

# EVALUASI MODEL-MODEL BAYESIAN SPASIAL *CONDITIONAL* *AUTOREGRESSIVE* UNTUK PEMODELAN KASUS KEMATIAN CORONA VIRUS DISEASE (COVID-19) DI INDONESIA

Andi Feriansyah<sup>1)</sup>

Aswi Aswi<sup>2\*)</sup>

Ruliana<sup>3)</sup>

1,2,3) Program Studi Statistika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam,  
Universitas Negeri Makassar

E-mail: [aswi@unm.ac.id](mailto:aswi@unm.ac.id)

## ABSTRACT

*Covid-19 cases in Indonesia occurred for the first time on 2 March 2020. By 30 September 2022, Indonesia had 158,173 Covid-19 deaths. Several studies have been done in modelling Covid-19 cases. However, research in modelling the number of Covid-19 deaths using the Bayesian Spatial Conditional Autoregressive (CAR) model is still rare. The Bayesian spatial CAR model has high flexibility in relative risk (RR) modeling. CAR models can include various types of spatial effects and can include covariates in the model. RR represents the ratio of the risk of outcome (Covid-19) in the exposed group compared to the population average (the unexposed group). This study aims to evaluate the BYM, Leroux, and Localised models with five hyperpriors, to obtain the best model for estimating the RR of Covid-19 deaths in Indonesia and to create RR maps. This study used aggregate data on Covid-19 deaths (2 March 2020 - 30 September 2022). Data on the total population and population density of each province in 2021 were also used. The best model selection is based on the lowest Watanabe Akaike Information Criterion (WAIC) and Deviance Information Criterion (DIC) values, and Modified Moran's I (MMI) residual values. The result showed that the CAR BYM model with covariates and with Inverse-Gamma  $IG(0.5; 0.0005)$  prior distribution had the lowest DIC and WAIC. As the BYM model does not converge, the model cannot be used in determining the RR of Covid-19 deaths in Indonesia. From the other three models that converge, the Bayesian CAR Leroux model without covariate with  $IG(0.5; 0.0005)$  has the lowest DIC(393,76), and WAIC(400,12), and its MMI value (-0,26) is approximate to zero. Therefore, the Bayesian CAR Leroux model without covariate with  $IG(0.5; 0.0005)$  is preferred. The province with the highest RR (2,76) and the lowest RR (0,22) are Yogyakarta and Papua, respectively.*

*Keywords: conditional autoregressive (CAR), covid-19 death, bayesian method, relative risk, spatial.*

## ABSTRAK

Kasus Covid-19 di Indonesia pertama kali terjadi pada 2 Maret 2020. Hingga 30 September 2022, Indonesia mencatatkan 158.173 kematian akibat Covid-19. Beberapa penelitian telah dilakukan dalam pemodelan kasus Covid-19. Namun penelitian dalam memodelkan jumlah kematian positif Covid-19 dengan menggunakan model Bayesian Spatial Conditional Autoregressive (CAR) masih jarang dilakukan. Model Bayesian spasial CAR memiliki fleksibilitas yang tinggi dalam pemodelan risiko relatif (RR). Model CAR dapat mencakup berbagai jenis efek spasial, serta dapat melibatkan kovariat dalam model. RR merepresentasikan rasio risiko outcome (Covid-19) pada kelompok *exposed* dibandingkan dengan kelompok rata-rata populasi (*unexposed*). Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi model BYM, Leroux, dan Localized dengan lima hyperprior; mendapatkan model terbaik untuk estimasi RR kematian akibat Covid-19 di Indonesia dan membuat peta RR. Penelitian ini menggunakan data agregat kematian akibat Covid-19 (2 Maret 2020 - 30 September 2022). Data jumlah

penduduk dan kepadatan penduduk masing-masing provinsi pada tahun 2021 juga digunakan. Pemilihan model terbaik didasarkan pada nilai Watanabe Akaike Information Criterion (WAIC) dan Deviance Information Criterion (DIC) yang paling rendah dan nilai residual *Modified Moran's I* (MMI) yang mendekati nol. Hasil penelitian menunjukkan bahwa model CAR BYM dengan kovariat dan dengan sebaran prior Inverse Gamma  $IG(0,5; 0,0005)$  memiliki DIC dan WAIC terendah. Karena model BYM tidak konvergen, maka model tersebut tidak dapat digunakan untuk menentukan RR kematian akibat Covid-19 di Indonesia. Dari ketiga model lain yang konvergen, model bayesian CAR Leroux tanpa kovariat dengan  $IG(0,5; 0,0005)$  memiliki DIC(393,76), WAIC(400,12), dan residual MMI (-0,26) nilainya mendekati 0. Oleh karena itu, model bayesian CAR Leroux tanpa kovariat dengan  $IG(0,5; 0,0005)$  adalah model yang lebih sesuai. Provinsi dengan RR tertinggi (2,76) dan RR terendah (0,22) berturut-turut adalah Yogyakarta dan Papua.

Kata Kunci: *conditional autoregressive* (CAR), kasus kematian covid-19, metode bayesian, risiko relatif, spasial.

## PENDAHULUAN

Indonesia merupakan salah satu negara yang terdampak pandemi *coronavirus disease-19* (Covid-19). Covid-19 adalah sindrom saluran pernapasan yang menyebabkan demam tinggi, batuk, flu, sesak nafas, nyeri tenggorokan serta dapat mengakibatkan kematian. Presiden Jokowi menetapkan status kedaruratan kesehatan masyarakat dalam pernyataannya yang disampaikan melalui telekonferensi dari Istana Kepresidenan Bogor, Jawa Barat, pada Selasa, 31 Maret 2020. Covid-19 yang telah menjadi pandemi global dinilai sebagai jenis penyakit berisiko yang menimbulkan kedaruratan kesehatan di tengah masyarakat (BPMI Setpres, 2020). Dalam rangka pengendalian pandemi Covid-19, maka pemerintah Indonesia terus melakukan berbagai upaya untuk pencegahan penyebarannya. Menurut WHO, Covid-19 menular dari orang terinfeksi ke orang sehat. Penyebaran Covid-19 dari manusia ke manusia menjadi sumber transmisi utama sehingga penyebaran menjadi lebih agresif (Susilo dkk, 2020). Penyakit Covid-19 adalah infeksi virus yang sangat menular dan patogen yang disebabkan oleh sindrom pernafasan akut parah coronavirus 2 (SARS-Cov-2) yang muncul di Wuhan, Cina dan menyebar ke seluruh dunia. Analisis genom mengungkapkan bahwa SARS-Cov-2 secara filogenetik terkait dengan virus kelelawar yang mirip dengan sindrom pernafasan akut (SARS-like) (Tiro dkk, 2021). Pada 2 Maret 2020, Indonesia melaporkan pertama kali kasus Covid-19 sebanyak 2 kasus yang dinyatakan positif. Tiga provinsi yang ada di Indonesia dengan jumlah angka kematian Covid-19 tertinggi yaitu berada di Provinsi Jawa Tengah, Provinsi Jawa Timur, dan Provinsi Jawa Barat. Sebanyak 6.035.358 orang terkonfirmasi positif Covid-19 di Indonesia hingga tanggal 30 September 2022 dimana terdapat 5.811.666 orang sembuh, dan 158.173 orang meninggal (<https://covid19.go.id/>) (Kemenkes RI, 2022).

Data spasial adalah data yang bereferensi geografis atas obyek di bumi. Data spasial pada umumnya berdasarkan peta yang berisikan interpretasi dan proyeksi seluruh fenomena yang berada di bumi (M. Gayo dkk., 2018). Berdasarkan jenis datanya, data spasial terbagi atas 3 yakni data area (*lattice data*), data geostatistik (*geostatistical data*), dan pola titik (*point patterns*). Model spasial banyak digunakan di berbagai bidang. Umumnya banyak digunakan dalam bidang kesehatan untuk pemetaan penyakit di mana biasanya wilayah tersebut dipartisi menjadi beberapa wilayah kecil yang berdekatan dengan tujuan memperkirakan pola spasial keseluruhan kejadian penyakit dan kelangsungan hidup atau risiko (Aswi dkk., 2020). Model Bayesian spasial *Conditional Autoregressive* (CAR) merupakan teknik dalam pemetaan penyakit yang mempertimbangkan interaksi spasial antar area kecil dari suatu daerah dan memperhatikan pemulusan nilai taksiran risiko relatif (RR) sehingga diperoleh taksiran RR yang lebih handal (Khaerati dkk., 2020). Ada beberapa model Bayesian spasial CAR diantaranya: Model *Intrinsic* CAR (ICAR), *Besag-York-Mollié* (BYM), *Localised*, dan *Leroux* (Sunengsih dkk., 2016).

Landasan dalam melakukan analisis spasial adalah adanya autokorelasi spasial. Autokorelasi spasial merupakan korelasi antara variabel dengan dirinya sendiri berdasarkan ruang atau dapat juga diartikan suatu ukuran kemiripan dari objek di dalam suatu ruang (jarak, waktu dan wilayah) (Lutfi dkk., 2019). Jika terdapat pola sistematis di dalam penyebaran sebuah variabel, maka terdapat autokorelasi spasial. Adanya autokorelasi spasial mengindikasikan bahwa nilai atribut pada daerah tertentu terkait oleh nilai atribut tersebut pada daerah lain yang letaknya berdekatan atau bertetangga (Yuriantari dkk., 2017). Terdapat dua macam kemungkinan hasil data yang berautokorelasi yaitu autokorelasi spasial positif dan autokorelasi spasial negatif. Autokorelasi spasial positif menyatakan lokasi yang berdekatan mempunyai nilai yang mirip dan cenderung berkelompok. Autokorelasi spasial negatif menyatakan sebaliknya yaitu lokasi yang berdekatan mempunyai nilai yang berbeda dan cenderung menyebar (Simatauw dkk., 2019).

Beberapa penelitian terkait kasus Covid-19 dengan menggunakan model Bayesian Spasial CAR telah dilakukan (Tiro, dkk., 2022; Tiro dkk., 2021a; Tiro dkk., 2021b). Penelitian tentang pengaruh kepadatan penduduk dengan jumlah kasus Covid-19 di 15 Kecamatan di Kota Makassar menyimpulkan bahwa Bayesian spasial CAR *localised* merupakan model yang terbaik dalam memodelkan kasus terkonfirmasi Covid-19 di Kota Makassar (Tiro dkk., 2021). Model *Bayesian* spasial hierarkis yang telah digunakan terkait dengan pemodelan Covid-19 adalah model Bayesian spasial BYM. Model BYM ini digunakan untuk menyelidiki hubungan antara faktor sosial ekonomi dengan kasus Covid-19 di Kota New York (Whittle & Diaz-Artiles, 2020). Dalam penelitian tersebut mereka membandingkan antara model Bayesian spasial BYM Poisson dengan model Bayesian spasial *Binomial Negative*.

Penelitian mengenai kasus kematian Covid-19 juga pernah dilakukan dengan tujuan melihat hubungan Covid-19 dengan konsentrasi PM2.5 (*fine particulate matter with diameters below 2.5  $\mu\text{m}$* ) dan kepadatan penduduk. Mereka menyimpulkan bahwa terdapat hubungan positif antara kasus kematian Covid-19 dengan konsentrasi PM2.5 dan kepadatan penduduk (Yu dkk., 2021). Selain itu, penelitian mengenai perbandingan model Bayesian spasial CAR juga telah dilakukan. Misalnya, perbandingan model Bayesian Spasial CAR BYM, CAR *Leroux*, CAR *Localised*, dan model independen untuk kasus Covid-19 di Kota Makassar (Tiro dkk., 2021). Berdasarkan studi literatur, penelitian yang menggunakan model Bayesian Spasial CAR untuk kasus kematian Covid-19 di setiap 34 provinsi di Indonesia belum dilakukan. Oleh karena itu, peneliti bermaksud untuk meneliti hal tersebut. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi model CAR BYM, CAR *Leroux*, dan CAR *Localised* dengan komponen pengelompokan 2 grup ( $G=2$ ), tiga grup ( $G=3$ ), empat grup ( $G=4$ ), dan lima grup ( $G=5$ ) kemudian membuat pemetaan nilai RR berdasarkan model terbaik dimana penentuan model terbaik menggunakan tiga kriteria yaitu nilai terkecil *Deviance Information Criteria* (DIC) dan *Wanatabe Akaike Information Criteria* (WAIC), serta nilai residual MMI yang mendekati nol (Aswi dkk., 2021; Carrijo dkk, 2017). Pakan suatu infeksi dari bakteri yang berada di udara dan disebabkan oleh *Mycobacterium Tuberculosis* yang menyerang beberapa bagian tubuh, terutama terjadi pada paru-paru. Saat *Mycobacterium tuberculosis* tersebar di udara sebagai percikan (*droplet*) saat bersin, batuk, bicara ataupun berteriak dari orang yang terindikasi tuberkulosis (TB) paru, ketika percikan (*droplet*) terhirup orang lain dan melewati mulut atau rongga hidung, sampai akhirnya mencapai paru-paru, maka penularan akan terjadi (Agyeman & Ofori-Asenso, 2017).

## METODE

### 1. Jenis Penelitian

Penelitian yang dilakukan merupakan penelitian kuantitatif yaitu mengumpulkan data yang diperlukan dalam penelitian kemudian dianalisis dengan Model Bayesian spasial CAR BYM, CAR *Leroux*, dan CAR *Localised* ( $G=2$ ,  $G=3$ ,  $G=4$ , dan  $G=5$ ). Selanjutnya menentukan model terbaik dalam memetakan nilai RR kematian positif Covid-19 di Indonesia.

### 2. Sumber Data

Penelitian ini menggunakan data sekunder yang diambil dari *website* resmi info Covid-19 Indonesia (Kemenkes RI, 2022) yang diambil mulai dari munculnya Covid (2 Maret 2020) di Indonesia hingga tanggal 30 September 2022 tentang kasus kematian positif Covid-19 dari tiap Provinsi di Indonesia. Pada penelitian ini juga digunakan data populasi penduduk tahun 2021 dan data kepadatan penduduk pada setiap Provinsi di Indonesia yang diambil dari *website* Badan Pusat Statistik (BPS) (Badan Pusat Statistik, 2021).

### 3. Definisi Operasional Variable

Variabel yang digunakan pada penelitian ini diuraikan sebagai berikut:

1. Kasus Kematian Positif Covid-19  
Kasus Kematian Positif Covid-19 di Indonesia ( $Y$ ) dianggap sebagai peubah acak yang diasumsikan mengikuti distribusi Poisson karena merupakan *count data* dengan nilai bilangan bulat non-negatif.
2. Kepadatan Penduduk  
Data kovariat dalam penelitian ini adalah kepadatan penduduk tiap provinsi di Indonesia ( $X$ ), yaitu perbandingan antara jumlah penduduk dengan luas wilayah yang dihuni (Aprianti, 2016).
3. Komponen spasial acak  
Menggambarkan variasi spasial tidak terduga dalam kasus penyakit yang tidak dapat dijelaskan oleh variable bebas lainnya.

### 4. Model Bayesian Spasial CAR

Pada penelitian ini, kasus kematian positif Covid-19 ( $y_i$ ) diasumsikan berdistribusi Poisson dengan rata-rata adalah perkalian nilai ekspektasi ( $E_i$ ) dengan relative risk ( $\theta_i$ ) yang dituliskan sebagai berikut:

$$y_i \sim \text{Poisson} (E_i \theta_i)$$

Penelitian ini membandingkan tiga model yaitu CAR BYM, CAR *Leroux* dan CAR *Localised* yang dapat dituliskan sebagai berikut:

#### 4.1 Model CAR BYM

Model BYM (Besag, York, & Mollié, 1991) merupakan model yang terdiri komponen spasial terstruktur  $u_i$  dan komponen spasial tidak terstruktur  $v_i$  yang dituliskan sebagai berikut:

$$\log(\theta_i) = \alpha + u_i + v_i \quad (1)$$

$u_i$  dimodelkan dengan menggunakan prior CAR sebagai berikut:

$$u_i | u_j, i \neq j, \tau_u^2 \sim N\left(\frac{\sum_j u_j \omega_{ij}}{\sum_j \omega_{ij}}, \frac{\tau_u^2}{\sum_j \omega_{ij}}\right)$$

$\tau_u^2 \sim \text{Inverse Gamma } IG(a, b)$ , dimana dipilih lima hyperprior yang berbeda yaitu  $IG(1; 0,01)$ ,  $IG(1; 0,1)$ ,  $IG(0,1; 0,1)$ ,  $IG(0,5; 0,05)$ , dan  $IG(0,5; 0,0005)$  (Tiro dkk., 2021).  $\omega_{ij}$  merupakan matriks pembobot spasial dengan menggunakan *queen contiguity*, yang didefinisikan  $\omega_{ij} = 1$ , jika daerah  $i$  dan  $j$  saling bertetangga, dan  $\omega_{ij} = 0$ , jika daerah  $i$  dan  $j$  tidak saling bertetangga.

#### 4.2 Model CAR *Leroux*

Model *Leroux* (Leroux, Lei & Breslow, 2000) merupakan model yang hanya terdiri dari komponen spasial terstruktur  $u_i$  dimana  $\rho$  memungkinkan nilai yang bervariasi antara nol dan satu. Jika  $\rho = 0$  diperoleh model independen dan jika  $\rho = 1$  diperoleh model ICAR. Model tersebut dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\log(\theta_i) = \alpha + u_i \quad (2)$$

dimana,

$$(u_i | u_j, i \neq j, \tau_u^2) \sim N\left(\frac{\rho \sum_j u_j \omega_{ij}}{\rho \sum_j \omega_{ij} + 1 - \rho}, \frac{\tau_u^2}{\rho \sum_j \omega_{ij} + 1 - \rho}\right)$$

#### 4.3 Model CAR *Localised*

Model CAR *Localised* (Lee & Sarran, 2015) merupakan model yang mirip dengan model *Leroux* tetapi ada penambahan satu komponen pengelompokkan pada model yaitu  $\lambda_{z_i}$  yang memungkinkan sub wilayah memiliki nilai spasial autokorelasi yang berbeda, yang dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\log(\theta_i) = \alpha + u_i + \lambda_{z_i} \quad (3)$$

$u_i$  dimodelkan dengan menggunakan prior CAR.

### 5. Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian pada penelitian ini adalah:

1. Melakukan kajian referensi yang terkait dengan model Bayesian spasial CAR BYM, *Leroux*, *Localised* (G=2, G=3, G=4, dan G=5), kasus kematian positif Covid-19, jumlah penduduk, dan kepadatan penduduk di Indonesia.
2. Melakukan pengambilan data di situs *website* resmi dari info Covid-19 Indonesia (<https://covid19.go.id/>) (Kemenkes RI, 2022) dan Badan Pusat Statistika (BPS) (Badan Pusat Statistik, 2021).
3. Menentukan Model Bayesian spasial CAR BYM, CAR *Leroux*, dan CAR *Localised* (G=2, G=3, G=4, dan G=5) menggunakan program R studio.

4. Melakukan pemetaan berdasarkan nilai taksiran RR dengan menggunakan model terbaik.
5. Membuat interpretasi dan hasil kesimpulan berdasarkan hasil pengolahan data.
6. Menyusun laporan hasil penelitian.

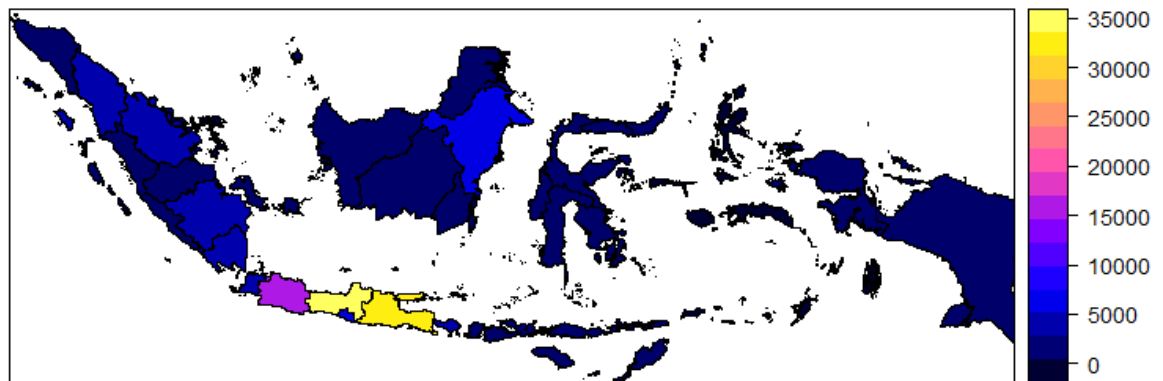
## 6. Teknik Analisis Data

1. Mengambil data mengenai banyaknya kasus kematian positif Covid-19, data populasi penduduk tahun 2021 dan data kepadatan penduduk dari tiap Provinsi di Indonesia di situs *website* resmi dari info Covid-19 Indonesia (<https://covid19.go.id/>) (Kemenkes RI, 2022) dan Badan Pusat Statistik (BPS) (Badan Pusat Statistik, 2021).
2. Menginput data dan *shapefile* Indonesia.
3. Membentuk matriks pembobot.
4. Pengujian autokorelasi spasial dengan perhitungan statistik *Morans' I*.
5. Memodelkan data dengan menggunakan Model Bayesian Spasial CAR BYM, CAR *Leroux*, dan CAR *Localised* (G=2, G=3, G=4, dan G=5) menggunakan program R. Setiap model menggunakan 5 hyperprior untuk komponen  $\tau_u^2$ .
6. Melakukan pengecekan kekonvergenan.
7. Menentukan model terbaik menggunakan tiga kriteria yaitu DIC dan WAIC yang paling minimum (Spiegelhalter,dkk., 2002), serta nilai residual MMI yang mendekati nol.
8. Melakukan pemetaan berdasarkan nilai taksiran RR dengan menggunakan model terbaik.
9. Menentukan Provinsi yang berisiko tinggi dan rendah Covid-19.
10. Interpretasi dan penarikan kesimpulan

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### 1. Analisis Deskriptif

#### 1.1 Kasus Kematian Covid-19

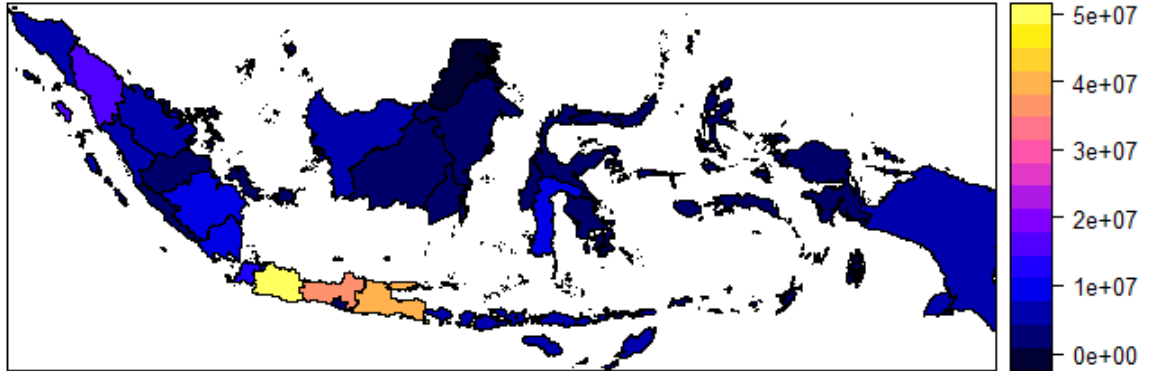


Gambar 1. Peta Persebaran Kasus Kematian Covid-19

Dari Gambar 1 dapat dilihat bahwa provinsi yang mempunyai kasus kematian positif Covid-19 yang tinggi adalah provinsi dengan warna kuning, yaitu Provinsi Jawa

Tengah sebanyak 26.841 kasus dan kasus kematian positif Covid-19 terendah berada pada Provinsi Maluku sebanyak 248 kasus.

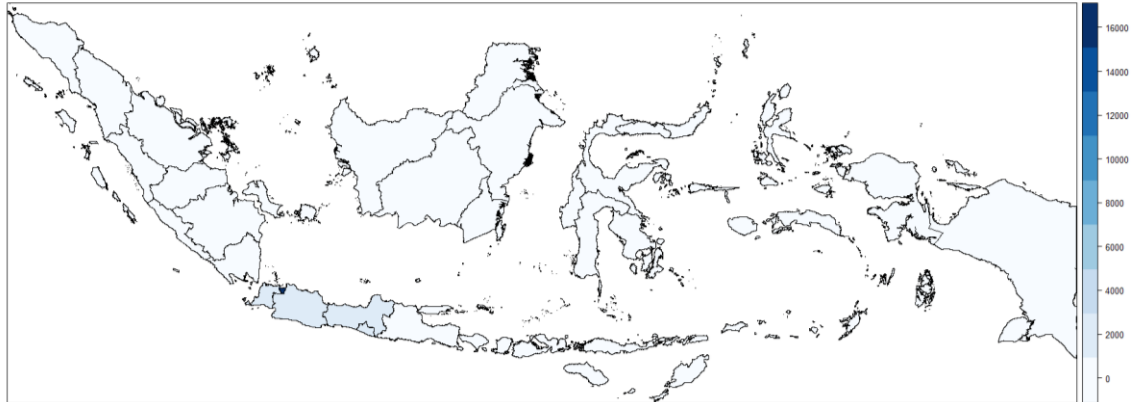
## 1.2 Populasi



**Gambar 2.** Persebaran x Pendudukx Setiapx Provinsix di Indonesiavax Tahun 2021

Dari Gambar 2 dapat dilihat bahwa provinsi yang mempunyai jumlah populasi yang tinggi yaitu provinsi berwarna kuning. Jawa Barat merupakan provinsi dengan populasi tertinggi sebanyak 48.274.162 penduduk dan Kalimantan Utara merupakan provinsi dengan populasi terendah sebanyak 701.814 penduduk.

## 1.3 Kepadatan Penduduk



**Gambar 3.** Peta Kepadatan Setiap Provinsi di Indonesia

Dari Gambar 3 dapat disimpulkan bahwa provinsi yang mempunyai kepadatan penduduk tertinggi yaitu DKI Jakarta sebanyak 15.978 penduduk per km dan Kalimantan Utara merupakan provinsi dengan kepadatan penduduk terendah yaitu 9 penduduk per km.

## 2. Autokorelasi Spasial

Nilai statistik *Moran's I* dari data adalah  $4,43 \times 10^{-5}$  dengan nilai ekspektasi - 0,03. Nilai *p-value* =  $4,43 \times 10^{-5}$  dengan  $\alpha = 0,05$  yang berarti nilai *p-value* <

$\alpha$ . Sehingga dapat disimpulkan bahwa terdapat autokorelasi spasial positif pada kasus kematian positif Covid-19 di Indonesia.

### 3. Pemilihan Model Terbaik

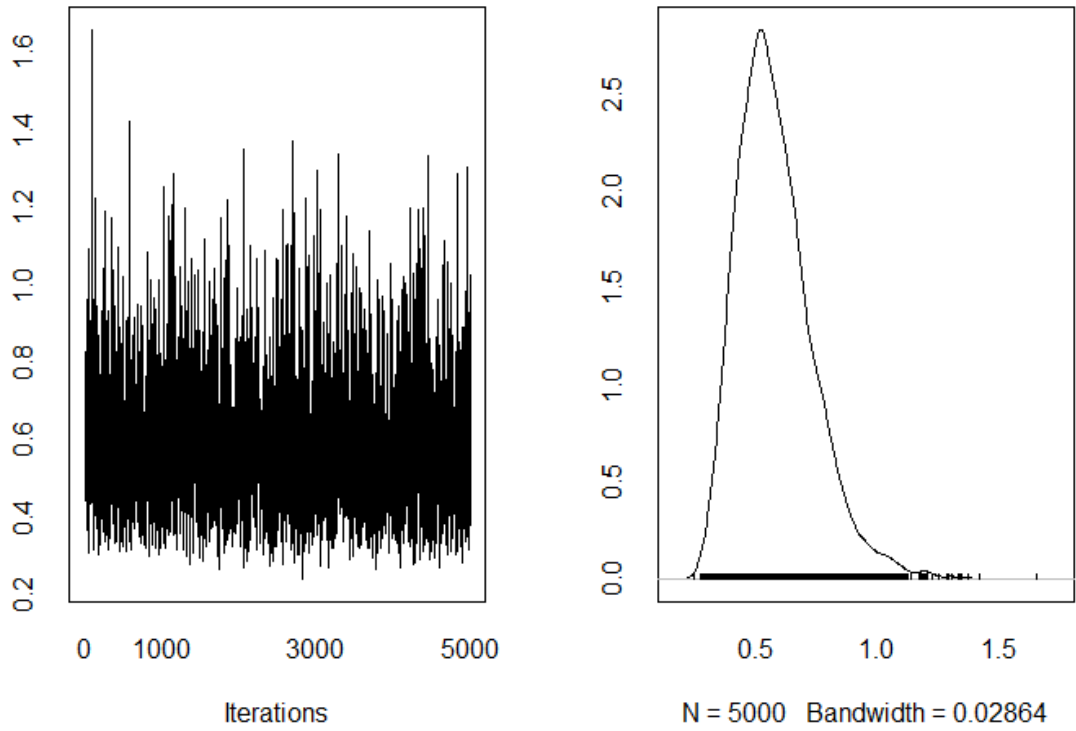
Pemilihan model terbaik didasarkan pada nilai DIC terkecil, WAIC terkecil, dan nilai residual MMI yang lebih dekat dengan nol. Ada 60 kombinasi model yang telah digunakan. Tabel 1 merupakan rangkuman nilai MMI untuk residual, WAIC, dan DIC dari 60 model yang telah dipilih sebagai model terbaik dari masing-masing model CAR BYM, Leroux dan localised (G=2, G=3, G=4, dan G=5) dari lima hyperprior yang digunakan dengan menggunakan kovariat dan tanpa kovariat.

**Tabel 1.** Nilai DIC, WAIC, dan Residual MMI dari masing-masing model Bayesian CAR terbaik

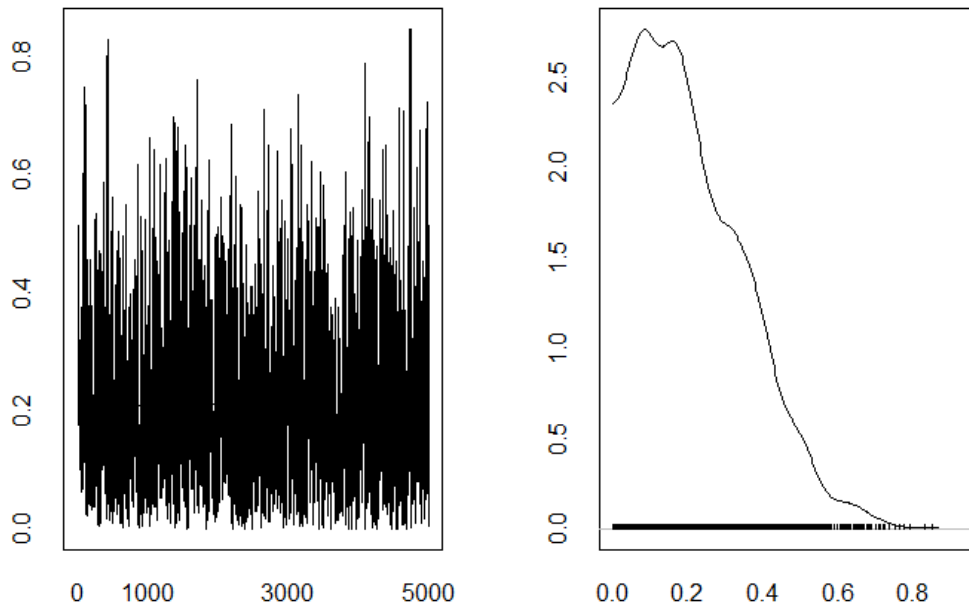
Model	Prior	DIC	WAIC	Residu MMI
BYM tanpa kovariat	(1;0,01)	390,62	388,79	0,10
<b>Leroux tanpa kovariat</b>	<b>IG (0,5;0,0005)</b>	<b>393,76</b>	<b>400,12</b>	<b>-0,26</b>
Localised G=2 dengan kovariat	IG (1;0,01)	401,41	419,00	-0,77
Localised G=3 tanpa kovariat	IG (0,5;0,05)	410,36	472,36	-0,70
Localised G=4 dengan kovariat	IG (0,5;0,05)	397,36	596,62	-0,58
Localised G=5 dengan kovariat	IG (0,5;0,0005)	416,79	506,18	-0,66

Dari Tabel 1 didapatkan model BYM tanpa kovariat mempunyai nilai DIC (390,62) dan WAIC (388,79) yang lebih kecil dari model yang lain. Akan tetapi, model Bayesian CAR BYM tersebut tidak konvergen dalam parameter  $\tau^2$  dan  $\beta$  sehingga model tersebut tidak dapat digunakan untuk menaksir nilai RR kasus kematian Covid-19 di Indonesia. Sehingga, model terbaik untuk menaksir nilai RR kasus kematian positif Covid-19 di Indonesia adalah model Bayesian spasial CAR Leroux dengan IG(0,5;0,0005) tanpa kovariat berdasarkan nilai DIC (393,76), WAIC (400,12) yang paling minimum dan nilai residual dari MMI (-0,26) mendekati 0. Model tersebut konvergen dalam parameter  $\tau^2$ ,  $\rho$ ,  $\phi$ , dan  $\beta$  sehingga dapat digunakan dalam menaksir RR kasus kematian Covid-19 di Indonesia. Dari Tabel 1 juga terlihat bahwa nilai residual MMI pada model CAR localised jauh lebih besar (jauh dari nilai nol) dari model CAR Leroux. Hasil pengecekan kekonvergenan model Bayesian CAR Leroux IG(0,5;0,0005) tanpa kovariat dapat dilihat pada Gambar 4 – Gambar 7 berikut:

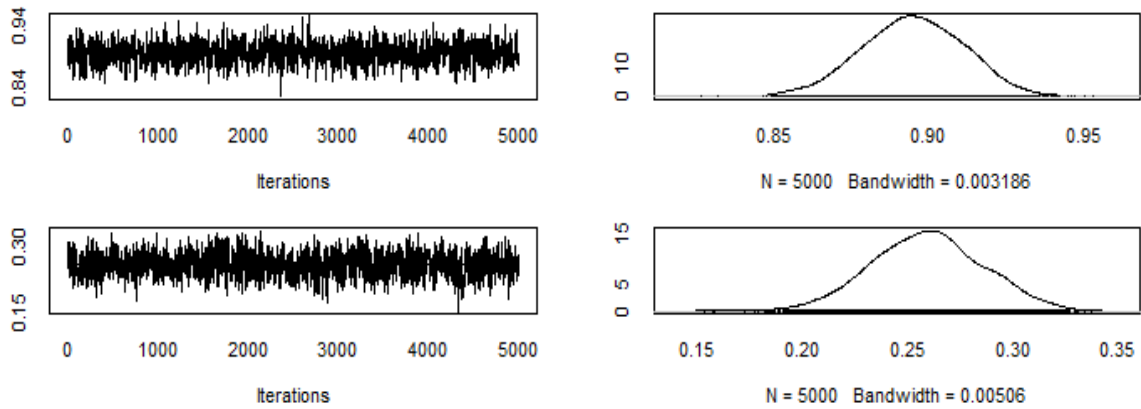




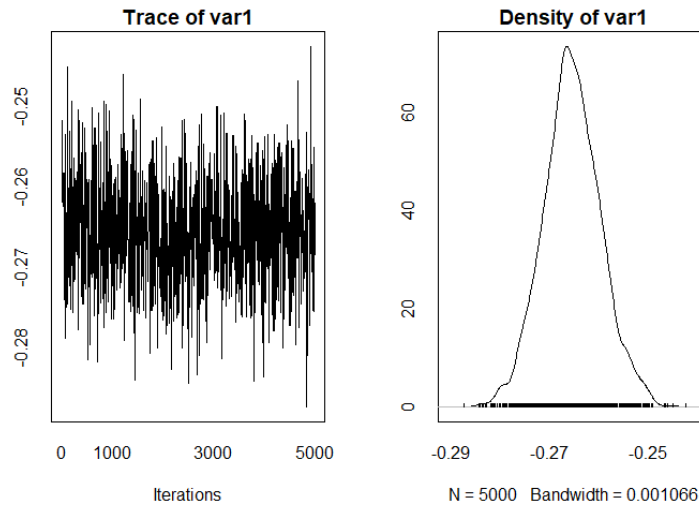
**Gambar 4.** *History Iteration Plot* dan *Densitas Plot* Parameter  $\tau^2$



**Gambar 5.** *History Iteration Plot* dan *Densitas Plot* Parameter  $\rho$



**Gambar 6.** History Iteration Plot dan Densitas Plot Parameter  $\phi$

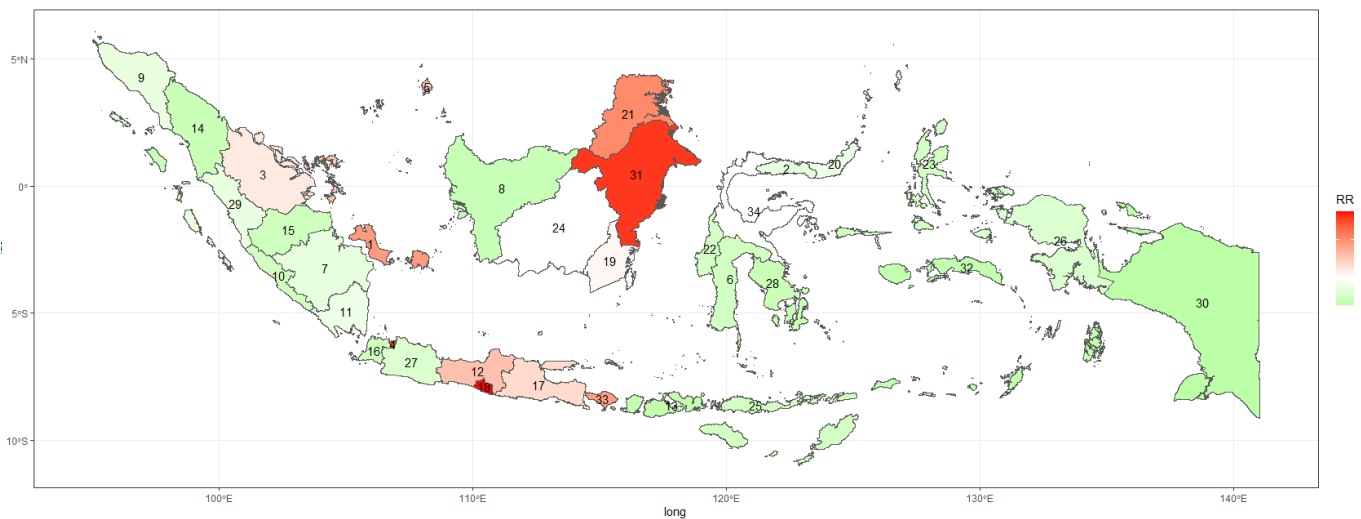


**Gambar 7.** History Iteration Plot dan Densitas Plot Parameter  $\beta$

Selanjutnya, nilai RR untuk setiap provinsi di Indonesia dengan model terbaik yaitu model Bayesian spasial CAR Leroux dengan  $IG(0,5;0,0005)$  tanpa kovariat dapat dilihat pada Tabel 2. Dari Tabel 2 dapat dilihat bahwa lima daerah provinsi dengan nilai RR tertinggi kasus kematian Covid-19 di Indonesia adalah Yogyakarta (RR = 2,76), Kalimantan Timur (RR = 2,61), DKI Jakarta (RR = 2,52), Kalimantan Utara (RR = 2,04), dan Bangka Belitung (RR = 1,89). Sedangkan provinsi dengan lima nilai RR terendah yaitu Papua (RR = 0,22), Maluku (RR = 0,28), Nusa Tenggara Barat (RR = 0,29), Kalimantan Barat (RR = 0,35), dan Sulawesi Tenggara (RR = 0,36). Yogyakarta memiliki nilai RR tertinggi yaitu 2,76 artinya risiko kematian Covid-19 di Yogyakarta adalah 176% lebih tinggi dari rata-rata. Dengan kata lain, risiko kematian Covid-19 di Yogyakarta (*exposed group*) hampir tiga kali lipat lebih tinggi dibandingkan rata-rata populasi (*unexposed group*). Peta Tematik RR kasus kematian positif Covid-19 di Indonesia menggunakan model terbaik yaitu model Bayesian spasial CAR Leroux dengan  $IG(0,5;0,0005)$  tanpa kovariat dapat dilihat pada Gambar 8.

**Tabel 2.** Nilai RR pada kasus kematian positif covid-19 menggunakan model terbaik

ID	Provinsi	RR	ID	Provinsi	RR
1	Bangka Belitung	1,89	<b>18</b>	<b>Yogyakarta</b>	<b>2,76</b>
2	Gorontalo	0,73	19	Kalimantan Selatan	1,07
3	Riau	1,19	20	Sulawesi Utara	0,78
4	DKI Jakarta	2,52	21	Kalimantan Utara	2,04
5	Kepulauan Riau	1,55	22	Sulawesi Barat	0,49
6	Sulawesi Selatan	0,46	23	Maluku Utara	0,46
7	Sumatera Selatan	0,69	24	Kalimantan Tengah	0,99
8	Kalimantan Barat	0,35	25	Nusa Tenggara Timur	0,48
9	Aceh	0,72	26	Papua Barat	0,57
10	Bengkulu	0,45	27	Jawa Barat	0,56
11	Lampung	0,79	28	Sulawesi Tenggara	0,36
12	Jawa Tengah	1,56	29	Sumatera Barat	0,73
13	Nusa Tenggara Barat	0,29	<b>30</b>	<b>Papua</b>	<b>0,22</b>
14	Sumatera Utara	0,37	31	Kalimantan Timur	2,61
15	Jambi	0,42	32	Maluku	0,28
16	Banten	0,42	33	Bali	1,87
17	Jawa Timur	1,33	34	Sulawesi Tengah	0,99



**Gambar 8.** Risiko Relatif Kasus Kematian positif Covid-19 di Indonesia

## SIMPULAN

Hasil analisis yang dilakukan diperoleh nilai DIC, WAIC, dan Residu MMI yang minimum masing-masing Model Bayesian Spasial CAR BYM, *Leroux*, *Localised G=2*, *Localised G=3*, *Localised G=4*, dan *Localised G=5* yaitu Model Bayesian Spasial CAR BYM dengan  $IG(0,5;0,0005)$  dengan kovariat, Model Bayesian Spasial CAR *Leroux* dengan  $IG(0,5;0,0005)$  tanpa kovariat, Model Bayesian Spasial CAR *Localised G=2*

dengan  $IG(0,5;0,0005)$  tanpa kovariat, Model Bayesian Spasial CAR *Localised*  $G=3$  dengan  $IG(0,5;0,05)$  tanpa kovariat, Model Bayesian Spasial CAR *Localised*  $G=4$  dengan  $IG(0,5;0,05)$  dengan kovariat, dan Model Bayesian Spasial CAR *Localised*  $G=5$  dengan  $IG(0,5;0,0005)$  dengan kovariat. Maka, berdasarkan kriteria pemilihan model terbaik didapatkan model Bayesian Spasial CAR BYM dengan  $IG(0,5;0,0005)$  dengan kovariat mempunyai nilai DIC dan WAIC paling minimum. Akan tetapi, estimasi parameter dari model tersebut tidak konvergen. Artinya model tersebut tidak dapat dilanjutkan untuk menaksir nilai risiko relatif. Sehingga model terbaik dalam menaksir nilai risiko relatif kasus kematian positif Covid-19 di Indonesia adalah model Bayesian Spasial CAR *Leroux* tanpa kovariat dengan  $IG(0,5;0,0005)$  dengan nilai DIC (393,76), WAIC (400,12) yang paling minimum dan nilai Residu dari MMI (-0,26) mendekati 0.

Berdasarkan data banyaknya kasus kematian positif Covid-19, data populasi penduduk, dan data kepadatan penduduk di setiap provinsi di Indonesia. Lima Provinsi dengan nilai RR tertinggi kasus kematian positif Covid-19 di Indonesia paling tinggi yaitu Provinsi Yogyakarta (RR = 2,76), Kalimantan Timur (RR = 2,61), DKI Jakarta (RR = 2,52), Kalimantan Utara (RR = 2,04), dan Bangka Belitung (RR = 1,89). Sedangkan Provinsi dengan lima nilai RR terendah yaitu Papua (RR = 0,22), Maluku (RR = 0,28), Nusa Tenggara Barat (RR = 0,29), Kalimantan Barat (RR = 0,35), dan Sulawesi Tenggara (RR = 0,36).

## REFERENSI

- Aprianti, W., & Maliha U. (2016). *Sistem Informasi Kepadatan Penduduk atau Desa Studi kasus pada Kecamatan Bati-Bati.2*(2013), 21–28.
- Aswi, A., Cramb, S., Duncan, E., & Mengersen, K. (2020). Evaluating the impact of a small number of areas on spatial estimation. *International Journal of Health Geographics*, 19(1), 1–14. <https://doi.org/10.1186/s12942-020-00233-1>
- Aswi, A., Cramb, S., Duncan, E., & Mengersen, K. (2021). Detecting Spatial Autocorrelation for a Small Number of Areas: A practical example. *Journal of Physics: Conference Series*, 1899(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1899/1/012098>
- Aswi, A., Tiro, M. A., Sudarmin, S., Sukarna, S., & Cramb, S. (2022). the Interplay Between Clusters, Covariates, and Spatial Priors in Spatial Modelling of Covid-19 in South Sulawesi Province, Indonesia. *Media Statistika*, 15(1), 48–59. <https://doi.org/10.14710/medstat.15.1.48-59>
- Badan Pusat Statistik. (2022). *Jumlah Penduduk Setiap Provinsi Di Indonesia*.
- Besag, J., York, J., & Mollié, A. (1991). *Bayesian image restoration, with two applications in spatial statistics*. *Annals of The Institute of Statistical Mathematics*, 43(1), 1-20.
- BPMI Setpres. (2020). *Pemerintah Tetapkan Status Kedaruratan Kesehatan Masyarakat*. <https://www.presidentri.go.id/siaran-pers/pemerintah-tetapkan-status-kedaruratan-kesehatan-masyarakat/>.
- Carrijo, T. B., & Da Silva, A. R. (2017). *Modified Moran's I for Small Samples*. *Geographical Analysis*, 49(4), 451-467. doi:10.1111/gean.12130.
- Kemendes RI. (2022). *Situasi Covid-19 Di Indonesia (per tanggal 12 April 2022)*.

- Khaerati, R., Thamrin, S. A., & Jaya, A. K. (2020). Bayesian Conditional Autoregressive (CAR) dengan Model Localised dalam Menaksir Risiko Relatif DBD di Kota Makassar. ESTIMASI: *Journal of Statistics and Its Application*, 1(1), 21. <https://doi.org/10.20956/ejsa.v1i1.9298>
- Lee, D., & Sarran, C. (2015). *Controlling for unmeasured confounding and spatial misalignment in long-term air pollution and health studies*. *Environmetrics*, 26(7), 477-487.
- Leroux, B. G., Lei, X., & Breslow, N. (2000). *Estimation of Disease Rates in Small Areas: A new Mixed Model for Spatial Dependence*. *Statistical models in epidemiology, the environment, and clinical trials*, 116, 179-191. doi:10.1007/978-1-4612-1284-3\_4.
- Lutfi, A., Aidid, M. K., & Sudarmin, S. (2019). Identifikasi Autokorelasi Spasial Angka Partisipasi Sekolah di Provinsi Sulawesi Selatan Menggunakan Indeks Moran. *Journal of Statistics and Its application on Teaching and Research*, 1(2), 1–8. <https://doi.org/10.35580/variensi.v1i2.9354>.
- M. Gayo, U. C., Rusdi, M., Fazlina, D., Studi, P., Sumber, P., Lahan, D., Pertania, F., & Kuala, U. S. (2018). Distribusi Spasial Lahan Kopi Eksisting Berdasarkan Ketinggian dan Arah Fungsi Kawasan di Kabupaten Aceh Tengah Spatial Distribution of Existing Coffee Land Based on Altitude and Direction of Function Area in Central Aceh Regency \* corresponding author. *Jurnal Ilmiah Mahasiswa Pertanian Unsyiah*, 3(4), 1–7.
- Simatauw, A., Sedyono, E., & Prasetyo, S. Y. J. (2019). Autokorelasi Spasial Untuk Analisis Pola Pengawasan Kawasan Lindung Di Kota Ambon Maluku. *Teknika*, 8(1), 36–43. <https://doi.org/10.34148/teknika.v8i1.144>.
- Spiegelhalter, D. J., Best, N. G., Carlin, B. P., & Van Der Linde, A. (2002). *Bayesian measures of model complexity and fit*. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B, Statistical methodology*, 64(4), 583-639. doi:10.1111/1467-9868.00353.
- Sunengsih, N., Nyoman, I. G., Jaya, M., & Tantular, B. (2016). *Bayesian Conditional Autoregressive (CAR) Dalam Menaksir Resiko Relative Diare di Kota Bandung*. 21–26.
- Susilo, A., Rumende, C. M., Pitoyo, C. W., Santoso, W. D., Yulianti, M., Herikurniawan, H., Sinto, R., Singh, G., Nainggolan, L., Nelwan, E. J., Chen, L. K., Widhani, A., Wijaya, E., Wicaksana, B., Maksum, M., Annisa, F., Jasirwan, C. O. M., & Yuniastuti, E. (2020). Coronavirus Disease 2019: Tinjauan Literatur Terkini. *Jurnal Penyakit Dalam Indonesia*, 7(1), 45. <https://doi.org/10.7454/jpdi.v7i1.415>.
- Tiro, M. A., Aswi, A., & Rais, Z. (2021a). Association of Population Density and Distance to the City with the Risks of COVID-19: A Bayesian Spatial Analysis. *Journal of Physics: Conference Series*, 2123(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2123/1/012001>
- Tiro, M. A., Aswi, A., & Rais, Z. (2021b). Perbandingan Model Bayesian Spasial Conditional Autoregressive (CAR): Kasus Covid-19 di Kota Makassar, Indonesia. *Seminar Nasional LP2M UNM*, 2019, 1026–1034.
- Whittle, R. S., & Diaz-Artiles, A. (2020). An ecological study of socioeconomic predictors in detection of COVID-19 cases across neighborhoods in New York City. *BMC Medicine*, 18(1), 1–17. <https://doi.org/10.1186/s12916-020-01731-6>.

- Yu, X., Wong, M. S., Kwan, M. P., Nichol, J. E., Zhu, R., Heo, J., Chan, P. W., Chin, D. C. W., Yin, C., Kwok, T., & Kan, Z. (2021). COVID-19 *Infection and Mortality : Association with PM 2 . 5 Concentration and Population Density — An Exploratory Study*.
- Yuriantari, N. P., Hayati, M. N., & Wahyuningsih, S. (2017). Analisis Autokorelasi Spasialtitik Panas Di Kalimantan Timur Menggunakan Indeks Moran dan Local Indicator Of Spatial Autocorrelation (LISA) Analysis Spatial Autocorrelation Hotspot in East Kalimantan Using Index Moran and Local Indicator of Spatial Autoco. *Eksponensial*, 8(1), 63–70.