eksperimental. Lalu membentuk rumus model teoritis seperti pada Persamaan (3), (4), dan (5).
- f) Melakukan validasi silang setiap model dengan metode LOOCV dalam Universal Kriging. Galat diperoleh melalui Persamaan (9).
- g) Menghitung nilai RMSE dengan Persamaan (10) pada masing-masing model semivariogram teoritis dan model terbaik dipilih berdasarkan nilai RMSE terendah.
- h) Melakukan estimasi pada lokasi tidak tersampel dengan *Universal Kriging* berdasarkan model semivariogram teoritis terbaik yang diperoleh melalui perhitungan bobot pada Persamaan (8) dan mengestimasiya melalui Persamaan (6).

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini menggunakan data laju penurunan muka tanah DKI Jakarta tahun 2022. Terdapat 100 titik lokasi sampel. Gambar 2 di bawah ini merupakan sebaran titik tersampel laju penurunan muka tanah DKI Jakarta tahun 2022. Titik tersampel terdapat pada 5 wilayah Jakarta, yaitu Jakarta Barat sebanyak 27 titik, Jakarta Pusat sebanyak 15 titik, Jakarta Selatan sebanyak 14 titik, Jakarta Timur sebanyak 7 titik, dan Jakarta Utara sebanyak 37 titik.



Gambar 2. Titik Tersampel Laju Penurunan Tanah DKI Jakarta Tahun 2022

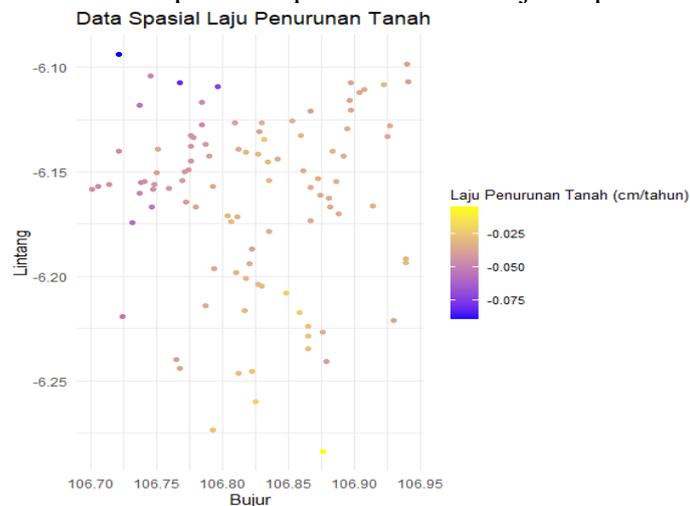
Statistik deskriptif mengenai data laju penurunan tanah dari 100 titik lokasi tersampel dapat dilihat pada Tabel 1 berikut:

Tabel 1. Statistik Deskriptif Laju Penurunan Muka Tanah Lokasi Tersampel

Rata-Rata	Variansi	Std. Deviasi	Minimal	Maksimal
-0,03250	0,000123	0,011096	-0,09000	-0,00500

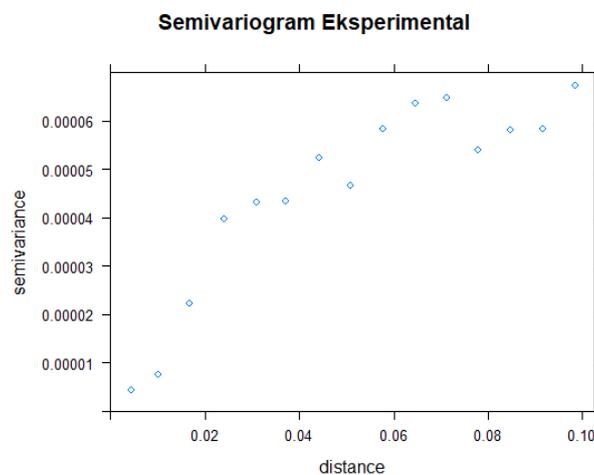
Berdasarkan Tabel 1 dapat diketahui bahwa rata-rata dari seluruh nilai laju penurunan muka tanah lokasi tersampel DKI Jakarta tahun 2022 adalah $-0,0325$ cm/tahun. Nilai negatif menandakan bahwa adanya penurunan. Artinya, secara rata-rata muka tanah pada lokasi tersampel di DKI Jakarta tahun 2022 mengalami penurunan sebesar $0,0325$ cm/tahun. Nilai variansi data laju penurunan tanah sebesar $0,000123$ dengan simpangan baku sebesar $0,011096$. Nilai minimal menunjukkan laju penurunan muka tanah terbesar yang tercatat di antara lokasi tersampel, yaitu penurunan sebesar $0,09$ cm/tahun yang berlokasi di Kecamatan Penjaringan Jakarta Utara. Nilai maksimal menunjukkan laju penurunan muka tanah terkecil yang tercatat di antara lokasi tersampel, yaitu penurunan sebesar $0,005$ cm/tahun yang berlokasi di Kecamatan Kramat Jati Jakarta Timur.

Salah satu asumsi dasar dalam metode Kriging adalah data yang diamati harus stasioner. Akan tetapi dalam Universal Kriging, data yang akan diamati non-stasioner yang dapat dilihat dari adanya *trend*. Hasil plot data penelitian ini disajikan pada Gambar 3.



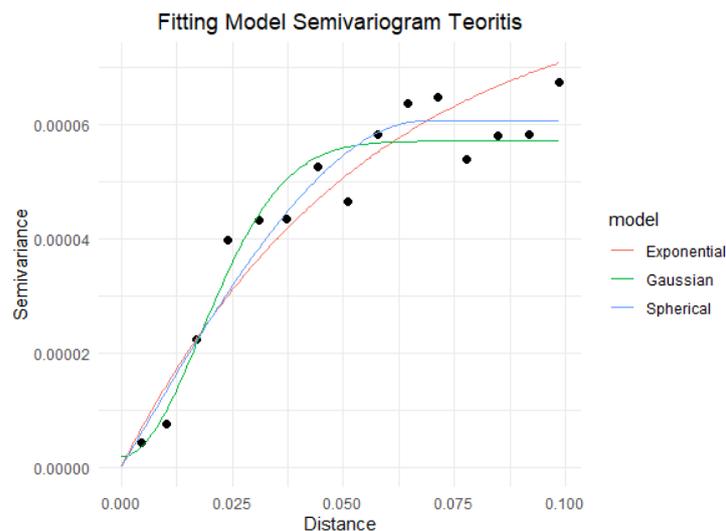
Gambar 3. Hasil Plot Data Spasial Laju Penurunan Tanah

Gambar 3 menunjukkan sebaran data spasial laju penurunan tanah di DKI Jakarta tahun 2022 dengan sumbu horizontal mewakili bujur/longitude (X) dan sumbu vertikal mewakili lintang/latitude (Y). Kemudian, warna pada titik-titik data menunjukkan laju penurunan tanah dalam cm/tahun. Hasil menunjukkan bahwa semakin kecil titik koordinat bujur dan semakin besar titik koordinat lintang, nilai laju penurunan tanah semakin besar. Semakin besar titik koordinat bujur dan semakin kecil titik koordinat lintang, nilai laju penurunan tanah semakin kecil. Pola ini menunjukkan adanya *trend* spasial karena warna titik-titik data berubah secara bertahap. Hal ini juga dapat mengindikasikan bahwa mean dan varian dari data tidak konstan. Maka dapat disimpulkan bahwa pada data laju penurunan tanah di DKI Jakarta tahun 2022 terdapat *trend* atau data bersifat non-stasioner. Karena asumsi stasioner tidak terpenuhi maka metode *Universal Kriging* dapat dilakukan. Hasil semivariogram eksperimental untuk *Universal Kriging* disajikan pada Gambar 4.



Gambar 4. Hasil Semivariogram Eksperimental

Semivariogram eksperimental pada Gambar 4, perlu dilakukan pencocokan model semivariogram teoritis yang dapat mewakili plot semivariogram eksperimentalnya. Gambar 5 merupakan hasil pencocokan semivariogram eksperimental dengan masing-masing model semivariogram teoritis.



Gambar 5. Pencocokan Model Semivariogram Teoritis

Berdasarkan Gambar 5, diperoleh nilai *nugget effect* (C_0), *sill* ($C_0 + C$), dan *range* (A) yang dapat dilihat pada Tabel 2 berikut.

Tabel 2. Nilai Nugget Effect, Sill dan Range dari Ketiga Model Semivariogram Teoritis

Model	Nugget Effect (C_0)	Sill ($C_0 + C$)	Range (A)
<i>Spherical</i>	0	0,00006	0,07
<i>Eksponensial</i>	0	0,00007	0,1
<i>Gaussian</i>	0,000002	0,000052	0,05

Ketiga model semivariogram teoritis tersebut sebagai berikut:

1) Model *Spherical*

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0,00006 \left[1,5 \left(\frac{h}{0,07} \right) - 0,5 \left(\frac{h}{0,07} \right)^3 \right] & , h \leq A \\ 0,00006 & , h > A \end{cases}$$

2) Model *Eksponensial*

$$\gamma(h) = 0,00007 \left[1 - \exp \left(-\frac{h}{0,1} \right) \right]$$

3) Model *Gaussian*

$$\gamma(h) = 0,000052 \left[1 - \exp \left(-\frac{h^2}{0,05^2} \right) \right]$$

Dalam memilih model semivariogram terbaik akan di uji dengan LOOCV untuk mengestimasi laju penurunan muka tanah dengan kesalahan seminimal mungkin. Model terbaik ditentukan dengan membandingkan model yang memiliki nilai RMSE terendah. Hasil uji validasi silang dengan menggunakan LOOCV yang diukur dengan nilai RMSE sebagai berikut.

Tabel 3. Hasil Perhitungan RMSE Setiap Model

Model	RMSE
<i>Spherical</i>	0,0068
<i>Eksponensial</i>	0,0069
<i>Gaussian</i>	0,0088

Berdasarkan Tabel 3 dapat dilihat hasil dari perhitungan RMSE dari setiap model semivariogram teoritis. Nilai RMSE terkecil diperoleh dari model *Spherical* yaitu sebesar 0,0068. Sehingga dapat disimpulkan bahwa model *Spherical* adalah model terbaik dari ketiga semivariogram teoritis yang digunakan untuk estimasi laju penurunan muka tanah DKI Jakarta tahun 2022.

Setelah mendapatkan model semivariogram teoritis terbaik, selanjutnya dapat dilakukan estimasi data laju penurunan muka tanah DKI Jakarta tahun 2022 pada lokasi tidak tersampel menggunakan *Universal Kriging* dengan model semivariogram teoritis *Spherical*.

Besarnya bobot *kriging* untuk masing-masing 26 titik tidak tersampel akan memiliki 100 bobot yang berbeda. Tabel 4 berikut merupakan hasil perhitungan bobot *kriging* untuk lokasi titik tidak tersampel yang pertama yaitu Semper Timur dengan titik koordinat bujur 106,926 dan titik koordinat lintang -6,1137.

Tabel 4. Bobot Kriging Lokasi Semper Timur

i	λ_i								
1	0,0015	21	-0,0013	41	-0,0131	61	-0,0121	81	0,0005
2	-0,0011	22	-0,0023	42	0,0017	62	0,0007	82	-0,0002

3	-0,0007	23	0,0001	43	0,0004	63	-0,0003	83	-0,0004
4	0,0004	24	0,0006	44	0,0000	64	0,0011	84	-0,0004
5	-0,0002	25	0,0002	45	-0,0002	65	-0,0007	85	0,0000
6	-0,0003	26	-0,0014	46	0,1786	66	0,0027	86	0,0001
7	0,0001	27	0,0116	47	-0,0001	67	0,0002	87	0,0003
8	0,0000	28	-0,0224	48	0,0004	68	-0,0005	88	0,0000
9	-0,0001	29	0,0059	49	-0,0055	69	-0,0001	89	0,0012
10	0,0000	30	0,0116	50	-0,0088	70	-0,0015	90	-0,0002
11	0,0011	31	0,0081	51	0,0097	71	-0,0004	91	0,0005
12	0,0009	32	-0,0078	52	0,0012	72	-0,0006	92	-0,0174
13	-0,0002	33	0,0073	53	-0,0044	73	0,0008	93	0,0091
14	-0,0012	34	0,0071	54	-0,0003	74	-0,0001	94	0,2757
15	0,0000	35	0,0082	55	-0,0008	75	0,0011	95	-0,0085
16	-0,0023	36	0,0130	56	-0,0009	76	0,0010	96	-0,0094
17	0,0007	37	-0,0300	57	-0,0006	77	-0,0002	97	-0,0019
18	0,0006	38	0,0235	58	-0,0001	78	0,0012	98	-0,0004
19	-0,0010	39	0,5796	59	0,0062	79	0,0014	99	0,0028
20	-0,0013	40	-0,0167	60	-0,0003	80	0,0004	100	-0,0002

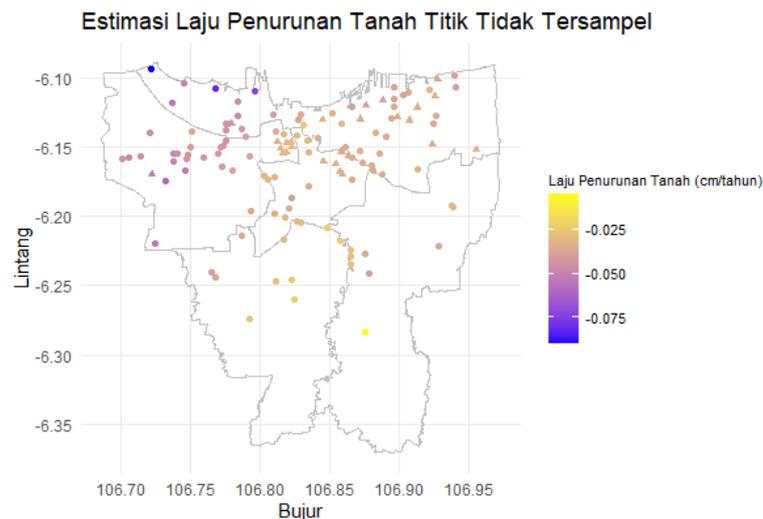
Estimasi laju penurunan tanah pada lokasi tidak tersampel dapat diperoleh dengan mengalikan bobot *kriging* dengan data laju penurunan tanah tersampel. Tabel 5 berikut merupakan hasil estimasi laju penurunan muka tanah DKI Jakarta tahun 2022 menggunakan *Universal Kriging* dengan bantuan software RStudio.

Tabel 5. Hasil Estimasi Laju Penurunan Tanah Lokasi Tidak Tersampel

No.	Lokasi	Bujur	Lintang	Estimasi Laju Penurunan Tanah (cm/tahun)	Variansi
1	Semper Timur	106,9261	-6,1137	-0,0334	0,00001
2	Sukapura	106,9242	-6,1481	-0,0350	0,00002
3	Rorotan	106,956	-6,1519	-0,0321	0,00006
4	Kalibaru	106,9279	-6,1011	-0,0357	0,00001
5	Tugu Utara	106,9131	-6,1215	-0,0345	0,00002
6	Tugu Selatan	106,9074	-6,1308	-0,0349	0,00002
7	Rawa Badak Selatan	106,899	-6,1282	-0,0354	0,00001
8	Warakas	106,8766	-6,12	-0,0386	0,00002
9	Papanggo	106,8721	-6,1299	-0,0354	0,00001
10	Kebon Bawang	106,8886	-6,116	-0,0383	0,00001
11	Pademangan Timur	106,8453	-6,1308	-0,0326	0,00001
12	Pejagalan	106,7798	-6,1334	-0,0442	0,000004
13	Utan Panjang	106,855	-6,1624	-0,0352	0,00002
14	Harapan Mulya	106,8576	-6,1675	-0,0353	0,00002
15	Kebon Kosong	106,8584	-6,1534	-0,0351	0,00001
16	Kemayoran	106,8639	-6,1562	-0,0352	0,00001
17	Cempaka baru	106,8594	-6,1697	-0,0352	0,00001
18	Gn Sahari Selatan	106,8459	-6,1607	-0,0340	0,00002

No.	Lokasi	Bujur	Lintang	Estimasi Laju Penurunan Tanah (cm/tahun)	Variansi
19	Tangki	106,8226	-6,1467	-0,0305	0,00001
20	Krukut	106,8165	-6,155	-0,0317	0,00002
21	Keagungan	106,8149	-6,1508	-0,0316	0,00002
22	Glodok	106,813	-6,1461	-0,0326	0,00001
23	Mangga Besar	106,8192	-6,1472	-0,0308	0,00001
24	Maphar	106,8192	-6,1536	-0,0314	0,00002
25	Taman sari	106,8232	-6,1505	-0,0309	0,00001
26	Duri Kosambi	106,7224	-6,17	-0,0535	0,00002

Pada tabel 5 diperoleh nilai estimasi laju penurunan tanah titik lokasi tidak tersampel ke-1 yaitu lokasi Semper Timur, sebesar -0,033 dengan nilai variansi 0,00001. Artinya penurunan tanah di daerah Semper Timur di estimasikan menurun sebesar 0,033 cm/tahun dan nilai variansi yang rendah yaitu 0,00001 menunjukkan tingkat kepastian yang tinggi dalam estimasi laju penurunan muka tanah pada lokasi tersebut atau dapat dikatakan juga bahwa model *Universal Kriging* cukup akurat dalam mengestimasi laju penurunan muka tanah. Begitu pula seterusnya untuk 25 hasil estimasi pada Tabel 5. Gambar 6 merupakan peta sebaran hasil estimasi lokasi titik tidak tersampel di DKI Jakarta tahun 2022.



Gambar 6. Hasil Estimasi Laju Penurunan Tanah DKI Jakarta 2022

Pada Gambar 6 titik data tersampel ditunjukkan dengan bentuk lingkaran dan untuk titik hasil interpolasi ditunjukkan dengan bentuk segitiga. Terlihat bahwa hasil estimasi nilai laju penurunan muka tanah mengikuti atau lebih mirip dengan nilai laju penurunan muka tanah titik tersampel yang ada di sekitarnya.

Statistik deskriptif hasil estimasi laju penurunan muka tanah pada lokasi tidak tersampel di DKI Jakarta tahun 2022, ditunjukkan pada Tabel 6 sebagai berikut.

Tabel 6. Statistik Deskriptif Hasil Estimasi Lokasi Tidak Tersampel

Rata-Rata	Variansi	Std. Deviasi	Minimal	Maksimal
-0,03512	0,0000226	0,004769	-0,05355	-0,03054

Berdasarkan Tabel 6 diperoleh nilai rata-rata dari estimasi adalah -0,03512. Artinya, secara rata-rata muka tanah pada lokasi tidak tersampel di DKI Jakarta tahun 2022

mengalami penurunan sebesar 0,03512 cm/tahun dengan nilai variansi sebesar 0,0000226 dan simpangan baku sebesar 0,004769. Serta nilai minimal Nilai minimal menunjukkan laju penurunan muka tanah terbesar yang tercatat di antara lokasi tidak tersampel, yaitu penurunan sebesar 0,05355 cm/tahun yang berlokasi di daerah Duri Kosambi Jakarta barat. Nilai maksimal menunjukkan laju penurunan muka tanah terkecil yang tercatat di antara lokasi tidak tersampel, yaitu penurunan sebesar 0,03054 cm/tahun yang berlokasi di daerah Tangki Jakarta Barat.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dan pembahasan analisis yang telah dilakukan, maka dapat diperoleh kesimpulan yaitu semivariogram teoritis terbaik untuk estimasi data laju penurunan muka tanah pada lokasi tidak tersampel di DKI Jakarta tahun 2022 adalah model *Spherical*. Nilai RMSE yang diperoleh adalah RMSE terkecil dari ketiga model yang dicobakan yaitu 0,0068. Kemudian, hasil estimasi laju penurunan muka tanah pada lokasi tidak tersampel di DKI Jakarta tahun 2022 berhasil dilakukan dengan metode *Universal Kriging* yang disajikan pada Tabel 5. Secara rata-rata, muka tanah pada lokasi tidak tersampel di DKI Jakarta tahun 2022 mengalami penurunan sebesar 0,03512 cm/tahun dengan nilai variansi sebesar 0,0000226 dan simpangan baku sebesar 0,004769. Serta nilai minimal menunjukkan laju penurunan muka tanah terbesar dari hasil estimasi yaitu penurunan sebesar 0,05355 cm/tahun yang berlokasi di daerah Duri Kosambi Jakarta barat. Nilai maksimal menunjukkan laju penurunan muka tanah terkecil dari hasil estimasi yaitu penurunan sebesar 0,03054 cm/tahun yang berlokasi di daerah Tangki Jakarta Barat. Dari hasil estimasi, Jakarta Barat serta Jakarta Utara merupakan wilayah dengan penurunan tanah terbesar, sehingga diperlukan perhatian lebih dan tindakan untuk mengatasi penurunan muka tanah di wilayah tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

- Charles Holbert. (2023). *Exploratory Spatial Data Analysis and Kriging in R*.
<https://www.cfholbert.com/blog/esda-kriging/>
- Cressie, N. (1990). The Origins of Kriging 1. Dalam *Mathematical Geology* (Vol. 22, Nomor 3). <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00889887>
- Cressie, N. (1993). *Statistics for spatial data*. Wiley.
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781119115151>
- Dika Hadi Anugrah, Dono Guntoro, & Yunus Ashari. (2022). Estimasi Sumberdaya Batugamping di PT X, Kecamatan Palimanan, Kabupaten Cirebon, Provinsi Jawa Barat. *Jurnal Riset Teknik Pertambangan*, 1(2), 148–154.
<https://doi.org/10.29313/jrtp.v1i2.538>
- Djuraidah, A., Rahardianto, S., & Desiwari, A. (2019). Penerapan Metode Cokriging Dengan Variogram Isotropi Dan Anisotropi Dalam Memprediksi Curah Hujan Bulanan Jawa Barat Application Of Cokriging Methods With Isotropy And Anisotropy Variograms In Prediction Of West Java Monthly Rainfall. *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*, 20, 39–46.
https://www.researchgate.net/publication/336365641_PENERAPAN_METODE_CO_KRIGING_DENGAN_VARIOGRAM_ISOTROPI_DAN_ANISOTROPI_DALAM_MEMPREDIKSI_CURAH_HUJAN_BULANAN_JAWA_BARAT
- Ega Hermawan, O., Montarich Limantara, L., & Suhartanto, E. (2020). Analisis Sebaran Jaringan Penakar Hujan Dengan Metode Stepwise, Kriging & WMO Di DAS Serang Jawa Tengah. *Jurnal Teknik Pengairan*, 11(2), 137–146.
<https://doi.org/10.21776/ub.pengairan.2020.011.02.07>

- Eka Putri, S., Amor Kusuma, D., Suhandi, B., & Nurani Ruchjana, B. (2020). Penerapan Metode Universal Kriging (UK) Untuk Prediksi Konsentrasi Partikulate Matter 2.5 (PM_{2.5}) Di Kota Bandung. *BAREKENG: Jurnal Ilmu Matematika dan Terapan*, 14(2), 279–292. <https://doi.org/10.30598/barekengvol14iss2pp279-292>
- Falah, A. N., Subartini, B., & Ruchjana, B. N. (2017). Application of universal kriging for prediction pollutant using GStat R. *Journal of Physics: Conference Series*, 893(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/893/1/012022>
- Kasfari, R., Yuwono, D., & Awaluddin, M. (2018). Pengamatan Penurunan Muka Tanah Kota Semarang Tahun 2017. *Jurnal Geodesi Undip Januari*, 7(1). <https://doi.org/https://doi.org/10.14710/jgundip.2017.19315>
- Khoirunisa, R., Yuwono, B. D., & Wijaya, A. P. (2015). Analisis Penurunan Muka Tanah Kota Semarang Tahun 2015 Menggunakan Perangkat Lunak Gamit 10.5. *Jurnal Geodesi Undip*, 4(4), 341–350. <https://doi.org/https://doi.org/10.14710/jgundip.2015.9961>
- Kiš, I. M. (2016). Comparison of ordinary and universal kriging interpolation techniques on a depth variable (a case of linear spatial trend), case study of the Šandrovac Field. *Rudarsko Geolosko Naftni Zbornik*, 31(2), 41–58. <https://doi.org/10.17794/rgn.2016.2.4>
- Respatti, E., Goejantoro, R., & Wahyuningsih, S. (2014). Perbandingan Metode Ordinary Kriging dan Inverse Distance Weighted untuk Estimasi Elevasi Pada Data Topografi (Studi Kasus: Topografi Wilayah FMIPA Universitas Mulawarman) Comparison of Ordinary Kriging and Inverse Distance Weighted Methods for Estimation of Elevations Using Topographic Data (Case Study: FMIPA University of Mulawarman's Topographic). *Jurnal EKSPONENSIAL*, 5(2). [https://fmipa.unmul.ac.id/files/docs/10.\[19\]%20Jurnal%20Erizal%20Respatti%20EDI T.pdf](https://fmipa.unmul.ac.id/files/docs/10.[19]%20Jurnal%20Erizal%20Respatti%20EDI T.pdf)
- Robertson, G. P. (2008). *GS*: GeoStatistics for the Environmental Sciences*. Gamma Design Software.
- Salwa R, D., Rachmatin, D., & Serviana H, H. (2020). Estimasi Harga Tanah Dengan Menggunakan Metode Universal Kriging (Studi Kasus Pada Kecamatan Taman Sari, Kota Oangkalpinang, Kepulauan Bangkabelitung). *EurekaMatika*, 8(2), 174–183. <https://ejournal.upi.edu/index.php/JEM>
- Webster, R. (Richard), & Oliver, M. A. (2007). *Geostatistics for environmental scientists*. Wiley.