

Majalah Ilmiah Globe diterbitkan oleh Badan Informasi Geospasial (BIG) bekerja sama dengan Masyarakat Ahli Penginderaan jauh Indonesia (MAPIN). Majalah Ilmiah Globe sebagai media komunikasi ilmiah, riset dan teknologi terkait pengumpulan, pengolahan dan analisis data menghasilkan informasi Geospasial Tematik, antara lain mencakup Analisis Tematik (Hidrologi, Geomorfologi, Penginderaan Jauh, Kartografi, dan Geografi Fisik), dan Aplikasi Sistem Informasi Geografi. Pernyataan penulis dalam artikel yang dimuat pada majalah ini merupakan pendapat individu penulis bukan pendapat penerbit.

Jurnal terbit 2 kali setiap tahun, 2 nomor 1 volume, bulan **April** dan **Oktober**.

Pengarah:

Kepala Badan Informasi Geospasial

Penanggung Jawab:

Kepala Pusat Penelitian Promosi dan Kerja Sama

Mitra Bestari:

Nama:

Prof. Dr. Sobar Sutisna
Prof. Junun Sartohadi
Prof. Bangun Mulyo Sukojo
Prof. Widiatmaka
Dr. Projo Danoedoro
Dr. Djati Mardiatno
Dr. Wikanti Asriningrum
Dr. Ibnu Sofian
Dr. Sri Hartini
Dr. Muhamad Buce Saleh

Kepakaran:

Geodesi Batas Wilayah
Geografi Fisik
Penginderaan Jauh
Evaluasi Sumberdaya Lahan
Sistem Informasi Geografis
Manajemen Kebencanaan
Geomorfologi
Oceanografi
Penginderaan Jauh – SIG
Penginderaan Jauh – SIG

Instansi:

Universitas Pertanahan
Universitas Gadjah Mada
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Institut Pertanian Bogor
Universitas Gadjah Mada
Universitas Gadjah Mada
Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional
Badan Informasi Geospasial
Badan Informasi Geospasial
Institut Pertanian Bogor

Dewan Editor:

Nama:

Prof Dewayany Sutrisno
Prof. Dr. Ing. Fahmi Amhar
Dr. Jonson Lumban-Gaol
Ir. Yatin Suwarno, M.Sc
Ir. Irmadi Nahib, M.Si
Ahmad Cahyadi, S.Si., M.Sc

Jabatan:

Ketua Dewan Editor
Anggota
Anggota
Anggota
Anggota
Anggota

Instansi:

Badan Informasi Geospasial
Badan Informasi Geospasial
Institut Pertanian Bogor
Badan Informasi Geospasial
Badan Informasi Geospasial
Universitas Gadjah Mada



Alamat Redaksi:

Sekretariat Redaksi Majalah Ilmiah Globe
Gedung S, Lt. 1 Badan Informasi Geospasial (BIG)
Jl. Jakarta-Bogor KM 46 Cibinong 16911
Telp/fax: +62-21- 87906041, E-mail: majalah.globe@big.go.id
Webs Jurnal: <http://jurnal.big.go.id/index.php/GL>

Redaktur Pelaksana:

Nama :	Jabatan	Instansi
Dr. Yosef Prihanto	Ketua Redaksi	Badan Informasi Geospasial
Fahrul Hidayat, S.T	Administrator	Badan Informasi Geospasial
Hanik Nurdina Sabita, SIP	Editor	Badan Informasi Geospasial
Mochamad Irwan Hariyono, S.T	Copy Editor	Badan Informasi Geospasial
Prayudha Hartanto, S.T., M.T	Copy Editor	Badan Informasi Geospasial
Intan Pujawati, S.Si	Copy Editor	Badan Informasi Geospasial
Munawaroh, S.Si	Copy Editor	Badan Informasi Geospasial
Tia Rizka Nuzula Rachma, ST	Copy Editor	Badan Informasi Geospasial
Fahrul Hidayat, S.T	Lay Out & Desain Grafis	Badan Informasi Geospasial
Ayu Nur Safii, S.T	Proof Reader	Badan Informasi Geospasial
Aninda Wisaksanti R, S.Pi., M.Si	Proof Reader	Badan Informasi Geospasial
Ellen Suryanegara, S.Sos	Proof Reader	Badan Informasi Geospasial
Florence E. S. Silalahi, S.T., M.A	Proof Reader	Badan Informasi Geospasial
Maslahatun Nashiha, S.Si	Proof Reader	Badan Informasi Geospasial
Djoko Soesilo	Sirkulasi	Badan Informasi Geospasial
Utami Yulaila, S.E	Sirkulasi	Badan Informasi Geospasial
Vetty Yanuaristi, S.E	Sirkulasi	Badan Informasi Geospasial

DAFTAR ISI

SUSUNAN DEWAN REDAKSI	ii
DAFTAR ISI	iv
LEMBAR ABSTRAK (ID)	v
LEMBAR ABSTRAK (EN)	vii
PENGANTAR REDAKSI	ix
RENCANA STRATEGIS PENENTUAN ALTERNATIF RUMAH SAKIT RUJUKAN COVID-19 Studi Kasus Kabupaten Bogor <i>(Strategic Planning for Alternative Determination of COVID-19 Referral Hospital)</i> Yusniar Rah Ayu Ristiantri, Agung Syetiawan, Mangapul Parlindungan Tambunan, dan Rudy P. Tambunan Pascasarjana Ilmu Geografi, Universitas Indonesia.....	1-12
ALOKASI PEMANFAATAN RUANG BERDASARKAN DAYA DUKUNG LAHAN DI SAWANGAN, DEPOK <i>(Allocation of Spatial Utilization Based on Land Carrying Capacity, Sawangan, Depok)</i> Irman Firmansyah dan Tatan Sukwika <i>Sistem Dinamik Center Bogor</i>	13-20
PEMETAAN ZONA KERENTANAN AIR TANAH DI PULAU BAKALAN, KABUPATEN BANGGAI KEPULAUAN, INDONESIA <i>(Mapping of Groundwater Vulnerability Zones in Bakalan Island, Banggai Kepulauan, Indonesia)</i> Erik Febriarta, Ahmad Cahyadi, dan Septian Vienastra Magister Pengelolaan Pesisir dan Daerah Aliran Sungai, Fakultas Geografi, Universitas Gadjah Mada.....	21-34
DINAMIKA KONSENTRASI EMISI GAS KARBON MONOKSIDA (CO) SELAMA PERIODE PSBB MENGGUNAKAN KOMPUTASI BERBASIS CLOUD PADA GOOGLE EARTH ENGINE Studi Kasus di Provinsi DKI Jakarta, Indonesia <i>(Dynamics of Gas Emission Concentration of Monoxide (CO) during PSBB Period Using Cloud Computing Based on Google Earth Engine, Case Study of DKI Jakarta Province, Indonesia)</i> Sheffiera Indriyaningtyas, Lucky Rakananda Hasandy, dan Bayu Elwantyo B. Dewantoro Departemen Sains Informasi Geografi, Fakultas Geografi, Universitas Gadjah Mada.....	35-42
PETA TIGA DIMENSI (3D) CITYGML UNTUK SIMULASI ALIRAN ANGIN MENGGUNAKAN OPENFOAM <i>(Three-Dimensional (3D) CityGML Map for Wind Flow Simulation Using OpenFOAM)</i> Ghalizha Z. Izzaty, Deni Suwardhi, Wiwin Windupranata, Agung Budi Harto, Dudy D. Wijaya, Arnadi Murtiyoso, Budhy Soeksmantono Teknik Geodesi dan Geomatika, Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumihan, Institut Teknologi Bandung.....	43-52
GIS-MULTI CRITERIA DECISION ANALYSIS FOR CONFLICTED LAND ALLOCATION Case Study: Adjoining Area of D'Aguilar National Park, Brisbane, Australia <i>(SIG-Multi Criteria Decision Analysis untuk Konflik Alokasi Lahan: Studi Kasus Area Berdekatan Taman Nasional D'Aguilar, Brisbane, Australia)</i> Muhamad Iqbal Januadi Putra School of Earth and Environmental Science, University of Queensland.....	53-60

LEMBAR ABSTRAK (ID)

MAJALAH ILMIAH GLOBÈ (Globè Scientific Magazine)	
P-ISSN 1411-0512/E-ISSN 2502-2172	Cibinong, April 2021
Kata kunci yang dicantumkan adalah istilah bebas. Lembar abstrak ini boleh dikopi tanpa izin dan biaya	
<p>DDC 622.526 Ristiantri (Universitas Indonesia) Rencana Strategis Penentuan Alternatif Rumah Sakit Rujukan Covid-19 <i>Majalah Ilmiah Globè, Vol 23 No 1, Hal 1-12</i></p> <p>Tujuan dari penelitian ini adalah menentukan lokasi strategis fasilitas kesehatan di Kab. Bogor sebagai Rumah Sakit rujukan COVID-19 dengan menggunakan metode analisis jaringan. Rencana strategis rumah sakit rujukan ditentukan berdasarkan wilayah-wilayah yang tidak bisa dijangkau oleh rumah sakit yang ada.</p> <p style="text-align: right;">(Ristiantri)</p> <p>Kata kunci: COVID-19, rumah sakit rujukan, <i>network analysis</i></p>	<p>DDC 620.4285 Firmansyah (Sistem Dinamik Center Bogor) Alokasi Pemanfaatan Ruang Berdasarkan Daya Dukung Lahan di Sawangan, Depok <i>Majalah Ilmiah Globè, Vol 23 No 1, Hal 13-20</i></p> <p>Tujuan penelitian ini adalah menganalisis kemampuan lahan untuk alokasi pemanfaatan permukiman dan memproyeksikan perkembangan wilayah dengan daya dukung lahan terhadap variable jumlah penduduk, PDRB, kebutuhan permukiman, kenyamanan tinggal dan timbulan sampah.</p> <p style="text-align: right;">(Firmansyah)</p> <p>Kata kunci: daya dukung, kemampuan lahan, pemanfaatan pola ruang, permukiman, spasial dinamik</p>
<p>DDC 690.0285 Febriarta (Universitas Gadjah Mada) Pemetaan Zona Kerentanan Air Tanah di Pulau Bakalan, Kabupaten Banggai Kepulauan, Indonesia <i>Majalah Ilmiah Globè, Vol 23 No 1, Hal 21-34</i></p> <p>Tujuan dari penelitian ini adalah menentukan sebaran zona kerentanan airtanah pada batugamping terumbu. Untuk mencapai tujuan tersebut dilakukan analisis spasial multi-kriteria dengan pendekatan DRASTIC. Pendekatan DRASTIC dapat memberikan informasi zona kerentanan berdasarkan sifat hidrogeologi pada batugamping. Analisis pemberian indeks pembobotan parameter dengan nilai tinggi, menggambarkan informasi faktor yang dominan atau yang paling mempengaruhi zona kerentanan airtanah.</p> <p style="text-align: right;">(Febriarta)</p> <p>Kata kunci: airtanah, Banggai kepulauan, batugamping koral, DRASTIC, kerentanan</p>	<p>DDC 771.526 Indriyaningtyas (Universitas Gadjah Mada) Dinamika Konsentrasi Emisi Gas Karbon Monoksida (CO) Selama Periode PSBB Menggunakan Komputasi Berbasis Cloud pada Google Earth Engine <i>Majalah Ilmiah Globè, Vol 23 No 1, Hal 35-42</i></p> <p>Penelitian ini bertujuan untuk melihat pengaruh kebijakan PSBB di DKI Jakarta terhadap variasi emisi gas karbon monoksida (CO) di lapisan atmosfer yang merupakan salah satu parameter dari kualitas udara. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah analisis statistik emisi gas CO dari Citra Sentinel-5P yang diekstraksi menggunakan komputasi berbasis cloud pada <i>Google Earth Engine</i>.</p> <p style="text-align: right;">(Indriyaningtyas)</p> <p>Kata kunci: Komputasi berbasis-cloud, CO, PSBB, sentinel-5P</p>

<p>DDC 526.8 Izzaty (Institut Teknologi Bandung) <i>Peta Tiga Dimensi (3D) CityGML untuk simulasi Aliran Angin Menggunakan OpenFOAM</i> <i>Majalah Ilmiah Globè, Vol 23 No 1, Hal 43-52</i></p> <p>Penelitian ini bertujuan untuk membangun dan memvalidasi model 3D CityGML LOD1 lanskap dari data DSM, DTM, dan tutupan lahan serta menerapkan simulasi aliran angin pada model 3D CityGML LOD1 lanskap yang telah dibangun dengan menggunakan perangkat lunak OpenFOAM. Model 3D LOD1 direkonstruksi dari data <i>Digital Surface Model</i> dan peta vektor 2D Kampus ITB Jatinangor, sedangkan bentuk atap pada model 3D LOD2 dihasilkan dari pengamatan stereo fotogrametri.</p> <p>(Izzaty)</p> <p>Kata kunci: CityGML, <i>level of detail</i>, simulasi aliran angin, OpenFOAM</p>	<p>DDC 551.456 Putra (University of Queensland) SIG- <i>Multi Criteria Decision Analysis</i> untuk Konflik Alokasi Lahan <i>Majalah Ilmiah Globè, Vol 23 No 1, Hal 52-60</i></p> <p>Penelitian ini bertujuan untuk mengalokasikan area untuk pengembangan pemukiman dan kawasan konservasi di area kawasan sekitar Taman Nasional D'Aguilar. Penelitian ini mencakup metode GIS dalam memproses MCDA dengan model yang memiliki banyak faktor untuk mendukung pengambilan keputusan, termasuk untuk kepentingan yang bertentangan.</p> <p>(Putra)</p> <p>Kata kunci: Alokasi lahan, MCDA, SIG, wilayah konflik</p>
--	---

LEMBAR ABSTRAK (EN)

Globë Scientific Magazine (MAJALAH ILMIAH GLOBë)	
P-ISSN 1411-0512/E-ISSN 2502-2172	Cibinong, April 2021
<i>The keywords given are free terms. This abstract sheet may be reproduced without permission or charge</i>	
<p>DDC 622.526 Ristiantri (Universitas Indonesia) <i>Strategic Planning for Alternative Determination of COVID-19 Referral Hospital</i> <i>Majalah Ilmiah Globë, Vol 23 No 1, Hal 1-12</i></p> <p><i>The purpose of this study was to determine strategic location of health facilities in Bogor Regency as a COVID-19 referral hospital using network analysis method. The referral hospital strategic plan is determined based on areas that are not accessible to existing hospitals.</i></p> <p style="text-align: right;"><i>(Ristiantri)</i></p> <p>Keywords: COVID-19, referral hospital, network analysis</p>	<p>DDC 620.4285 Firmansyah (Sistem Dinamik Center Bogor) <i>Allocation of Spatial Utilization Based on Land Carrying Capacity, Sawangan, Depok</i> <i>Majalah Ilmiah Globë, Vol 23 No 1, Hal 13-20</i></p> <p><i>This study aims to analyze the ability of the land to allocate residential use and project the development of the area with the carrying capacity of the land on the variables of population, GRDP, housing needs, living comfort, waste generation.</i></p> <p style="text-align: right;"><i>(Firmansyah)</i></p> <p>Keywords: carrying capacity, land capability, utilization of spatial patterns, settlements, spatial dynamics</p>
<p>DDC 690.0285 Febriarta (Universitas Gadjah Mada) <i>Mapping of Groundwater Vulnerability Zones in Bakalan Island, Banggai Kepulauan, Indonesia</i> <i>Majalah Ilmiah Globë, Vol 23 No 1, Hal 21-34</i></p> <p><i>This research set out to determine the distribution of groundwater vulnerability zones in coral limestones using a multi-criteria spatial analysis with the DRASTIC approach. The DRASTIC approach produces information on vulnerability zones based on the hydrogeological properties of limestone.</i></p> <p style="text-align: right;"><i>(Febriarta)</i></p> <p>Keywords: Banggai kepulauan, coral limestone, DRASTIC, groundwater, vulnerability</p>	<p>DDC 771.526 Indriyaningtyas (Universitas Gadjah Mada) <i>Dynamics of Gas Emission Concentration of Monoxide (CO) during PSBB Period Using Cloud Computing Based on Google Earth Engine</i> <i>Majalah Ilmiah Globë, Vol 23 No 1, Hal 35-42</i></p> <p><i>This study aims to see the effect of PSBB policy in DKI Jakarta on variations of carbon monoxide (CO) emissions in the atmosphere, which is one of the parameters of air quality. The method used in this research is the statistical analysis of CO gas emissions from Sentinel-5P imagery which is extracted using cloud-based computing on the google earth engine.</i></p> <p style="text-align: right;"><i>(Indriyaningtyas)</i></p> <p>Keywords: Cloud computing, CO, PSBB, sentinel-5P</p>

<p>DDC 526.8 Izzaty (Institut Teknologi Bandung) <i>Three- Dimensional (3D) CityGML Map for Wind Flow Simulation Using Open FOAM</i> <i>Majalah Ilmiah Globè , Vol 23 No 1, Hal 43-52</i></p> <p><i>This research demonstrates the process of urban wind flow simulation in ITB Jatinangor Campus with the use of CityGML LOD1 3D models. Point clouds obtained from a Digital Surface Model and a 2D topographical map of ITB Jatinangor Campus are used for the creation of 3D city models.</i></p> <p style="text-align: right;">(Izzaty)</p> <p>Keywords: CityGML, level of detail, urban wind flow simulation, OpenFOAM</p>	<p>DDC 551.456 Putra (University of Queensland) <i>GIS- Multi Criteria Decision Analysis for Conflicted Land Allocation</i> <i>Majalah Ilmiah Globè , Vol 23 No 1, Hal 52-60</i></p> <p><i>This paper aims to allocate the location for each residential development and conservation area in the adjoining area of D'Aguilar National Park. This research covers the GIS method in processing the MCDA to develop the model which has many factors to support the decision making, including for the conflicting purpose.</i></p> <p style="text-align: right;">(Putra)</p> <p>Keywords: Conflicting area, GIS, land allocation, MCDA</p>
---	---

PENGANTAR REDAKSI

Puji syukur kehadirat Tuhan Yang Maha Esa, Majalah Ilmiah Globe Volume 21 No. 1 April 2021 dapat kembali terbit. Dengan semangat untuk selalu memberikan yang terbaik, redaksi berharap agar setiap edisinya semakin berkualitas dengan memuat hasil penelitian yang berguna dan sesuai perkembangan di bidang Informasi Geospasial Tematik, antara lain mencakup Analisis Tematik (Hidrologi, Geomorfologi, Penginderaan Jauh, Kartografi, dan Geografi Fisik), dan Aplikasi Sistem Informasi Geografi.

Majalah Ilmiah Globe Volume 23 No. 1 April 2021 ini menyajikan berbagai tulisan penelitian yang terdiri dari enam karya tulis ilmiah oleh penulis dari beberapa instansi yaitu Universitas Indonesia, Sistem Dinamik Center Bogor, Universitas Gadjah Mada, Institut Teknologi Bandung, dan University of Queensland. Karya tulis ilmiah yang dimuat pada edisi ini yang pertama bertujuan untuk menentukan lokasi strategis fasilitas kesehatan di Kab. Bogor sebagai Rumah Sakit rujukan COVID-19 dengan menggunakan metode analisis jaringan. Naskah kedua bertujuan untuk menganalisis kemampuan lahan untuk alokasi pemanfaatan permukiman dan memproyeksikan perkembangan wilayah dengan daya dukung lahan terhadap variable jumlah penduduk, PDRB, kebutuhan permukiman, kenyamanan tinggal dan timbulan sampah. Naskah ketiga bertujuan untuk menentukan sebaran zona kerentanan airtanah pada batugamping terumbu. Naskah keempat bertujuan untuk melihat pengaruh kebijakan PSBB di DKI Jakarta terhadap variasi emisi gas karbon monoksida (CO) di lapisan atmosfer yang merupakan salah satu parameter dari kualitas udara. Naskah kelima bertujuan untuk membangun dan memvalidasi model 3D CityGML LOD1 lanskap dari data DSM, DTM, dan tutupan lahan serta menerapkan simulasi aliran angin pada model 3D CityGML LOD1 lanskap yang telah dibangun dengan menggunakan perangkat lunak OpenFOAM. Naskah keenam bertujuan untuk mengalokasikan area untuk pengembangan pemukiman dan kawasan konservasi di area kawasan sekitar Taman Nasional D'Aguilar.

Redaksi mengucapkan terima kasih atas kontribusi para penulis, editor, mitra bestari, dan berbagai pihak sehingga edisi ini dapat diterbitkan. Juga kepada pembaca yang budiman, kami harapkan saran dan kritik serta sumbangan pemikiran untuk perbaikan dan kemajuan Majalah Ilmiah Globe ini kedepan. Semoga terbitan ini bermanfaat bagi pembaca.

Cibinong, 30 April 2021

Redaksi

RENCANA STRATEGIS PENENTUAN ALTERNATIF RUMAH SAKIT RUJUKAN COVID-19

Studi Kasus Kabupaten Bogor

(Strategic Planning for Alternative Determination of COVID-19 Referral Hospital)

Yusniar Rah Ayu Ristiantri^{1,2}, Agung Syetiawan², Mangapul Parlindungan Tambunan¹, dan Rudy P. Tambunan¹

¹Pascasarjana Ilmu Geografi, Universitas Indonesia

²Badan Informasi Geospasial

Jalan Raya Jakarta-Bogor Km. 46, Cibinong, Indonesia

E-mail: yusniarrar@gmail.com

Diterima: 2 Desember 2020; Direvisi: 19 Februari 2021; Disetujui untuk Dipublikasikan: 24 Maret 2021

ABSTRAK

Beberapa wilayah di Kab. Bogor merupakan daerah penyangga Ibukota negara, dengan kepadatan penduduk tinggi dan merupakan pusat perekonomian. Akibatnya, wilayah tersebut terancam mempunyai kerentanan yang tinggi terhadap penyebaran COVID-19. Peningkatan pasien terkonfirmasi positif COVID-19 di Kab. Bogor semakin masif dari hari ke hari. Peningkatan kasus yang signifikan ini sangat mengkhawatirkan, terutama terhadap kemampuan fasilitas pelayanan kesehatan. Kemampuan fasilitas pelayanan kesehatan, terutama rumah sakit rujukan untuk menjangkau wilayah-wilayah rentan kasus positif dapat dengan mudah dilihat menggunakan analisis spasial. Tujuan dari penelitian ini adalah menentukan lokasi strategis fasilitas kesehatan di Kab. Bogor sebagai Rumah Sakit rujukan COVID-19 dengan menggunakan metode analisis jaringan. Rencana strategis rumah sakit rujukan ditentukan berdasarkan wilayah-wilayah yang tidak bisa dijangkau oleh rumah sakit yang ada. Selanjutnya, penentuan indeks kesiapan rumah sakit rujukan menggunakan analisis multi kriteria *Simple Additive Weighting*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa terdapat satu rumah sakit existing dengan indeks kesiapan tinggi, kemudian 4 rumah sakit dengan indeks kesiapan sedang. Lebih lanjut, terdapat 13 alternatif rumah sakit rujukan menunjukkan kesiapan rendah. Sebaran rumah sakit di Kab. Bogor pun tidak banyak, dan hanya memusat di bagian tengah wilayah Kab. Bogor. Oleh karena itu, seluruh rumah sakit alternatif sangat strategis menjadi rumah sakit rujukan COVID-19. Jumlah rumah sakit rujukan COVID-19 di Kab. Bogor masih kurang menjangkau seluruh wilayah, sehingga pemerintah daerah selayaknya berupaya untuk melakukan penambahan jumlah rumah sakit atau penambahan kapasitas layanan kesehatan.

Kata kunci: COVID-19, rumah sakit rujukan, *network analysis*

ABSTRACT

Several areas in Bogor Regency are the capital buffer areas, with high population density and are the center of economy. As a result, the area is threatened with a high vulnerability to the spread of COVID-19. The increase in patients confirmed positive for COVID-19 in Bogor Regency is increasingly massive. The increase in positive cases is very worrying, especially for the capacity of health service facilities. The ability of health care facilities, especially referral hospitals, to reach areas prone to positive cases can easily be seen using spatial analysis. The purpose of this study was to determine strategic location of health facilities in Bogor Regency as a COVID-19 referral hospital using network analysis method. The referral hospital strategic plan is determined based on areas that are not accessible to existing hospitals. Furthermore, the determination of the referral hospital readiness index used a multi-criteria analysis of Simple Additive Weighting. The results showed that there was one existing hospital with a high readiness index, then 4 hospitals with a moderate readiness index. Furthermore, there are 13 alternative referral hospitals showing low readiness. The distribution of hospitals in Bogor Regency is not much, and is only concentrated in the central part of the Bogor Regency area. Therefore, all alternative hospitals are very strategic to become COVID-19 referral hospitals. The number of COVID-19 referral hospitals in Bogor Regency still does not reach all areas, so the local government should make efforts to increase the number of hospitals or increase the capacity of health services.

Keywords: COVID-19, referral hospital, *network analysis*

PENDAHULUAN

Novel Coronavirus Infection Disease-19 (COVID-19) merupakan *Emerging Infectious*

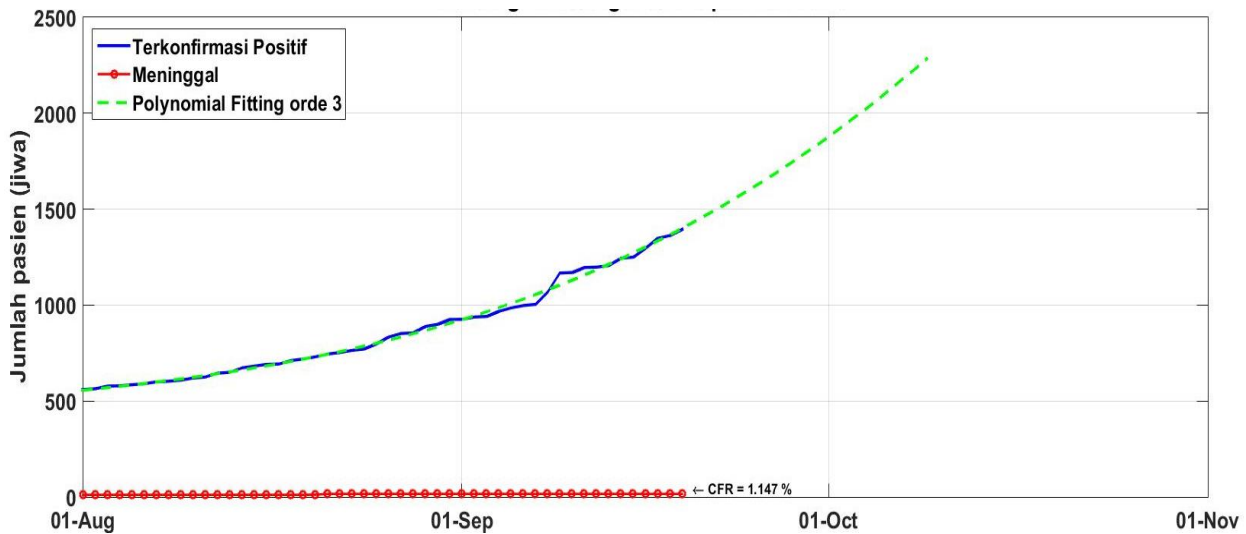
Diseases (EID) yang muncul pertama kali pada akhir 2019 di Wuhan (Djalante et al., 2020). COVID-19 adalah penyakit pernafasan akut pada manusia yang disebabkan oleh novel corona virus-2

(Huang et al., 2020). COVID-19 menyebar lebih cepat dibandingkan dengan wabah SARS dan MERS (Boulos & Geraghty, 2020). Pada awal Maret, WHO menetapkan COVID-19 sebagai penyakit pandemi global (Okba et al., 2020; Organization, 2020) dengan perkiraan tingkat kematian antara 1% hingga 5% (Roser et al., 2020). Pandemi COVID-19 bukan merupakan wabah yang pertama kali berdampak global, sebelumnya telah muncul epidemi Flu Spanyol tahun 1918, wabah SARS tahun 2003, H1N1 Influenza tahun 2009, dan tahun 2014 virus Ebola (Jones et al., 2008). Selain itu, muncul juga wabah seperti cacar air (Shimakawa et al., 2010) dan polio (Kamadjeu et al., 2014) yang mengakibatkan kematian tinggi di dunia. Jika dilihat trennya, EID terus meningkat dan berpotensi menjadi ancaman keberlanjutan kehidupan manusia sehingga diperlukan perencanaan yang baik untuk menanganinya.

Kasus pertama di Indonesia dilaporkan pada tanggal 2 Maret 2020, dengan jumlah pasien positif tercatat yaitu dua orang. Momentum ini menjadi titik awal penyebaran COVID-19 ke seluruh wilayah Indonesia. Dalam kasus wabah, kota dengan populasi yang padat dan pusat perekonomian akan mempercepat terjadinya penularan penyakit

menular (Flies et al., 2019). Sementara itu, Kab. Bogor sebagai wilayah metropolitan JABODETABEK merupakan daerah penyangga Ibukota negara, dengan kepadatan penduduk tinggi dan merupakan pusat perekonomian. Akibatnya, wilayah tersebut terancam mempunyai kerentanan yang tinggi terhadap penyebaran COVID-19. Apalagi, wilayah Kab. Bogor sangat dekat dengan kota Depok, wilayah pertama kali dikonfirmasi kejadian COVID-19.

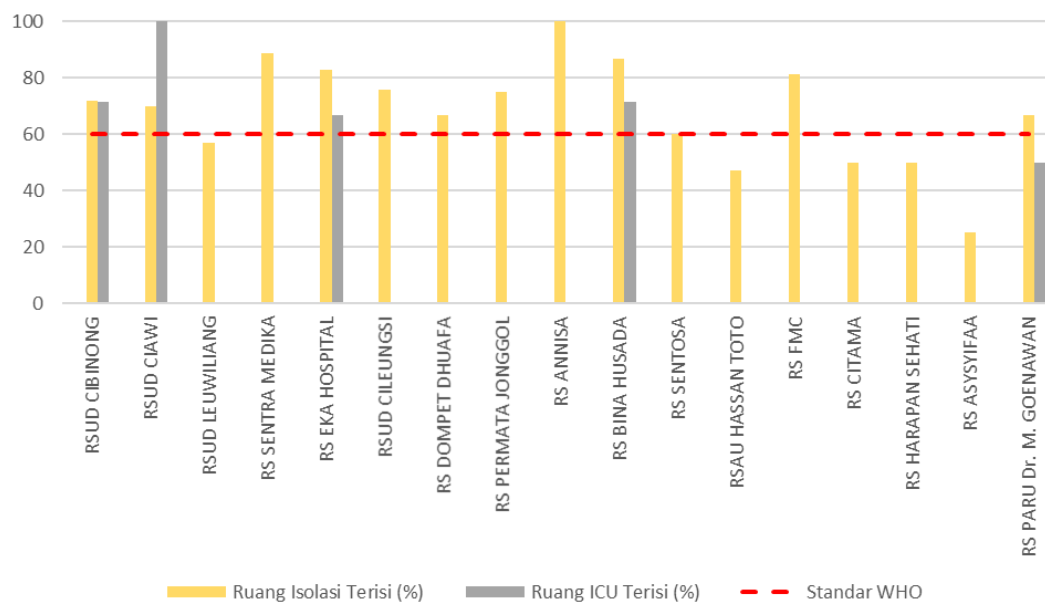
Peningkatan pasien terkonfirmasi positif COVID-19 di Kab. Bogor semakin masif dari hari ke hari. **Gambar 1** menunjukkan kasus terkonfirmasi positif COVID-19 di Kab. Bogor pada rentang waktu Agustus hingga September 2020, data didapatkan dari Satgas COVID-19 di Kab. Bogor. *Case Fatality Rate* (CFR) di Kab. Bogor pada pertengahan bulan September tercatat pada angka 1,14%, dengan kasus terkonfirmasi positif mencapai hingga 1.400 an kasus. Melihat grafik konfirmasi kasus positif di Kab. Bogor, belum menunjukkan tren penurunan. Bahkan, dengan menggunakan pemodelan sederhana menggunakan *polynomial fitting* orde tiga, jumlah kasus diprediksi bisa meningkat hingga sekitar 2.000 kasus terkonfirmasi positif COVID-19.



Gambar 1. Kasus COVID-19 di Kab. Bogor rentang waktu Agustus hingga September 2020.

Peningkatan kasus yang signifikan ini sangat mengkhawatirkan, terutama terhadap kemampuan fasilitas pelayanan kesehatan. Kemampuan fasilitas pelayanan kesehatan rumah sakit rujukan COVID-19 diukur dari ketersediaan ruang isolasi, ruang ICU, dan jumlah ventilator (Moghadas et al., 2020). Peningkatan kasus positif COVID-19 sejalan dengan meningkatnya keterpakaian tempat tidur, ruang isolasi, dan unit perawatan intensif (ICU). Tingkat keterpakaian tempat tidur atau sering disebut dengan *Bed Occupancy Rate* (BOR) dihitung dengan cara membagi jumlah hari perawatan dengan ketersediaan tempat tidur di suatu rumah sakit (Khare et al., 2018). BOR memberikan gambaran tinggi rendahnya

pemanfaatan tempat tidur di rumah sakit (Huffman, 1994; Indharwati, 2018). Idealnya nilai BOR berada pada rentang 60-85% (Supriyanto & Suryani, 2019). Akan tetapi pada kasus wabah COVID-19 ini, WHO telah mengeluarkan standar *Bed Occupancy Rate* (BOR) yaitu sebesar 60% (Tambun, 2020). Rumah sakit dengan nilai BOR tinggi sangat mengkhawatirkan, karena rumah sakit diindikasikan tidak mampu menyediakan tempat tidur untuk pasien bergejala COVID-19. Oleh karena itu, pemerintah daerah memerlukan kesiapsiagaan terutama pada fasilitas kesehatan rumah sakit untuk mengantisipasi lonjakan jumlah pasien kasus COVID-19 yang terus meningkat.



Gambar 2. Tingkat keterpakaian tempat tidur di rumah sakit rujukan COVID-19 Kab. Bogor.

Para pengambil kebijakan di daerah harus memiliki data yang akurat dan kemampuan untuk memprediksi dengan tepat lonjakan kasus yang dapat melumpuhkan fasilitas pelayanan kesehatan di daerahnya masing-masing. Kemampuan ini menjadi fondasi awal bagi pemerintah daerah untuk menentukan strategi sesuai dengan masalah yang dihadapi dan kemampuan yang dimiliki. Kemampuan fasilitas pelayanan kesehatan, terutama rumah sakit rujukan untuk menjangkau wilayah-wilayah rentan kasus positif dapat dengan mudah dilihat menggunakan analisis spasial. Analisis spasial dan pemetaan penyakit telah banyak dilakukan di berbagai belahan dunia (Koch, 2005). Informasi terkait *spatio-temporal* wabah dinilai sangat penting digunakan untuk melihat prioritas penanganan wilayah (Desjardins et al., 2020). Salah satu respon yang sering dilakukan adalah melakukan pengambilan keputusan secara spasial untuk membantu penanggulangan pandemi melalui deteksi dini lokasi-lokasi yang beresiko tinggi (Liu et al., 2017). Pemodelan dan pemetaan penyakit adalah pendekatan statistik yang dapat dimanfaatkan oleh pengambil kebijakan dalam memformulasikan tindakan yang dapat dilakukan guna menekan angka penyebaran dan kasus penyakit (Lee & Lawson, 2014). Banyak peneliti telah membuktikan bahwa perangkat Sistem Informasi Geografis (SIG) mampu meningkatkan kapasitas untuk mempelajari, menampilkan dampak, dan memprediksi wabah yang terjadi (Koch, 2005). GIS dapat membantu pemerintah daerah melihat kemampuan daerah untuk menangani wabah COVID-19 tersebut secara spasial.

Pada penelitian ini, analisis spasial digunakan untuk mengetahui kemampuan Kab. Bogor merespon pandemi COVID-19. Kemampuan ini diukur dari jumlah rumah sakit tersedia yang dapat menampung pasien terkonfirmasi positif COVID-19. Menurut informasi dari laman Pejabat Pengelola

Informasi dan Dokumentasi (PPID) Kab. Bogor, per tanggal 17 Maret 2020 Pemerintah Kab. Bogor telah menunjuk 17 rumah sakit sebagai rumah sakit rujukan COVID-19. Berdasarkan data keterpakaian tempat tidur dari Satuan Tugas COVID-19 Kab. Bogor, **Gambar 2** menunjukkan nilai BOR di 17 rumah sakit rujukan COVID-19 di Kab. Bogor sampai dengan 23 November 2020. Jika dilihat dari **Gambar 2**, sebagian besar rumah sakit rujukan di Kab. Bogor telah melebihi kapasitas standar yang ditetapkan oleh WHO. Selain itu, jumlah rumah sakit yang ada sekarang ini, digunakan untuk melayani sekitar 6 juta penduduk di Kab. Bogor. Oleh karena itu, pemerintah daerah perlu menentukan strategi yang lebih tepat, mengingat lonjakan kasus yang masih terus terjadi di Kab. Bogor. Tujuan dari penelitian ini adalah menentukan lokasi strategis fasilitas kesehatan di Kab. Bogor sebagai rumah sakit rujukan COVID-19 dengan menggunakan analisis jaringan jalan. Wilayah-wilayah yang belum terjangkau oleh rumah sakit rujukan yang ada menjadi prioritas pada penelitian ini.

METODE

Penentuan lokasi strategis rumah sakit rujukan dilakukan di Kab. Bogor. Dalam hal ini, Kab. Bogor sebagai daerah yang mempunyai kerentanan tinggi terhadap penyebaran COVID-19, maka sangat penting untuk melakukan pemetaan kapasitas rumah sakit rujukan COVID-19. Pemetaan bertujuan untuk mengetahui jumlah pasien terkonfirmasi positif COVID-19 yang dapat ditampung dan ditangani di rumah sakit rujukan tersebut. **Gambar 3** menunjukkan diagram alir penelitian yang dilakukan. Kapasitas fasilitas kesehatan rumah sakit rujukan COVID-19 di Kab. Bogor didapatkan dari survei lapangan ke Satuan Tugas (SATGAS) COVID-19 di Kab. Bogor. Data kapasitas tersebut meliputi informasi ketersediaan ruang ICU, informasi ketersediaan ruang isolasi,

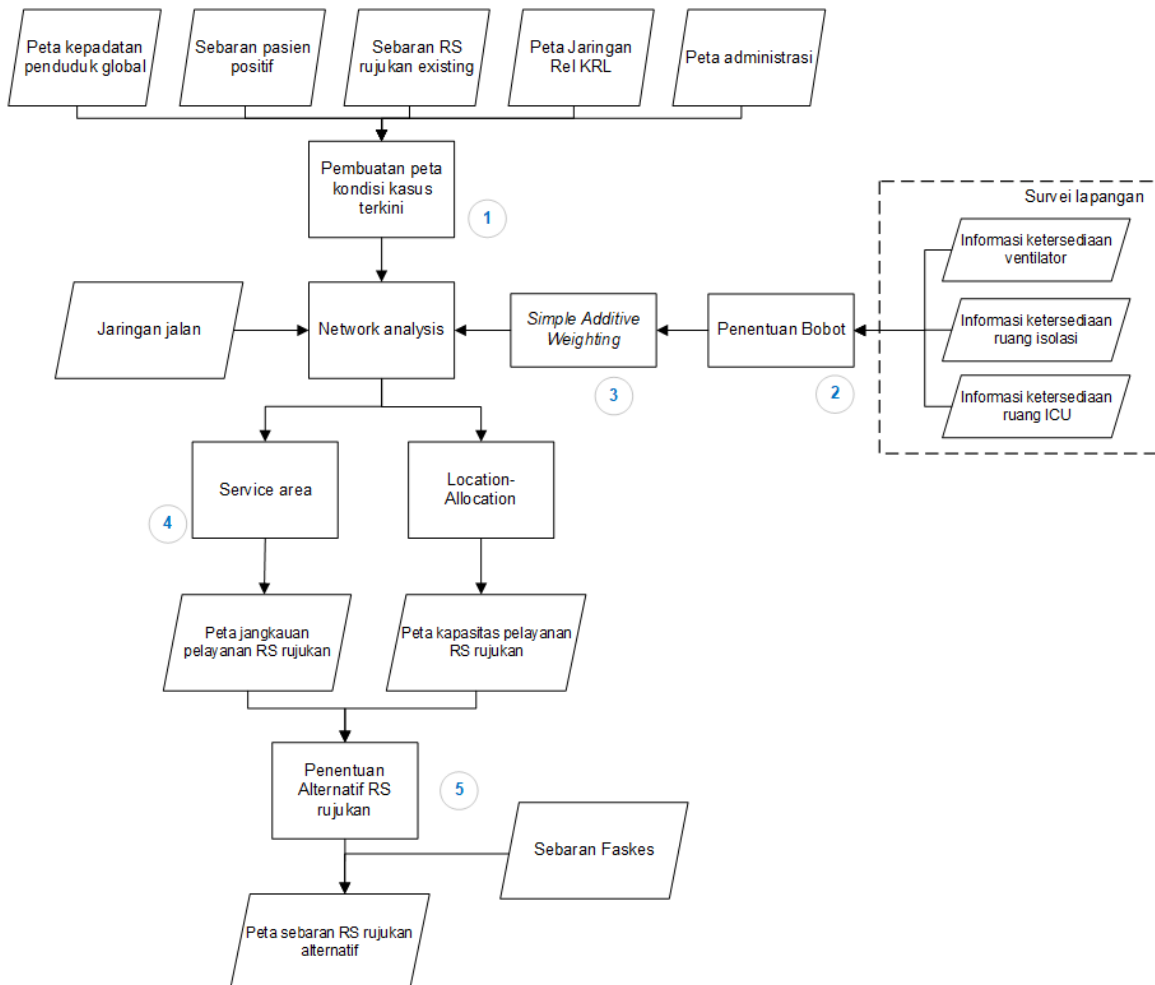
dan informasi ketersediaan ventilator. Data lain yang digunakan yaitu berupa data batas administrasi dan jaringan jalan di Kab. Bogor yang didapatkan dari peta Rupabumi Indonesia (RBI) Badan Informasi Geospasial. Sementara itu, data sebaran pasien terkonfirmasi positif COVID-19 dan daftar rumah sakit rujukan, didapatkan dari laman satgas COVID-19 Kab. Bogor (<https://geoportal.bogorkab.go.id/covid19/>). Berdasarkan **Gambar 3**, penelitian ini terdiri dari 5 tahapan yaitu (1) Pemetaan kasus COVID-19 Kab. Bogor, (2) Perhitungan bobot kepentingan, (3) Pemetaan indeks kesiapan rumah sakit rujukan, (4) Pemetaan jangkauan rumah sakit dalam kondisi darurat, (5) Pemetaan alternatif rumah sakit rujukan di Kab. Bogor.

Pemetaan Kasus COVID-19 Kab. Bogor

Pendekatan spasial merupakan salah satu cara untuk memahami fenomena dan merepresentasikannya dalam Sistem Informasi Geografis yang terintegrasi. Analisis spasial sering diterapkan untuk memahami bagaimana suatu penyakit menular menyebar (Robertson & Nelson, 2014). Pada tahap ini, pemetaan kasus COVID-19 dilakukan untuk memahami dan memberikan gambaran terkait dengan penyebaran COVID-19 di Kab. Bogor. Data yang digunakan adalah kasus

positif COVID-19 dan sebaran Rumah Sakit rujukan COVID-19 di Kab. Bogor. Data kasus terkonfirmasi positif disajikan pada tingkat satuan administrasi kecamatan. Data tambahan lain yang digunakan adalah data jaringan rel kereta api dan stasiun kereta yang didapatkan dari *Open Street Map* (OSM). Kedua data ini digunakan untuk melihat hubungan mobilitas suatu wilayah terhadap jumlah kasus terkonfirmasi positif COVID-19.

Penelitian ini juga menggunakan peta kepadatan penduduk global resolusi tinggi yang diunduh dari laman *Humanitarian Data Exchange* (HDX). Data kepadatan penduduk tersebut dalam format geotiff yang dibuat oleh *Facebook Connectivity Lab* dan *Center for International Earth Science Information Network* (CIESIN), Universitas Columbia. Peta kepadatan penduduk ini memperkirakan jumlah orang yang tinggal dalam satu grid dengan resolusi grid (resolusi spasial) yaitu berukuran 30 meter. Peta kepadatan penduduk digunakan untuk melihat kontribusi kepadatan penduduk dalam peningkatan jumlah kasus positif COVID-19 di Kab. Bogor. Selain itu, data kepadatan penduduk ini digunakan untuk mengalokasikan sumber daya rumah sakit yang ada untuk mengendalikan wabah COVID-19 di Kab. Bogor.



Gambar 3. Diagram alir penelitian.

Perhitungan Bobot Kepentingan

Pada tahap ini, dilakukan proses perhitungan bobot kepentingan menggunakan metode *pairwise comparison*. *Pairwise comparison* menghasilkan bobot relatif antar kriteria. Kriteria akan dibandingkan dengan kriteria lain untuk mendapatkan kriteria yang paling penting (Saaty, 2004). Kriteria yang digunakan pada penelitian ini meliputi ketersediaan ventilator, ICU, dan ruang isolasi. Kemudian ketiga kriteria tersebut dibandingkan secara berpasangan untuk mendapatkan kriteria paling penting yang harus tersedia pada setiap rumah sakit rujukan. Tingkat kepentingan direpresentasikan dalam angka, mulai dari angka 1 yang menunjukkan sama penting dari 2 kriteria yang dipasangkan hingga angka 9 yang menunjukkan kriteria 1 sangat penting (*extreme importance*) dibandingkan dengan kriteria 2. Penilaian kriteria tersebut melibatkan pengetahuan ahli (*expert judgement*), dalam penelitian ini melibatkan 20 tenaga kesehatan yang terlibat langsung dalam penanganan COVID-19. Selain bobot kepentingan, koresponden diminta untuk menentukan waktu optimal rumah sakit rujukan dapat menjangkau pasien COVID-19 dalam kondisi darurat.

Pemetaan Indeks Kesiapan Rumah Sakit Rujukan

Pembuatan indeks kapasitas rumah sakit rujukan COVID-19 di Kab. Bogor berdasarkan variabel-variabel yang ada menggunakan analisis multikriteria, yaitu *Simple Additive Weighting* (SAW). Konsep dasar metode *Simple Additive Weighting* adalah mencari penjumlahan bobot performansi pada setiap alternatif di setiap atributnya. Sementara itu, untuk menentukan strategi penanganan pandemik yang tepat, maka diperlukan suatu pendekatan yang sistematis. Dengan bantuan metode *Multicriteria Decision Analysis* (MCDA), strategi penanganan yang telah ada dievaluasi untuk mendapatkan skenario terbaik dalam mengatasi penyebaran dan dampak dari pandemi (Samanlioglu & Kaya, 2020). *Multicriteria Decision Analysis* (MCDA) merupakan suatu metode pengambilan keputusan untuk menetapkan alternatif terbaik dari sejumlah alternatif spasial yang dievaluasi berdasarkan beberapa kriteria tertentu (Malczewski, 1999; Zeleny, 1982). Penggabungan metode GIS dan MCDA telah banyak digunakan dalam beberapa tahun terakhir (Feick & Hall, 2004).

Data yang digunakan adalah kapasitas fasilitas kesehatan (ICU, ruang isolasi, dan ventilator) rumah sakit rujukan, bobot dari masing-masing kriteria dari hasil *pairwise comparison*, kasus positif, dan lokasi rumah sakit rujukan di Kab. Bogor. Dari data kapasitas fasilitas kesehatan tersebut, kemudian dilakukan penentuan kriteria kelas berdasarkan rentang kelas. Untuk ketersediaan ruang isolasi dan ventilator dibagi menjadi 5 kelas, yaitu kelas 1 tidak lengkap hingga kelas 5 sangat

lengkap. Selanjutnya, ketersediaan ICU dibagi menjadi 3 kelas, yaitu kelas 1 tidak lengkap hingga kelas 3 sangat lengkap. Tahapan selanjutnya yaitu kriteria kelas tersebut dan bobot digunakan untuk menghitung indeks kesiapan rumah sakit rujukan Kab. Bogor menggunakan metode SAW. Indeks kesiapan rumah sakit rujukan terdiri dari 3 kelas yaitu tinggi, sedang, dan rendah. Indeks kesiapan rumah sakit tinggi memiliki arti bahwa rumah sakit rujukan memiliki fasilitas yang memadai untuk menampung pasien COVID-19 bergejala, begitupun sebaliknya.

Pemetaan Jangkauan Rumah Sakit dalam Kondisi Darurat

Pemetaan jangkauan rumah sakit rujukan menggunakan metode *network analysis service area*. *Analysis Service Area* adalah suatu metode untuk memperhitungkan area cakupan dari suatu obyek. Cakupan ini didasarkan pada waktu tempuh yang diperlukan untuk mencapai suatu obyek melalui jaringan transportasi. Area pelayanan dapat ditentukan oleh jarak atau waktu (Mahmoud et al., 2013). Pada tahap ini, data yang digunakan adalah jaringan jalan Kab. Bogor dan lokasi rumah sakit rujukan. Pada data jaringan jalan dilakukan perhitungan waktu tempuh untuk setiap kelas jalan. Waktu tempuh didapatkan dari jarak pada setiap kelas jalan dibagi dengan kecepatan tempuh. Penentuan kelas jalan dan kecepatan tempuh mengacu pada Peraturan Menteri Perhubungan No. PM 111 tentang Tata Cara Penetapan Batas Kecepatan (2015). Terdapat perbedaan definisi kelas jalan antara permenhub dengan data peta RBI, sehingga kecepatan dihitung berdasarkan rata-rata antara kecepatan tertinggi dan terendah setiap kelas jalannya, seperti dapat dilihat pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Penetapan Batas Kecepatan.

Kelas Jalan	Kecepatan (km/jam)
Jalan tol	80
Jalan arteri	40
Jalan kolektor	40
Jalan lokal	40
Jalan lain	40
Jalan setapak	20

Tahap selanjutnya adalah pembuatan *network dataset*. Untuk memastikan data jaringan jalan sudah bebas dari *error topology*, maka dilakukan proses *clean topology*. Tahapan selanjutnya adalah melakukan *network analysis service area* dengan perhitungan impedansi menggunakan waktu tempuh. Output dari tahapan ini berupa cakupan area yang bisa dijangkau oleh rumah sakit rujukan COVID-19 dalam kondisi darurat. Hasil dari tahap ini untuk mengetahui kemampuan rumah sakit yang ada saat kondisi darurat pasien harus dirujuk ke rumah sakit.

Pemetaan Alternatif Rumah Sakit Rujukan di Kab. Bogor

Pada tahap ini, hasil perhitungan indeks kesiapan rumah sakit rujukan COVID-19 digunakan untuk menilai kemampuan rumah sakit rujukan menjangkau wilayah-wilayah di sekitarnya. Pemetaan jangkauan rumah sakit rujukan berdasarkan pada kontribusi setiap wilayah kelurahan di Kab. Bogor menyumbang pasien dengan kondisi gejala berat. Rata-rata kasus aktif COVID-19 per kelurahan di Kab. Bogor yaitu sebanyak 5 orang, mengacu pada data jumlah kasus positif aktif per tanggal 23 November 2020. Menurut Mukaromah (2020), 80% penderita COVID-19 merupakan pasien tanpa gejala, artinya hanya ada 20% dari total kasus aktif per wilayah yang menyumbang keterisian di rumah sakit. Oleh karena itu, hanya ada 1 orang per kelurahan yang diasumsikan memiliki gejala berat dari total kasus aktif, selebihnya merupakan pasien tanpa gejala sebanyak 80%. Angka pasien dengan gejala berat per kelurahan ini digunakan sebagai landasan untuk menghitung kemampuan maksimal dari rumah sakit rujukan COVID-19 untuk menjangkau wilayah di sekitarnya dilihat dari indeks kesiapan rumah sakit. Penelitian ini mengasumsikan bahwa indeks kesiapan rumah sakit rujukan kategori tinggi dapat menampung 15 kelurahan. Artinya, ada 15 pasien dengan gejala berat dan butuh perawatan yang berasal dari 15 kelurahan terdekat. Sementara itu, rumah sakit dengan kategori indeks kesiapan sedang dapat menampung 7 kelurahan, dan indeks kesiapan rendah dapat menampung 2 kelurahan. Penentuan angka daya tampung pada indeks

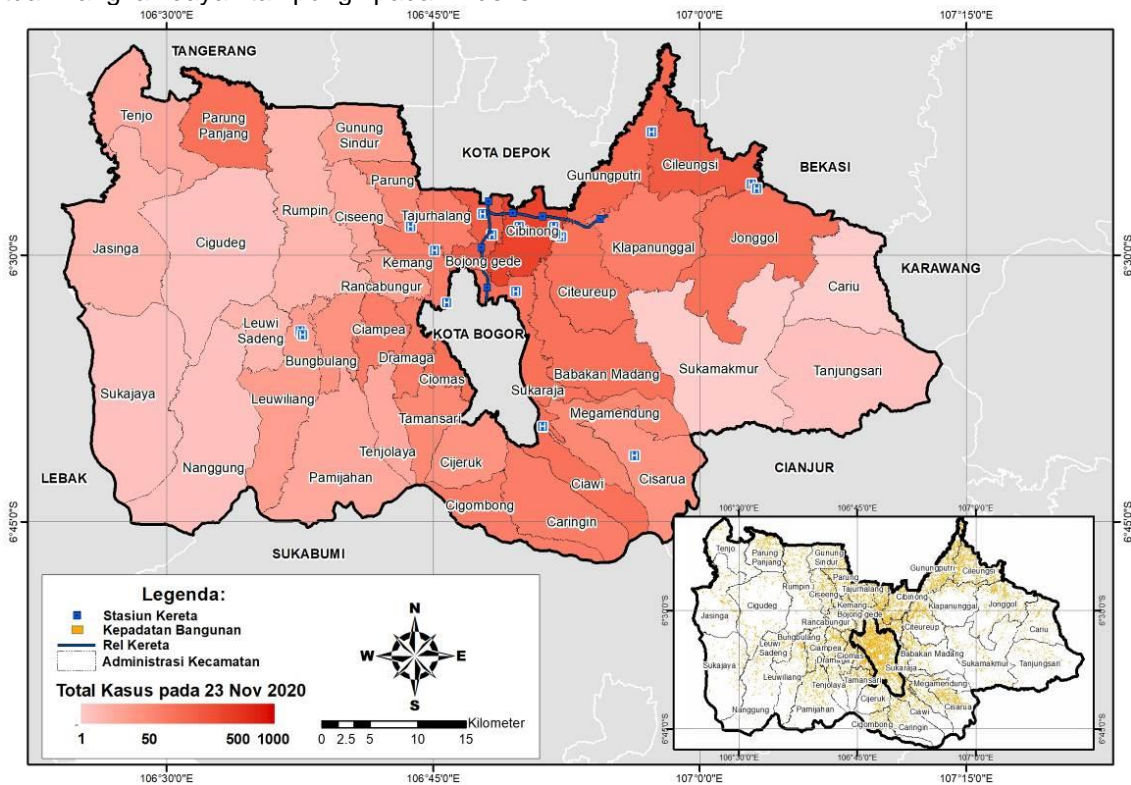
kesiapan merujuk pada jumlah ventilator di setiap kategori rumah sakit.

Data daya tampung atau kemampuan rumah sakit rujukan tersebut kemudian dimasukkan sebagai *capacity* pada saat pengolahan *network analysis allocation-location*. Analisis *allocation-location* digunakan untuk memilih fasilitas dari seperangkat fasilitas untuk beroperasi berdasarkan interaksi potensi fasilitas dengan titik permintaan. Hasil analisis *allocation-location* fase awal berupa kemampuan rumah sakit rujukan yang sudah ada untuk menjangkau wilayah terdekat berdasarkan daya tampung setiap rumah sakit. Dari hasil fase awal *allocation-location* akan terlihat wilayah-wilayah yang belum terjangkau oleh rumah sakit rujukan yang sudah ada. Oleh karena itu, dilakukan analisis *allocation-location* menggunakan sebaran rumah sakit lain yang masih di wilayah Kab. Bogor, untuk menentukan kemungkinan rumah sakit tersebut dijadikan sebagai alternatif rumah sakit rujukan COVID-19.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pemetaan Kasus COVID-19 Kab. Bogor

Pola sebaran total kasus konfirmasi positif sampai dengan tanggal 23 November 2020 di wilayah Kab. Bogor bisa dilihat pada **Gambar 4**. **Gambar 4** menunjukkan bahwa daerah kecamatan Cibinong, Bojonggede, Sukaraja, Gunungputri, dan Cileungsi mengalami kasus konfirmasi positif COVID-19 sejumlah 200-500 kasus, lebih tinggi dibandingkan daerah lainnya.



Gambar 4. Pola penyebaran COVID-19 di Kab. Bogor.

Daerah-daerah tersebut merupakan daerah yang dekat dengan Ibukota negara. Selain itu, wilayah tersebut juga merupakan wilayah dengan mobilitas tinggi, dengan ditandai adanya jalur Kereta Rel Listrik (KRL) dan stasiun KRL. Mobilitas manusia dan jalur transportasi mempercepat penyebaran COVID-19 (Kang et al., 2020; Pourghasemi et al., 2020). Tidak hanya mobilitas manusia, kepadatan penduduk menjadi faktor pendorong peningkatan kasus tinggi di wilayah Kab. Bogor, seperti dapat dilihat pada **Gambar 4**, peta total kasus positif yang disandingkan dengan peta kepadatan penduduk. Wilayah dengan kepadatan penduduk rendah seperti di kecamatan Sukajaya, Cariu, Sukamakmur, Tanjungsari, Cigudeg, dan Nanggung mempunyai total kasus konfirmasi positif COVID-19 kurang dari 5 kasus.

Bobot Kepentingan

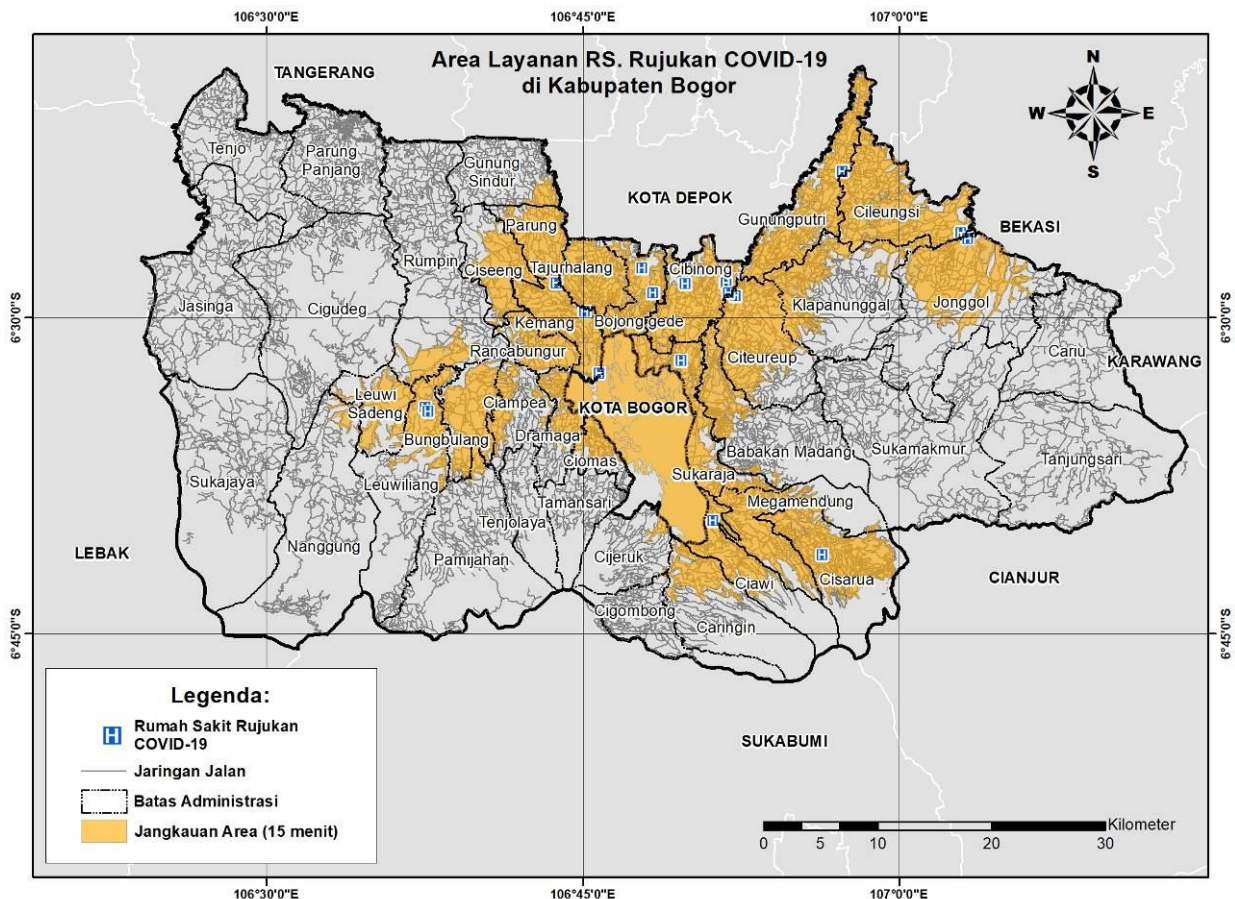
Responden yang terlibat dalam penilaian kuesioner terdiri dari dokter, perawat, bidan, dan ahli gizi yang terlibat dalam penanganan COVID-19. Hasil kuesioner tersebut kemudian diolah menggunakan *software expertchoice 11* untuk mendapatkan bobot dari masing-masing kriteria. Hasil dari *pairwise comparison* harus menunjukkan konsistensi dari responden dilihat dari nilai *Consistency Index*. *Consistency Index* untuk mengukur seberapa konsisten penilaian terhadap kriteria tersebut. Jika nilai dari *Consistency Index* lebih kecil atau sama dengan 10% (0,1), maka

ketidakkonsistenan/hasil penilaian dapat diterima (Saaty, 2003).

Dari 20 responden yang telah memberikan penilaian, hanya 4 responden yang diterima nilai *Consistency Index* nya. Kemudian, bobot kepentingan dari 4 responden digabung untuk mendapatkan bobot total dari masing-masing kriteria (ventilator, ICU, dan ruang isolasi). Dari penggabungan tersebut didapatkan nilai *Consistency Index* yaitu sebesar 0,01. Menurut pengetahuan ahli, ketersediaan ventilator menjadi paling penting ada di rumah sakit rujukan COVID-19, kemudian disusul dengan keberadaan ruang ICU, dan ruang isolasi. Keberadaan ventilator dinilai paling penting ada di rumah sakit rujukan COVID-19 karena berhubungan dengan fungsi ventilator membantu pasien COVID-19 mempermudah untuk bernafas. Nilai bobot untuk 3 kriteria yang dipasangkan yaitu ventilator, ruang ICU, ruang isolasi secara berurutan antara lain 0,622, 0,285, dan 0,094.

Pemetaan Jangkauan Rumah Sakit dalam Kondisi Darurat

Hasil dari kuesioner menunjukkan bahwa 47,6% dari total responden menilai 15 menit adalah waktu optimal rumah sakit rujukan dapat menjangkau pasien COVID-19 dalam kondisi darurat. Waktu 15 menit ini akan dijadikan dasar untuk melakukan *network analysis service area*.



Gambar 5. Area cakupan rumah sakit rujukan.

Tabel 2. Indeks kesiapan rumah sakit.

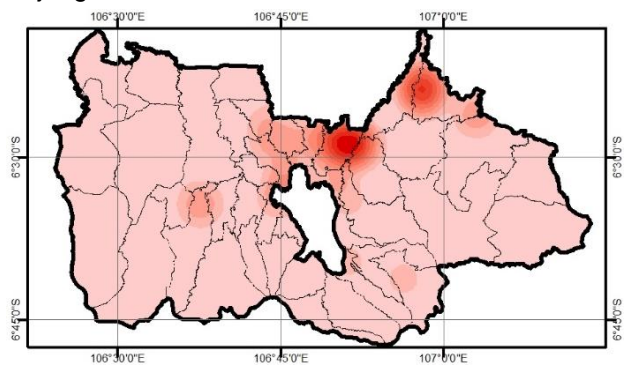
NO	RUMAH SAKIT	INDEKS KESIAPAN	NO	RUMAH SAKIT	INDEKS KESIAPAN	NO	RUMAH SAKIT	INDEKS KESIAPAN
1	RSUD Cibinong	TINGGI	11	RS Sentosa	RENDAH	21	RSU Dr. Sismadi	RENDAH
2	RSUD Ciawi	SEDANG	12	RSAU Hassan Toto	RENDAH	22	RS MH. Thamrin	RENDAH
3	RSUD Leuwiliang	RENDAH	13	RS FMC	RENDAH	23	RS Hermina Mekarsari	RENDAH
4	RS Sentra Medika	RENDAH	14	RS CITAMA	RENDAH	24	RS EMC	RENDAH
5	RS Eka Hospital	SEDANG	15	RS Harapan Sehati	RENDAH	25	RS Karya Bhakti Pratiwi	RENDAH
6	RSUD Cileungsi	SEDANG	16	RS Asyasyifaa	RENDAH	26	RSIA Citra Insani	RENDAH
7	RS Dompot Dhuafa	RENDAH	17	RS Paru Dr. M. Goenawan Partowidigdo	RENDAH	27	RSIA Melania	RENDAH
8	RS Permata Jonggol	RENDAH	18	RSUD TNI Atang Sanjaya	RENDAH	28	RSIA Permata Pertiwi	RENDAH
9	RS Annisa	RENDAH	19	RSU Mary Cileungsi	RENDAH	29	RS Assalam	RENDAH
10	RS Bina Husada	SEDANG	20	RSU Trimitra	RENDAH	30	RSIA Kenari Graha Medika	RENDAH

Gambar 5 menunjukkan aksesibilitas area yang dapat dijangkau rumah sakit rujukan di Kab. Bogor dalam waktu tempuh 15 menit. Aksesibilitas menggambarkan kemampuan sistem rumah sakit dalam memenuhi kebutuhan pasien (Levesque et al., 2013; Thomas & Penchansky, 1984). Dalam kondisi darurat, banyak daerah di Kab. Bogor yang belum terjangkau rumah sakit rujukan, seperti dapat dilihat pada **Gambar 5**. Akan tetapi, melihat **Gambar 4** terkait kepadatan penduduk di Kab. Bogor, wilayah dengan kepadatan penduduk tinggi masih bisa terjangkau oleh rumah sakit rujukan yang sudah ada. Keterbatasan infrastruktur kesehatan menjadi permasalahan di Kab. Bogor. Untuk itu, perlu penanganan yang serius dari pemangku kebijakan daerah, mengingat wabah COVID-19 masih terus berlangsung dan kasus positif semakin bertambah dari hari ke hari.

Pemetaan Indeks Kesiapan Rumah Sakit Rujukan

Menurut Peraturan Menteri Kesehatan RI No. 56 tentang Klasifikasi dan Perizinan Rumah Sakit (2014), bahwa rumah sakit diklasifikasikan menjadi 4 tipe. Di wilayah Kab. Bogor terdapat 1 rumah sakit dengan tipe A, 5 rumah sakit dengan tipe B, 21 rumah sakit dengan tipe C, dan 3 rumah sakit dengan tipe D. Dari total 30 rumah sakit yang ada di Kab. Bogor hanya 17 rumah sakit yang ditunjuk sebagai rumah sakit rujukan COVID-19. **Tabel 2** menunjukkan hasil dari penentuan indeks kesiapan 17 rumah sakit rujukan yang sudah ada sekarang dan 13 rumah sakit lainnya di Kab. Bogor. Dari 17 rumah sakit rujukan yang sudah ada di Kab. Bogor, hanya 1 rumah sakit rujukan dengan indeks kesiapan tinggi, yaitu Rumah Sakit Umum Daerah Cibinong. Kemudian, terdapat 4 rumah sakit rujukan dengan kategori indeks kesiapan sedang, yaitu antara lain RSUD Ciawi, RSUD Cileungsi, RS Eka

Hospital, dan RS Bina Husada. Sedangkan 12 rumah sakit rujukan sisanya, memiliki indeks kesiapan rendah. Sementara itu, 13 rumah sakit lain yang tidak termasuk dalam rumah sakit rujukan COVID-19 memiliki indeks kesiapan rendah. Infrastruktur kesehatan di Kab. Bogor belum memadai, terlihat dari sebagian besar hasil indeks kesiapan rumah sakit rujukan dan rumah sakit lainnya pada kategori rendah. Terjadi ketimpangan penyediaan fasilitas pelayanan kesehatan, terbukti dari hasil indeks kesiapan rumah sakit yang menunjukkan hanya ada satu rumah sakit dengan kategori tinggi, yaitu RSUD Cibinong. **Gambar 6** menunjukkan sebaran keseluruhan rumah sakit (30 rumah sakit) yang ada di wilayah Kab. Bogor. Sebaran rumah sakit di Kab. Bogor pun tidak banyak, dan hanya memusat di bagian tengah wilayah Kab. Bogor. Ketersediaan rumah sakit terkonsentrasi di wilayah Cibinong, Gunung putri, dan Cileungsi. Sebaran rumah sakit tidak merata dan banyak lokasi di Kab. Bogor belum bisa terjangkau.



Gambar 6. Kepadatan RS di wilayah Kab. Bogor.

Gambar 7 menunjukkan Indeks Kesiapan Rumah Sakit Rujukan dengan sebaran kasus positif aktif COVID-19 per tanggal 23 November 2020. Rumah sakit rujukan COVID-19 di Kab. Bogor

hanya memusat di bagian tengah wilayah Kab. Bogor, tersebar berdekatan dengan Kota Depok dan Kota Bogor. Untuk wilayah bagian barat dan timur Kab. Bogor hampir tidak ditemukan rumah sakit rujukan COVID-19. Sementara itu, di bagian selatan Kab. Bogor hanya ada dua rumah sakit rujukan, yaitu RSUD Ciawi dan RS Paru Dr. M. Goenawan Partowidigdo.

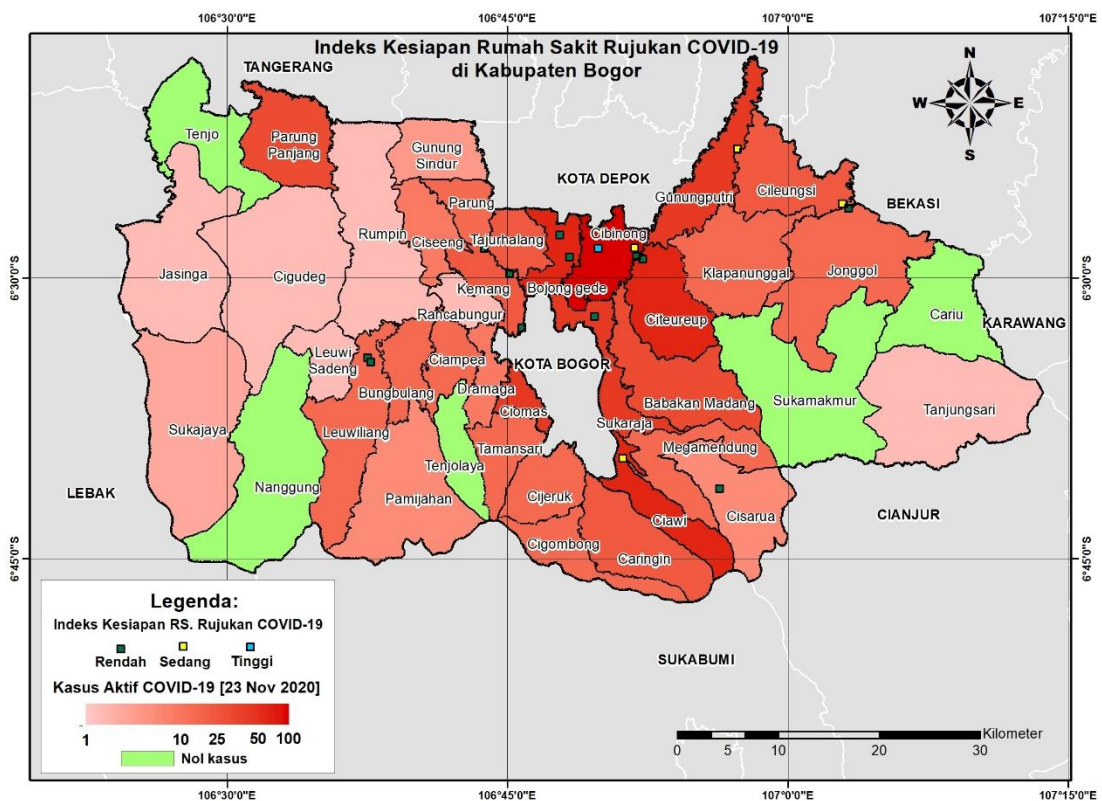
Dilihat dari **Gambar 7** wilayah Cibinong, Citeureup, Bojonggede, Sukaraja, dan Ciawi memiliki kasus positif aktif hingga 100 orang, dan wilayah di sekitarnya memiliki kasus positif aktif hingga 50 orang pada tanggal 23 November 2020. Jika dilihat dari indeks kesiapan rumah sakit rujukan yang berada di sekitar wilayah tersebut hanya ada 1 rumah sakit rujukan dengan indeks kesiapan tinggi, 2 rumah sakit rujukan dengan indeks kesiapan sedang, dan rumah sakit rujukan lainnya dengan indeks kesiapan rendah. Hal tersebut dapat menyebabkan akumulasi pasien yang tidak bisa dirawat di rumah sakit rujukan di sekitar wilayah zona merah (kasus aktif tinggi). Ketimpangan antara kesiapan rumah sakit rujukan dengan penambahan kasus positif aktif membuat banyak pasien dengan gejala tidak bisa dirawat, sehingga membuat angka kematian menjadi tinggi.

Terlihat juga pada **Gambar 7**, untuk wilayah Parung Panjang terjadi kasus positif aktif mencapai 50 orang pada tanggal 23 November 2020, tetapi di wilayah tersebut tidak terdapat rumah sakit rujukan dan wilayah tersebut juga tidak terjangkau oleh rumah sakit rujukan dalam kondisi darurat. Kondisi tersebut harus menjadi perhatian pemangku kebijakan daerah mengingat kasus positif aktif di wilayah tersebut tinggi tetapi tidak ada fasilitas kesehatan di wilayah tersebut.

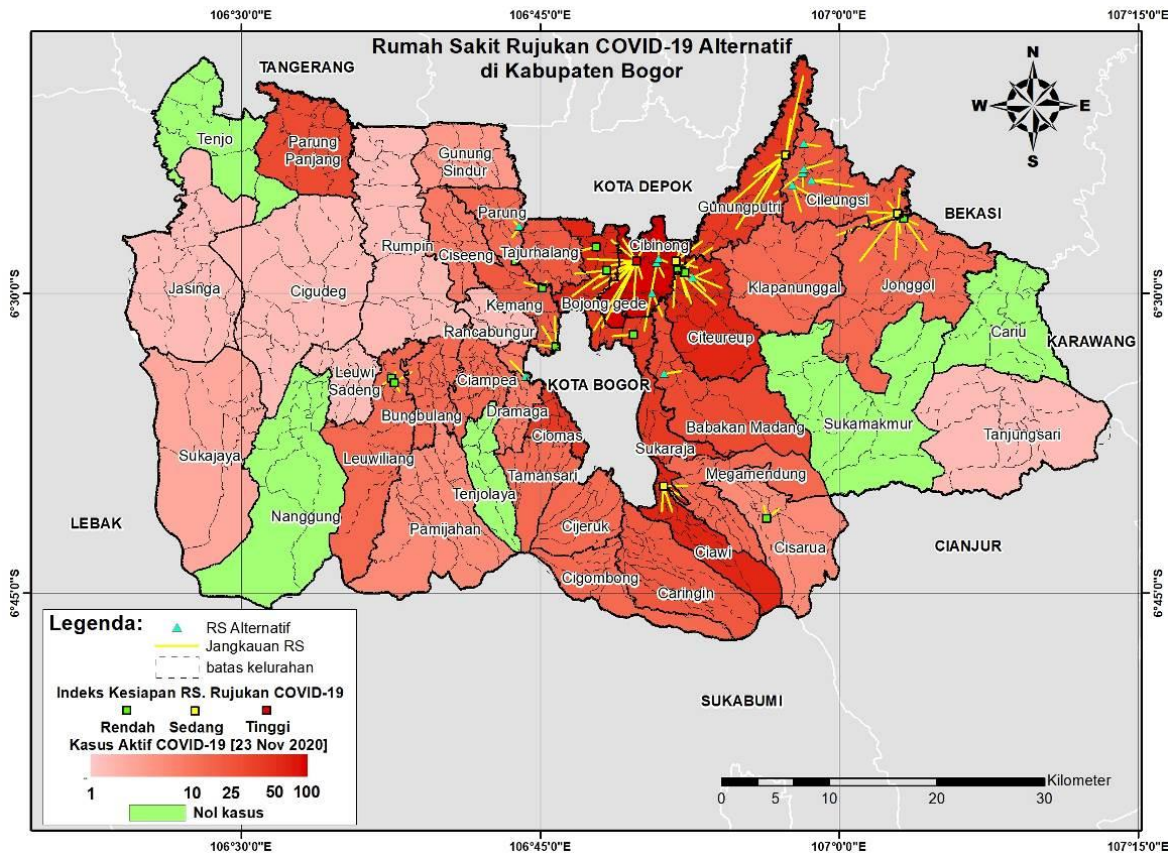
Pemetaan Alternatif Rumah Sakit Rujukan di Kab. Bogor

Gambar 7 menunjukkan jangkauan layanan seluruh rumah sakit di Kab. Bogor. Lokasi rumah sakit rujukan dan rumah sakit lainnya banyak terdapat di daerah sekitar Cibinong, Bojonggede, Sukaraja Ciawi, dan Cileungsi. Daerah tersebut merupakan daerah penyumbang kasus positif aktif tertinggi dibandingkan dengan daerah lainnya di Kab. Bogor. Jika dilihat dari jumlah kasus positif aktif dan indeks kesiapan rumah sakit rujukan, pada daerah tersebut memang membutuhkan alternatif rumah sakit rujukan untuk menampung pasien positif aktif yang terus naik dari hari ke hari. Keterbatasan jumlah rumah sakit menjadikan rumah sakit lain sangat berpotensi menjadi rumah sakit rujukan COVID-19.

Untuk rumah sakit rujukan dengan indeks kesiapan tinggi hanya dapat menjangkau 15 kelurahan terdekat dari rumah sakit tersebut. Dengan asumsi 1 kelurahan menyumbang sebanyak 1 pasien positif aktif yang membutuhkan perawatan di rumah sakit rujukan. Sehingga untuk rumah sakit rujukan dengan indeks kesiapan tinggi dapat menampung 15 pasien positif aktif dan untuk rumah sakit rujukan dengan indeks kesiapan sedang dapat menampung 7 pasien positif aktif. Sementara itu, untuk daerah Cibinong, Bojonggede, Sukaraja, Ciawi, dan Cileungsi, kasus positif aktif mencapai hingga 100 orang maka dibutuhkan alternatif rumah sakit rujukan. Alternatif rumah sakit rujukan ditentukan dari rumah sakit yang sudah ada sebelumnya sebagai rumah sakit rujukan di Kab. Bogor.



Gambar 7. Indeks kesiapan rumah sakit rujukan.



Gambar 8. Rumah sakit rujukan COVID-19 alternatif di Kab. Bogor.

Dari 13 alternatif rumah sakit rujukan yang ada, hasil perhitungan indeks kesiapannya rendah. Oleh karena itu, alternatif rumah sakit rujukan hanya dapat menjangkau 2 kelurahan saja dengan asumsi hanya dapat menampung 2 pasien positif aktif. Oleh karena itu, seluruh 13 rumah sakit lainnya ini dialokasikan menjadi rumah sakit alternatif. Apabila melihat **Gambar 8**, terdapat banyak kelurahan di daerah Cibinong, Bojonggede, Sukaraja Ciawi, dan Cileungsi yang belum terjangkau oleh rumah sakit rujukan dan alternatif rumah sakit rujukan. Hal ini membutuhkan penanganan yang serius dari pemerintah daerah setempat. Salah satu solusi yang dapat dilakukan adalah menambah ketersediaan ventilator, ICU, dan ruang isolasi pada rumah sakit tersebut agar daya tampung rumah sakit rujukan yang sudah ada dan alternatif menjadi bertambah. Untuk daerah Tenjo, Jasinga, Sukajaya, Nanggung, Cariu, dan Tanjungsari tidak terdapat rumah sakit rujukan yang sudah ada maupun alternatif rumah sakit terdekat. Tetapi daerah tersebut adalah daerah dengan kepadatan penduduk rendah dan kasus positif aktif cenderung rendah bahkan terdapat daerah dengan *zero case*. Untuk daerah Parung Panjang terdapat kasus positif aktif yang tinggi, mencapai hingga 100 kasus tetapi di daerah tersebut tidak terdapat rumah sakit rujukan *existing* maupun alternatif rumah sakit terdekat. Hal tersebut harus menjadi perhatian pemerintah daerah setempat untuk dapat mengambil langkah serius dalam menangani lonjakan wabah di daerah tersebut dan sekitarnya.

KESIMPULAN

Pola penyebaran kasus terkonfirmasi COVID-19 tertinggi di wilayah Kab. Bogor terkonsentrasi pada wilayah dengan kepadatan penduduk dan mobilitas manusia yang tinggi. Dari pola penyebaran COVID-19 ini, dapat dilakukan penanganan/strategi khusus untuk daerah-daerah yang mengalami kasus konfirmasi positif yang tinggi. Salah satunya dengan mengevaluasi dan meningkatkan kapasitas rumah sakit rujukan terdekat pada daerah yang mengalami konfirmasi kasus positif yang tinggi untuk mengantisipasi lonjakan kasus yang masih akan terus terjadi.

Selanjutnya, peta jangkauan rumah sakit rujukan yang sudah ada menggambarkan kemampuan wilayah Kab. Bogor dalam menghadapi pandemi. Sayangnya, dari hasil penelitian menunjukkan bahwa jumlah rumah sakit rujukan COVID-19 di Kab. Bogor yang ada sekarang ini masih kurang untuk menjangkau seluruh wilayah Kab. Bogor. Ditambah lagi, infrastruktur rumah sakit sangat kurang di Kab. Bogor, terbukti sebagian besar rumah sakit rujukan yang ada memiliki hasil indeks kesiapan rumah sakit bernilai rendah. Di samping itu, kondisi ini diperparah dengan sebaran rumah sakit hanya terkonsentrasi pada wilayah bagian tengah Kab. Bogor. Oleh karena itu, pemerintah daerah harus berupaya untuk melakukan penambahan jumlah rumah sakit atau penambahan kapasitas layanan kesehatan. Apabila kondisi ini tidak bisa diatasi maka penumpukan pasien akan terjadi. Selain itu,

kematian pasien akan meningkat karena pasien tidak bisa mendapatkan perawatan medis dengan baik.

Pemetaan Indeks Kesiapan rumah sakit rujukan penting dilakukan untuk mengetahui kondisi atau kesiapan rumah sakit rujukan berdasarkan dari ketersediaan fasilitas. Dari indeks kesiapan rumah sakit rujukan tersebut pemangku kebijakan daerah dapat menilai kesiapan setiap rumah sakit yang ada. Dari pemetaan indeks kesiapan rumah sakit rujukan dan pemetaan jangkauan rumah sakit rujukan didapatkan wilayah-wilayah dengan kasus positif aktif yang tinggi tetapi tidak terjangkau bahkan tidak terdapat rumah sakit rujukan. Hal tersebut harus menjadi perhatian pemangku kebijakan daerah untuk menentukan langkah ke depan dalam menangani wabah COVID-19 ini. Dilakukan Pemetaan Alternatif rumah sakit rujukan untuk menghasilkan rumah sakit rujukan baru yang strategis dilihat dari jumlah kasus positif aktif dan rumah sakit rujukan *existing* sehingga jika terjadi lonjakan kasus COVID-19 dapat segera ditangani oleh rumah sakit rujukan terdekat. Keterbatasan jumlah rumah sakit membuat 13 alternatif rumah sakit rujukan yang ada sangat strategis dijadikan rumah sakit rujukan COVID-19. Rumah sakit alternatif tersebut bisa membantu menopang wilayah-wilayah yang tidak terjangkau.

Selain penambahan infrastruktur rumah sakit, solusi lain yang bisa dilakukan oleh pemerintah daerah Kab. Bogor adalah dengan melakukan penerapan Pembatasan Sosial Berskala Besar (PSBB) secara ketat. Penerapan PSBB digunakan untuk membatasi pergerakan masyarakat dan menekan jumlah pasien terkonfirmasi positif COVID-19. Oleh karena itu, kapasitas rumah sakit bisa dikendalikan dengan harapan angka kematian menjadi berkurang.

Analisis spasial dan penerapan *Multicriteria Decision Analysis* yang dilakukan pada penelitian ini dapat diterapkan untuk lokasi lain. Akan tetapi, perlu penambahan variabel lain dalam penyusunan indeks kesiapan. Variabel seperti jumlah dokter spesialis paru, jumlah perawat, dan jumlah tempat tidur akan memperkuat analisis yang ada.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Satuan Tugas (SATGAS) COVID-19 yang telah membantu dalam memberikan data kapasitas rumah sakit rujukan Kabupaten Bogor. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Kementerian Ristek Dikti yang telah memberikan pendanaan dalam penulisan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

Boulos, M. N. K., & Geraghty, E. M. (2020). Geographical tracking and mapping of coronavirus disease COVID-19/SARS-CoV-2 epidemic and associated events around the world: how 21 century GIS technologies are supporting the global fight against outbreaks and epidemics. *International Journal of*

- Health Geographics*, 19(8). <https://doi.org/10.1186/s12942-020-00202-8>
- Desjardins, M. R., Hohl, A., & Delmelle, E. M. (2020). Rapid surveillance of COVID-19 in the United States using a prospective space-time scan statistic: Detecting and evaluating emerging clusters. *Applied Geography*, 118. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2020.102202>
- Djalante, R., Lassa, J., Setiamarga, D., Sudjatma, A., Indrawan, M., Haryanto, B., ... Warsilah, H. (2020). Review and analysis of current responses to COVID-19 in Indonesia: Period of January to March 2020. *Progress in Disaster Science*, 6. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.pdisas.2020.100091>
- Feick, R., & Hall, B. (2004). A method for examining the spatial dimension of multi-criteria weight sensitivity. *International Journal of Geographical Information Science*, 18(8), 815–840. <https://doi.org/10.1080/13658810412331280185>
- Flies, E. J., Mavoa, S., Zosky, G. R., Mantzioris, E., Williams, C., Eri, R., ... Buettel, J. C. (2019). Urban-associated diseases: Candidate diseases, environmental risk factors, and a path forward. *Environment International*, 133. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105187>
- Huang, C., Wang, Y., Li, X., Ren, L., Zhao, J., Hu, Y., ... Cao, B. (2020). Clinical features of patients infected with 2019 novel coronavirus in Wuhan, China. *The Lancet*, 395(10223), 497–506. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)30183-5](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)30183-5)
- Huffman, E. K. (1994). *Health Information Management* (Tenth Edit). Physicians' Record Company.
- Indharwati, R. (2018). *Sumber Daya Terhadap Rendahnya Capaian Bed Occupancy Rate (BOR) Berdasarkan Penilaian Pasien Rawat Inap di Umah Sakit Paru Jember Tahun 2017*. Universitas Jember.
- Jones, K. E., Patel, N. G., Levy, M. A., Storeygard, A., Balk, D., Gittleman, J. L., & Daszak, P. (2008). Global trends in emerging infectious diseases. *Nature*, 451, 990–993.
- Kamadjeu, R., Mahamud, A., Webeck, J., Baranyikwa, M. T., Chatterjee, A., Bile, Y. N., ... Mulugeta, A. (2014). Polio Outbreak Investigation and Response in Somalia, 2013. *The Journal of Infectious Diseases*, 210(suppl_1), S181–S186. <https://doi.org/10.1093/infdis/jiu453>
- Kang, D., Choi, H., Kim, J.-H., & Choi, J. (2020). Spatial epidemic dynamics of the COVID-19 outbreak in China. *International Journal of Infectious Diseases*, 94. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijid.2020.03.076>
- Khare, M., Goudie, A., & Rauch, D. A. (2018). National Pediatric Bed Occupancy. *Pediatrics*, 141. https://doi.org/10.1542/peds.141.1_MeetingAbstract.420
- Koch, T. (2005). *Cartographies of Disease: Maps, Mapping, and Medicine*. California: ESRI Press.
- Lee, D., & Lawson, A. (2014). Cluster detection and risk estimation for spatio-temporal health data. *ArXiv Preprint*.
- Levesque, J.-F., Harris, M. F., & Russella, G. (2013). Patient-centred access to health care: conceptualising access at the interface of health systems and populations. *International Journal of Equity in Health*, 12. <https://doi.org/10.1186/1475->

- 9276-12-18
- Liu, Y., Watson, S. C., Gettings, J. R., Lund, R. B., Nordone, S. K., Yabsley, M. J., & McMahan, C. S. (2017). A Bayesian spatio-temporal model for forecasting Anaplasma species seroprevalence in domestic dogs within the contiguous United States. *PLoS One*, 12(7). <https://doi.org/https://doi.org/10.1371/journal.pone.0182028>
- Mahmoud, M. S., Al-Nasser, F. A., & Al-Sunni, F. M. (2013). Network-based strategies for signalised traffic intersections. *Inderscience Publisher*, 5. <https://doi.org/10.1504/IJSCC.2013.054139>
- Malczewski, J. (1999). *GIS and Multicriteria Decision Analysis*. New York: John Wiley & Sons Inc.
- Moghadas, S. M., Shoukat, A., Fitzpatrick, M. C., Wells, C. R., Sah, P., Pandey, A., ... Galvani, A. P. (2020). Projecting hospital utilization during the COVID-19 outbreaks in the United States. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(16), 9122 LP – 9126. <https://doi.org/10.1073/pnas.2004064117>
- Mukaromah, V. F. (2020). Hampir 80 Persen Kasus Covid-19 Tak Bergejala, Ini Fakta soal OTG. Retrieved 4 January 2021, from Kompas website: <https://www.kompas.com/tren/read/2020/06/08/090300965/hampir-80-persen-kasus-covid-19-tak-bergejala-ini-fakta-soal-otg>
- Okba, N. M. A., Müller, M. A., Li, W., Wang, C., H., C., GeurtsvanKessel, ... Haagmans, B. L. (2020). SARS-CoV-2 specific antibody responses in COVID-19 patients.
- Organization, W. H. (2020). *Coronavirus disease 2019 (COVID-19): situation report, 72*.
- Peraturan Menteri Kesehatan RI No 56 tentang Klasifikasi dan Perizinan Rumah Sakit. , (2014).
- Peraturan Menteri Perhubungan No. PM 111 tentang Tata Cara Penetapan Batas Kecepatan. , (2015).
- Pourghasemi, H. R., Pouyan, S., Heidari, B., Farajzadeh, Z., Fallah Shamsi, S. R., Babaei, S., ... Sadeghian, F. (2020). Spatial modeling, risk mapping, change detection, and outbreak trend analysis of coronavirus (COVID-19) in Iran (days between February 19 and June 14, 2020). *International Journal of Infectious Diseases*, 98, 90–108. <https://doi.org/10.1016/j.ijid.2020.06.058>
- Robertson, C., & Nelson, T. A. (2014). An Overview of Spatial Analysis of Emerging Infectious Diseases. *The Professional Geographer*, 66(4), 579–588. <https://doi.org/10.1080/00330124.2014.907702>
- Roser, M., Ritchie, H., Ortiz-Ospina, E., & Hasell, J. (2020). Coronavirus Pandemic (COVID-19). Retrieved 8 May 2020, from <https://ourworldindata.org/coronavirus>
- Saaty, T. (2003). Decision-making with the AHP: Why is the principal eigenvector necessary. *European Journal of Operational Research*, 145(1), 85–91. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(02\)00227-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0377-2217(02)00227-8)
- Saaty, T. L. (2004). Decision making—the analytic hierarchy and network processes (AHP/ANP). *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, 13(1), 1–35.
- Samanlioglu, F., & Kaya, B. E. (2020). Evaluation of the COVID-19 Pandemic Intervention Strategies with Hesitant F-AHP. *Journal of Healthcare Engineering*. <https://doi.org/10.1155/2020/8835258>
- Shimakawa, Y., Camélique, O., & Ariyoshi, K. (2010). Outbreak of chickenpox in a refugee camp of northern Thailand. *Conflict and Health*, 4(1), 4. <https://doi.org/10.1186/1752-1505-4-4>
- Supriyanto, H., & Suryani, E. (2019). Implementation of System Dynamics in Hospital Services for Improving the Inpatient Rooms Utilization. *Jurnal Ilmiah KURSOR*, 10(1), 29–36.
- Tambun, L. T. (2020). Tingkat Keterisian Tempat Tidur Pasien Covid-19 Masih Mencukupi. Retrieved 4 January 2020, from Berita Satu website: <https://www.beritasatu.com/kesehatan/681319/tingkat-keterisian-tempat-tidur-pasien-covid19-masih-mencukupi>
- Thomas, J. W., & Penchansky, R. (1984). Relating satisfaction with access to utilization of services. *Medical Care*, 22(6), 553–568. <https://doi.org/10.1097/00005650-198406000-00006>
- Zeleny, M. (1982). *Multiple criteria decision making*. New York: McGraw-Hill.

ALOKASI PEMANFAATAN RUANG BERDASARKAN DAYA DUKUNG LAHAN DI SAWANGAN, DEPOK

(Allocation of Spatial Utilization Based on Land Carrying Capacity, Sawangan, Depok)

Tatan Sukwika¹ dan Irman Firmansyah²

¹Program Studi Teknik Lingkungan, Universitas Sahid Jakarta

²Sistem Dinamik Center Bogor

Jl. Prof. Dr. Soepomo No.84 Tebet, Jakarta Selatan 12870

E-mail koresponden: tatan.swk@gmail.com

Diterima: 3 Januari 2020; Direvisi: 1 Februari 2021; Disetujui untuk Dipublikasikan: 23 Maret 2021

ABSTRAK

Pertumbuhan penduduk Kota Depok rata-rata per tahun sekitar 6%. Peningkatan ini berimplikasi pada penyediaan infrastruktur terutama permukiman. Kota Depok melakukan pengembangan sistem pusat pelayanan kegiatan (SPK) kota. Wilayah SPK tersebut dibagi dalam 11 jenis penggunaan lahan yang didominasi oleh permukiman sebesar 49,77%. Tujuan kajian ini adalah menganalisis kemampuan lahan untuk alokasi pemanfaatan permukiman dan memproyeksikan perkembangan wilayah dengan daya dukung lahan terhadap variable jumlah penduduk, PDRB, kebutuhan permukiman, kenyamanan tinggal dan timbulan sampah. Metode yang digunakan adalah analisis spasial dengan overlay peta untuk mengeksplorasi data dari perspektif keruangan sebagai dasar pengambilan keputusan dari kriteria klasifikasi kemampuan lahan yang dikaji. Metode sistem dinamik menggunakan data time series untuk memodelkan dan memproyeksikan variabel. Dari hasil analisis diketahui terdapat tiga sub kelas kemampuan lahan (KL) dengan faktor pembatas erosi (e), dan kelerengan (l) yaitu KL-II (63,8%), KL-I (32,48%), dan KL-IV (3,72%). Selanjutnya hasil proyeksi 20 tahun (2010-2030) menunjukkan bahwa di Kota Depok terjadi peningkatan penduduk alami sebesar 52% dan kenaikan PDRB sebesar 80,39%. Kondisi kenyamanan tinggal mengalami tren yang menurun mencapai 9 m²/orang. Sebaliknya, seiring pertambahan jumlah penduduk, tren peningkatan juga terjadi pada kebutuhan permukiman dan timbulan sampah. Secara garis besar, dapat disimpulkan bahwa terdapat penggunaan lahan aktual yang selaras dengan kemampuan lahan di sub-kelas IV. Hasil proyeksi daya dukung lahan menunjukkan bahwa kebutuhan permukiman lebih dinamis seiring dengan pertambahan jumlah penduduk, sedangkan luasan permukiman cenderung tidak mengalami penambahan. Rekomendasi untuk lahan yang dikategorikan sebagai kelas kemampuan lahan IV-e, dapat dimanfaatkan sebagai lahan pertanian. Selain itu arah kebijakan pemanfaatan pola ruang di Kota Depok diharapkan dapat lebih memperhatikan daya dukung lahan non permukiman.

Kata kunci: daya dukung, kemampuan lahan, pemanfaatan pola ruang, permukiman, spasial dinamik

ABSTRACT

The population growth of Depok City is around 6% per year. This increase has implications for the provision of infrastructure, especially settlements. Depok City is developing a service centre system (SPK) for city activities. The SPK area divided into 11 types of land use which are dominated by settlements of 49.77%. This study aims to analyze the ability of the land to allocate residential use and project the development of the area with the carrying capacity of the land on the variables of population, GRDP, housing needs, living comfort, waste generation. The method used is spatial analysis with a map overlay to explore data from a spatial perspective as a basis for decision making from the criteria for the classification of the ability of the studied land. The dynamic system method uses time-series data to model and project variables. The results of the analysis show that there are three sub-classes of land capability (KL) with the limiting factor of erosion (e) and slope (l), namely KL-II (63.8%), KL-I (32.48%), dan KL-IV (3.72%). Furthermore, the projection results of 20 years to 2030 show that Depok City has experienced an increase in the population of 52% and GRDP up 80.39% while living comfort has experienced a decreasing trend of past 9 m²/person, besides that, along with the increase in population, an increasing trend occurs in housing needs and waste generation. In conclusion, there is an actual land use in line with land capacity in sub-class IV, while the projection results of land carrying capacity show that the need for housing is more dynamic as population increases, while the area of settlements tends not to increase. Land capability class IV-e, is recommended for cropland and the direction of spatial pattern utilization policies are more concerned with the carrying capacity of non-residential.

Keywords: carrying capacity, land capability, utilization of spatial patterns, settlements, spatial dynamics

PENDAHULUAN

Perubahan atau perkembangan pola penggunaan lahan dipengaruhi oleh keadaan sosial ekonomi dan pengaruh dari adanya sebuah kebijakan terhadap pemanfaatan lahan. Rustiadi et al. (2003) menyatakan bahwa proses peralihan fungsi lahan dapat dipandang sebagai pergeseran-pergeseran dinamika alokasi dan distribusi sumberdaya menuju keseimbangan-keseimbangan baru yang lebih optimal. Proses alih fungsi lahan pada umumnya didahului oleh adanya proses alih penguasaan lahan. Misalnya pendirian bangunan liar dipinggiran kota untuk tempat tinggal. Pesatnya urbanisasi di kota-kota besar dan metropolitan telah menyebabkan permasalahan ketersediaan lahan bagi perumahan. Akibat langka dan semakin mahal tanah di perkotaan, pembangunan perumahan baru layak huni bagi masyarakat berpenghasilan rendah cenderung menjauh dari tempat kerja. Keadaan ini menimbulkan ketidakteraturan penataan ruang dan kawasan, permasalahan mobilitas manusia dan barang, beban investasi dan operasi dan pemeliharaan PSU (prasarana, sarana dan utilitas), penurunan produktifitas kerja, serta berdampak buruk terhadap kondisi sosial dan lingkungan (Sabaruddin, 2012; Sukwika, 2018b). Menurut Hidajat (2014) dan Ramlan dan Rudiarto (2015) *urban sprawl* menggambarkan penyebaran spasial teratur atau tidak teratur dari pusat kota pada sebuah perkotaan, batas spasial lebih tinggi terhadap pertumbuhan penduduk yang menggambarkan kepadatan rata-rata masih rendah dari penduduk perkotaan. Pengembangan kawasan permukiman perkotaan membutuhkan sumberdaya alam seperti lahan dalam jumlah besar. Di lain sisi, lahan di perkotaan menjadi persoalan yang semakin kompleks.

Sesuai dengan PermenLH (2009), bahwa penyusunan rencana tata ruang wilayah yang tidak memperhatikan daya dukung lahan dapat menimbulkan permasalahan lingkungan hidup seperti banjir, longsor dan kekeringan. Ditinjau dalam perspektif lingkungan, daya dukung mencakup dua komponen yaitu kapasitas penyediaan (*supportive capacity*) dan kapasitas tampung (*assimilative capacity*). Dalam pedoman ini, daya dukung lingkungan terbatas pada kapasitas penyediaan sumber daya alam, terutama berkaitan dengan kemampuan lahan serta ketersediaan dan kebutuhan akan lahan dan air dalam suatu ruang/wilayah. Oleh karena kapasitas sumber daya alam tergantung pada kemampuan, ketersediaan, dan kebutuhan akan lahan dan air. Dalam perspektif biofisik wilayah, daya dukung dapat didefinisikan sebagai jumlah maksimum populasi yang dapat didukung oleh suatu wilayah, sesuai dengan kemampuan teknologi yang ada (Binder and Lopez, 2000). Ruang menurut UUTR (2007) merupakan sebagai ruang aktivitas manusia melakukan kegiatan dan memelihara kelangsungan hidupnya. Sementara pemanfaatan ruang adalah

upaya mewujudkan struktur ruang dan pola ruang sesuai dengan rencana tata ruang melalui penyusunan dan pelaksanaan program beserta pembiayaannya. Struktur ruang adalah susunan pusat-pusat permukiman dan sistem jaringan prasarana dan sarana yang berfungsi sebagai pendukung kegiatan sosial ekonomi masyarakat yang secara hierarki memiliki hubungan fungsional.

Berdasarkan sensus penduduk tahun 2010, penduduk SPK Sawangan Kota Depok berjumlah 123.356 jiwa dan terus akan mengalami peningkatan setiap tahunnya. Menurut Hidajat (2014), peningkatan pertumbuhan penduduk yang melampaui daya dukung lahan dapat mendorong terjadinya *urban sprawl*. Bahkan bisa berakibat buruk terhadap terjadi kondisi degradasi lingkungan, krisis infrastruktur, kemacetan, risiko bencana dan ketidaksiapan aparat pemerintah sehingga proses pertumbuhan mengarah pada ketidakberlanjutan.

Peraturan Daerah Kota Depok Nomor 1 Tahun 2015 tentang Rencana Tata Ruang Wilayah Kota Depok Tahun 2012-2032 menjelaskan terkait pengembangan sistem pusat pelayanan (SPK) kegiatan kota di Depok diantaranya yaitu SPK Sawangan. Penggunaan lahan merupakan salah satu aspek penting yang perlu diperhatikan, terutama yang terkait dengan kemampuan lahan. Kemampuan lahan mendukung jenis penggunaan lahan tertentu tanpa menyebabkan kerusakan permanen, serta kategori klasifikasi kemampuan lahan dibagi ke dalam kelas kemampuan dan sub kelas kemampuan lahan (Gad, 2015). Kelas kemampuan memiliki tingkat pembatas dan penghambat (*degree of limitation*) yang sama jika digunakan untuk pertanian yang umum (Arsyad (2010). Berdasarkan data penggunaan lahan BPS-Depok (2018), diketahui luas wilayah SPK Sawangan, terbagi ke dalam 11 (sebelas) jenis penggunaan lahan. Jenis penggunaan lahan yang paling mendominasi adalah permukiman yaitu seluas 768,81 ha atau 29,74%, Selanjutnya terdapat kebun seluas 510,75 ha atau 19,76%, sawah dan tegalan seluas 500,64 ha atau 19,36% semak belukar dan lahan terbuka seluas 418,79 ha atau 16,20%, serta penggunaan lahan lainnya seluas 234.79 ha atau 9,08.

Berdasarkan uraian dan permasalahan yang dikemukakan di atas maka dirasa perlu melakukan kajian daya dukung lingkungan. Lokus kajian ini adalah di SPK Sawangan yang memiliki kegiatan utama antara lain pertanian, perdagangan, perumahan kepadatan rendah, dan ruang terbuka hijau (RTH) kota. Tujuan kajian ini adalah mengetahui kemampuan lahan untuk alokasi pemanfaatan ruang permukiman; menghitung daya dukung lahan untuk permukiman dengan membandingkan antara ketersediaan lahan dan kebutuhan lahan; dan memproyeksikan atau memodelkan perkembangan wilayah yang terkait dengan daya dukung lahan dengan sistem dinamik.

METODE

Lokasi Penelitian

Lokasi kajian kemampuan daya dukung lahan Kota Depok dilakukan di SPK Sawangan. Penentuan kemampuan daya dukung lahan didekati dengan cara mengetahui kondisi kapasitas lingkungan alam dan sumberdaya untuk mendukung kegiatan manusia/penduduk yang menggunakan ruang aktivitas keseharian di wilayah SPK Sawangan, Depok.

Pengumpulan Data dan Teknik Analisis

Metode pengumpulan data dilakukan dengan telaah kebijakan (*desk study*), observasi lapangan, dan wawancara. Jenis data yang digunakan yaitu data primer dan sekunder. Data primer digunakan dalam proses pengklarifikasian konstruksi model, khususnya model arahan dan strategi kebijakan daya dukung dan daya tampung. Data sekunder digunakan untuk mendukung pemodelan yang berasal dari laporan dan dokumen instansi.

Tabel 1 Kriteria klasifikasi kemampuan lahan

Faktor	Kelas Kemampuan							
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
Tekstur tanah (t)								
a. Lapisan atas	t2/t3	t1/t4	t1/t4	(*)	(*)	(*)	(*)	t5
b. Lapisan Bawah	t2/t4	t1/t4	t1/t4	(*)	(*)	(*)	(*)	t5
Lereng Permukaan (%)	i0	i1	i2	i3	(*)	i4	i5	i6
Drainase	d0/d1	d2	d3	d4	(*)(*)	(*)	(*)	(*)
Kedalaman Efektif	K0	k0	k1	k2	(*)	k3	(*)	(*)
Keadaan Erosi	e0	e1	e1	e2	(*)	e3	e4	(*)
Kerikil/batuan	b0	b0	b01	b1	b2	(*)	(*)	b3
Banjir	w0	w1	w2	w3	w4	(*)	(*)	(*)

Sumber: Arsyad (2010)
 (*)= dapat mempunyai sembarang sifat faktor penghambat dari kelas lebih rendah
 (**) = permukaan tanah selalu tergenang air
 Tekstur: t1: halus; t2: agak halus; t3: sedang; t4: agak kasar; t5 (kasar);
 Lereng permukaan: i0 (0 – 3%); i1 (3 – 8 %); i2 (8 – 15%); i3 (15– 30%); i4 (30– 45%); i5 (45– 65%); i6 (> 65%);
 Drainase: D0 (baik); D1 (agak baik); D2 (agak buruk); D3 (buruk); D4 (sangat buruk)
 Kedalaman efektif: K0 (dalam); K1 (sedang); K2 (dangkal); K3 (sangat dangkal);
 Keadaan erosi: e0 (tidak ada erosi); e1 (ringan); e2 (sedang); e3 (berat); e4 (sangat berat).
 Kerikil/batuan: b0: tidak ada atau sedikit b1: sedang; b2: banyak; b3: sangat banyak
 Banjir: w0: tidak pernah; w1: jarang; w2: kadang-kadang; w3: sering; w4: sangat sering.

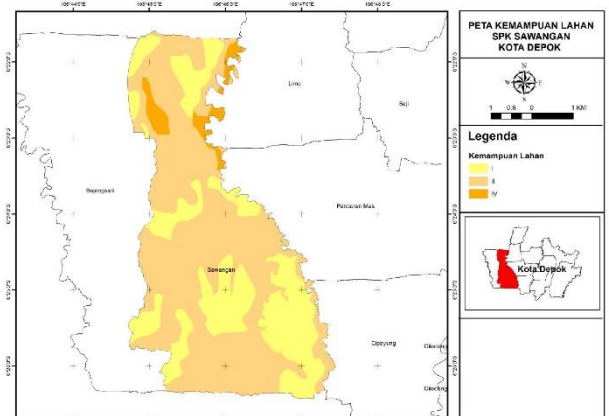
Teknik analisis data yang digunakan adalah analisis spasial dan sistem dinamik. Analisis spasial dilakukan dengan *overlay* peta untuk mendapatkan ekstraksi, nilai tambah, atau informasi baru hasil eksplorasi data dari perspektif keruangan, selanjutnya digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan dari dikriteria klasifikasi kemampuan lahan yang dikaji. Dalam penelitian ini, penggolongan lahan ke dalam kelas kemampuan didasarkan pada intensitas faktor-faktor penghambat permanen dan sulit diubah. Kelas kemampuan berkisar dari kelas I, yaitu lahan yang tidak memiliki faktor penghambat sampai kelas VIII, yaitu lahan yang memiliki penghambat-penghambat yang sangat berat sehingga tidak memungkinkan digunakan, namun masih dapat menghasilkan produksi non kayu atau jasa lingkungan. Faktor-

faktor kriteria klasifikasi kemampuan lahan disajikan pada **Tabel 1**. Metoda lainnya adalah sistem dinamik digunakan untuk mendeskripsikan, memodelkan, dan mensimulasikan. Jenis data yang digunakan dalam kajian ini diantaranya data *time series* kependudukan, produk domestik regional bruto (PDRB), luas lahan, dan sumber sampah.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Spasial

Hasil dari analisis pengelompokan lahan pada SPK Sawangan terbagi menjadi 3 sub kelas, yaitu kelas kemampuan lahan I, kelas kemampuan lahan II, dan kelas kemampuan lahan IV. Ketiga sub kelas tersebut termasuk kedalam kelompok pertama, yaitu kelas kemampuan yang mampu untuk dilakukan sebagai penggunaan lahan pertanian (usahatani) dengan masing-masing faktor pembatas. Sebaran kemampuan lahan SPK Sawangan dapat dilihat pada **Gambar 1**. Kelas kemampuan lahan I tersebar di beberapa bagian SPK Sawangan. Kelas kemampuan lahan II tersebar hampir merata di seluruh bagian SPK Sawangan, sedangkan untuk kelas kemampuan lahan IV hanya tersebar di bagian barat dan timur SPK Sawangan.



Gambar 1. Peta kemampuan lahan SPK Sawangan

Tingkat kelas kemampuan lahan ditentukan faktor pembatas atau resiko paling besar yang terdapat pada SPK. Faktor penghambat tersebut sekaligus menjadi sub kelas kemampuan lahan. Hasil analisis menunjukkan, pada lahan di SPK Sawangan terdapat dua sub kelas kemampuan lahan. Faktor penghambat utama pada sub kelas kemampuan lahan tersebut adalah kelerengn (i) dan erosi (e) yang terdapat pada kelas kemampuan lahan II dan kelas kemampuan lahan IV. Hal ini disebabkan oleh kondisi permukaan lahan di SPK Sawangan yang berbukit-bukit kecil atau memiliki kelerengn sebesar 15-20%. kemampuan lahan II dengan sub kelas kelerengn (i) dan erosi (e) di SPK Sawangan Depok memiliki luasan tertinggi yakni 1.635,27 ha atau setara dengan 63,71% dari total luas keseluruhan yaitu 2.566,71 ha. Kelas kemampuan lahan dengan luasan terbesar kedua

adalah kelas I dengan luas area 834,88 ha (32,53%). Kelas kemampuan lahan IV dengan sub kelas kelerengan (i) dan erosi (e) memiliki luasan terendah yaitu 96,56 ha (3,76%). Luas kelas kemampuan lahan setiap kelas dan sub kelas disajikan pada **Tabel 2**.

Hasil analisis menunjukkan bahwa kelas Lahan pada kelas kemampuan lahan I pada SPK Sawangan dapat dipergunakan untuk berbagai penggunaan seperti pertanian pada umumnya tanpa adanya faktor pembatas. Lahan pada kelas kemampuan lahan II dan IV dapat dipergunakan untuk berbagai penggunaan seperti pertanian pada umumnya namun memiliki faktor pembatas kelerengan dan erosi.

Kesesuaian antara penggunaan lahan aktual dengan kemampuan lahan dan kesesuaian pemanfaatan ruang yang direncanakan dalam RTRW dengan kemampuan lahan adalah mencerminkan daya dukung lahan di kawasan tersebut. Berdasarkan **Tabel 3**, menunjukkan bahwa pada kelas kemampuan lahan I, penggunaan lahan yang selaras terdiri dari 10 jenis penggunaan lahan. Penggunaan lahan tersebut terdiri dari gedung/bangunan, kebun, ladang/tegalan, lahan terbuka semak belukar, pemukiman, sarana/prasarana, sawah, TPU (tempat pemakaman umum), taman, dan tambak dengan luasan sebesar 776,54 ha.

Tabel 2. Luas dan sub kelas kemampuan lahan

Kemampuan Lahan	Sub Kelas Kemampuan Lahan	Lokasi Kelurahan	Luas (Ha)
I		Bedahan	170,03
		Cinangka	103,31
		Kedaung	53,70
		Pasir Putih	297,36
		Pengasinan	97,72
		Sawangan Baru	35,11
		Sawangan Lama	77,66
Total			834,88
II	i, e	Bedahan	397,75
		Cinangka	192,53
		Kedaung	114,84
		Pasir Putih	161,84
		Pengasinan	290,22
		Sawangan Baru	186,03
Sawangan Lama	292,04		
Total			1.635,27
IV	i, e	Cinangka	45,10
		Kedaung	41,71
		Sawangan Lama	9,75
Total			96,56

Sumber: Hasil pengolahan data.

Persentase dari total luas keseluruhan pada sub kelas kemampuan lahan ini sebesar 30,25%. Sedangkan penggunaan lahan yang tidak dinilai (TD) yakni penggunaan lahan tubuh air dan jalan sebesar 58,34 ha (2,27%). Pada kelas kemampuan lahan II dengan sub kelas erosi (e) dan kelerengan (i), penggunaan lahan yang selaras terdiri dari 10 jenis penggunaan lahan. Penggunaan lahan tersebut terdiri dari gedung/bangunan, kebun, ladang/tegalan, lahan terbuka semak belukar, pemukiman, sarana/prasarana, sawah, TPU,

taman, dan tambak dengan luasan sebesar 1.515,25 ha (58,87%). Keselarasan pada kemampuan lahan ini merupakan luasan tertinggi dibandingkan kelas kemampuan lahan lainnya. Sedangkan penggunaan lahan yang tidak dinilai (TD) yakni penggunaan lahan tubuh air dan jalan sebesar 120,02 ha.

Tabel 3. Hubungan antara kemampuan lahan dengan penggunaan lahan SPK Sawangan

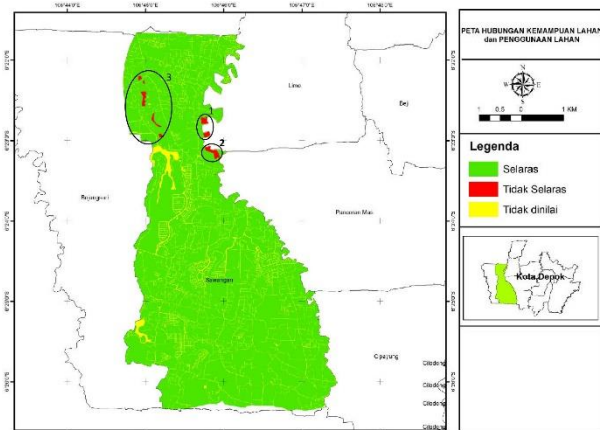
Kemampuan Lahan	Ketidak-selarasan	Lokasi Kelurahan	Luas (Ha)		
I	Selaras (30,25%)	Bedahan	159,16		
		Cinangka	94,99		
		Kedaung	49,74		
		Pasir Putih	283,27		
		Pengasinan	87,29		
		Sawangan Baru	33,37		
		Sawangan Lama	68,73		
		Total			776,54
		Tidak Dinilai (2,27%)		Bedahan	10,87
				Cinangka	8,32
Kedaung	3,96				
Pasir Putih	14,09				
Pengasinan	10,43				
Sawangan Baru	1,74				
Sawangan Lama	8,93				
Total			58,34		
IIi, IIe	Selaras (59,03%)	Bedahan	374,66		
		Cinangka	181,60		
		Kedaung	107,74		
		Pasir Putih	152,39		
		Pengasinan	269,22		
		Sawangan Baru	173,13		
		Sawangan Lama	256,50		
		Total			1.515,25
		Tidak Dinilai (4,68%)		Bedahan	23,09
				Cinangka	10,93
Kedaung	7,10				
Pasir Putih	9,46				
Pengasinan	21,00				
Sawangan Baru	12,91				
Sawangan Lama	35,55				
Total			120,02		
IVi, IVe	Selaras (3,04%)	Cinangka	37,66		
		Kedaung	34,70		
		Sawangan Lama	5,56		
		Total			77,92
		Tidak Dinilai (0,22%)		Cinangka	4,02
Kedaung	1,39				
Sawangan Lama	0,30				
Total			5,72		
Tidak Selaras (0,50%)		Cinangka	3,41		
		Kedaung	5,62		
		Sawangan Lama	3,89		
Total			12,92		

Sumber: Hasil pengolahan data.

Pada kelas kemampuan lahan IV dengan sub kelas erosi (e) dan kelerengan (i), penggunaan lahan yang selaras terdiri dari 9 jenis penggunaan lahan yakni, gedung/bangunan, kebun, ladang/tegalan, lahan terbuka semak belukar, pemukiman, sarana/prasarana, TPU, taman, dan tambak dengan luasan sebesar 78,22 ha (3,03%). Keselarasan penggunaan lahan tersebut memiliki luasan terendah dibandingkan kelas kemampuan

lahan lainnya. Penggunaan lahan yang tidak dinilai yakni pada penggunaan lahan tubuh air dan jalan memiliki luasan sebesar 5.72 ha atau selaras dengan 0.22%. Pada kemampuan lahan ini, terdapat penggunaan lahan yang tidak selaras dengan kemampuan lahannya dengan luasan sebesar 12.92 ha (0,50%).

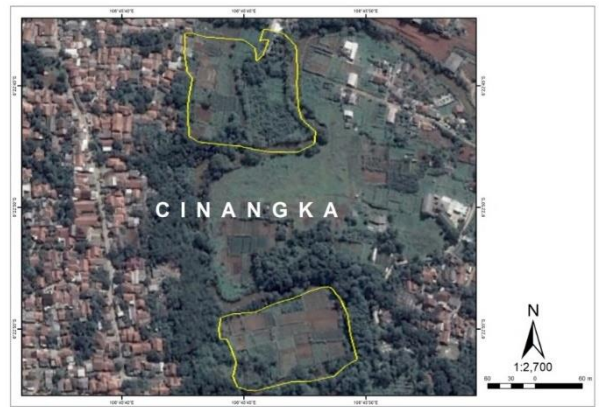
Berdasarkan **Gambar 2**, pada daerah-1 merupakan wilayah yang tidak selaras antara penggunaan dan kemampuan lahannya yang terdapat di Kelurahan Cinangka. Pada daerah-2 lokasi tidak selaras terdapat di Kelurahan Sawangan Lama. Sedangkan pada daerah-3, lokasi ketidakselarasan tersebut berada di Kelurahan Kedaung. Pada ketiga daerah tersebut termasuk ke dalam kelas kemampuan lahan IV dengan sub kelas erosi (e) dan lereng (i).



Gambar 2. Daerah yang termasuk tidak selaras SPK Sawangan

Cinangka (Lihat **Gambar 3**). Penggunaan lahan aktual setelah dilakukan verifikasi via Google Earth, daerah tersebut termasuk kedalam penggunaan lahan tegalan/ladang. Berdasarkan klasifikasi pada kelas kemampuan lahan IV dengan sub kelas kelereng (i) dan erosi (e), penggunaan lahan tersebut diperkenankan sebagai lahan semua jenis penggembalaan, hutan produksi terbatas, dan pertanian terbatas. Hal tersebut menunjukkan bahwa pada lahan tersebut masih dapat digunakan sebagai lahan pertanian terbatas namun tidak dapat dilakukan pertanian secara intensif karena adanya faktor pembatas.

Kendala mempertahankan keberlanjutan lahan pertanian di perkotaan juga ditemukan dalam oleh Sadesmesli et al. (2017), dimana penggunaan lahan actual terluas adalah permukiman disusul sawah, hutan, dan kebun campur dan tegalan. Adapun kemampuan lahannya terdiri atas enam kelas yaitu kelas II, III, IV, VI, VII dan kelas VIII yang dapat dibedakan menjadi 15 subkelas. Wilayah yang mampu mendukung aktivitas budidaya pertanian (kelas kemampuan II-IV) hanya 39.0%, sedangkan wilayah yang sebaiknya tidak digunakan untuk aktivitas budidaya pertanian (kelas VI-VIII) 61.0%.



Gambar 3. Peta lahan aktual Kelurahan Cinangka



Gambar 4. Peta lahan aktual Kelurahan Sawangan Lama



Gambar 5 Peta lahan aktual Kelurahan Kedaung

Pada daerah-2, penggunaan lahan aktual yang tidak selaras antara kemampuan dan penggunaan lahannya terletak pada kelurahan Sawangan Lama (Lihat **Gambar 4**). Penggunaan lahan aktual yang dilakukan verifikasi Google Earth, pada lahan tersebut digunakan sebagai lahan kebun campuran dan tegalan. Sedangkan klasifikasi kemampuan lahan termasuk kedalam kelas IV dengan sub kelas kelereng (i) dan erosi (e). Berdasarkan klasifikasi tersebut, penggunaan lahan tersebut diperkenankan sebagai penggembalaan, hutan produksi terbatas, dan pertanian terbatas. Sehingga jika penggunaan lahan tersebut tetap dilakukan maka disarankan untuk memperhatikan pengelolannya.

Berdasarkan **Gambar 5**, menunjukkan daerah-3 dengan ketidakselarasan antara kemampuan dan penggunaan lahan di SPK Sawangan khususnya terletak di Kelurahan Kedaung. Setelah dilakukan verifikasi via Google Earth, penggunaan lahan aktual tersebut adalah sawah. Sehingga jika kondisi aktual tersebut tetap dilakukan maka disarankan agar pertanian sawah tersebut dikurangi penggunaannya. Dikarenakan pada lahan tersebut masih dapat digunakan sebagai lahan pertanian terbatas namun tidak dapat dilakukan pertanian secara intensif karena adanya faktor pembatas. Jika pada lahan sawah tersebut menggunakan indeks pertanaman (IP) 300 maka lebih baik diturunkan menjadi IP 200, karena kandungan bahan organik akan semakin berkurang oleh kegiatan pengolahan tanah yang intensif. Penelitian (Purba et al., 2018) menyebutkan bahwa lahan sawah IP 300 memiliki kandungan C-Organik yang lebih rendah di dibandingkan dengan lahan sawah IP 200. Bahkan, penanaman intensif secara terus menerus pada lahan yang memiliki faktor pembatas utama erosi dan kelerengan akan menimbulkan resiko negati hingga bencana yang tidak diinginkan. Resiko lain dari penanaman intensif juga dapat memengaruhi keseimbangan kimia dalam pengambilan hara tanah sehingga dapat mempengaruhi pertumbuhan akar tanaman (Sukwika & Firmansyah, 2020). Untuk memperbaiki sifat tanah maupun meningkatkan produksi maka lebih baik pertanian dilakukan secara terbatas. Jika erosi yang terjadi sudah semakin parah, disarankan untuk dilakukan pembuatan terasering pada penggunaan lahan sawah (Firmansyah & Sukwika, 2020).

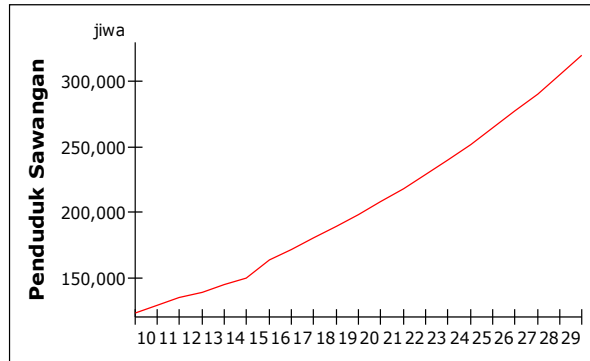
Analisis Sistem Dinamis

Penduduk dan PDRB

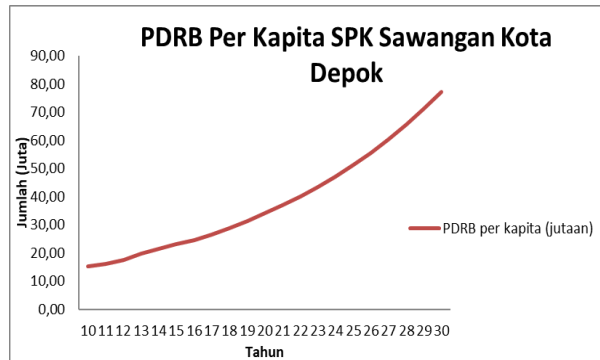
Penentuan proyeksi penduduk dimasa yang akan datang berguna untuk membantu proses pelaksanaan pembangunan di Kota Depok. Dalam proses pembangunan nantinya dibutuhkan peran serta penduduk sebagai angkatan kerja yang memiliki kualitas sumberdaya manusia yang baik. Hasil simulasi pada tahun 2030, penduduk Kota Depok diperkirakan melampaui lebih dari 320.376 jiwa (Lihat **Gambar 6**), Pertumbuhan penduduk yang cenderung cepat menurut Sukwika (2018a) berpengaruh terhadap kebutuhan peningkatan angkatan kerja di sebuah wilayah. Sedangkan pada sisi ekonomi lainnya, jumlah penduduk bila dikaitkan dengan pertumbuhan *income* perkapita suatu daerah, secara kasar dapat mencerminkan kemajuan perekonomian daerah tersebut. Bahkan, jumlah penduduk besar yang dimanfaatkan secara tepat bisa menguntungkan pembangunan ekonomi. Sanusi (2004) menyatakan bahwa pertumbuhan penduduk akan berpengaruh cukup besar, terutama dalam hal pendapatan per kapita, standar kehidupan, pembangunan pertanian, lapangan kerja, tenaga buruh, maupun dalam hal

pembentukan modal (Primadona, 2015; Sukwika, 2018a).

Pembangunan ekonomi Kota Depok ditujukan untuk mencapai target pendapatan per kapita. Di lain sisi, Kota Depok menghadapi kendala alokasi sumberdaya yang dimiliki seperti sumberdaya alam, sumberdaya manusia (tenaga kerja) dan sumber daya modal (modal). Berdasarkan hasil simulasi nilai pendapatan per kapita di SPK Sawangan Kota Depok pada tahun 2010 sebesar 15.15 juta mengalami peningkatan sebesar 77.27 juta secara fluktuatif seiringan dengan perekonomian kota hingga tahun 2030. Hasil simulasi menunjukkan terjadi tren peningkatan PDRB per kapita SPK Sawangan Kota Depok setiap tahunnya. Kondisi nilai PDRB dan pendapatan per kapita yang meningkat berpotensi meningkatkan pembangunan ekonomi wilayah tersebut. Gambaran simulasi PDRB per kapita SPK Sawangan Kota Depok disajikan pada **Gambar 7**.



Gambar 6. Penduduk SPK Sawangan Kota Depok

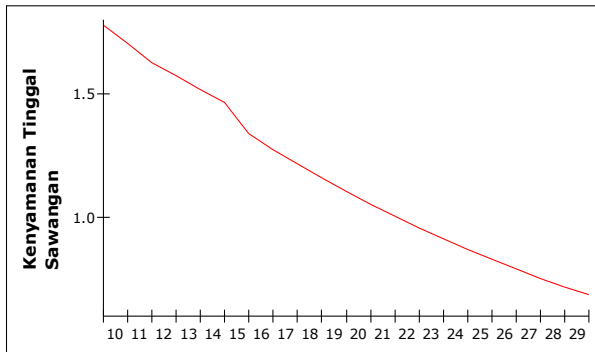


Gambar 7. PDRB per kapita SPK Sawangan

Kebutuhan Pemukiman, Kenyamanan, dan Timbulan Sampah

Perkembangan penduduk dan kebutuhan perumahan permukiman merupakan bagian terintegral yang bersifat dinamis. Tingkat kenyamanan tinggal pada sebuah wilayah dengan kepadatan penduduk yang tinggi tentunya berbeda dengan kepadatan penduduk yang rendah. Pertambahan penduduk di wilayah dengan kepadatan penduduk yang rendah dan ketersediaan lahan yang mencukupi tidak sertamerta berimplikasi kepada permintaan penambahan kawasan permukiman. Kajian Arjulita (2014) menunjukkan bahwa variabel pertumbuhan

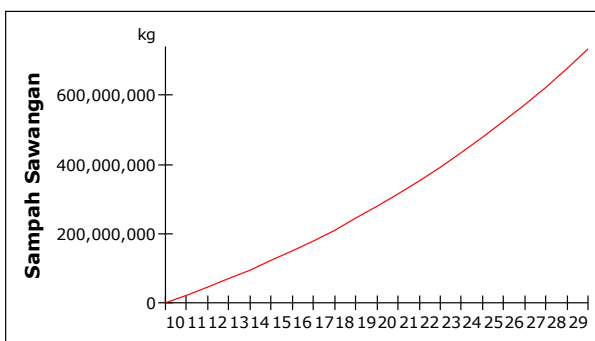
penduduk memiliki hubungan negatif dan tidak signifikan terhadap permintaan perumahan. Sedangkan Tiandi (2011) menyatakan bahwa peningkatan pertumbuhan penduduk di suatu kota dengan kepadatan penduduk yang tinggi berdampak terhadap kebutuhan ruang, salah satunya untuk permukiman. Peningkatan pertumbuhan penduduk Kota Depok yang terus bertambah telah mengubah pergeseran pertumbuhan penduduk yang awalnya terjadi di pusat kota bergeser ke pinggiran kota. Pergeseran ini akhirnya berdampak pada penambahan laju permukiman.



Gambar 8. Kenyamanan tinggal di SPK Sawangan



Gambar 9. Perbandingan kebutuhan permukiman terhadap luas



Gambar 10. Timbulan sampah SPK Sawangan

Keterbatasan luas lahan untuk pembangunan permukiman berpengaruh pada kenyamanan tinggal dari penduduk. Berdasarkan standar kenyamanan terhadap kebutuhan ruang tinggal menurut KepmenKimpraswil (2002) untuk rumah tinggal yaitu satu seorang dengan luas 9 m²/orang dengan perhitungan rata-rata ketinggian langit-langit adalah 2.80 m belum termasuk fasilitas umum dan fasilitas sosial. Hasil simulasi kenyamanan rumah

tinggal di SPK Sawangan menunjukkan tren yang terus menurun melewati 9 m²/orang standar kenyamanan terhadap kebutuhan ruang tinggal seseorang (Lihat **Gambar 8**). Kenyamanan tinggal berdasarkan luas lahan pemukiman yang ada dibandingkan dengan kebutuhan terhadap permukiman dapat dihitung berdasarkan dari jumlah penduduk di SPK Sawangan. Pada **Gambar 9** terlihat hubungan grafik yang tidak berbanding lurus, dimana garis kebutuhan permukiman di SPK Sawangan menunjukkan tren yang terus meningkat atau lebih dinamis, sedangkan luas permukiman di SPK Sawangan menunjukkan garis yang statis atau tidak mengalami perubahan luasan untuk permukiman.

Pertumbuhan pertumbuhan penduduk berpengaruh juga terhadap timbulan sampah yang dihasilkan di SPK Sawangan. Hal ini dapat mengurangi kualitas lingkungan di Kecamatan Sawangan. Penelitian Prajati et al. (2015) menemukan pengaruh jumlah penduduk, PDRB, kepadatan penduduk dan pertumbuhan ekonomi terhadap timbulan sampah (Noviana & Sukwika, 2020; Sukwika & Noviana, 2020).

Berdasarkan hasil simulasi, timbulan sampah yang dihasilkan dari tahun ke tahun mengalami peningkatan secara fluktuatif. Tahun 2010 timbulan sampah sebanyak 21.512.470 kg/tahun dan mengalami peningkatan pada tahun 2030 sebesar 754.795.551 kg/tahun. Dalam jangka panjang, proyeksi timbulan sampah terus meningkat mengikuti laju pertumbuhan penduduk. Simulasi timbulan sampah disajikan pada **Gambar 10**.

KESIMPULAN

Kemampuan lahan di SPK Sawangan terbagi menjadi tiga sub kelas yaitu KL I, II, dan IV dengan faktor pembatas masing-masing yaitu erosi (e), dan kelerengan (i) untuk kelas II dan IV. Persentase luasan masing-masing kelas adalah 63,8% (KL II), 32,48% (KL I) dan 3,72% (KL IV). Pada beberapa tempat, ada daerah yang tidak sesuai dengan daya dukung lingkungan. Hal tersebut ditunjukkan dari penggunaan lahan aktual yang tidak selaras dengan kemampuan lahan yang telah diklasifikasi sebelumnya. Ketidakselarasan tersebut masih termasuk kedalam klasifikasi sub kelas IV dengan faktor pembatas kelerengan (i) dan erosi (e). Pada klasifikasi lahan kelas IV masih termasuk kedalam areal yang dapat dipergunakan sebagai pertanian hanya saja harus lebih memperhatikan faktor pembatas. Sehingga pada beberapa daerah tersebut, penggunaan lahan aktual masih dapat dilakukan. Kelas kemampuan lahan IV-e, I direkomendasikan sebagai lahan pertanian.

Selanjutnya hasil proyeksi 20 tahun hingga 2030 menunjukkan bahwa Kota Depok akan mengalami peningkatan penduduk sebesar 52% dan kenaikan PDRB sebesar 80,39%, sedangkan kenyamanan tinggal mengalami tren yang menurun melewati 9 m²/orang. Tren kebutuhan permukiman

terus meningkat, begitu juga terjadi peningkatan timbulan sampah seiring pertambahan jumlah penduduk. Direkomendasikan agar arah kebijakan pemanfaatan pola ruang lebih diperhatikan pada daya dukung lahan non permukiman.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan banyak terima kasih atas segala bantuan dan dukungannya kepada pemerintah Kota Depok, Jawa Barat, program studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Universitas Sahid Jakarta, dan Tim Triwala serta seluruh staf redaksi Jurnal Majalah Ilmiah Globè.

DAFTAR PUSTAKA

- Arjulita, M. (2014). Pengaruh pertumbuhan penduduk terhadap permintaan rumah di kota Pekanbaru. *JOM FEKON*, 1(2), 1-19.
- Arsyad, S. (2010). *Konservasi tanah dan air* (Kedua ed.). Bogor: Institut Pertanian Bogor Press.
- BPS-Depok. (2018). *Kota Depok dalam angka 2018*. Depok: Badan Pusat Statistik.
- Firmansyah, I., & Sukwika, T. (2020). Penilaian kondisi degradasi tanah di SPK Sawangan kota Depok. *Jurnal Tanah dan Sumberdaya Lahan*, 7(1), 45-57. doi:10.21776/ub.jtsl.2020.007.1.7
- Gad, A. A. (2015). Land capability classification of some western desert oases, Egypt, using remote sensing and GIS. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 18, 9-18. doi:10.1016/j.ejrs.2015.06.002
- Hidajat, J. T. (2014). *Model pengelolaan kawasan permukiman berkelanjutan di pinggiran kota metropolitan Jabodetabek*. (Disertasi), Institut Pertanian Bogor, Bogor. Retrieved from <http://repository.ipb.ac.id/handle/123456789/69710>
- KepmenKimpraswil. Keputusan Menteri Perumahan dan Prasarana Wilayah No. 403/KPTS/M/2002 tentang Pedoman teknis pembangunan rumah sederhana sehat (Rs sehat), (2002).
- Noviana, L., & Sukwika, T. (2020). Pemanfaatan sampah organik sebagai pupuk kompos ramah lingkungan di kelurahan Bhaktijaya Depok. *Pengabdian Untukmu Negeri*, 4(2), 237-241. doi:10.37859/jpumri.v4i2.2155
- PermenLH. Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor Pedoman No. 17 tentang Penentuan daya dukung lingkungan hidup dan penataan ruang wilayah, (2009).
- Prajati, G., Padmi, T., & Rahardyan, B. (2015). Pengaruh faktor-faktor ekonomi dan kependudukan terhadap timbulan sampah di ibu kota provinsi Jawa dan Sumatera. *Jurnal Teknik Lingkungan*, 21(1), 39-47.
- Primadona. (2015). Pengaruh pertumbuhan penduduk terhadap PDRB dan angkatan kerja di kota Payakumbuh. *Polibisnis*, 7(1), 47-62.
- Purba, F. R. A., Razali, R., & Hidayat, B. (2018). Pemetaan status hara lahan sawah IP-200 dan IP-300 di desa Baru kecamatan Batang Kuis kabupaten Deli Serdang. *Jurnal Agroekoteknologi*, 6(3), 547-557.
- Ramlan, N., & Rudiarto, I. (2015). Pengendalian urban sprawl di wilayah pinggiran (Studi kasus: Perkembangan kota di Indonesia dan Perancis). *Jurnal Pembangunan Wilayah dan Kota*, 11(4), 444-454. doi:10.14710/pwk.v11i4.11596
- Rustiadi, E., Saefulhakim, S., & Panuju, D. R. (2003). *Analisis kecenderungan dan dampak proses suburbanisasi di wilayah Jabodetabek: Suatu upaya pengembangan model pembangunan wilayah metropolitan*. Laporan Akhir Penelitian Hibah Bersaing Perguruan Tinggi. Dirjen Dikti.
- Sabaruddin, A. (2012). *Arsitektur perumahan di perkotaan*. Panyaungan Cileunyi Wetan Kabupaten Bandung: Puskim.
- Sadesmesli, I., Baskoro, D. P. T., & Pravitasari, A. E. (2017). *Arahan pemanfaatan ruang berbasis daya dukung lahan di Kabupaten Blitar, Jawa Timur*. (Tesis), Institut Pertanian Bogor, Bogor. Retrieved from <https://repository.ipb.ac.id/handle/123456789/88212>
- Sanusi, B. (2004). *Pengantar ekonomi pembangunan*. Jakarta: Rineka Cipta.
- Sukwika, T. (2018a). Kinerja pasar tenaga kerja pra dan pasca otonomi daerah dan implikasinya pada sektor pertanian di kabupaten Bogor. *Book Chapter*, p.239-249.
- Sukwika, T. (2018b). Peran pembangunan infrastruktur terhadap ketimpangan ekonomi antarwilayah di Indonesia. *Jurnal Wilayah dan Lingkungan*, 6(2), 115-130. doi:10.14710/jwl.6.2.115-130
- Sukwika, T., & Firmansyah, I. (2020). Pemetaan dan strategi kebijakan: Dampak kerusakan tanah untuk produksi biomasa di Kota Depok. *Jurnal Pendidikan Geografi*, 25(2), 114-127. doi:10.17977/um017v25i22020p114
- Sukwika, T., & Noviana, L. (2020). Status keberlanjutan pengelolaan sampah terpadu di TPST-Bantargebang, Bekasi: Menggunakan rapfish dengan R statistik. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 18(1), 107-118. doi:10.14710/jil.18.1.107-118
- Tiandi, A. (2011). *Pertumbuhan penduduk dan pola permukiman di kota Cilegon Tahun 1997-2009*. (Skripsi), Universitas Indonesia, Jakarta. Retrieved from <http://lib.ui.ac.id/file?file=digital/20280371-S615-Pertumbuhan%20penduduk.pdf>
- UUTR. Undang-Undang No. 26 tentang Penataan ruang, (2007).

PEMETAAN ZONA KERENTANAN AIR TANAH DI PULAU BAKALAN, KABUPATEN BANGGAI KEPULAUAN, INDONESIA

(Mapping of Groundwater Vulnerability Zones in Bakalan Island, Banggai Kepulauan,
Indonesia)

Erik Febriarta¹, Ahmad Cahyadi², dan Septian Vienastra³

¹Magister Pengelolaan Pesisir dan Daerah Aliran Sungai, Fakultas Geografi, Universitas Gadjah Mada

²Departemen Geografi Lingkungan, Fakultas Geografi, Universitas Gadjah Mada

³Teknik Geologi, Fakultas Teknologi Mineral, Institut Sains dan Teknologi AKPRIND Yogyakarta

Jl. Kaliurang Sekip Utara, Bulaksumur, Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta

E-mail: e.febriarta@gmail.com

Diterima: 22 Februari 2021; Direvisi: 5 April 2021; Disetujui untuk Dipublikasikan: 19 April 2021

ABSTRAK

Ketersediaan sumber daya airtanah di kepulauan sangat tergantung oleh faktor meteorologi (curah hujan) sebagai sumber air dan faktor geologi yaitu formasi penyusun batuan tempat cadangan airtanah tersimpan (akuifer). Pulau Bakalan berada di Kepulauan Banggai, yang secara kondisi geologi regional berada di Formasi Batugamping koral kuartar (QI). Karakteristik airtanah di daerah batugamping sangat dinamis, terbatas, dipengaruhi oleh perkembangan dari aliran celah dan pelarutan. Sehingga dapat dikategorikan daerah airtanah langka, dan bersifat setempat atau lokal. Keterbatasan airtanah juga dipengaruhi oleh aktifitas penggunaannya. Semakin besar penggunaan dan semakin intensif pemakaian airtanah, maka dapat mengakibatkan penurunan kuantitas dan penurunan kualitas airtanah. Penurunan kualitas airtanah dapat menimbulkan permasalahan kesehatan. Penurunan kualitas air dapat disebabkan tercemarnya sistem akuifer oleh sumber pencemar melalui pori-pori batuan pada formasi batugamping yang mudah terlarut. Untuk mengetahui distribusi kerentanan airtanah, maka tujuan dari penelitian ini adalah menentukan sebaran zona kerentanan airtanah pada batugamping terumbu. Untuk mencapai tujuan tersebut dilakukan analisis spasial multi-kriteria dengan pendekatan DRASTIC. Pendekatan DRASTIC dapat memberikan informasi zona kerentanan berdasarkan sifat hidrogeologi pada batugamping. Analisis pemberian indeks pembobotan parameter dengan nilai tinggi, menggambarkan informasi faktor yang dominan atau yang paling mempengaruhi zona kerentanan airtanah. Hasil skor perhitungan setiap parameter diperoleh dari perkalian linier. Indeks kerentanan air tersebut dikelaskan ke dalam lima tingkat kerentanan dengan pendekatan equal interval. Hasil analisis menunjukkan kerentanan sangat rendah seluas 0,003%, kerentanan rendah seluas 18,79%, kerentanan sedang seluas 18,48%, kerentanan tinggi seluas 13,53% dan kerentanan sangat tinggi seluas 49,16% dari luas pulau 40,7 km².

Kata kunci: airtanah, Banggai kepulauan, batugamping koral, DRASTIC, kerentanan

ABSTRACT

Groundwater availability in a group of islands is highly dependent on meteorological factors (rainfall) as water sources and geological factors (rock formations where groundwater reserves are stored, termed aquifers). Bakalan Island, part of the Banggai Kepulauan, geologically lies on the Quaternary coral limestone formation (QI). Groundwater in limestone areas is very dynamic, limited in quantity, and susceptible to fissure flow development and dissolution. For these reasons, the island is categorized as an area with scarce and local groundwater. The prevailing activities are also influenced because more extensive and intensive use of groundwater can decrease its quantity and quality. Groundwater quality decline is attributable to an aquifer system polluted by contaminants that flow through rock pores in highly dissoluble limestone formation and, thus, can cause health problems. This research set out to determine the distribution of groundwater vulnerability zones in coral limestones using a multi-criteria spatial analysis with the DRASTIC approach. The DRASTIC approach produces information on vulnerability zones based on the hydrogeological properties of limestone. A parameter with a high weight index reflects a dominant or the most influencing factor in these zones and its score was obtained from linear multiplication. The groundwater vulnerability index values were differentiated into five levels using the equal interval approach. The results showed that the island area, 40.7 km², was 0.003% very low vulnerability, 18.79% low vulnerability, 18.48% medium vulnerability, 13.53% high vulnerability, and 49.16% very high vulnerability.

Keywords: Banggai kepulauan, coral limestone, DRASTIC, groundwater, vulnerability

PENDAHULUAN

Sumber daya air di pulau-pulau kecil relatif terbatas, hal tersebut dipengaruhi oleh siklus hidrologi yang pendek dan daerah tangkapan air yang relatif kecil, kemudian mengalir menuju kembali ke laut. Faktor meteorologis atau kondisi intensitas dan curah hujan mempengaruhi imbuhan air yang masuk kedalam tanah menjadi cadangan airtanah (Febriarta et al., 2018). Faktor geologis dipengaruhi oleh kondisi penyusun batuan dari sifat keterdapatan airtanah, yaitu sifat batuan dalam menahan (menyimpan) dan meloloskan airtanah (akuifer) (Singhal & Gupta, 2010; Todd & Mays, 2005). Kemampuan air dalam menyimpan air sebagai cadangan airtanah dapat diketahui dengan nilai potensi porositas efektif (*specific yield*). Nilai *specific yield* (sy) atau porositas efektif, merupakan perbandingan dalam persen (%) air yang dapat diambil dari tanah atau batuan yang jenuh air dibandingkan dengan volume total batuan atau tanah (Todd & Mays, 2005). Semakin besar nilai porositas efektif (sy) maka semakin besar volume cadangan air yang dapat tersimpan dan dapat diloloskan oleh formasi batuan, dan sebaliknya bila semakin kecil, maka nilai porositas efektif (sy) maka akan memiliki nilai rendah hingga langka (Singhal & Gupta, 2010).

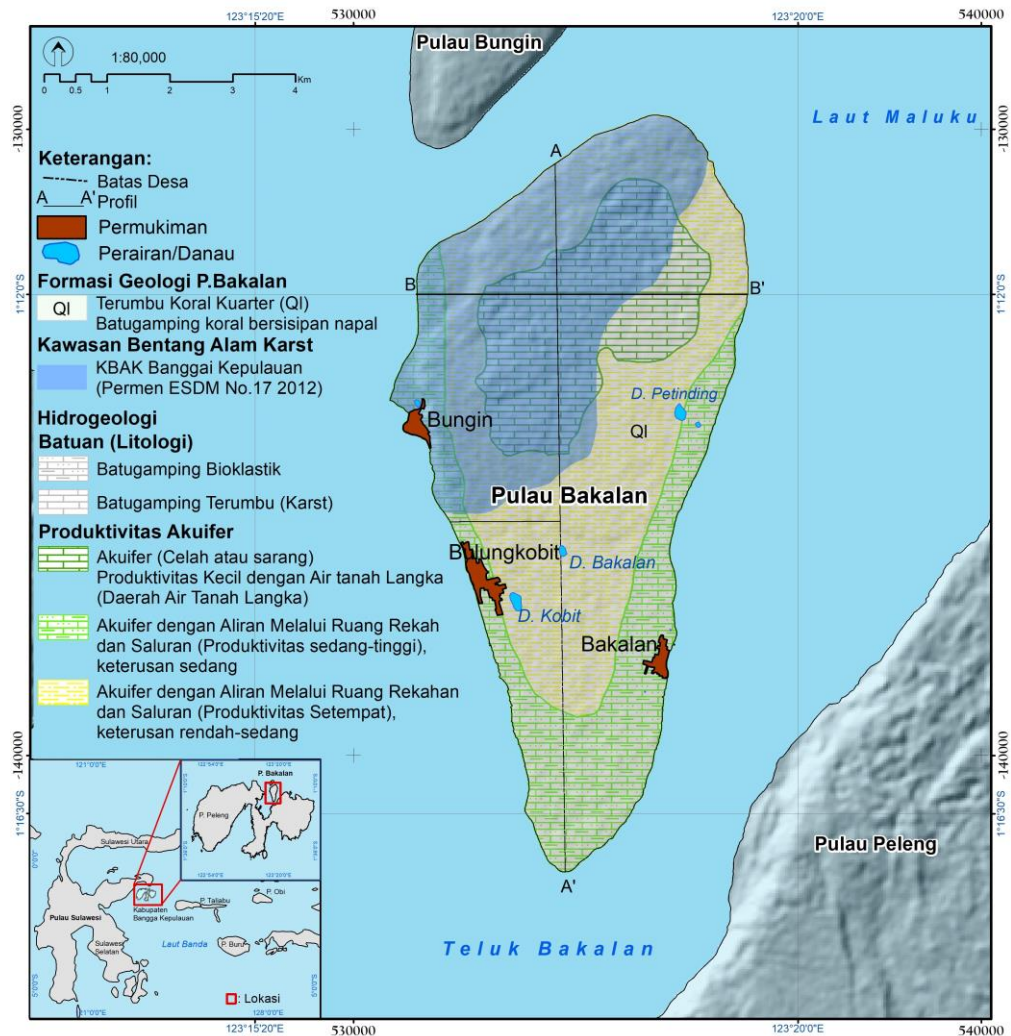
Karakteristik airtanah dengan parameter porositas efektif (sy) tinggi memiliki korelasi dengan kondisi keterusan airtanah dan potensi debit air yang tinggi juga (Febriarta & Larasati, 2020). Potensi airtanah pada kawasan batugamping memiliki sifat keterusan yang kecil hingga sedang, dengan material penyusun batuan berupa celah atau rekah, dengan sifat keterusan (meloloskan airtanah) dengan potensi sedang hingga tinggi bila sudah berkembang dan berada pada media aliran berupa saluran maupun pelarutan hingga terbentuknya saluran-saluran (sungai bawah tanah) (Singhal & Gupta, 2010). Pada perkembangan tersebut sangat dipengaruhi oleh daerah imbuhan airtanah yang luas dan sumber air (curah hujan) dengan intensitas kondisi curah hujan yang tinggi (Febriarta & Oktama, 2020; Purnama et al., 2019).

Geologi Regional

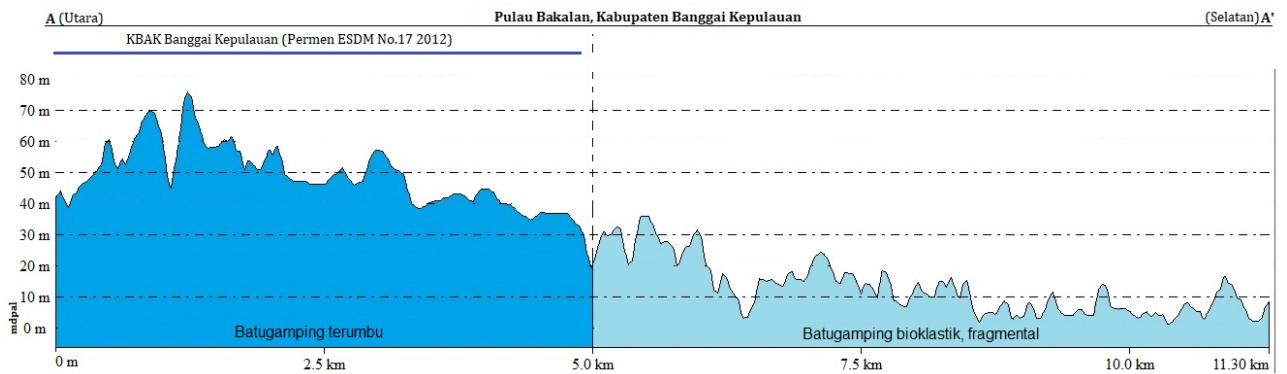
Secara geologi regional Pulau Bakalan berada pada Formasi Terumbu Karang Kuartar (Q1). Penyusun batuan formasi tersebut antara lain batugamping terumbu dan batugamping karang bersisipan napal (KESDM, 2012). Secara stratigrafi pengendapan umur batuan tersebut Holosen. Kenampakan morfologi perbukitan batugamping dengan litologi batugamping terumbu pada bagian utara dari Pulau Bakalan secara karakteristik keterdapatan airtanah tidak terdistribusi merata. Dilihat dari stratigrafi

pengendapan, di daerah tersebut merupakan bagian dari endapan permukaan dengan potensi pelapukan yang tinggi. Batuan penyusun pada bagian selatan dengan morfologi dataran tersusun atas batugamping bioklastik dan rombakan batugamping karang (**Gambar 2**). Morfolgi pada bagian barat terdapat perbukitan karst dengan penyusun batuan batugamping terumbu perselingan napal dan batugamping karang fragmental hingga tengah pulau, sedangkan bagian timur pulau memiliki morfologi datar, dengan kemiringan lereng landau hingga datar, dengan penyusun batuan batugamping karang (**Gambar 3**). Batugamping bioklastik terbentuk pada lingkungan pengendapan lingkungan laut yang dangkal dan dekat dengan pantai dengan partikel yang terombak oleh proses abrasi. Endapan tersebut dapat terbentuk dari akibat gelombang yang terabrasi, sedangkan perkembangan terumbu merupakan hasil dari pelongsoran karang. (BouDagher-Fadel & Marcelle, 2013). Batugamping bioklastik (karang bioklastik, fragmental) yang terdapat pada bagian selatan pulau (**Gambar 1**), tersusun atas material fargmen (material rombakan) kerangka organisme dengan sifat lepas-lepas akibat proses tertransportasi. Material lepas-lepas memiliki media lubang antar butir yang dengan persentase tinggi sehingga memiliki nilai percepatan aliran airtanah yang cepat (Todd & Mays, 2005; Wicaksono et al., 2020). Karakteristik penyusun material tersebut memiliki nilai percepatan pengaliran yang tinggi dan dapat mempercepat pencemaran terhadap sumber pencemar (polutan) ke dalam sistem akuifer (Aller et al., 1987a; Gunawan et al, 2012).

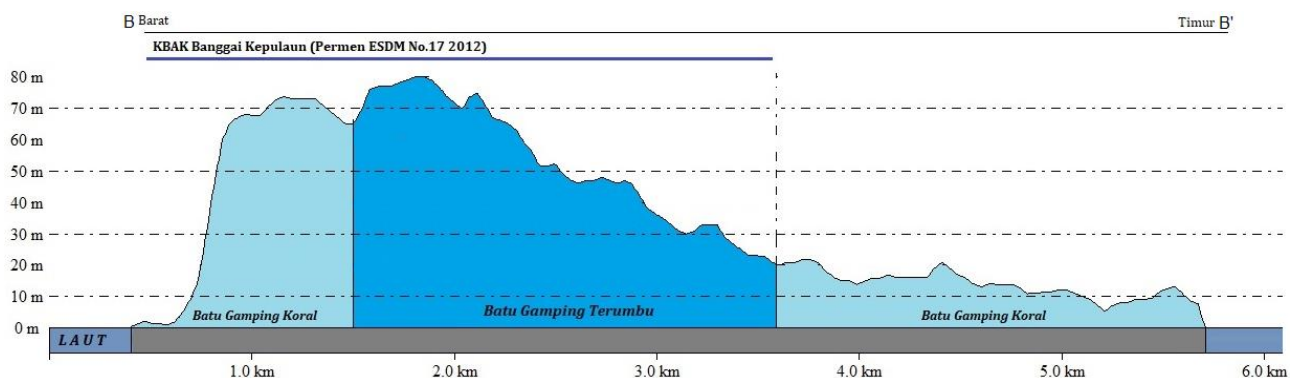
Berdasarkan peta Kawasan Bentang Alam Karst (KBAK), Pulau Bakalan mempunyai kawasan karst seluas 42,85% (**Gambar 1**, **Gambar 2**, dan **Gambar 3**) dari luas wilayah Pulau Bakalan (40,7 km²) yang merupakan bagian dari KBAK Banggai Kepulauan (RI, 2010). Definisi kawasan karst menurut Permen ESDM nomor 17 (2012), adalah bentang alam yang terbentuk akibat pelarutan air pada batugamping dan/atau dolomit dengan perkembangan ciri-ciri eksokarst dan endokarst tertentu (RI, 2010; Singhal & Gupta, 2010). Kawasan karst tersebut berada di bagian utara dengan ketinggian tempat 0-78 mdpal (**Gambar 2** dan **Gambar 3**). Keterdapatan airtanah pada formasi batugamping sangat dinamis yang sangat dipengaruhi oleh pelarutan batuan, dampak dari sifat dinamis tersebut antara lain; sifat aliran air tanah bersifat lokal, keterdapatan airtanah dapat berpindah diakibatkan oleh pelarutan batuan yang berada jauh semakin kedalam permukaan, hingga potensi pencemaran yang relatif tinggi karena langsung terhubung dengan cadangan sumber air (Febriarta et al, 2020; Fetter, 2014; Kalhor et al., 2019).



Gambar 1. Geologi regional batugamping terumbu dan kondisi hidrogeologi Pulau Bakalan.



Gambar 2. Topografi utara-selatan dengan morfologi bergelombang.



Gambar 3. Topografi barat-timur dengan morfologi bergelombang melandai di bagian timur.

Hidrogeologi Regional

Pulau Bakalan merupakan bagian dari gugusan kepulauan di kabupaten Banggai Kepulauan, Provinsi Sulawesi Tengah. Secara pembentukannya Pulau Bakalan terbentuk oleh proses tektonogenesis pengangkatan yang dicirikan dengan struktur utama yaitu sesar dan lipatan (KESDM, 2015b; Suroño & Sukido, 1993). Sehingga potensi airtanah sangat dikontrol oleh sifat batuan dan morfologi lereng, dengan potensi keterdapatan sumber daya air sedang (terbatas) pada pegunungan karst batugamping terumbu (BPLH, 2014). Karakteristik hidrogeologi pada stratigrafi kuartar dengan penyusun batuan Formasi Batugamping Terumbu (QI) berupa akuifer dengan aliran celah, lubang hasil pelarutan bukan termasuk akuifer dan tidak termasuk dalam kawasan Cekungan Airtanah (CAT) (BPLH, 2013, 2014; KESDM, 2018).

Berdasarkan sifat hidrogeologi maka, Pulau Bakalan dapat dikategorikan mempunyai sumber daya air yang sangat terbatas hingga langka (tidak terdapat airtanah). Berdasarkan kondisi hidrogeologi terdapat tiga potensi akuifer yaitu, zona dengan produktivitas sedang, dengan akuifer media ruang rekah atau saluran dengan keterusan sedang, penyusun batuan berupa batugamping terumbu (Febriarta et al, 2020; KESDM, 2015b). Zona produktivitas rendah hingga sedang pada akuifer dengan media aliran melalui ruang, rekahan dan saluran, zona tersebut berada di bagian tengah, dan sebagian berada di kawasan Karst Banggai Kepulauan. Zona produktivitas kecil dengan airtanah langka pada penyusun batuan batugamping koral, zona tersebut berada di bagian utara Pulau Bakalan dan masuk kawasan karst, yaitu Karst Banggai Kepulauan. Distribusi kondisi hidrogeologi di Pulau Bakalan disajikan pada **Gambar 1**.

Kerentanan Airtanah

Dinamika airtanah di pesisir sangat dipengaruhi oleh kondisi formasi batuan dengan sifat parameter akuifer dan pengaruh air laut di daerah sependan pantai atau dataran pantai (Cahyadi, 2019; Febriarta & Widyastuti, 2020). Pulau koral memiliki karakteristik morfologi yang landai hingga datar, sehingga imbuhan air yang meresap kedalam tanah relatif sedikit (Purnama & Cahyadi, 2019; Trinanda, 2017). Keterdapatan airtanah berkembang pada daerah batugamping terumbu atau akuifer karst. Akuifer karst adalah akuifer yang memiliki batuan induk yang signifikan kelarutan dalam air (White et al., 2017). Potensi perkembangan rongga, celah maupun saluran pada batuan yang terbentuk oleh pelarutan dapat mengakibatkan sumber polutan (sumber pencemar) masuk kedalam sistem airtanah (Ferreira et al., 2004; White et al., 2017). Sifat akuifer karst sangat permeabel dan rentan

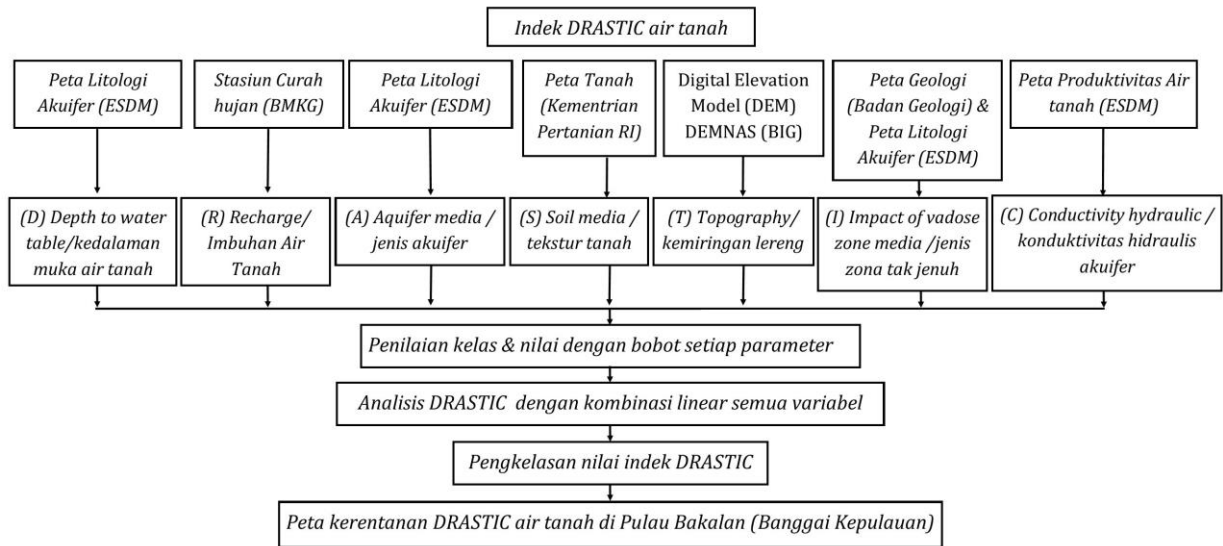
terhadap kontaminasi (Linggasari et al., 2019; Thapa et al., 2018; Vrba & Zaporozec, 1994).

Suatu potensi atau kondisi dimana sistem airtanah dapat bertahan terhadap sumber pencemar dari permukaan hingga kedalam akuifer dapat didefinisikan sebagai kerentanan airtanah (Harter & Walker, 2001; Putranto et al., 2016). Percepatan pencemaran airtanah dapat dipengaruhi oleh kondisi hidrogeologi dari formasi batuan dalam sifat kelulusan airtanah (Febriarta & Oktama et al, 2020; Voutchkova et al., 2021). Sumber pencemar secara dinamis dapat dipengaruhi oleh sumber pencemar serta kondisi infiltrasi hingga mencapai zona jenuh air, sehingga dapat mengakibatkan risiko pencemaran rendah pada daerah dengan sumber pencemar (polutan) yang tinggi (DPU, 1996; Putranto et al., 2020; Vrba & Zaporozec, 1994).

Lathamani et al., (2015) menyebutkan bahwa penilaian kerentanan airtanah dapat diperoleh dari kombinasi parameter sifat pembawa air (kondisi geologi). Putranto et al., (2020) dan Voutchkova et al., (2021) menyatakan bahwa parameter hidrogeologi merupakan parameter yang mempengaruhi percepatan penyebaran pencemaran. Oleh karena hal tersebut penilaian kerentanan airtanah terhadap pencemaran dapat diperoleh dari perhitungan multi kriteria dari kecepatan kelulusan airtanah, dengan metode DRASTIC (Aller et al., 1987a; Sugianti et al, 2016). Berkaitan dengan peningkatan akses informasi dalam pembangunan berkelanjutan, maka diperlukan pemetaan tentang sumber daya air secara keruangan (spasial) mengenai potensi, lokasi, sebaran airtanah yang dangkal, dan kondisi kerentanan yang dipengaruhi oleh faktor penyusun batuan yaitu dominasi batugamping bioklastik fragmental dan terumbu, yang rentan terhadap sumber pencemar (polutan) di Pulau Bakalan. Maka tujuan dari penelitian ini adalah mengetahui potensi tingkat kerentanan airtanah terhadap pencemaran pada formasi batugamping koral kuartar (QI), dengan pendekatan metode DRASTIC di Pulau Bakalan di Kabupaten Banggai Kepulauan.

METODE

Dalam perhitungan pendekatan zona kerentanan airtanah dengan DRASTIC, terdapat beberapa tahapan yang perlu dilakukan seperti yang tertera pada diagram alir penelitian (**Gambar 4**). Pendekatan kerentanan dengan metode DRASTIC merupakan sebuah evaluasi untuk airtanah terhadap potensi pencemaran dengan memperhatikan sifat hidrogeologi (Aller et al., 1987a; Ferreira et al., 2004; Harter & Walker, 2001; White et al., 2017). Sifat hidrogeologi merupakan parameter akuifer dalam menyimpan dan meloloskan (mengalirkan) yang berhubungan dengan waktu dan kecepatan aliran dan ketebalan terhadap zona tak jenuh (Fetter, 2014; Singhal & Gupta, 2010).



Gambar 4. Langkah kerja kajian kerentanan airtanah terhadap pencemaran

Parameter yang digunakan dalam pendekatan kerentanan airtanah terhadap pencemaran antara lain: *depth to water* (D)/kedalaman muka airtanah, *recharge* (R)/imbuan air, *aquifer* (A)/jenis akuifer, *soil media* (S)/tekstur tanah, *topography* (T)/kemiringan lereng, *impact of vadose zone media* (I)/jenis zona tak jenuh, dan *conductivity hydraulic* (C)/konduktivitas hidraulis akuifer (**Tabel 1**). *Depth to water* (D)/kedalaman muka airtanah merupakan parameter kedalaman muka airtanah dari permukaan. Semakin dangkal muka airtanah, memiliki potensi pencemaran yang lebih tinggi atau mudah mengalirkan pencemaran. Nilai Recharge (R) / imbuan air adalah kondisi airtanah yang masuk kedalam tanah (Purnama et al., 2019). Untuk mendapatkan nilai imbuan airtanah diperoleh dari pendekatan rumus keseimbangan air (*water balance*) berdasarkan metode *Thornthwaite-Matter* (BSN, 2002), seperti pada **Persamaan 1**.

$$\text{Recharge} = \text{Curah hujan (presipitasi)} - \text{aliran permukaan (runoff)} - \text{evapotranspirasi} \dots \dots \dots (1)$$

Aquifer (A) / jenis akuifer merupakan pendekatan yang dipengaruhi oleh sifat pembawa airtanah dengan rongga antar butir atau media aliran air. Akuifer dengan aliran media antar butir yang semakin rapat atau semakin kecil mempunyai nilai kerentanan yang rendah, sedangkan kondisi akuifer dengan media rongga antar butir semakin besar hingga rongga dan percelahan memiliki nilai yang semakin tinggi dan semakin rentan terhadap kerentanan airtanah (Vienastra & Febriarta, 2018). *Soil media* (S)/tekstur tanah merupakan parameter kerentanan dari sifat peresapan air (imbuan) dari permukaan tanah hingga masuk ke sistem akuifer (Lathamani et al., 2015). Kondisi tekstur semakin lepas-lepas mempengaruhi nilai kerentanan, selain

tekstur, ketebalan tanah mempengaruhi proses filtrasi (Putranto et al, 2016).

Parameter *topography* (T)/kemiringan lereng merupakan faktor yang mempengaruhi dalam meresapkan imbuan airtanah. Daerah dengan kemiringan lereng yang semakin datar hingga landa akan mempengaruhi proses filtrasi (Febriarta, et al., 2020). *Impact of vadose zone media* (I)/jenis zona tak jenuh, dipengaruhi oleh sifat aliran dari setiap batuan. Parameter terakhir adalah *Conductivity hydraulic* (C)/konduktivitas hidraulis akuifer, merupakan kemampuan batuan dalam meloloskan airtanah yang dinyatakan dalam satuan m/hari (BSN, 2016). Nilai konduktivitas hidraulis akuifer yang semakin cepat akan mempunyai nilai kerentanan yang tinggi terhadap kerentanan pencemaran airtanah (Febriarta & Widyastuti, 2020). Nilai potensi konduktivitas hidraulis, mengacu persamaan nilai terhadap batuan (Todd & Mays, 2005) (**Tabel 2**). Penilaian dalam setiap kelas dinilai dengan nilai terendah 1 dan terbesar atau yang mempengaruhi faktor kerentanan dengan nilai 10. Kelas dan nilai setiap parameter kerentanan airtanah terhadap pencemaran dengan metode DRASTIC disajikan pada **Tabel 1**.

Setiap parameter kerentanan memiliki bobot dominan terhadap kerentanan yang paling mempunyai dampak terhadap pencemaran. Penilaian setiap kelas dari komponen parameter kerentanan dikalikan dengan nilai bobot (**Tabel 3**) untuk mendapatkan informasi skala pengaruh kerentanan pencemaran. Nilai skala pembobotan adalah 1-5, dengan angka pembobotan bernilai besar (nilai 5) menunjukkan faktor yang penting dan paling berpengaruh, sedangkan nilai kecil (nilai 1) menunjukkan faktor yang paling rendah dalam mempengaruhi kerentanan.

Tabel 1. Kelas dan nilai (R) parameter kerentanan air tanah terhadap pencemaran dengan metode DRASTIC

(D) Kedalaman Air tanah (m)		(R) Imbuhan Air (mm)		(A) Jenis Akuifer		(S) Tekstur Tanah		(T) Kemiringan Lereng (%)		(I) Jenis Zona Tak Jenuh		(C) Konduktivitas Hidraulis (m/hari)	
Kelas	Nilai	Kelas	Nilai	Kelas	Nilai	Kelas	Nilai	Kelas	Nilai	Kelas	Nilai	Kelas	Nilai
0-3	10	200-300	9	Batu gamping, karst	10	kerikil	10	0-2	10	lapisan batas	1	>82	10
3-4,5	9	150-200	8	basal	9	pasir	9	2-6	9	lempung/lanau	3	41-82	8
4,5-9	7	120-150	6	Batu gamping masif, pasir, kerikil	8	gambut	8	6-12	5	serpih	3	28,8-41	6
9-15	5	100-120	5	Batu pasir masif	6	agregat lempung	7	12-18	3	Batu gamping	3	12,3-28,7	4
15-22	3	80-100	3	Batu pasir, batu gamping, serpih	6	lempung pasiran	6	>18	1	Batu pasir	6	4,1-12,3	2
22-30	2	60-80	2	glacial till / sedimen oleh pencairan es	5	lempung	5			pasir kerikil dan lanau	6	0,04-4,1	1
>30	1			lapukan metamorf/ beku	4	lempung lanau	4			pasir dan kerikil	8		
				metamorf/ beku	3	lempung liat	3			basal	9		
				Serpih masif	2					Batu gamping, karst	10		
						Campuran lempung non agregat	2						
							1						

Sumber: Aller et al, (1987) ; White et al, (2017); Putranto et al, (2019); Voutchkovaa et al, (2021)

Tabel 2. Konduktivitas hidraulis pada batuan.

Material batuan	Konduktivitas Hidrolik (m/hari)	Material batuan	Konduktivitas Hidrolik (m/hari)
Kerikil, kasar	150	Gumuk Pasir	20
Kerikil, halus	250	Gambut	5,7
Pasir, kasar	45	Skis / batuan metamorf	0,2
Pasir, sedang	12	Slate /batuan metamorf halus	0,00008
Pasir, halus	2,5	Till sedimen, pasiran	0,49
Lanau	0,08	Till sedimen, berkerikil	30
Tanah liat	0,0002	Tuff	0,2
Batu pasir, berbutir halus	0,2	Basal	0,01
Batu pasir, berbutir sedang	3,2	Gabbro, lapuk	0,2
Batugamping	0,94	Granit, lapuk	1,4
Dolomit	0,001		

Sumber: Todd & Mays, (2005); Singhal & Gupta, (2010); Fetter, (2014)

Tabel 3. Bobot (W) parameter DRASTIC.

Parameter	Nilai Bobot
(D) Depth to water / kedalaman muka airtanah	5
(R) Recharge / Imbuhan Air	4
(A) Aquifer / jenis akuifer	3
(S) Soil media / tekstur tanah	2
(T) Topography / kemiringan lereng,	1
(I) Impact of vadose zone media / jenis zona tak jenuh,	5
(C) Conductivity hydraulic / konduktivitas hidraulis akuifer	3

Sumber: Aller et al, (1987); Sugianti et al, (2016); Devianto et al, (2019); Putranto et al, (2019)

Perhitungan nilai dan bobot dari setiap parameter kerentanan DRASTIC, dilakukan secara keruangan (spasial) untuk menggambarkan informasi distribusi kondisi sertiap parameter kerentanan DRASTIC. Fungsi matematika yang digunakan untuk menghitung seluruh parameter kerentanan (Tabel 1) dengan pembobotan sekenario (Tabel 3) digunakan fungsi perhitungan linier setiap variabel. Hasil dari perhitungan menghasilkan indeks kerentanan. Pendekatan rumus yang digunakan untuk menghitung nilai total dari indeks kerentanan (Aller et al., 1987b), seperti pada **Persamaan 2**.

$$Kerentanan = D_R D_W + R_R R_W + A_R A_W + S_R S_W + T_R T_W + I_R I_W + C_R C_W \dots \dots \dots (2)$$

dimana:

- (*R*) : nilai untuk masing-masing parameter
- (*w*) : bobot untuk masing-masing parameter
- (*D*) : *Depth to water* / kedalaman muka airtanah
- (*R*) : *Recharge*/Imbuan aAir
- (*A*) : *Aquifer*/jenis akufer
- (*S*) : *Soil media*/tekstur tanah
- (*T*) : *Topography*/kemiringan lereng,
- (*I*) : *Impact of vadose zone media*/jenis zona tak jenuh,
- (*C*) : *Conductivity hydraulic*/konduktivitas hidraulis akuifer

Tabel 4. Kelas kerentanan airtanah DRASTIC.

Kelas kerentanan	Nilai indeks DRASTIC
Sangat Rendah	86-100
Rendah	101-120
Sedang	121-140
Tinggi	141-148
Sangat Tinggi	>140

Sumber: Pacheco et al, (2015); Thapa et al, (2018)

Penentuan kelas kerentanan pencemaran airtanah dengan metode DRASTIC, mengacu pada pembagian kelas menurut Pacheco et al., (2015) dan Thapa et al., (2018). Pembagian kelas kerentanan airtanah tersebut, dibagi menjadi lima (5) kelas, yaitu sangat rendah, rendah, sedang, tinggi dan sangat tinggi dengan rentang nilai seperti pada **Tabel 4**.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kedalaman Muka Airtanah (D)

Kedalaman muka airtanah merupakan selisih nilai kedalaman dari permukaan tanah hingga ke tinggi muka airtanah dalam satuan meter (m). Nilai kedalaman muka airtanah merupakan data sekunder yang diperoleh dari hasil kajian BPLH, (2013), dan BPLH, (2014). Kondisi kedalaman airtanah pada perbukitan karst (bagian utara) memiliki kedalaman 9-11 m. Terdapat beberapa lokasi yang tergenang pada cekungan dan rawa dengan kondisi kedalaman airtanah <2 m.

Sedangkan kondisi kedalaman airtanah pada dataran secara umum kedalaman muka airtanah relatif dangkal dengan nilai rata-rata 0-4 meter. Daerah pesisir sepadan pantai memiliki kedalaman muka airtanah 0 m, hal tersebut dipengaruhi oleh tinggi muka laut (0 mdpal). Penilaian nilai dan bobot, distribusi kedalaman muka airtanah disajikan pada **Tabel 5**.

Tabel 5. Perhitungan nilai kedalaman muka airtanah (D).

Kedalaman muka airtanah (m)	Kelas (m)	Nilai	Bobot	Skor
2	0-3	10	5	50
3	3-4,5	9	5	45
5	4,5-9	7	5	35
10	9-15	5	5	25
15	15-22	3	5	15

Imbuan Airtanah (R)

Kondisi imbuan airtanah diperoleh dari perhitungan neraca air meteorologis, dengan menggunakan data curah hujan dan temperatur rata-rata selama 10 tahun. Di Kabupaten Banggai Kepulauan tidak terdapat stasiun hujan sebagai sumber data pengolahan, sehingga sumber data sekunder menggunakan data curah hujan dari Alfiandy et al, (2020), BPS (2020), BPLH, (2014) BMKG, (2020b), BMKG (2020a), dan Paski, (2018) yang dianalisis dengan metode *Thornthwaite-Matter*, dan pendekatan pada **Persamaan 1** untuk mengetahui imbuan airtanah. Berdasarkan pendekatan tersebut, diketahui hasil perhitungan nilai potensi air imbuan di Pulau Bakalan merata dengn nilai sebesar 235 mm/tahun. Menurut Pacheco et al., (2015) kondisi curah hujan tersebut kategori lebat atau tinggi. Nilai tersebut termasuk kelas nilai yang tinggi dari kelas kerentanan (**Tabel 6**) dalam mempengaruhi potensi pencemaran airtanah.

Tabel 6. Perhitungan nilai imbuan airtanah (R).

Imbuan air (mm/tahun)	Kelas (m)	Nilai	Bobot	Skor
235	200-300	9	4	36

Jenis Akuifer (A)

Parameter jenis akuifer merupakan jenis batuan yang mempunyai sifat akuifer atau dapat menyimpan dan meloloskan airtanah. Jenis akuifer di Pulau Bakalan secara umum didominasi oleh batugamping yang merupakan bagian dari Formasi Batugamping koral (QI). Menurut KESDM (2015a) dan KESDM (2015b) jenis batuan (litologi) akuifer terdiri atas batugamping terumbu di bagian tengah pulau dan berada di kawasan karst, dan batugamping koral.

Batugamping terumbu memiliki faktor yang lebih mempengaruhi dalam kerentanan airtanah dengan nilai 10 poin. Secara umum jenis akuifer tersebut, memiliki nilai yang tinggi dipengaruhi oleh sifat rongga antar butir atau media aliran air dengan sifat rekah, celah maupun saluran pelarutan, yang mempunyai respon yang cepat kedalam sistem akuifer airtanah. Jenis akuifer pada bagian selatan, tersusun atas batuan fragmental dari rombakan batugamping bioklastik, nilai tersebut memiliki nilai yang tinggi (8 poin) dalam parameter kerentanan. Jenis litologi akuifer berupa batugamping dengan media celah memiliki potensi mengalirkan air dengan cepat (Harter & Walker, 2001). Seperti pada hasil penelitian Vienastra & Febriarta (2020) dan Febriarta et al., (2020) penilaian kerentanan pada batugamping memiliki kerentanan sangat tinggi. Nilai jenis akuifer di Pulau Bakalan disajikan pada **Tabel 7** dan distribusi spasial (keruangan) disajikan pada **Gambar 5**.

Tabel 7. Perhitungan nilai jenis akuifer (A).

Jenis akuifer	Kelas	Nilai	Bobot	Skor
Batugamping terumbu	10	10	3	30
Batugamping bioklastik, fragmental	8	8	3	24

Tekstur Tanah (S)

Tekstur tanah dalam parameter kerentanan airtanah, dipengaruhi oleh sifat filtrasi airtanah masuk kedalam tanah. BPLH, (2014) dan Sisultan (2017) menyebutkan bahwa, jenis perkembangan tanah di Pulau Bakalan adalah berasosiasi dengan *Eutric Regosols*. Perkembangan tanah ini memiliki tebal 0-30 cm dengan dominiasi tekstur lempung sedang. Tanah tersebut memiliki kondisi drainase sedang. Perkembangan tanah pada daerah pada cekungan didominasi menjadi daerah yang tergenang air (**Gambar 5**) yang memiliki tingkat kerentanan rendah, sedangkan pada tekstur tanah dengan tekstur campuran pasir memiliki nilai kerentanan lebih tinggi dengan kondisi drainase baik. Nilai kerentanan airtanah dari parameter tekstur tanah disajikan pada **Tabel 8** dan secara keruangan (spasial) disajikan pada **Gambar 5**.

Tabel 8. Perhitungan nilai tekstur tanah (S).

Tekstur tanah	Kelas	Nilai	Bobot	Skor
Pasir	9	9	2	18
Gambut/rawa (genangan)	8	8	2	16
Lempung pasir	6	6	2	12
Lempung	2	2	2	4

Kemiringan Lereng (T)

Kemiringan lereng diperoleh dari analisis secara keruangan (spasial) dengan sistem informasi geografis mengubah nilai ketinggian

menjadi nilai kemiringan menggunakan data *digital elevation model* nasional (DEMNAS) dari BIG, (2018). Secara morofologi, di Pulau Bangkalan bagian utara merupakan perbukitan karst dengan lokasi tertinggi 76 mdpl. Morfologi bergelombang tersebut memiliki rentang kemiringan lereng 12-18% atau 8-14°. Sedangkan bagian tengah hingga selatan, mempunyai morfologi relatif datar dengan ketinggian rata-rata 25 mdpl. Kondisi kemiringan lereng secara umum berkisar 2-6% atau 2-4°, yang termasuk landai. Bagian selatan Pulau Bakalan, banyak terdapat cekungan pada ketinggian ± 5 mdpl, daerah cekungan tersebut berkembang menjadi daerah rawa/gambut (genangan), dan pada cekungan yang relatif besar terbentuk danau.

Terdapat tiga (3) danau besar yaitu Danau Petinding, Danau Bakalan, dan Danau Kobit (**Gambar 1**). Topografi disekitar danau, relatif datar dengan kemiringan lereng datar hingga landai. Nilai kemiringan lereng yang datar tersebut, mempunyai faktor kerentanan yang tinggi. Hal tersebut dipengaruhi oleh daerah yang datar merupakan tempat terakumulasi aliran permukaan dan meresap kedalam tanah (filtrasi). Daerah dengan topografi cekungan dapat membentuk genangan air permukaan dan terinfiltrasi kedalam tanah (Kalhor et al., 2019). Daerah dengan kemiringan lereng yang semakin terjal, akan mempunyai faktor kerentanan yang kecil, hal tersebut disebabkan oleh aliran permukaan akan bergerak cepat mengikuti alur lembah, lereng dan relatif sedikit yang masuk kedalam tanah (proses infiltrasi). Daerah dengan kemiringan lereng yang terjal akan menunjukkan nilai faktor yang relatif kecil. Hasil penilaian kemiringan lereng dalam % disajikan pada **Tabel 9**, dan secara keruangan (spasial) disajikan pada **Gambar 5**.

Tabel 9. Perhitungan nilai kemiringan lereng (T).

Kemiringan lereng (%)	Kelas	Nilai	Bobot	Skor
0-2	10	10	1	10
2-6	9	9	1	9
6-12	5	5	1	5
12-18	3	3	1	3
>18	1	1	1	1

Zona Tak Jenuh (I)

Zona tak jenuh merupakan bagian atau material batuan yang berada dari permukaan tanah hingga muka airtanah (BSN, 2005; Febriarta & Purnama, 2020). Berdasarkan sifat batuan dalam mengalirkan aliran airtanah, parameter zona tak jenuh memiliki pengaruh yang paling berpengaruh, hal tersebut dipengaruhi oleh laju kecepatan airtanah menuju zona jenuh yang dipengaruhi oleh sifat porositas batuan (Purnama & Cahyadi, 2019). Bobot untuk parameter zona tak jenuh adalah 5 poin. Berdasarkan kondisi penyusun litologi (batuan) menurut KESDM, (2015a) terdapat lima (5) litologi yaitu batugamping

terumbu (perbukitan karst) yang berada di bagian utara dan batugamping terumbu, kategori tersebut memiliki nilai 10 point (tertinggi) (**Tabel 10**).

Tabel 10. Perhitungan nilai zona tak jenuh (I).

Zona Tak Jenuh	Kelas	Nilai	Bobot	Skor
Batugamping terumbu (karst)	Batugamping, karst	10	5	50
Batugamping bioklastik, fragmen	Batugamping	10	5	50
Rombakan batugamping	Batugamping rombakan	8	5	40
Pasir Kerikil, lanau	Pasir kerikil, lanau	6	5	30
Batugamping terumbu	Batugamping	3	5	15

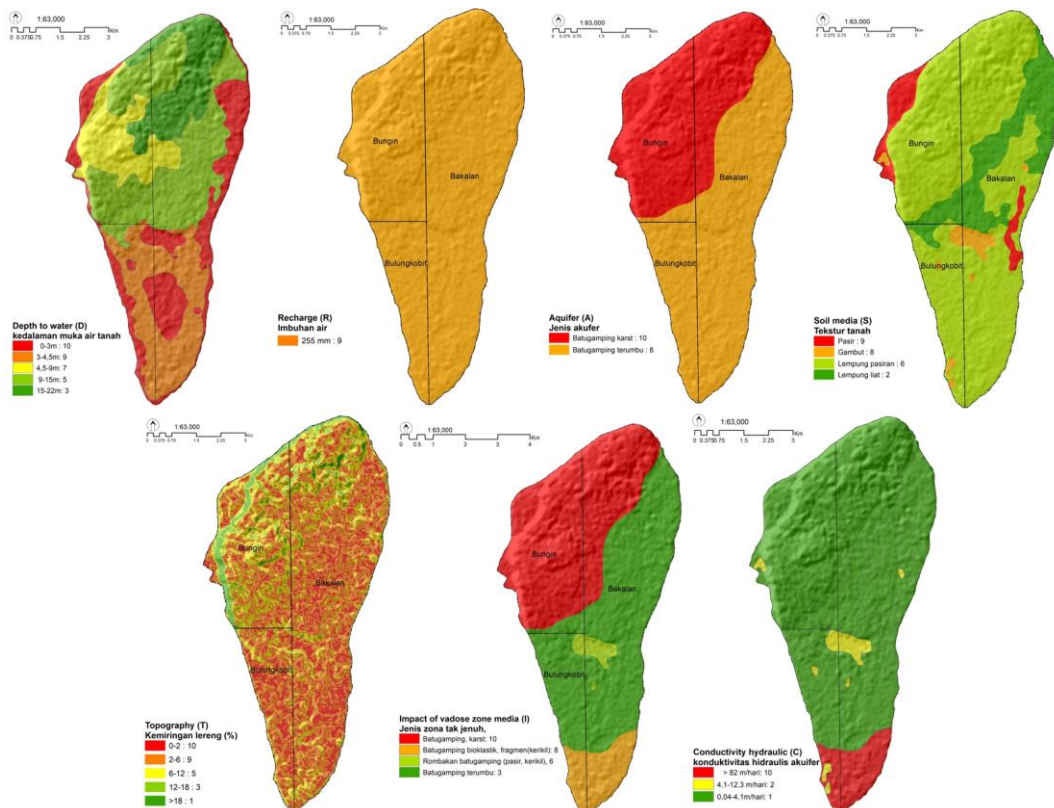
Litologi (batuan) batugamping koral bioklastik, fragmen (bagian selatan) memiliki bobot parameter tinggi, dikarenakan media aliran airtanah berupa celah, rekah, saluran hasil pelarutan, sehingga memiliki potensi kecepatan sumber pencemar (polutan) yang tinggi menuju zona jenuh air (akuifer). Rombakan batugamping berada di morfologi dataran bagian tengah pulau. Penilaian nilai zona tak zenuh disajikan pada **Tabel 10**, dan secara keruangan (spasial) disajikan pada **Gambar 5**.

Konduktivitas Hidraulik (C)

Nilai konduktivitas hidraulik atau nilai kelulusan airtanah, dipengaruhi oleh media aliran airtanah dan jenis batuan. Kondisi jenis batuan (litologi) akuifer didominasi oleh batugamping dengan nilai rata-rata konduktivitas hidraulik sebesar 0,94 m/hari. Yang et al., (2019) menyebutkan bahwa nilai konduktivitas hidraulik akuifer dapat dipengaruhi juga oleh sifat pembawa airtanah, seperti pada daerah genangan air (rawa/gambut) di daerah dengan morfologi cekungan atau alur lembah pada material pasir sedang hingga kasar memiliki kelulusan airtanah yang lebih tinggi yaitu 5,7 m/hari. Secara umum nilai konduktivitas hidraulik akuifer relatif kecil yang dipengaruhi oleh sifat lempung dengan nilai pergerakan 0,02 m/hari (**Tabel 11**). Nilai konduktivitas hidraulik yang kecil tersebut dipengaruhi oleh sifat lempung yaitu akuitard. Sifat akuitard yaitu kemampuan sifat batuan dapat menahan dan menyimpan airtanah, tetapi meloloskan atau mengalirkan air sangat kecil (White et al., 2017). Distribusi spasial (keruangan) nilai konduktivitas hidraulik disajikan pada **Gambar 5**.

Tabel 11. Perhitungan nilai konduktivitas hidraulik (C).

konduktivitas hidraulik (m/hari)	Kelas	Nilai	Bobot	Skor
Gambut/rawa (5,7)	4,1-12,3	2	3	6
Lempung pasiran (2,5)	0,04-4,1	1	3	3
Batugamping (0,94)	0,04-4,1	1	3	3
Lempung (0,02)	0,04-4,1	1	3	3



Gambar 5. Nilai parameter kerentanan airtanah terhadap pencemaran dengan metode DRASTIC.

Tabel 12. Luas desa terhadap tingkat kerentanan airtanah DRASTIC.

Tingkat Kerentanan	Desa Bakalan		Desa Bulungkoibit		Desa Bungin		Total	
	Luas (km ²)	%	Luas (km ²)	%	Luas (km ²)	%	Luas (km ²)	%
Sangat Tinggi	8,802	21,58	1,265	3,10	9,988	24,48	20,056	49,16
Tinggi	4,147	10,16	1,007	2,47	0,375	0,92	5,529	13,55
Sedang	4,886	11,98	2,616	6,41	0,041	0,10	7,543	18,49
Rendah	6,712	16,45	0,376	0,92	0,579	1,42	7,667	18,79
Sangat Rendah	0,001	0,003	-	-	-	-	0,001	0,003

Zona Kerentanan Airtanah DRASCTIC

Penentuan zona kerentanan airtanah, diperoleh dari metode perhitungan multi-kriteria dari pendekatan sifat hidrogeologi batuan DRASTIC yang dianalisis secara keruangan (spasial) dengan sistem informasi geografis (SIG). Penentuan zona kerentanan diperoleh dari perhitungan penjumlahan linier (**Persamaan 2**) skor setiap parameter. Berdasarkan hasil perhitungan linier tersebut diperoleh nilai total skor (skor indeks DRASTIC). Untuk mengklasifikasikan zona kerentanan airtanah, mengacu rentang nilai dari **Tabel 4**. Berdasarkan perhitungan, nilai indeks DRASTIC berkisar 99-193. Zona kerentanan airtanah terhadap pencemaran sangat rendah, diperoleh dari rentang nilai indeks DRASTIC 86-100.

Daerah dengan tingkat kerentanan sangat rendah, merupakan daerah yang mempunyai proporsi <5 % terjadi pencemaran airtanah, atau dapat dikatakan tidak berpotensi terkontaminasi dengan sumber pencemar (Putranto et al, 2019). Hasil dari analisis zona kerentanan sangat rendah hanya seluas 0,001 km² atau 0,003% (**Tabel 12**) dari luas Pulau Bakalan. Zona atau daerah tersebut berada di morfologi dataran bagian utara, yang secara administrasi berada di Desa Bakalan. Karakteristik dengan zona kerentanan sangat rendah di Pulau Bakalan memiliki kondisi kedalaman muka airtanah >10 m, kondisi jenis litologi (batuan) akuifer berupa batugamping koral, kondisi tekstur tanah permukaan berupa lempung, dengan kondisi kemiringan lereng >18% atau >15°. Kondisi zona tak jenuh dengan penyusun batuan berupa batugamping terumbu dengan potensi sifat konduktivitas hidraulis 0,02 m/hari (lempung).

Zona tingkat kerentanan airtanah rendah, berada pada rentang nilai indeks DRASTIC 101-120. Zona kerentanan airtanah terhadap pencemaran rendah, dapat diartikan zona atau daerah dengan potensi kerentanan airtanah dengan proporsi hingga 20% dari sumber pencemar (polutan). Potensi pencemaran pada zona tersebut dengan intensitas yang kecil. Nilai indeks kerentanan airtanah terhadap pencemaran dengan metode DRASTIC rendah di Pulau Bakalan, memiliki karakteristik kedalaman airtanah berkisar 5-10 m, dengan jenis litologi (batuan) akuifer berupa batugamping koral, dengan perkembangan jenis tanah berupa lempung pasir yang mempunyai potensi filtrasi yang relatif pelan dan permeabilitas/kelulusan air (K)

atau kemampuan batuan meluluskan air di dalam rongga-rongga dalam batuan yang rendah pada penyusun batu lempung (0,02 m/hari). Faktor kemiringan lereng dengan dengan rentang 12-18% atau 8-15°. Faktor kemiringan lereng dan kedalaman muka airtanah merupakan faktor yang dominan pada zona kerentanan rendah. Luas zona kerentanan airtanah rendah adalah seluas 7,667 km² atau seluas 18,794% (**Tabel 12**) dari luas Pulau Bakalan. Zona tingkat kerentanan rendah terdistribusi pada bagian dataran bagian utara, yang sebagian besar secara administrasi masuk wilayah Desa Bakalan (**Gambar 6**).

Zona tingkat kerentanan airtanah terhadap pencemaran sedang, memiliki rentang nilai indeks DRASTIC 121-140. Zona atau daerah dengan tingkat kerentanan sedang, memiliki potensi tercemar (kontaminasi) hingga proporsi 60% dari luas wilayah (Pacheco et al., 2015). Potensi pencemaran dapat terjadi pada intensitas yang relatif lama dan menerus dari sumber pencemaran (polutan). Karakteristik tingkat kerentanan airtanah sedang di Pulau Bakalan dipengaruhi oleh nilai kedalaman air berkisar 5 m, dengan kondisi perkembangan tanah lapisan atas dengan tekstur lempung pasir dengan ketebalan hingga 30 cm. Faktor kemiringan lereng berkisar 2-4% atau 2-3°, dengan morfologi landai. Kemiringan lereng tersebut mempunyai potensi polutan (sumber pencemar) relatif mudah menuju zona jenuh air. Kondisi tersebut juga dipengaruhi oleh kecepatan aliran (konduktivitas hidraulik) oleh batuan penyusun berupa batugamping, dengan potensi 0,94 m/hari. Kondisi zona jenuh Karakteristik zona vadoze atau zona tak jenuh tersusun atas batuan batugamping terumbu, dengan perkembangan ruang rongga antar butir atau media aliran air yang tidak terlalu rapat. Berdasarkan analisis keruangan (spasial), tingkat zona kerentanan sedang diketahui seluas 7,54 km² atau 13,55% dari luas Pulau Bakalan (**Tabel 12**). Secara keruangan (spasial), zona kerentanan sedang terdistribusi di utara dan selatan Pulau Bakalan (**Gambar 6**). Secara dominan kerentanan sedang terdapat di morfologi landai hingga datar. Kondisi imbuhan airtanah yang masuk kedalam tanah dengan potensi yang tinggi (235 mm/tahun), litologi (batuan) penyusun akuifer berupa batugamping terumbu, yang merupakan bagian dari Karst Banggai Kepulauan.

Zona kerentanan airtanah terhadap pencemaran tinggi, diperoleh dari nilai indeks DRASTIC 141-148. Pada kondisi ini, zona atau daerah yang memiliki potensi kerentanan tinggi

mempunyai proporsi atau peluang terkontaminasi hingga 80% oleh polutan (sumber pencemar), yang dipengaruhi oleh faktor yang pendukung berupa kondisi airtanah dangkal dan sifat batuan sangat cepat dalam mengalirkan air. Tingkat kerentanan tinggi di Pulau Bakalan terdapat pada kondisi kedalaman muka airtanah 0-3 m dari permukaan tanah. Dangkalnya kondisi jenuh air dapat mempercepat kontaminasi (sumber pencemar) masuk menuju zona jenuh air (Devianto et al, 2019; Voutchkova et al., 2021).

Nilai imbuhan airtanah yang tinggi (235 mm/tahun), termasuk parameter yang mempengaruhi tingkat kerentanan tinggi. Faktor penyusun batuan, yaitu batugamping koral dalam sifat zona tak jenuh, termasuk media dengan aliran yang memiliki tingkat porositas yang baik dalam meresapkan menuju akuifer airtanah. Anim-Gyampo et al., (2019) menyebutkan semakin besar media rongga antar butir, dapat menurunkan kualitas airtanah, hal tersebut dikarenakan media tersebut dengan mudah mengalirkan polutan dari atasnya. Hal tersebut memicu terjadinya kerentanan pencemaran. Faktor kemiringan lereng yang landai hingga dapat mempercepat kondisi jenuh pada tanah lapisan permukaan yang terfiltrasi menuju zona tak jenuh. Zona atau daerah dengan kerentanan tinggi terdapat pada bagian utara dan bagian tengah disekitar Danau Bakalan dan Danau Kobit. Luas kerentanan airtanah tinggi seluas 5,529 km² atau seluas 13,553% dari luas Pulau Bakalan (**Gambar 6**).

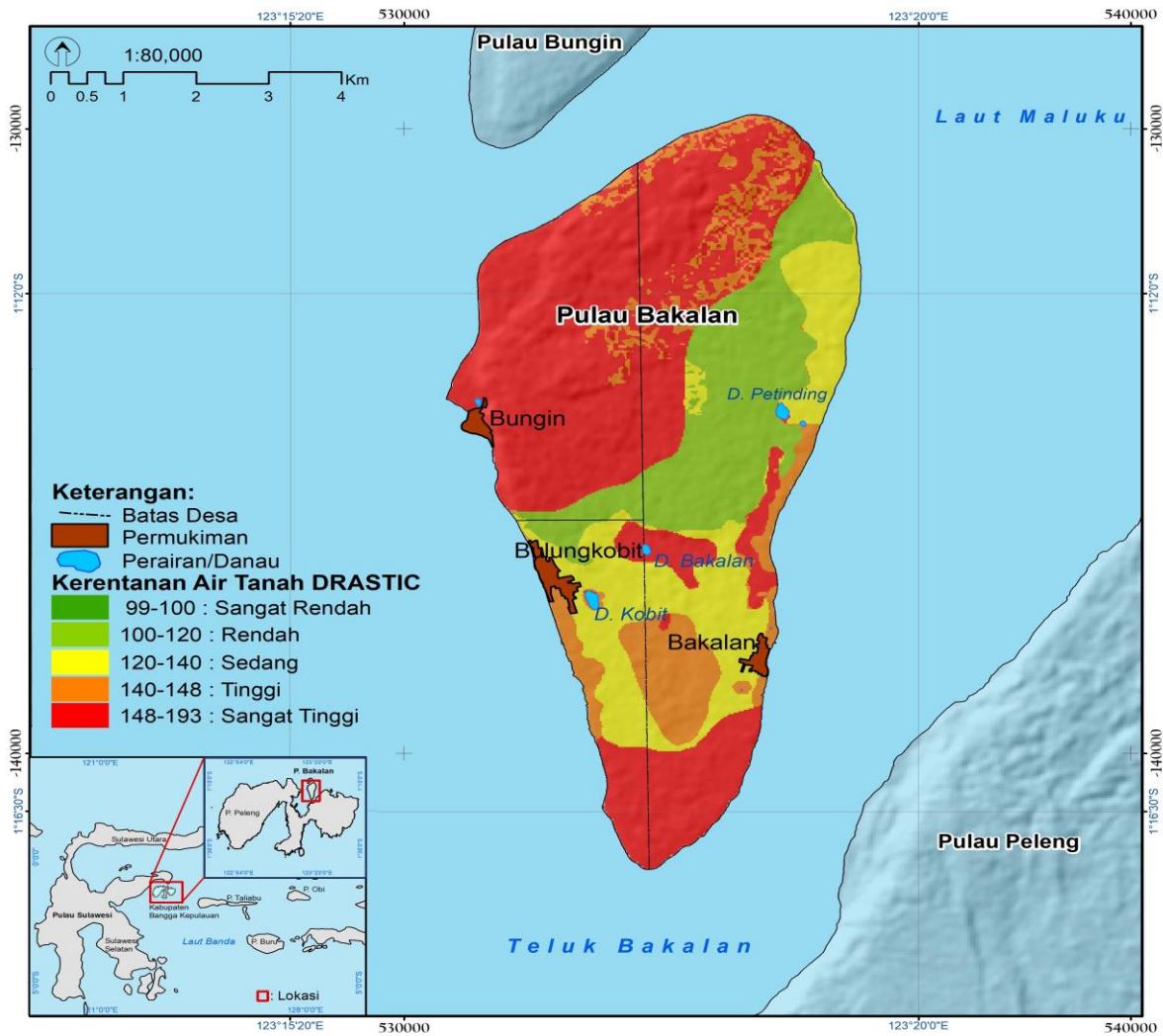
Tingkat kerentanan tinggi terdistribusi di wilayah Desa Bulungkopit dan Desa Bakalan. Kerentanan airtanah sangat tinggi, merupakan kondisi suatu zona yang mempunyai potensi proporsi dapat tercemar oleh semua polutan (sumber pencemar). Hal tersebut dipengaruhi oleh sifat batuan yang sangat porus terhadap airtanah, dengan kedalaman airtanah 0-3 m dari permukaan tanah. Selisih kedalaman tersebut cukup dangkal, yang mengakibatkan sumber pencemar cepat masuk ke zona jenuh air (akuifer). Kondisi kedalaman airtanah yang dangkal dengan kondisi topografi yang rendah terdapat potensi intrusi air laut bila dalam penggunaan airtanah yang berlebihan. Hal tersebut juga dipengaruhi oleh pola perkembangan permukiman yang berada Faktor penyusun batuan berupa batugamping terumbu (karst) mempunyai potensi yang cepat dalam mengalirkan sumber polutan yang dipengaruhi oleh rongga antar butir media aliran berupa celah, rekah hingga saluran dari perkembangan pelarutan (Febriarta et al, 2020). Nilai konduktivitas hidraulis pada batugamping sebesar 0,94 m/hari. Faktor kemiringan lereng 0-6% atau 0-4° termasuk

landai, yang mengakibatkan terkonsentrasinya aliran permukaan sehingga menjadi jenuh, dan mudah teresapkan (filtrasi) kedalam tanah hingga masuk dengan mudah ke zona jenuh (akuifer) dengan relatif cepat. Zona tingkat kerentanan airtanah sangat tinggi terdapat pada bagian utara Pulau Bakalan, yang sebagian besar berada di perbukitan karst. Luas zona dengan tingkat kerentanan pencemaran airtanah sangat tinggi seluas 20,056 km² atau 49,16%. Secara umum tingkat kerentanan pencemaran airtanah di Pulau Bakalan didominasi oleh kerentanan sangat tinggi (49,16%).

KESIMPULAN

Penilaian kerentanan airtanah terhadap pencemaran dengan metode DRASTIC menghasilkan nilai indeks kerentanan dengan interval yang panjang, sehingga dapat mengetahui interaksi parameter akuifer yang dominan atau memicu kerentanan. Penilaian kerentanan dapat diterapkan pada akuifer bebas (tidak tertekan). Pemodelan keruangan (spasial) dengan metode DRASTIC lebih sesuai untuk skala kecil. Terdapat kekurangan dengan metode ini, yaitu diperlukan data yang banyak.

Saran yang dapat dilakukan pada zona kerentanan sangat rendah adalah pemantauan berkala di sumber-sumber airtanah. Kerentanan rendah mempunyai peluang terkontaminasi sampai dengan 20%. Saran yang dapat dilakukan pada zona kerentanan rendah adalah pemantauan berkala dengan pengukuran kualitas air sesuai baku mutu dan edukasi tentang pengelolaan limbah, terutama limbah domestik. Kerentanan sedang mempunyai peluang terkontaminasi sampai dengan 60%. Saran yang dapat dilakukan pada zona kerentanan sedang adalah pemantauan berkala dengan pengukuran kualitas baku mutu, dan pembuatan instalasi pembuangan limbah (IPAL). Kerentanan tinggi mempunyai peluang terkontaminasi sampai dengan 80%. Saran yang dapat dilakukan pada zona kerentanan tinggi adalah dengan pengelolaan limbah dengan wawasan lingkungan dengan pembuatan instalasi pembuangan limbah (IPAL) dan pembuatan sumur pantau. Kerentanan sangat tinggi mempunyai peluang tercemar oleh seluruh polutan (sumber pencemar). Saran yang dapat dilakukan pada zona kerentanan sangat tinggi dalam menjaga potensi pencemaran airtanah adalah dengan pemantauan berkala kuantitas dan kualitas air, dan pembuatan peraturan daerah tentang perlindungan dan pengelolaan limbah.



Gambar 6. Tingkat kerentanan airtanah terhadap pencemaran dengan metode DRASTIC Pulau Bakalan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Dinas Lingkungan Hidup (DLH) Kabupaten Banggai Kepulauan Provinsi Sulawesi Tengah yang telah mendukung dan memfasilitasi penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

Alfiandy, S., Permana, D. S., Nurjaman, A. W., Kurnia, W. G., Prastika, L., Panggabean, H., Rahman, M. S. D. P., Wulandari, S., Setiawan, H., Hendrawan, A., & Miranda. (2020). Analisis Iklim Provinsi Sulawesi Tengah berdasarkan Data Pemantau Cuaca Otomatis BMKG. *Buletin GAW Bariri*, 1(1), 1–11.
<https://doi.org/https://gawpalu.id/bgb/index.php/bgb/article/view/5>

Aller, L., Bennett, T., Lehr, J. H., Petty, R. J., & Hackett, G. (1987a). *DRASTIC; a Standardized System for Evaluating Ground water Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings*. U. S. Environ. Prot. Agency.

Aller, L., Bennett, T., Lehr, J., Petty, R., & Hackett, G. (1987b). *DRASTIC; a Standardized System for Evaluating Ground water Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings*. United States Environmental Protection Agency.

Anim-Gyampo, M., Anornu, G. K., Appiah-Adjei, E. K., &

Agodzo, S. K. (2019). Quality and health risk assessment of shallow groundwater aquifers within the Atankwidi basin of Ghana. *Groundwater for Sustainable Development*, 9, 100217.
<https://doi.org/10.1016/j.gsd.2019.100217>

BIG. (2018). *DEMNAS 2314-441 dan DEMNAS2314-423*. Badan Informasi Geospasial (BIG).

BMKG. (2020a). *Analisis Hujan Agustus 2020 dan Prakiraan Hujan Oktober, November dan Desember 2020*. Pusat Informasi Perubahan Iklim Kedeputusan Bidang Klimatologi Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika.

BMKG. (2020b). *Analisis Hujan April 2020 dan Prakiraan Hujan Juni, Juli dan Agustus 2020*. Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG).

BouDagher-Fadel, & Marcelle, K. (2013). *Biostratigraphic and Geological Significance of Planktonic Foraminifera*. UCLPress. London.

BPLH. (2013). *Kajian Potensi Mataair dan Pengelolaannya Kabupaten Banggai Kepulauan (Laporan Ak)*. Badan Pengelolaan Lingkungan Hidup (BPLH) Kabupaten Banggai Kepulauan.

BPLH. (2014). *Penyusunan Ekoregion dan Rencana Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup (RPPLH) Kabupaten Banggai Kepulauan (Laporan Ak)*. Badan Pengelolaan Lingkungan Hidup (BPLH) Kabupaten Banggai Kepulauan.

BPS. (2020). *Kabupaten Banggai Kepulauan Dalam*

- Angka 2020. Badan Pusat Statistik (BPS) Kabupaten Banggai Kepulauan.
- BSN. (2002). *Standar Nasional Indonesia No. 19-6728.1-2002 Penyusunan Neraca Sumber Daya - Bagian 1: Sumber Daya Air Spasial*. Badan Standardisasi Nasional. Badan Standardisasi Nasional.
- BSN. (2005). *Standar Nasional Indonesia (SNI) no.13-1712-2005 tentang penyelidikan potensi air tanah skala 1:100.000 atau lebih besar*. Badan Standardisasi Nasional (BSN).
- BSN. (2016). *Standar Nasional Indonesia (SNI) Nomor 8283:2016 Metode Pengukuran Kedalaman Menggunakan Alat Perum Gema Untuk Menghasilkan Peta Batimetri*. Badan Standardisasi Nasional (BSN).
- Cahyadi, A. (2019). Analisis Kerentanan Airtanah terhadap Pencemaran di Pulau Korol Sangat Kecil dengan Menggunakan Metode GOD. *Jurnal Geografi*, 16(1), 48–53. <https://doi.org/https://doi.org/10.15294/jg.v16i1.18411>.
- Devianto, L. A., Lusiana, N., & Ramdani, F. (2019). Analisis Kerentanan Pencemaran Air Tanah di Kota Batu Menggunakan Analisis Multikriteria Spasial dengan Indeks DRASTIC. *Jurnal Wilayah Dan Lingkungan*, 7(2), 90–104. <https://doi.org/10.14710/jwl.7.2.90-104>
- DPU. (1996). *Standar Kebutuhan Air Rumah Tangga*. Pengembangan Kawasan Perkotaan, Kawasan Perdesaan Dirjen Pekerjaan Umum.
- Febriarta, E., & Larasati, A. (2020). Karakteristik Akuifer Air Tanah Dangkal Di Endapan Muda Merapi Yogyakarta. *Jurnal Sains Dan Teknologi Lingkungan*, 12(2), 84–99. <https://doi.org/https://doi.org/10.20885/jstl.vol12.iss2.art1>
- Febriarta, E., Marfai, M. A., Hizbaron, D. R., & Larasati, A. (2020). Kajian Spasial Multi Kriteria DRASTIC Kerentanan Air tanah Pesisir Akuifer Batugamping di Tanjungbumi Madura. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 18(3), 476–487. <https://doi.org/10.14710/jil.18.3.476-487>
- Febriarta, E., & Oktama, R. (2020). Pemetaan Daya Dukung Lingkungan Berbasis Jasa Ekosistem Penyedia Pangan Dan Air Bersih Di Kota Pekalongan. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 18(2), 283–289. <https://doi.org/10.14710/jil.18.2.283-289>
- Febriarta, E., Oktama, R., & Purnama, S. (2020). Analisis Daya Dukung Lingkungan Berbasis Jasa Ekosistem Penyediaan Pangan dan Air Bersih di Kabupaten Semarang. *Geomedia: Majalah Ilmiah Dan Informasi Kegeografian*, 18(1), 12–24. <https://doi.org/10.21831/gm.v18i1.30612>
- Febriarta, E., Prabawa, B. A., & Rosaji, F. S. C. (2018). Sumberdaya Air di Pulau Pelapis Kepulauan Karimata, Kabupaten Kayong Utara, Kalimantan Barat. *SEMINAR NASIONAL IV Pengelolaan Pesisir Dan Daerah Aliran Sungai*, 4, 174–181. <https://doi.org/https://doi.org/10.17605/osf.io/v6nx8>
- Febriarta, E., & Purnama, S. (2020). Identifikasi Keterdapatan Airtanah Dengan Electromagnetic Very Low Frequency (EM-VLF) di Non Cekungan Airtanah Kecamatan Ungaran Timur. *Jurnal Geosains Dan Teknologi*, 3(2), 52–62. <https://doi.org/https://doi.org/10.14710/jgt.3.2.2020.52-62>
- Febriarta, E., & Widyastuti, M. (2020). Kajian Kualitas Air Tanah Dampak Intrusi Di Sebagian Pesisir Kabupaten Tuban. *Jurnal Geografi: Media Informasi Pengembangan Dan Profesi Kegeografian*, 17(2), 39–48. <https://doi.org/10.15294/jg.v17i2.24143>
- Ferreira, J. P., Lobo, Oliveira, & Manuel, M. (2004). Groundwater Vulnerability Assessment in Portugal. *Geofisica International*, 4, 541–550.
- Fetter, C. W. (2014). *Applied Hydrogeology*. Pearson New Internasional Edition.
- Gunawan, W. A. F., Sisinggih, D., & Dermawan, V. (2012). Cekungan Airtanah Negara Kabupaten Jembrana. *Jurnal Pengairan Universitas Brawijaya*, 4(2).
- Harter, T., & Walker, L. . (2001). *Booklet: Assessing Vulnerability of Groundwater*. California Departement of Health Services.
- Kalhor, K., Ghasemizadeh, R., Rajic, L., & Alshwabkeh, A. (2019). Assessment of groundwater quality and remediation in karst aquifers: A review. *Groundwater for Sustainable Development*, 8, 104–121. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2018.10.004>
- KESDM. (2012). *Geologi*. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. <https://geoportal.esdm.go.id/geologi/>
- KESDM. (2015a). *Litologi Akuifer*. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. <https://geoportal.esdm.go.id/geologi>
- KESDM. (2015b). *Produktivitas Akuifer*. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.
- KESDM. (2018). *Cekungan Air Tanah (CAT)*. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. <https://geoportal.esdm.go.id/geologi/>
- Lathamani, R., Janardhana, M. R., Mahalingam, B., & Suresha, S. (2015). Evaluation of Aquifer Vulnerability Using Drastic Model and GIS: A Case Study of Mysore City, Karnataka, India. *Aquatic Procedia*, 4, 1031–1038. <https://doi.org/10.1016/j.aapro.2015.02.130>
- Linggasari, S., Cahyadi, T. ., & Ernawati, R. (2019). Overview Metode Perhitungan Kerentanan Airtanah Terhadap Rencana Penambangan. *Prosiding Nasional Rekayasa Teknologi Industri Dan Informasi XIV Tahun 2019 (ReTII)*, 14, 123–129.
- Pacheco, F. A. L., Pires, L. M. G. R., Santos, R. M. B., & Sanches Fernandes, L. F. (2015). Factor weighting in DRASTIC modeling. *Science of The Total Environment*, 505, 474–486. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.09.092>
- Paski, J. A. I. (2018). Analisis Kondisi Atmosfer dengan Memanfaatkan Citra Satelit Cuaca dan Karakteristik Tanah pada Kejadian Tanah Longsor di Pesisir Barat Lampung sepanjang Tahun 2014. *Jurnal Lingkungan Dan Bencana Geologi*, 9(2), 65. <https://doi.org/10.34126/jlbg.v9i2.161>
- Purnama, S., & Cahyadi, A. (2019). Groundwater Vulnerability to Pollution in Kasihan District, Bantul Regency, Indonesia. *Forum Geografi*, 33(2), 140–152. <https://doi.org/10.23917/forgeo.v33i2.7672>
- Purnama, S., Tivianton, T. A., Cahyadi, A., & Febriarta, E. (2019). Kajian Daerah Imbuhan Airtanah di Kabupaten Ngawi. *Kajian Daerah Imbuhan Airtanah Di Kabupaten Ngawi*, 16(1), 54–59. <https://doi.org/10.15294/jg.v16i1.18358>
- Putranto, T. T. (2019). Studi Kerentanan Airtanah Terhadap Pencemaran dengan Menggunakan Metode Drastic Pada Cekungan Airtanah (CAT) Karanganyar-Boyolali, Provinsi Jawa Tengah. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 17(1), 159. <https://doi.org/10.14710/jil.17.1.159-171>

- Putranto, T. T., Widiarso, D. ., & Yuslihanu, F. (2016). Studi Kerentanan Air Tanah Terhadap Kontaminan Menggunakan Metode Drastic di Kota Pekalongan. *Teknik*, 37(1), 26–31.
- Putranto, T. T., Winarno, T., & Susanta, A. P. A. (2020). Risk Assessment of Groundwater Abstraction Vulnerability Using Spatial Analysis: Case Study at Salatiga Groundwater Basin, Indonesia. *Indonesian Journal on Geoscience*, 7(2). <https://doi.org/10.17014/ijog.7.2.215-224>
- RI. (2010). *Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia No.17 Tahun 2012 tentang Penetapan Kawasan Bentang Alam Karst*. Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia.
- Singhal, B. B. ., & Gupta, R. . (2010). *Applied Hydrogeology of Fracture Rock*. Springer Dordrecht Heidelberg London.
- Sisultan. (2017). *Peta Tanah Skala 1:50.000 Sulawesi Tengah*. Sisultan Informasi Sumberdaya Lahan Pertanian (Sisultan) Kementerian Pertanian.
- Sugianti, K., Mulyadi, D., & Maria, R. (2016). Analisis kerentanan pencemaran air tanah dengan pendekatan DRASTIC di Bandung Selatan. *Jurnal Lingkungan Dan Bencana Geologi*, 7(1), 19–33. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.34126/jlbg.v7i1.91>
- Surono, & Sukido. (1993). *Peta Geologi Lembar Kolaka, Sulawesi*. Badan Geologi.
- Thapa, R., Gupta, S., Guin, S., & Kaur, H. (2018). Sensitivity analysis and mapping the potential groundwater vulnerability zones in Birbhum district, India: A comparative approach between vulnerability models. *Water Science*, 32, 44–66.
- Todd, D. K., & Mays, L. W. (2005). *Groundwater Hydrology* (3rd ed.). John Wiley & Sons, Inc.
- Trinanda, T. C. (2017). Pengelolaan Wilayah Pesisir Indonesia dalam Rangka Pembangunan Berbasis Pelestarian Lingkungan. *Matra Pembaruan*, 75–84. <https://doi.org/10.21787/mp.1.2.2017.75-84>
- Vienastra, S., & Febriarta, E. (2018). Karakteristik Airtanah di Pulau Yeben, Kabupaten Raja Ampat, Papua Barat. *Prosiding Pertemuan Ilmiah Tahunan Ke-3 Perhimpunan Ahli Airtanah Indonesia*, 3(November), 108–113. <https://doi.org/https://doi.org/10.17605/OSF.IO/EZHDT>
- Vienastra, S., & Febriarta, E. (2020). Penentuan Zona Kerentanan Airtanah Metode Simple Vertical Vulnerability Di Pulau Yeben. *JURNAL SWARNABHUMI: Jurnal Geografi Dan Pembelajaran Geografi*, 5(2), 58. <https://doi.org/10.31851/swarnabhumi.v5i2.4431>
- Voutchkova, D. D., Schullehner, J., Rasmussen, P., & Hansen, B. (2021). A high-resolution nitrate vulnerability assessment of sandy aquifers (DRASTIC-N). *Journal of Environmental Management*, 277, 111330. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111330>
- Vrba, J., & Zaporozec, A. (1994). *Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability*. International Association of Hydrogeologist.
- White, W. B., Herman, J. S., Herman, E. K., & Rutigliano. (2017). *Advances in Karst Science: Karst Groundwater Contamination and Public*. Springer Switzerland. <http://www.springer.com/series/15147>
- Wicaksono, A. P., Febriarta, E., Nurani, D. T. T., & Larasati, A. (2020). Evaluasi Kebutuhan Air Persemaian Di Kawasan Karst Nggorang Manggarai Barat, Labuan Bajo, Nusa Tenggara Timur. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 18(3), 572–581. <https://doi.org/10.14710/jil.18.3.572-581>
- Yang, S., Ge, W., Chen, H., & Xu, W. (2019). Investigation of soil and groundwater environment in urban area during post-industrial era: A case study of brownfield in Zhenjiang, Jiangsu Province, China. *China Geology*, 3(4), 504–514. <https://doi.org/10.31035/cg2018128>

DINAMIKA KONSENTRASI EMISI GAS KARBON MONOKSIDA (CO) SELAMA PERIODE PSBB MENGGUNAKAN KOMPUTASI BERBASIS CLOUD PADA GOOGLE EARTH ENGINE

Studi Kasus di Provinsi DKI Jakarta, Indonesia

*(Dynamics of Gas Emission Concentration of Monoxide (CO) during PSBB Period Using
Cloud Computing Based on Google Earth Engine, Case Study of DKI Jakarta Province,
Indonesia)*

Sheffiera Indriyaningtyas, Lucky Rakananda Hasandy, dan Bayu Elwantyo B. Dewantoro

Departemen Sains Informasi Geografi, Fakultas Geografi, Universitas Gadjah Mada

Sekip Utara Jalan Kaliurang, Bulaksumur, Yogyakarta, 55281

E-mail: sheffiera00@mail.ugm.ac.id

Diterima: 20 Februari 2021; Direvisi: 5 April 2021; Disetujui untuk Dipublikasikan: 23 April 2021

ABSTRAK

Kondisi pandemi *Coronavirus Disease 2019* (COVID-19) di tahun 2020 menjadikan Provinsi DKI Jakarta yang memiliki kepadatan penduduk tinggi hingga 15.900 jiwa/km² pada tahun 2019 perlu menerapkan Pembatasan Sosial Berskala Besar (PSBB) dengan tujuan untuk mengontrol atau memutus rantai penyebaran COVID-19 sejak ditetapkannya pada April 2020. Kebijakan PSBB yang membatasi kegiatan masyarakat di DKI Jakarta tentunya tak hanya memberikan pengaruh pada kegiatan sosial, namun juga lingkungan akibat berkurangnya intensitas aktivitas masyarakat. Penelitian ini bertujuan untuk melihat pengaruh kebijakan PSBB di DKI Jakarta terhadap variasi emisi gas karbon monoksida (CO) di lapisan atmosfer yang merupakan salah satu parameter dari kualitas udara. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah analisis statistik emisi gas CO dari Citra Sentinel-5P yang diekstraksi menggunakan komputasi berbasis *cloud* pada *Google Earth Engine*. Hasil penelitian menunjukkan adanya tingkat konsentrasi CO rata-rata dan total yang tinggi pada periode waktu 3 Januari- 9 April 2020 (sebelum Penerapan kebijakan PSBB), yaitu sekitar 0.0828 mol/m² dan 21.205 mol. Kemudian, terdapat penurunan konsentrasi CO rata-rata dan total pada periode 10 April - 4 Juni 2020 (penerapan kebijakan PSBB DKI Jakarta), yaitu 0.0769 mol/m² dan 19.673 mol. Namun konsentrasi karbon monoksida kembali meningkat pada periode PSBB Transisi (5 Juni-13 September), yaitu 0.0826 mol/m² dan 21.136 mol.

Kata kunci: Komputasi berbasis-cloud, CO, PSBB, sentinel-5P

ABSTRACT

The conditions of the Coronavirus Disease 2019 (COVID-19) pandemic in 2020 have made DKI Jakarta Province which has a high population density of up to 15,900 people/km² in 2019 needs to implement Large- Scale Social Restrictions (PSBB) with the aim of controll or break the chain of the spread of COVID-19 since its enactment in April 2020. The PSBB policy which limits community activities in DKI Jakarta will certainly not only have an impact on social activities, but also the environment due to the reduced intensity of community activities. This study aims to see the effect of PSBB policy in DKI Jakarta on variations of carbon monoxide (CO) emissions in the atmosphere, which is one of the parameters of air quality. The method used in this research is the statistical analysis of CO gas emissions from Sentinel-5P imagery which is extracted using cloud-based computing on the google earth engine. The results showed that there was a high level of average and total CO concentration in the period January 3 - April 9, 2020 (before the implementation of the PSBB policy), which was around 0.0828 mol/m² and 21,205 mol. Then, there was a decrease in the average and total CO concentration in the period 10 April - 4 June 2020 (implementation of the DKI Jakarta PSBB policy), namely 0.0769 mol/m² and 19,673 mol. However, the concentration of carbon monoxide increased again during the PSBB Transition period (5 June-13 September), namely 0.0826 mol/m² and 21.136 mol.

Keywords: Cloud computing, CO, PSBB, sentinel-5P

PENDAHULUAN

Pembatasan Sosial Berskala Besar (PSBB) merupakan salah satu kebijakan yang diterapkan sebagai dampak dari mewabahnya pandemi COVID-19. Kebijakan ini mengatur dibatasinya kegiatan penduduk pada suatu wilayah guna

mencegah potensi penyebaran virus yang tidak terkendali. DKI Jakarta, merupakan salah satu daerah yang menerapkan kebijakan PSBB. Berdasarkan Keputusan Gubernur Daerah Khusus Ibukota Jakarta nomor 380, 412, 489, 879, dan 959 tahun 2020 yang mengatur tentang penanganan virus COVID-19, diketahui bahwa pemberlakuan

kebijakan PSBB di DKI Jakarta terbagi menjadi tiga fase, yaitu PSBB Total pertama (10 April 2020 – 4 Juni 2020), PSBB Transisi (5 Juni 2020 – 13 September 2020), dan PSBB Total kedua (14 September 2020 – 27 September 2020). Sehubungan dengan fungsinya sebagai ibu kota negara, DKI Jakarta termasuk ke dalam daerah dengan aktivitas penduduk yang sangat padat. Berdasarkan data Badan Pusat Statistik, Provinsi DKI Jakarta tercatat memiliki kepadatan penduduk yang tinggi, dengan angka kepadatan hingga 15.900 jiwa/km² pada tahun 2019. Tingginya angka kepadatan penduduk diikuti dengan dinamika aktivitas yang ada dapat memberikan pengaruh terhadap kualitas udara daerah yang bersangkutan. Sepanjang tahun 2019, kualitas udara DKI Jakarta menurut data dari Dinas Lingkungan Hidup mayoritas terklasifikasikan ke dalam kelas sedang (ISPU 51-100) hingga tidak sehat (ISPU 101-199).

Pengukuran Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU) dilakukan terhadap beberapa parameter, seperti Partikulat (PM10), Sulfur Dioksida (SO₂), Carbon Monoksida (CO), Ozon (O₃), dan Nitrogen Dioksida (NO₂) yang masing-masing memiliki rentang dan pengaruh dalam mendefinisikan kelas-kelas ISPU (Badan Pengendalian Dampak Lingkungan, 1997). Karbon Monoksida (CO) merupakan salah satu parameter pencemar yang banyak dihasilkan dari pembakaran tidak sempurna bahan bakar yang mengandung karbon (Wu & Wang, 2005). Aktivitas manusia yang berperan besar dalam menghasilkan CO adalah *internal combustion engines*, peralatan berbahan bakar gas, minyak, kayu, atau batu bara, dan pembuangan limbah padat. Lebih lanjut, Wu & Wang (2005) juga menjelaskan bahwa proses-proses alami seperti metabolisme dan produksi CO oleh tumbuhan dan kehidupan di laut atau kebakaran hutan turut serta menyumbang kadar CO di atmosfer.

Lin et al., (2020) menyebutkan bahwa COVID-19 yang termasuk ke dalam penyakit pernapasan memiliki kemungkinan untuk dapat diasosiasikan dengan paparan karbon monoksida yang tinggi. Sebagaimana diindikasikan dalam (Zhao et al., 2019), (North et al., 2019), dan (Herve et al., 2018), bahwa paparan karbon monoksida dapat memberikan pengaruh terhadap gejala pernapasan. Hal ini karena inhalasi CO dapat menyebabkan hipoksia jaringan dengan mengikat hemoglobin dan mengurangi kapasitas pembawa oksigen darah (Fujita et al., 2001). Selain memberikan dampak buruk bagi sistem pernapasan, karbon monoksida yang terhirup dalam jumlah berlebih juga dapat mempengaruhi sistem syaraf, sirkulasi darah, sistem reproduktif, gastrointestinal, hati, ginjal dan pankreas (Wu & Wang, 2005). Tak hanya berdampak buruk bagi kesehatan, konsentrasi CO yang tinggi juga berdampak buruk bagi lingkungan. Keberadaan karbon monoksida dalam jumlah berlebih di lapisan troposfer menjadi salah satu penyebab terjadinya efek rumah kaca yang dapat memicu fenomena pemanasan global.

Kebijakan PSBB yang membatasi aktivitas masyarakat diasumsikan dapat memberikan pengaruh pada kadar polusi udara. Pembatasan Sosial Berskala Besar tak hanya membatasi kegiatan yang berhubungan dengan mobilisasi massa dan transportasi, namun juga pada segala sektor termasuk perusahaan dan kegiatan industri. Kebijakan yang diterapkan meliputi penghentian sementara kegiatan perkantoran di lingkungan kementerian perindustrian sesuai yang tercantum dalam surat edaran Menperin No. 2 tahun 2020, serta peraturan terkait pelaksanaan operasional pabrik yang tidak dapat menerapkan kebijakan *work from home* dengan memastikan diterapkannya prosedur keamanan dan keselamatan kerja sebagaimana telah diatur dalam surat edaran Kementerian Perindustrian No. 4 tahun 2020. Diberlakukannya kebijakan - kebijakan ini berpotensi memberikan dampak positif terhadap kualitas udara karena berkurangnya kegiatan yang selama ini menjadi sumber-sumber polutan.

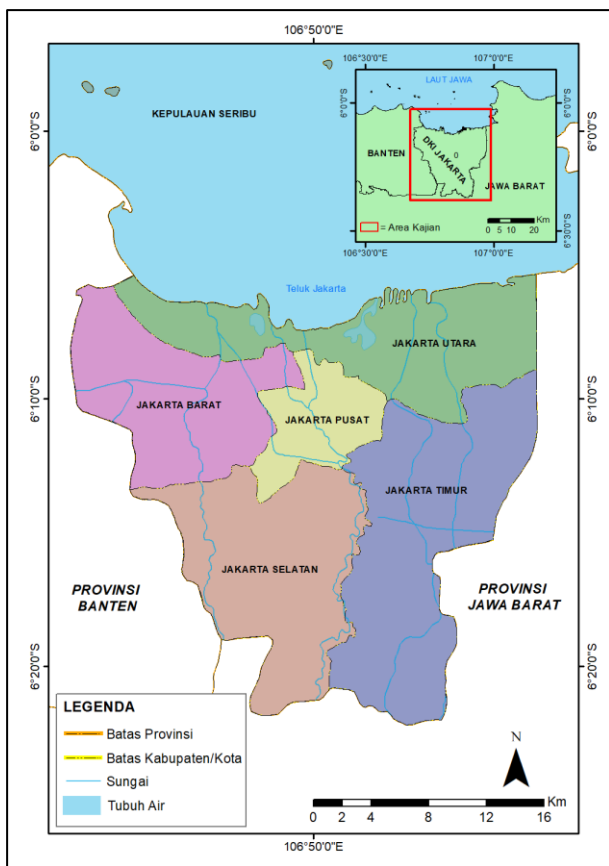
Penginderaan jauh dapat berperan dalam melakukan *monitoring* emisi CO secara multitemporal, hal ini didukung dengan kemampuan deteksi karakteristik spektral untuk pengamatan atribut atmosfer (Dede et al., 2020; Nguyen et al., 2015). Salah satu atribut atmosfer yang dapat dideteksi dan diestimasi adalah indikator kualitas udara berupa emisi gas rumah kaca (GRK), yang salah satunya adalah kandungan karbon monoksida (Martin, 2008; Wald et al., 1999). Menurut Lin et al., (2020), citra satelit penginderaan jauh mampu berperan dalam mengestimasi indikator kualitas udara secara multi-spasiotemporal dan dapat diintegrasikan dengan pengukuran lapangan untuk memastikan akurasi data yang diperoleh.

Penelitian ini bertujuan untuk melihat hubungan antara diterapkannya kebijakan PSBB dengan emisi gas karbon monoksida (CO) melalui citra satelit Sentinel-5P di DKI Jakarta. Sebelumnya, Liu et al., (2021) telah melakukan penelitian terkait dampak COVID-19 terhadap polusi udara di California, USA dan didapat hasil bahwa kebijakan *lockdown* dan *reopening* memang memberikan dampak pada pola spasiotemporal polusi udara di daerah kajian. Adanya kebijakan *lockdown* secara umum mengakibatkan berkurangnya konsentrasi polutan di udara. Hal ini berhubungan dengan aktivitas masyarakat penghasil polusi yang juga turut dibatasi selama diberlakukannya kebijakan *lockdown*. Korelasi ini kembali dibuktikan oleh data yang menunjukkan emisi gas-gas polutan kembali meningkat pada saat kebijakan *reopening* di California diterapkan. Nakada & Urban (2020) juga melakukan penelitian serupa terkait dampak diberlakukannya partial *lockdown* terhadap kualitas udara di São Paulo, Brazil. Peningkatan kualitas udara yang signifikan diamati selama periode partial *lockdown* di São Paulo, dan diperoleh hasil bahwa kebijakan partial *lockdown* terbukti memberikan kontribusi positif terhadap meningkatnya kualitas udara.

METODE

Lokasi Penelitian

Penelitian dilakukan di Provinsi DKI Jakarta yang terletak pada 5°19'12"-6°23'54" Lintang Selatan dan 106°22'42"-106°58'18" Bujur Timur (lihat **Gambar 1**). Provinsi DKI Jakarta merupakan dataran rendah yang berada pada ketinggian rata-rata 7 meter di atas permukaan laut dengan 17 sungai atau kanal yang melewati daerah DKI Jakarta. DKI Jakarta terdiri dari 6 kabupaten dengan jumlah penduduk sebanyak 10.557.810 jiwa pada tahun 2019 dan total area seluas 662.33 km² (BPS, 2020). Suhu rata-rata DKI Jakarta sekitar 28.7°C, kelembaban rata-rata sekitar 74%, dan curah hujan tahunan sekitar 121.65 mm² menurut data dari Stasiun Pengamatan Kemayoran (BPS, 2019).

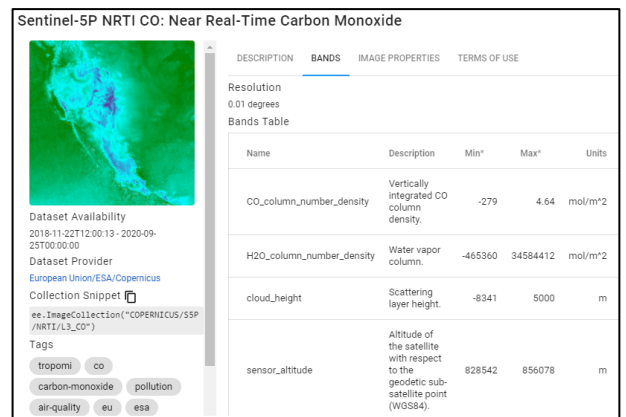


Gambar 1. Lokasi penelitian.

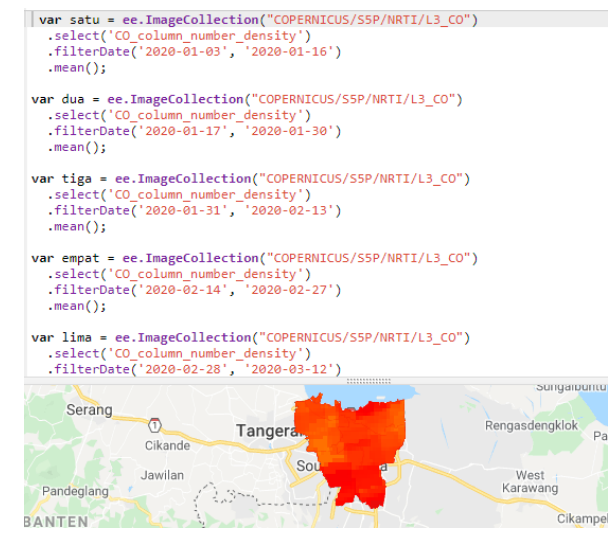
Sumber dan Ekstraksi Data

Penelitian ini memanfaatkan Citra Sentinel-5P TROPOMI yang diluncurkan oleh *European Space Agency* pada 13 Oktober 2017 dengan misi utamanya untuk melakukan *monitoring* kualitas udara dengan beberapa parameter kualitas udara, salah satunya adalah karbon monoksida (CO) (Apituley, 2017). Sentinel-5P TROPOMI memiliki dua tipe produk, yaitu OFFL (*Offline*) dan NRTI (*Near Real-Time*). Informasi karbon monoksida (CO) dilakukan menggunakan komputasi berbasis *cloud* pada *Google Earth Engine*. Level data asli siap analisis yang tersedia berada pada level 2 (L2), namun data tersebut masih berbentuk *granule*

dalam satu orbit perekaman, sehingga memungkinkan untuk komputasi, tiap data dikonversi ke level 3 (L3) yang menjadikan data tidak teragregasi pada satu *granule*. Resolusi spasial Sentinel-5P TROPOMI yang digunakan pada *Google Earth Engine* cukup tinggi bila dibandingkan satelit observasi cuaca lainnya, yaitu 0,01 *degrees* atau sekitar 1,11 km dengan *daily revisit time* yang memungkinkan pengamatan dilakukan setiap hari. Penelitian ini memanfaatkan data NRTI untuk mengakomodir periode waktu perekaman yang cukup detail dari bulan Januari hingga September 2020. Batas kajian yang digunakan meliputi batas administrasi Provinsi DKI Jakarta yang diperoleh dari laman Geoportal Indonesia milik Badan Informasi Geospasial. Metadata Sentinel-5P NRTI CO dapat dilihat pada **Gambar 2**.



Sumber: <https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/sentinel-5p>
Gambar 2. Metadata Sentinel-5P NRTI CO pada *google earth engine*.



Gambar 3. Sebagian *syntax javascript* pada *google earth engine*.

Ekstraksi informasi karbon monoksida (CO) dilakukan dengan memanfaatkan *syntax Javascript* pada *Code Editor Google Earth Engine*. Sebagian *syntax Javascript* yang digunakan dan visualisasi data raster (lihat **Gambar 3**). Algoritma disusun dengan tujuan untuk mendapatkan informasi kolom

kepadatan CO (*CO column density*) sebagai representasi kandungan CO di atmosfer. Ekstraksi kandungan CO dilakukan pada periode PSBB (lihat **Tabel 1**).

Tabel 1. Periode waktu ekstraksi data.

No	Tanggal	Kategori
1	3 - 16 Januari 2020	Sebelum COVID-19
2	17 - 30 Januari 2020	Sebelum COVID-19
3	31 Januari - 13 Februari 2020	Sebelum COVID-19
4	14 - 27 Februari 2020	Sebelum COVID-19
5	28 Februari - 12 Maret 2020	Sebelum COVID-19
6	13 - 26 Maret 2020	Sebelum COVID-19
7	27 Maret - 9 April 2020	Sebelum COVID-19
8	10 -23 April 2020	PSBB Total Jilid 1
9	24 April - 7 Mei 2020	PSBB Total Jilid 1
10	8 Mei - 21 Mei 2020	PSBB Total Jilid 1
11	22 Mei - 4 Juni 2020	PSBB Total Jilid 1
12	5 - 18 Juni 2020	PSBB Transisi
13	19 Juni - 2 Juli 2020	PSBB Transisi
14	3 - 16 Juli 2020	PSBB Transisi
15	17 - 30 Juli 2020	PSBB Transisi
16	31 Juli - 13 Agustus 2020	PSBB Transisi
17	14 - 27 Agustus 2020	PSBB Transisi
18	28 Agustus - 10 September 2020	PSBB Transisi
19	11 - 13 September 2020	PSBB Transisi
20	14 - 27 September 2020	PSBB Total Jilid 2

Analisis Statistik dan Visualisasi Grafis

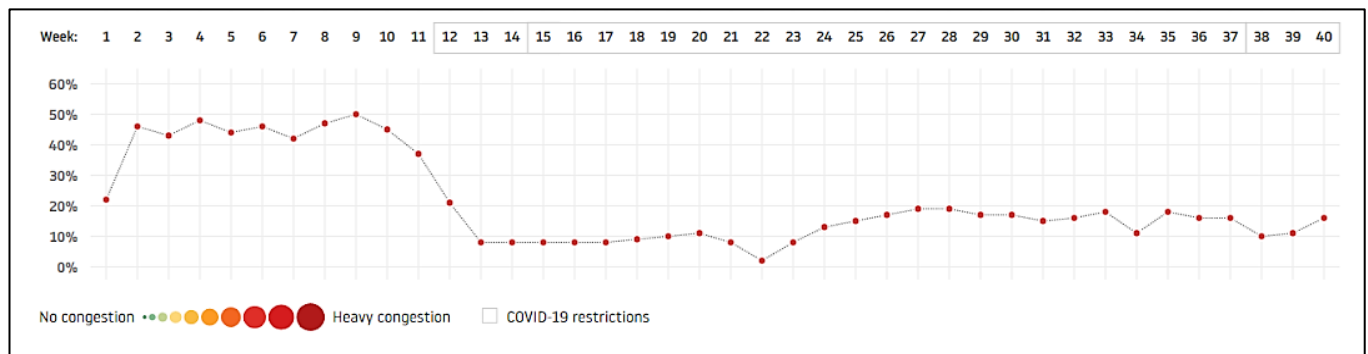
Analisis statistik dilakukan pada Citra Sentinel-5P NRTI CO yang telah diakuisisi dengan cara mengekstraksi nilai piksel yang berupa nilai kandungan CO pada citra dan mengolahnya pada perangkat lunak pengolah kata. Informasi kandungan CO divisualisasikan per-periode waktu

sesuai **Tabel 1** menggunakan grafik garis 2 dimensi untuk mengidentifikasi pola kandungan CO pada periode waktu yang dimaksud.

Visualisasi distribusi spasial kandungan CO dilakukan dengan menginterpolasi data CO yang telah diekstraksi menggunakan metode interpolasi Kriging. Metode interpolasi tersebut dipilih berdasarkan karakteristik stokastik pada data dengan distribusi tidak beraturan, sehingga metode Kriging dipandang mampu melakukan interpolasi dengan lebih objektif (Pramono, 2008). Visualisasi grafis dilakukan dengan *side-by-side mode* sesuai periode waktu yang dimaksudkan untuk memudahkan identifikasi pola distribusi spasial secara visual.

HASIL DAN PEMBAHASAN

DKI Jakarta pada tahun 2019 tercatat sebagai peringkat ke-10 kota termacet di dunia berdasarkan survey dari lembaga pemantau kemacetan lalu lintas, *TomTom Traffic Index*. Data tersebut menunjukkan bahwa kebijakan PSBB yang diterapkan sebagai dampak dari mewabahnya virus COVID-19 memberikan pengaruh terhadap kondisi lalu lintas di DKI Jakarta (lihat **Gambar 4**). Berdasarkan **Gambar 4**, tingkat kemacetan rata-rata di DKI Jakarta mengalami penurunan sejak kebijakan terkait COVID-19 diberlakukan, yaitu pada minggu ke-12, kemudian kembali mengalami kenaikan nilai pada minggu ke-23, bertepatan dengan mulai diterapkannya *PSBB transisi* yang memberikan kelonggaran pada kebijakan terkait pembatasan aktivitas sosial. Kendaraan bermotor, yang merupakan salah satu penyumbang terbesar keberadaan emisi gas karbon monoksida di udara, juga merupakan faktor utama penyebab kemacetan, apabila volume kendaraan pada suatu titik tidak sebanding dengan luas jalan. Hal ini mengindikasikan adanya hubungan antara emisi karbon monoksida (CO) dengan kebijakan PSBB yang membatasi aktivitas masyarakat. Data emisi karbon monoksida (CO) dari Sentinel-5P dimodelkan untuk melihat pengaruh penerapan kebijakan PSBB terhadap kadar emisi karbon monoksida (CO) di udara.



Sumber : https://www.tomtom.com/en_gb/traffic-index/jakarta-traffic
Gambar 4. Grafik tingkat kemacetan rata-rata mingguan Jakarta tahun 2020.

Hasil ekstraksi kandungan karbon monoksida (CO) di Provinsi DKI Jakarta menunjukkan adanya kecenderungan konsentrasi CO yang tinggi di beberapa wilayah DKI Jakarta pada periode waktu tertentu. Analisis distribusi spasial secara visual dilakukan dengan mengelompokkan visualisasi grafis kandungan CO ke dalam masing-masing periode untuk melihat keterkaitan antara *periode sebelum COVID-19*, *periode PSBB*, dan *periode PSBB transisi*. Pola distribusi kandungan CO pada *periode sebelum COVID-19* cenderung memusat di Jakarta Pusat hingga Jakarta Selatan bagian utara dan timur laut (lihat **Gambar 5**). Pemusatan ini didukung oleh masih tingginya aktivitas manusia di daerah tersebut sebelum diberlakukannya kebijakan PSBB di wilayah DKI Jakarta. Pada *periode PSBB*, pola distribusi kandungan CO kemudian menjadi lebih bervariasi (lihat **Gambar 5**). Tidak terlihat pola khusus pada setiap periode waktu selama masa penerapan PSBB. Visualisasi grafis dari konsentrasi CO juga tidak menunjukkan adanya perubahan yang signifikan jika dibandingkan dengan periode sebelumnya. Pada masa *periode PSBB transisi*, distribusi kandungan CO kembali memusat pada daerah tertentu di DKI Jakarta (lihat **Gambar 5**). Visualisasi grafis menunjukkan pola distribusi konsentrasi CO memusat di Jakarta Barat hingga Jakarta Selatan bagian barat. Hal ini sehubungan dengan adanya pelanggaran kebijakan terkait pembatasan aktivitas dibandingkan pada saat periode PSBB total. Berdasarkan hal tersebut, diketahui bahwa visualisasi grafis dari distribusi kandungan CO di Provinsi DKI Jakarta kurang menunjukkan informasi spesifik antara satu periode dengan periode yang lain, dalam hal ini adalah *periode sebelum COVID-19*, *periode PSBB*, dan *periode PSBB Transisi*.

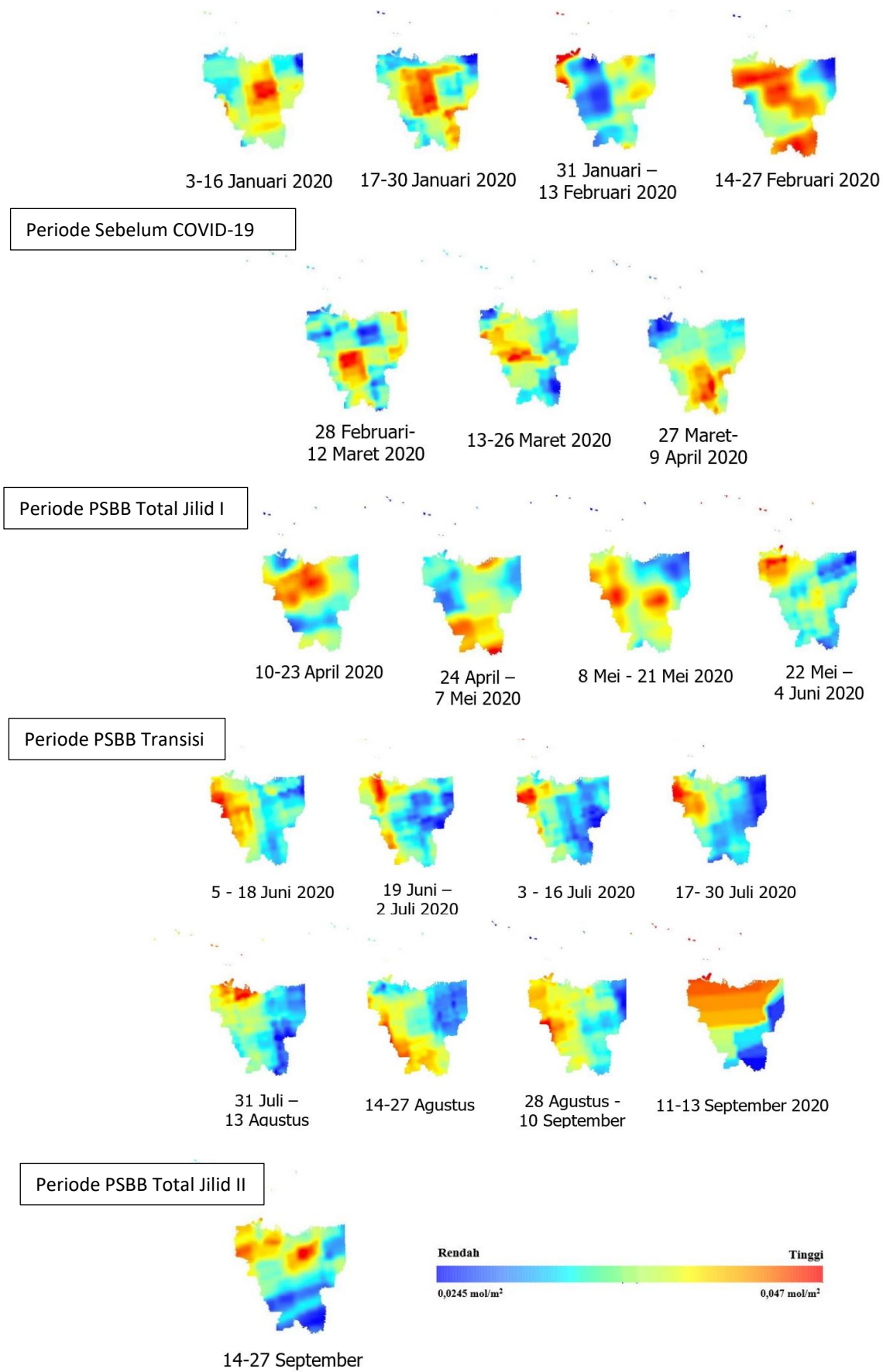
Pengukuran lapangan untuk kepentingan uji akurasi data tidak dapat dilakukan secara *in-situ* dikarenakan keterbatasan alat dan stasiun ukur, biaya, waktu, dan kebijakan PSBB. Data kolom CO total Sentinel-5P TROPOMI yang direpresentasikan dalam penelitian ini telah sesuai dengan pengukuran korelatif berbasis lapangan dari NDACC dan TCCON. Sebagaimana tercantum pada portal resmi VDAF (*Validation Data Analysis Facility*) TROPOMI, dapat diketahui bahwa data Karbon Monoksida (CO) yang diperoleh memiliki

estimasi bias sebesar 6,5% dengan dispersi sebesar 5%. Angka ini telah memenuhi persyaratan misi dengan detail seperti yang dapat dilihat pada **Tabel 2**. Ekstraksi kandungan CO yang divisualisasikan ke dalam bentuk grafik statistik menunjukkan adanya pola fluktuatif pada dinamika konsentrasi CO di DKI Jakarta (lihat **Gambar 6**). Berdasarkan **Gambar 6**, *periode sebelum COVID-19* menunjukkan pola fluktuatif dengan rata-rata konsentrasi CO sebesar 0,0828 mol/m² dan nilai *threshold* sebesar 21,2051 mol. Berdasarkan nilai *threshold* tersebut, terdapat 4 dari 7 periode waktu selama *periode sebelum COVID-19* dengan kadar konsentrasi CO yang melebihi nilai ambang batas. Pada *periode PSBB*, terjadi penurunan rata-rata konsentrasi CO dan nilai *threshold* sebesar 7% menjadi 0.0769 mol/m² dan 19.6733 mol. Meskipun demikian, terdapat 2 dari 4 periode waktu dalam *periode PSBB* yang memiliki kadar konsentrasi CO melebihi nilai ambang batas, salah satunya adalah periode tanggal 8-24 Mei 2020 dengan konsentrasi CO total sebesar 20,679 mol. Periode waktu tersebut merupakan periode dengan nilai konsentrasi CO tertinggi selama *periode PSBB*. Tingginya konsentrasi tersebut memiliki indikasi dipengaruhi oleh adanya kegiatan masyarakat DKI Jakarta dalam menyambut peringatan hari Kenaikan Isa Almasih dan hari Raya Idul Fitri 1441 Hijriah pada tanggal 21 Mei dan 23 Mei 2020. Sedangkan pada *periode PSBB transisi*, rata-rata konsentrasi CO dan nilai *threshold* kembali naik sebesar 6.9% menjadi 0.0826 mol/m² dan 21.1365 mol. Berdasarkan nilai *threshold periode PSBB Transisi*, terdapat 5 dari 9 periode waktu yang memiliki kadar konsentrasi CO melebihi nilai ambang batas. Hal tersebut ditunjukkan dengan adanya peningkatan grafik pada periode waktu 12-20, meskipun dilihat secara relatif. Pelanggaran kebijakan mempengaruhi frekuensi aktivitas masyarakat DKI Jakarta di luar rumah, misalnya pabrik/industri yang masih memperbolehkan karyawannya untuk datang ke pabrik dengan menerapkan protokol kesehatan. Sehingga, variasi konsentrasi CO DKI Jakarta yang ditunjukkan **Gambar 6** juga dipengaruhi oleh aktivitas manusia selama kebijakan PSBB dan PSBB Transisi diselenggarakan.

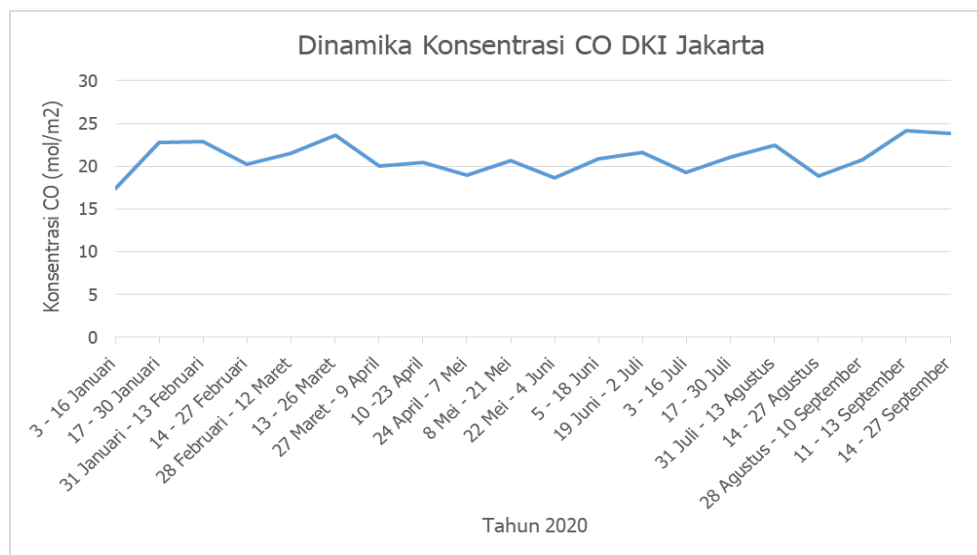
Tabel 2. *Validation summary* data karbon monoksida dari sentinel-5P TROPOMI

Product ID	Stream	Product	Bias	Dispersion	Special Features
L2_CO	NRTI	CO column	6.5%	5%	Along orbit stripes. High pollution underestimated. 5% SZA dependence of bias. Outliers in SAA and other sporadic locations not filtered by qa_value.
	RPRO/OFFL	CO column	6.5%	5%	Since July 2019 NRTI behaves similar as OFFL.

Sumber: <https://s5p-mpc-vdaf.aeronomie.be/index.php/carbon-monoxide>



Gambar 5. Visualisasi grafis kandungan CO di DKI Jakarta pada 3 Januari hingga 27 September 2020.



Gambar 6. Grafik dinamika konsentrasi CO DKI Jakarta.

Pengamatan konsentrasi CO di atmosfer dapat memberikan gambaran terkait frekuensi aktivitas manusia di bawahnya. Kebijakan PSBB yang diterapkan untuk menghentikan rantai penularan virus COVID-19 dirasa sudah tepat karena data konsentrasi CO menunjukkan penurunan selama *periode PSBB*. Akan tetapi, masih diperlukan evaluasi terkait teknis pelaksanaan, yaitu ketertiban masyarakat dalam mematuhi kebijakan tersebut. Pelaksanaan *PSBB Transisi* yang diselenggarakan untuk mempersiapkan masyarakat DKI Jakarta menuju masa *New Normal* menunjukkan adanya peningkatan konsentrasi CO, sejalan dengan aktivitas manusia yang juga meningkat.

KESIMPULAN

Pengolahan Citra Sentinel-5P TROPOMI dengan *cloud-computing Google Earth Engine* terhadap ekstraksi data karbon monoksida (CO) menunjukkan adanya pengaruh dari diberlakukannya kebijakan PSBB terhadap konsentrasi emisi gas karbon monoksida (CO) di DKI Jakarta. Hal ini berkaitan dengan aktivitas manusia selama penerapan kebijakan PSBB di DKI Jakarta. Tingkat konsentrasi karbon monoksida (CO) pada tiga periode penelitian yaitu sebelum penerapan PSBB, pada saat PSBB total, dan saat PSBB transisi menunjukkan adanya perubahan nilai emisi karbon monoksida (CO) di udara. Pada periode sebelum penerapan kebijakan PSBB, yaitu 3 Januari-9 April 2020, CO rata-rata dan total memiliki nilai yang tinggi, yaitu sekitar 0.0828 mol/m² dan 21.205 mol. Kemudian, terdapat penurunan nilai konsentrasi CO rata-rata dan total pada periode diberlakukannya kebijakan PSBB di DKI Jakarta pada 10 April - 4 Juni 2020, yaitu dengan rata-rata sebesar 0.0769 mol/m² dan konsentrasi total sebesar 19.673 mol. Konsentrasi karbon monoksida kembali meningkat pada periode PSBB Transisi (5 Juni-13 September), yaitu 0.0826 mol/m² dan 21.136 mol.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Tuhan Yang Maha Esa karena atas rahmat-Nya menjadikan penulis dapat menyelesaikan penelitian ini. Penulis juga mengucapkan terimakasih kepada Departemen Sains Informasi Geografi, Fakultas Geografi, Universitas Gadjah Mada. Selain itu, penulis mengucapkan terimakasih kepada European Space Agency yang telah menyediakan citra penginderaan jauh secara gratis sehingga mendukung terwujudnya penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Apituley, A. (2017). *Level 2 Product User Manual KNMI level 2 support products*.
- Badan Pengendalian Dampak Lingkungan. (1997). *Keputusan Badan pengendalian dampak lingkungan (KABAPEDAL)*. 13–36.
- Badan Pusat Statistik. (2019). [Online]. Available: <https://jabar.bps.go.id/>. [Accessed 21 10 2020].
- Dede, M., Widiawaty, M. A., Nurhanifah, N., Ismail, A., Artati, A. R. P., Ati, A., & Ramadhan, Y. R. (2020). Estimasi Perubahan Kualitas Udara Berbasis Citra Satelit Penginderaan Jauh Di Sekitar PLTU Cirebon. *Jambura Geoscience Review*, 2(2), 78–87. <https://doi.org/10.34312/jgeosrev.v2i2.5951>
- Fujita, T., Toda, K., Karimova, A., Yan, S.-F., Naka, Y., Yet, S.-F., & Pinsky, D. J. (2001). Paradoxical rescue from ischemic lung injury by inhaled carbon monoxide driven by derepression of fibrinolysis. *Nature Medicine*, 7(5). <https://doi.org/10.1038/87929>
- Herve, L., Lucie, A. F., Arsene, K., Vikkey, H., John, B., Jacqueline, W., Maxime, A. B., & Benjamin, F. (2018). Comparison of motorcycle taxi driver's respiratory health using an air quality standard for carbon monoxide in ambient air: a pilot survey in Benin. *Pan African Medical Journal*, 30. <https://doi.org/10.11604/pamj.2018.30.113.14975>
- Keputusan Gubernur Daerah Khusus Ibukota Jakarta. (2020). *Pemberlakuan Pelaksanaan Pembatasan Sosial Berskala Besar dalam Penanganan Corona*

- Virus Disease. Keputusan Gubernur Nomor: 380 Tahun 2020. Gubernur Jawa Barat. Bandung
- Keputusan Gubernur Daerah Khusus Ibukota Jakarta. (2020). Perpanjangan Pemberlakuan Pembatasan Sosial Berskala Besar dalam Penanganan Corona Virus Disease 2019 (COVID-19) di Provinsi Daerah Khusus Ibukota Jakarta. Keputusan Gubernur Nomor: 412, 489, 879, 959 Tahun 2020. Gubernur Jawa Barat. Bandung
- Lin, S., Wei, D., Sun, Y., Chen, K., Yang, L., Liu, B., Huang, Q., Bastos Paoliello, M. M., Li, H., & Wu, S. (2020). Region-specific air pollutants and meteorological parameters influence COVID-19: A study from mainland China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 204(July), 111035. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111035>
- Liu, Q., Harris, J. T., Chiu, L. S., Sun, D., Houser, P. R., Yu, M., Duffy, D. Q., Little, M. M., & Yang, C. (2021). Spatiotemporal impacts of COVID-19 on air pollution in California, USA. *Science of the Total Environment*, 750, 141592. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141592>
- Martin, R. V. (2008). Satellite remote sensing of surface air quality. *Atmospheric Environment*, 42(34). <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.07.018>
- Nakada, L. Y. K., & Urban, R. C. (2020). COVID-19 pandemic: Impacts on the air quality during the partial lockdown in São Paulo state, Brazil. *Science of the Total Environment*, 730, 139087. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139087>
- Nguyen, T. T. N., Bui, H. Q., Pham, H. V., Luu, H. V., Man, C. D., Pham, H. N., Le, H. T., & Nguyen, T. T. (2015). Particulate matter concentration mapping from MODIS satellite data: A Vietnamese case study. *Environmental Research Letters*, 10(9). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/9/095016>
- North, C. M., MacNaughton, P., Lai, P. S., Vallarino, J., Okello, S., Kakuhikire, B., Tsai, A. C., Castro, M. C., Siedner, M. J., Allen, J. G., & Christiani, D. C. (2019). Personal carbon monoxide exposure, respiratory symptoms, and the potentially modifying roles of sex and HIV infection in rural Uganda: a cohort study. *Environmental Health*, 18(1). <https://doi.org/10.1186/s12940-019-0517-z>
- Pramono, G. H. (2008). Accuracy of the IDW and kriging methods for interpolating the suspended sediment distribution in Maros, South Sulawesi. *Forum Geografi*, 22(1), 145158.
- Wald, L., Basly, L., & Baleynaud, J. M. (1999). Satellite data for the air pollution mapping. *Operational Remote Sensing for Sustainable Development*, May 2014, 133–139.
- Wu, L., & Wang, R. (2005). Carbon Monoxide: Endogenous Production, Physiological Functions, and Pharmacological Applications. *Pharmacological Reviews*, 57(4). <https://doi.org/10.1124/pr.57.4.3>
- Zhao, Y., Hu, J., Tan, Z., Liu, T., Zeng, W., Li, X., Huang, C., Wang, S., Huang, Z., & Ma, W. (2019). Ambient carbon monoxide and increased risk of daily hospital outpatient visits for respiratory diseases in Dongguan, China. *Science of The Total Environment*, 668. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.333>

PETA TIGA DIMENSI (3D) CITYGML UNTUK SIMULASI ALIRAN ANGIN MENGGUNAKAN OPENFOAM

(Three-Dimensional (3D) CityGML Map for Wind Flow Simulation Using OpenFOAM)

Ghalizha Z. Izzaty, Deni Suwardhi, Wiwin Windupranata, Agung Budi Harto, Dudy D. Wijaya, Arnadi Murtiyoso, Budhy Soeksmantono

Teknik Geodesi dan Geomatika, Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumihan, Institut Teknologi Bandung
Labtek IX-C Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesha No. 10, Bandung
E-mail: ghalizha.zahra@gmail.com

Diterima: 3 Februari 2021; Direvisi: 9 Maret 2021; Disetujui untuk Dipublikasikan: 23 April 2021

ABSTRAK

CityGML merupakan model data yang bersifat terbuka untuk memodelkan wilayah perkotaan maupun lanskap secara 3D. Dari lima tingkat perincian/*Level of Detail* (LOD) pada CityGML, LOD1 dan LOD2 menjadi tingkat perincian yang penting karena dimilikinya informasi mengenai struktur atap bangunan yang merupakan syarat data dalam pelaksanaan aplikasi seperti perencanaan detail maupun penataan lingkungan dan bangunan. Dalam mendukung perencanaan dan pengembangan perkotaan dan lanskap yang berkelanjutan, pengetahuan mengenai efek aliran angin di sekitar bangunan menjadi hal yang penting dalam menyelesaikan permasalahan perkotaan yang berkaitan dengan aliran angin. Integrasi model 3D CityGML dengan perangkat lunak simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) OpenFOAM dapat memberikan visualisasi dan informasi mengenai aliran angin di perkotaan dengan lebih baik. Makalah ini mempunyai tujuan untuk membangun dan memvalidasi model 3D CityGML LOD1 lanskap dari data DSM, DTM, dan tutupan lahan serta menerapkan simulasi aliran angin pada model 3D CityGML LOD1 lanskap yang telah dibangun dengan menggunakan perangkat lunak OpenFOAM. Model 3D LOD1 direkonstruksi dari data *Digital Surface Model* dan peta vektor 2D Kampus ITB Jatinangor, sedangkan bentuk atap pada model 3D LOD2 dihasilkan dari pengamatan stereo fotogrametri. Hasil simulasi aliran angin menunjukkan pengaruh model 3D LOD1 terhadap aliran angin berupa perubahan arah dan kecepatan, serta geometri model 3D LOD1 bangunan dan pohon menyebabkan informasi aliran angin menjadi kurang akurat di sekitar atap bangunan dan di sekeliling pohon. Hal ini dapat diperbaiki dengan menambah tingkat perincian model yang digunakan menjadi LOD2.

Kata kunci: CityGML, *level of detail*, simulasi aliran angin, OpenFOAM

ABSTRACT

CityGML is an international open data model used to model cities and landscapes in 3D with extensive semantics. In a CityGML dataset, LOD1 and LOD2 are essential in terms of performing advanced applications as it contains information about roof structures, especially when it comes to a detailed urban and environmental planning. In the perspective of sustainable urban planning, wind flow is a fundamental and important factor to evaluate and must be taken into account in practically any urban planning process. CityGML, with its urban and geometric concepts and their semantic relationships, can be useful for representing a wind flow analysis, as it could provide more precise and effective results when being integrated with a Computational Fluid Dynamics (CFD) software OpenFOAM to perform a wind flow simulation. This research demonstrates the process of urban wind flow simulation in ITB Jatinangor Campus with the use of CityGML LOD1 3D models. Point clouds obtained from a Digital Surface Model and a 2D topographical map of ITB Jatinangor Campus are used for the creation of 3D city models. Wind flow simulation with LOD1 models results in a generally correct visualization of wind flow effects around buildings, except for the heights where the buildings' roofs are supposed to be, as well as the area with trees in it. This can be resolved by upgrading the level of detail to LOD2 models.

Keywords: CityGML, *level of detail*, urban wind flow simulation, OpenFOAM

PENDAHULUAN

Angin adalah udara yang bergerak karena adanya perbedaan tekanan di permukaan bumi. Angin memiliki peran dan dampak yang besar dalam kehidupan sehari-hari, baik itu positif atau negatif, sehingga tidak heran apabila pengaruh aliran angin dalam suatu kawasan perkotaan menjadi pertimbangan penting dalam perencanaan suatu kegiatan dan atau pembangunan yang

menyangkut banyak orang. Di perkotaan, pengaruh efek aliran angin telah banyak dibicarakan oleh perancang, pembangun, maupun peneliti lingkungan kota dan lanskap. Kegiatan pemantauan serta analisis aliran angin sebagai bentuk usaha dalam menyikapi permasalahan aliran angin di perkotaan pun beragam bentuknya.

Analisis aliran angin pada umumnya dilakukan untuk menemukan suatu solusi atas suatu permasalahan aliran angin di perkotaan, meskipun

tidak menutup kemungkinan bahwa analisis aliran angin juga dapat ditujukan sebagai bentuk pengembangan fungsi kota dan lanskap yang berkaitan dengan aspek lingkungan seperti persebaran polusi udara, perpindahan termal pada bangunan, emisi karbon, dan berbagai aspek lingkungan lainnya. Selain itu, bentuk analisis yang dilakukan juga dapat berupa pemantauan aliran angin yang ditujukan untuk penilaian dalam aspek kenyamanan dan keselamatan, misalnya untuk menilai tingkat kenyamanan pejalan kaki (*wind comfort pedestrian*) berdasarkan kecepatan aliran angin pada suatu kawasan perkotaan. Mengingat bahwa kawasan perkotaan memiliki jumlah bangunan dan infrastruktur yang tidak sedikit serta karakteristik geospasial yang multiobjek, multistruktur, dan bermacam jenis (David Batara, 2012), maka dibutuhkan metode visualisasi yang tepat untuk melakukan pemodelan serta simulasi aliran angin di perkotaan.

Integrasi model 3D perkotaan dalam simulasi aliran angin merupakan salah satu metode yang dapat membantu memberikan visualisasi yang lebih akurat serta memberikan informasi atribut dan analisis yang lebih efektif dalam simulasi aliran angin perkotaan dan lanskap. City Geographic Markup Language (CityGML) adalah salah satu format model data 3D yang dapat mendefinisikan berbagai objek topografi seperti bangunan, jembatan, vegetasi, fasilitas transportasi, dan lain-lain dan terfokus pada aspek geometri tiga dimensi, topologi, semantik, maupun tampilan dari objek, yang dapat digunakan untuk analisis lanjutan (G. Gröger, Kolbe, Czerwinski, & Nagel, 2008). CityGML juga membedakan tingkat kedetailan setiap objeknya dengan Level of Detail (LOD) yang memiliki batas semantik dan bentuk geometri yang berbeda-beda untuk masing-masing tingkat LOD serta dapat merepresentasikan heterogenitas infrastruktur perkotaan dan lanskap.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk membangun dan memvalidasi model 3D CityGML LOD1 lanskap dari data DSM, DTM, dan tutupan lahan serta menerapkan simulasi aliran angin pada model 3D CityGML LOD1 lanskap yang telah dibangun dengan menggunakan perangkat lunak OpenFOAM. Dengan mengintegrasikan model 3D ini, simulasi aliran angin diharapkan dapat memberikan informasi yang lebih akurat, sehingga hasil simulasi dapat dijadikan acuan dalam perencanaan, pembangunan, serta pengambilan kebijakan terkait permasalahan aliran angin di kawasan perkotaan dan lanskap.

METODE

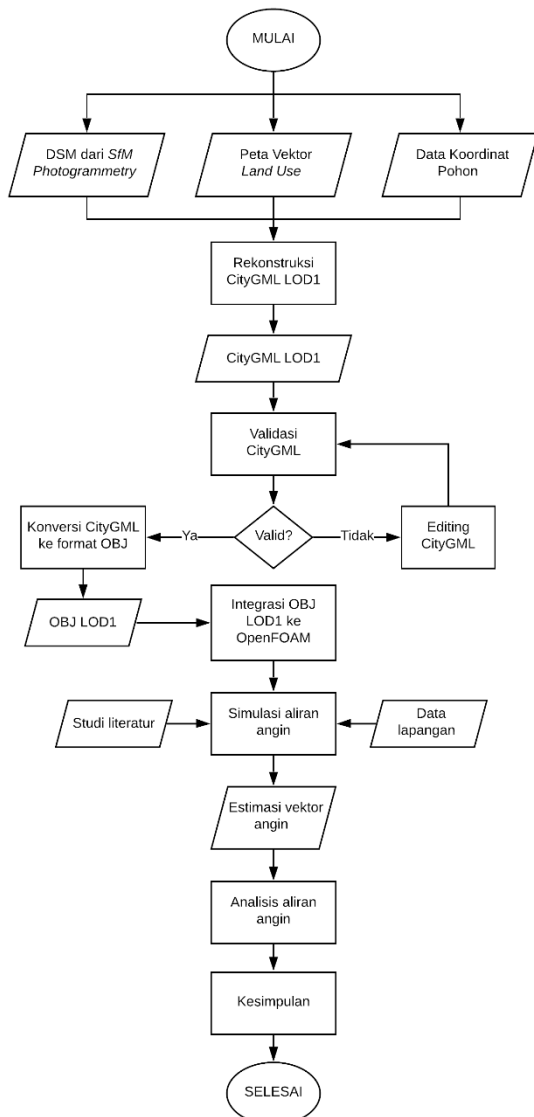
Penelitian ini menggunakan data *Digital Surface Model* (DSM) Kampus ITB Jatinangor dengan resolusi 50 cm dari proses *Structure from Motion Photogrammetry*, peta vektor 2D penggunaan lahan Kampus ITB Jatinangor yang merupakan hasil digitasi ortofoto, serta koordinat sebaran pohon untuk merekonstruksi model 3D

CityGML LOD1 Kampus ITB Jatinangor. Kampus ITB Jatinangor dipilih sebagai area penelitian dengan mempertimbangkan faktor geografis serta objek-objek guna lahan yang variatif di dalam area kampusnya, sehingga nantinya hasil penelitian ini diharapkan dapat merepresentasikan kawasan perkotaan yang sebenarnya.

City Geographic Markup Language (CityGML) adalah standar internasional yang dibuat oleh *Open Geospatial Consortium* (OGC) yang mendefinisikan representasi dan pertukaran objek model kota 3D (Gerhard Gröger & Plümer, 2012). Secara konsep, rekonstruksi model 3D CityGML LOD1 Kampus ITB Jatinangor dilakukan dengan cara memberikan elevasi terhadap peta vektor 2D guna lahan dengan menggunakan perangkat lunak 3Dfier. Dalam hal ini, nilai elevasi model 3D diperoleh dari data point clouds yang merupakan hasil pengolahan Digital Surface Model area Kampus ITB Jatinangor. Peta vektor 2D guna lahan Kampus ITB Jatinangor berperan sebagai deliniasi objek-objek yang akan direkonstruksi menjadi model 3D, dimana setiap kelas penggunaan lahan yang terkandung di dalam peta ini diekstrak menjadi layer-layer yang terpisah dan dikonversi menjadi format SQLite agar dapat terbaca dalam script pemrograman. Jenis guna lahan yang dimaksud dalam hal ini adalah objek-objek yang telah terdefinisi dalam ASPRS Standard LIDAR Point Classes v1.4 seperti bangunan, perairan, jalan, vegetasi, dan permukaan tanah (terrain).

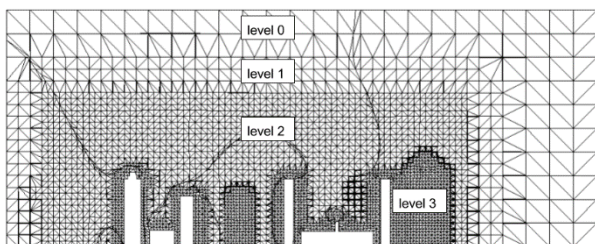
Setelah model 3D berhasil direkonstruksi, geometri model 3D CityGML LOD1 Kampus ITB Jatinangor divalidasi dengan aplikasi val3dity sebelum disimplifikasi dan dikonversi ke dalam format Wavefront OBJ (*.obj) untuk dijadikan data masukan dalam simulasi aliran angin. Validitas geometri model 3D CityGML LOD1 lanskap yang dihasilkan dapat dijamin dengan syarat tidak boleh ada kesalahan geometri pada objek primitif pembentuk model 3D-nya.

Validasi geometri model 3D CityGML LOD1 ini diperlukan karena kualitas hasil analisis aliran angin akan bergantung pada ketepatan geometri model 3D yang digunakan. Simulasi aliran angin di Kampus ITB Jatinangor dilakukan dengan perangkat lunak CFD (Computational Fluid Dynamics) OpenFOAM dengan memasukkan parameter arah datang angin dan kecepatan awal angin yang mengacu kepada data lapangan Kecamatan Jatinangor tahun 2009, sementara parameter fisis angin lainnya didapatkan dari hasil studi literatur. Perlu diperhatikan bahwa dalam penelitian ini, simulasi aliran angin tidak mempertimbangkan pengaruh gaya gesek yang dihasilkan oleh bangunan, pohon, dan topografi. Untuk lebih lengkapnya, alur kerja penelitian ini ditunjukkan pada **Gambar 1** dalam bentuk diagram alir.



Gambar 1. Diagram alir penelitian.

Block meshing dan hex meshing merupakan tahapan pembentukan domain spasial dan mesh geometri yang akan dijadikan objek simulasi. Konsep dasarnya adalah membagi sel mesh hasil proses block meshing menjadi sel-sel yang lebih kecil untuk disesuaikan dengan permukaan objek geometri masukan dan memindahkannya ke dalam mesh domain. Proses pembagian sel mesh menjadi sel-sel yang lebih kecil dikenal dengan istilah cell refinement. Gambar 2 menunjukkan ilustrasi konsep cell refinement level pada suatu objek geometri.



Sumber: www.ansys.com.

Gambar 2. Ilustrasi konsep cell refinement level.

Dalam penelitian ini, simulasi aliran angin dilakukan menggunakan algoritma SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equation). Metode ini menggunakan hubungan antara kecepatan dan tekanan untuk mendapatkan nilai konservasi massa dan nilai bidang tekan, dengan persamaan kecepatan dikoreksi untuk menghitung satu set baru fluks konservatif (ANSYS, 2011). Proses perhitungan data input dengan persamaan yang terlibat secara iteratif dilakukan dalam tahapan ini. Artinya, perhitungan dilakukan hingga hasil menuju galat terkecil atau hingga mencapai nilai yang konvergen. Secara spesifik, pemodelan fluida dinamis dengan algoritma SIMPLE diselesaikan melalui persamaan kontinuitas sebagai berikut (Caretto, Gosman, Patankar, & Spalding, 2007):

$$\nabla \cdot U = 0 \dots\dots\dots (1)$$

di mana:

∇ = simbol operator matematika dari gradien vektor
 U = vektor kecepatan aliran angin

Dan persamaan momentum (Caretto et al., 1972):

$$\frac{\partial}{\partial t}(U) + \nabla \cdot (U \otimes U) = -\nabla p \dots\dots\dots (2)$$

di mana:

\otimes = symbol perkalian vektor cross
 p = nilai tekanan kinematik (m^2/s^2)

Sementara itu, model turbulensi kinetik yang digunakan dalam penelitian ini adalah Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) kappa-epsilon ($k-\epsilon$) yang persamaannya dijelaskan sebagai berikut (Launder & Spalding, 1974):

$$\frac{D}{Dt}(\rho k) = \nabla \cdot (\rho Dk \nabla k) + P - \rho \epsilon \dots\dots\dots (3)$$

di mana:

k = energi kinetik turbulensi (m^2/s^2)
 D_k = koefisien difusivitas efektif untuk k
 ρ = densitas fluida
 P = laju produksi energi kinetik turbulensi (m^2/s^3)
 ϵ = laju disipasi energi kinetik turbulensi (m^2/s^3)

Pendefinisian parameter fisis awal angin pada saluran masuk (inlet) untuk arah datang dan kecepatan awal mengacu pada data lapangan area Kecamatan Jatinangor tahun 2009, yaitu 288° terhadap arah utara untuk arah datang angin dan $0,75 \text{ m/s}$ untuk kecepatan awal angin. Sementara itu, nilai kondisi awal untuk besaran fisis angin lainnya seperti tekanan (p), energi kinetik turbulensi (k), dan laju disipasi turbulensi (ϵ) diperoleh dari studi literatur yang melakukan penelitian terhadap aliran angin di wilayah perkotaan/lanskap dengan nilai kecepatan awal yang serupa (Yoshie et al., 2007). Nilai awal untuk seluruh besaran fisis pada saluran masuk dapat dilihat di Tabel 1.

Tabel 1. Nilai besaran fisis awal angin pada saluran masuk.

Batas	U (m/s)	p (m ² /s ²)	k (m ² /s ²)	ε (m ² /s ³)
<i>Inlet</i> (arah 288°)	<i>Fixed Value</i> 0,75	0	<i>Fixed Value</i> 1,5	<i>Fixed Value</i> 0,03

Sumber: Yoshie, (2007).

Dalam hal ini, tekanan kinematik merupakan hasil bagi antara tekanan statis (dalam satuan Pa) dengan massa jenis fluida (ρ) dan dinyatakan dalam satuan meter kuadrat per detik kuadrat, dan vektor kecepatan angin adalah jarak tempuh angin dalam satuan meter per detik dalam komponen arah X, Y, dan Z. Sementara itu, energi kinetik turbulensi adalah energi kinetik per satuan massa dari fluktuasi turbulensi pada aliran turbulensi dan laju disipasi turbulensi adalah laju dimana energi kinetik turbulensi berubah menjadi energi dalam termal (Siswantara, Daryus, & Budiarmo, 2016).

Selain mendefinisikan parameter fisis awal, pada tahap ini juga dilakukan pendefinisian bidang yang dianggap permukaan tanah (*ground*), saluran masuk (*inlet*), serta saluran keluar (*outlet*) untuk aliran fluida berdasarkan bentuk *block mesh* yang telah dibuat sebelumnya. Pendefinisian ini dilakukan dengan cara mengubah karakteristik tiap-tiap bidang yang selanjutnya dikenal dengan istilah kondisi batas (*boundary conditions*).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Visualisasi hasil rekonstruksi model 3D Kampus ITB Jatinangor dalam CityGML LOD1 dapat dilihat pada **Gambar 3**. Model 3D harus dipastikan tidak memiliki kesalahan geometri sebelum dapat dijadikan objek simulasi aliran angin. Kesalahan geometri pada model 3D dapat menyebabkan perambatan kesalahan yang pada akhirnya dapat memengaruhi hasil simulasi aliran angin. Validasi geometri model 3D dilakukan dengan aplikasi val3dity yang menghasilkan laporan identifikasi kesalahan geometri seperti yang dijelaskan pada **Tabel 2** (Ledoux, 2018).

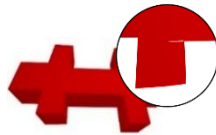
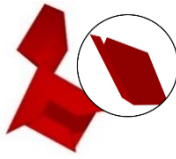
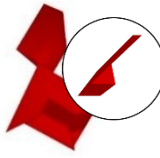


Gambar 3. Hasil rekonstruksi model 3D CityGML LOD1 Kampus ITB Jatinangor.

Biljecki (2016) juga menjelaskan beberapa kesalahan geometri yang umum ditemukan pada model 3D CityGML, yaitu *Rings Self-Intersection* (poligon tidak tertutup sempurna), *Shell Not Closed* (adanya lubang pada geometri model 3D), dan *Non-*

Manifold Case (akibat poligon tidak melipat sempurna) (Biljecki et al., 2016). Perbaikan geometri invalid dilakukan dengan cara mencari tahu dari mana kesalahan tersebut berasal.

Tabel 2. Kesalahan geometri LOD1 CityGML yang teridentifikasi.

Geometri	Nama Kesalahan	Jumlah Invalid
	<i>Self-Intersecting</i>	6
	<i>Non-Manifold</i>	3
	<i>Shell Not Closed</i>	2

Setelah memastikan bahwa seluruh geometri model 3D Kampus ITB Jatinangor telah valid, model 3D LOD1 CityGML harus dikonversi menjadi bentuk Wavefront OBJ (*.obj) terlebih dahulu agar dapat dijadikan data masukan dalam tahapan *pre-processing* yang berikutnya. Simplifikasi model 3D *terrain* Kampus ITB Jatinangor dilakukan dengan cara mengganti *terrain* dari model 3D yang telah direkonstruksi sebelumnya dengan *Digital Terrain Model (DTM)* Kampus ITB Jatinangor. Sementara itu, dalam rekonstruksi model 3D LOD1 pohon di Kampus ITB Jatinangor, pohon merupakan model silinder vertikal yang memiliki ketinggian (Gobeawan et al., 2018).

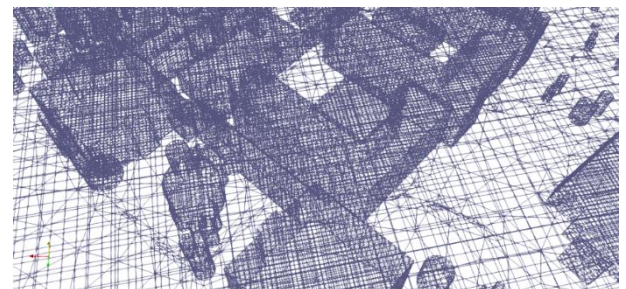
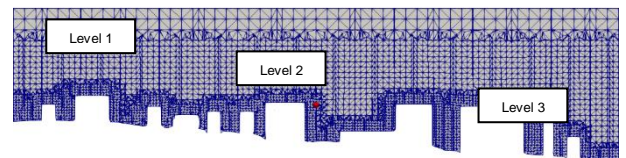
Dalam hal ini, diameter masing-masing silinder pohon akan mengacu kepada estimasi diameter kanopi pohon yang diperoleh berdasarkan hasil segmentasi manual pada ortofoto Kampus ITB Jatinangor, sementara tinggi masing-masing silinder pohon akan mengacu kepada tinggi pohon yang diperoleh secara semi-otomatis dari nDSM (Trisyanti, Suwardhi, & Harto, 2017).



Gambar 3. Hasil rekonstruksi model 3D pohon di Kampus ITB Jatiningor.

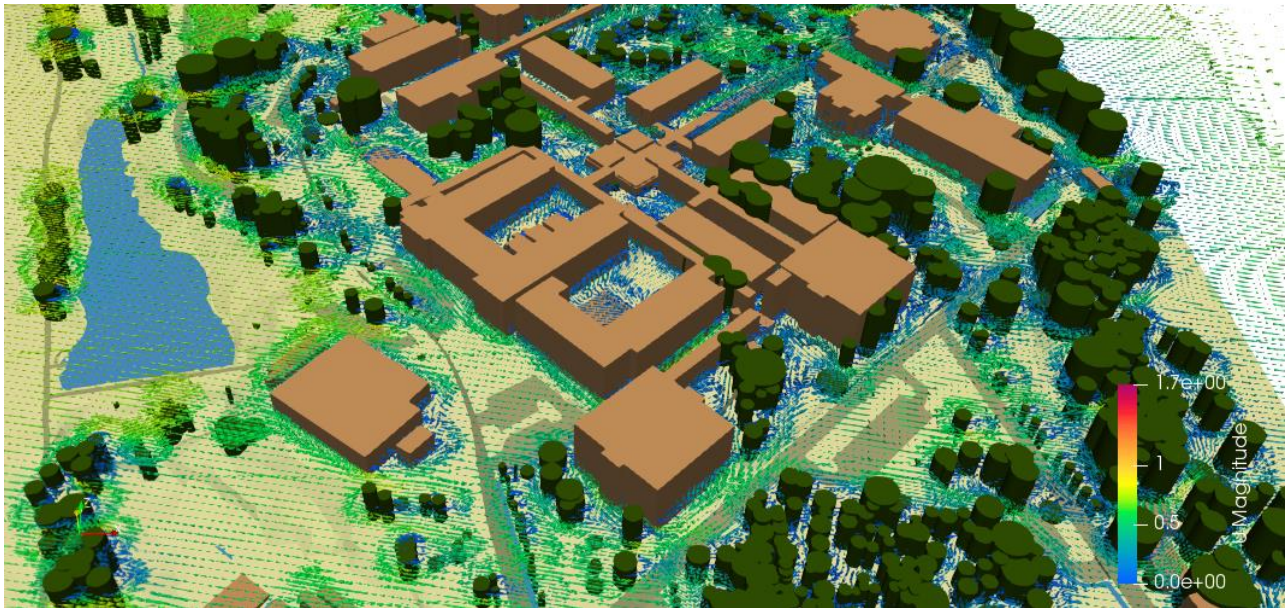
Hasil rekonstruksi model 3D pohon LOD1 di Kampus ITB Jatiningor kemudian dikonversi ke dalam format OBJ agar dapat disimulasikan, yang diilustrasikan dalam **Gambar 4**. Simulasi aliran angin akan dilakukan dengan memanfaatkan sebuah *block mesh* berbentuk balok berukuran 1320 x 1030 x 112 meter sebagai domain kerja dengan ukuran sel *grid* sebesar 8 meter. Integrasi geometri model 3D Kampus ITB Jatiningor ke dalam *block mesh* ini dilakukan dengan metode *hex meshing* dan *cell refinement*. *Hex Meshing* merupakan tahapan pembentukan *mesh* geometri yang akan dijadikan objek simulasi. Konsep dasarnya adalah membagi sel *mesh* hasil proses *block meshing* menjadi sel-sel yang lebih kecil untuk disesuaikan dengan permukaan objek geometri masukan dan memindahkannya ke dalam *mesh* domain. Dalam metode ini, *refinement level* yang digunakan untuk memindahkan geometri model 3D adalah Level 3, yang artinya ukuran sel *block mesh* akan terbagi menjadi sebanyak 2^3 grid yang lebih kecil dari ukuran sel awal, yaitu 8 meter. Ini berarti proses *hex meshing* akan menghasilkan ukuran sel terkecil sebesar 1 meter.

Dalam hal ini, ukuran sel terkecil yang digunakan dalam proses *cell refinement* akan mempengaruhi hasil *hex meshing*. Ukuran sel yang lebih kecil akan lebih mudah menangkap detail-detail geometri seperti sudut bangunan dan topografi daripada ukuran sel yang lebih besar, dan semakin akurat *hex mesh* yang dihasilkan, akan semakin akurat juga hasil simulasi aliran angin. Contoh hasil *hex meshing* geometri model 3D Kampus ITB Jatiningor lainnya diilustrasikan pada **Gambar 5**. Sebuah penampang yang terletak sejajar dengan bidang YZ diekstrak untuk memperlihatkan profil samping dari hasil akhir *hex meshing* Kampus ITB Jatiningor.



Gambar 5. Profil samping (atas) dan hasil hex meshing (bawah) model 3D Kampus ITB Jatiningor.

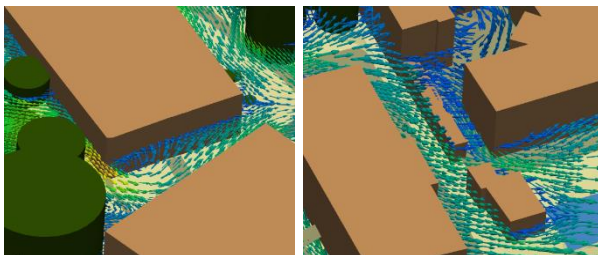
Simulasi aliran angin di area Kampus ITB Jatiningor dilakukan dengan mengikuti modul resmi OpenFOAM *windAroundBuildings* yang menganut algoritma SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equation*) untuk memecahkan permasalahan fluida dinamis. Selain algoritma SIMPLE, *windAroundBuildings* juga memuat model transportasi fluida Newtonian dan model turbulensi Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) k- ϵ , umumnya direkomendasikan untuk pemodelan aliran angin di luar ruangan (Tominaga et al., 2008). Simulasi dilakukan secara iteratif hingga mencapai nilai yang konvergen atau galat terkecil yang telah ditentukan sebelumnya. Dalam hal ini, iterasi dinyatakan selesai apabila galat perhitungan telah mencapai kurang dari 1×10^{-6} untuk setiap besaran fisis angin (U_x , U_y , U_z , p , k , dan ϵ).



Gambar 6. Aliran angin pada time step $t = 205$ detik.

Hasil simulasi aliran angin divisualisasikan dengan perangkat lunak ParaView. Simulasi aliran angin diawali dengan seluruh vektor angin memiliki besar kecepatan sama dengan nol dan arah yang sama pada $t = 0$ detik. Dapat dilihat pada **Gambar 6** bahwa vektor angin akan berubah seiring dengan bertambahnya waktu, serta dipengaruhi oleh model 3D bangunan dan pohon yang berada di sekitarnya. Pada $t = 205$ detik, besar kecepatan angin maksimum adalah $1,307 \text{ m/s}$ dengan rata-rata besar kecepatan angin $0,601 \text{ m/s}$.

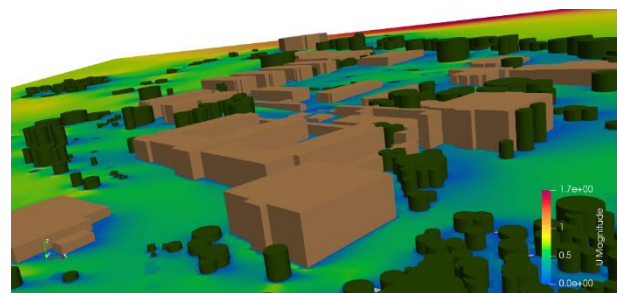
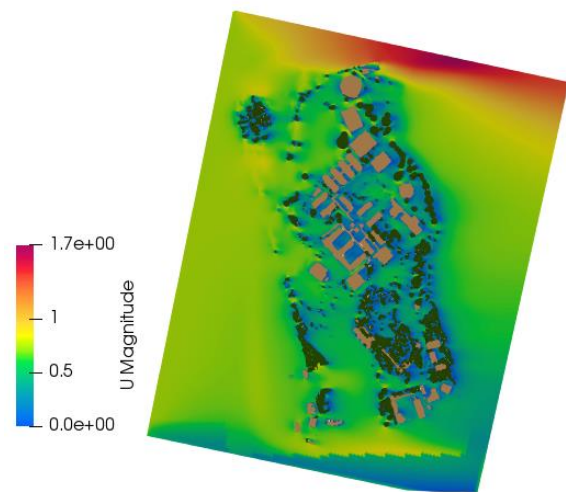
Bangunan yang berada pada lintasan angin, akan menyebabkan angin berbelok atau dapat berhenti (Angerik, 2009). Dalam hal ini, simulasi aliran angin berhasil menunjukkan pengaruh bangunan yang menyebabkan angin berbelok dan menempati ruang yang ada. Ilustrasi pembelokkan angin sesuai dengan geometri bangunan di sekitarnya di beberapa lokasi di Kampus ITB Jatinangor ditunjukkan dalam **Gambar 7**.



Gambar 7. Ilustrasi pembelokkan angin.

Untuk melihat perubahan kecepatan aliran angin di sekitar model 3D bangunan dan pohon dengan lebih mudah, sebuah penampang melintang diletakkan memotong model 3D bangunan dan pohon. **Gambar 8** menunjukkan bahwa aliran angin di sekitar geometri pohon dan bangunan Kampus ITB Jatinangor memiliki kecepatan yang jauh lebih kecil daripada aliran angin pada area yang tidak terdapat bangunan dan pohon. Dapat dilihat bahwa kecepatan angin di sekitar bangunan dan pohon disajikan dalam

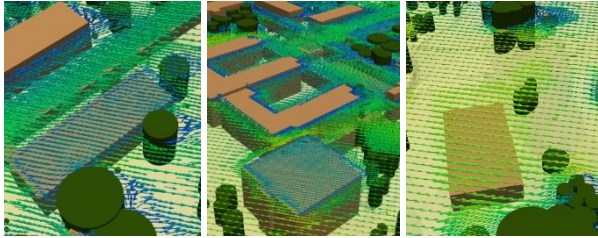
spektrum warna biru, yang pada legenda menunjukkan angka 0 m/s atau hampir tidak ada aliran angin sama sekali. Dalam hal ini, hasil simulasi berhasil menunjukkan bahwa bangunan dan pohon dalam suatu kawasan perkotaan dapat berperan sebagai penghalang atau pemecah angin yang efektif menghambat aliran angin (Kang, Kim, Kim, Choi, & Park, 2017).



Gambar 8. Perbedaan kecepatan angin di sekitar bangunan dan pohon.

Level of Details (LOD) merupakan tingkat kedetailan objek 3D. Dalam hal ini, LOD model 3D Kampus ITB Jatinangor yang digunakan untuk

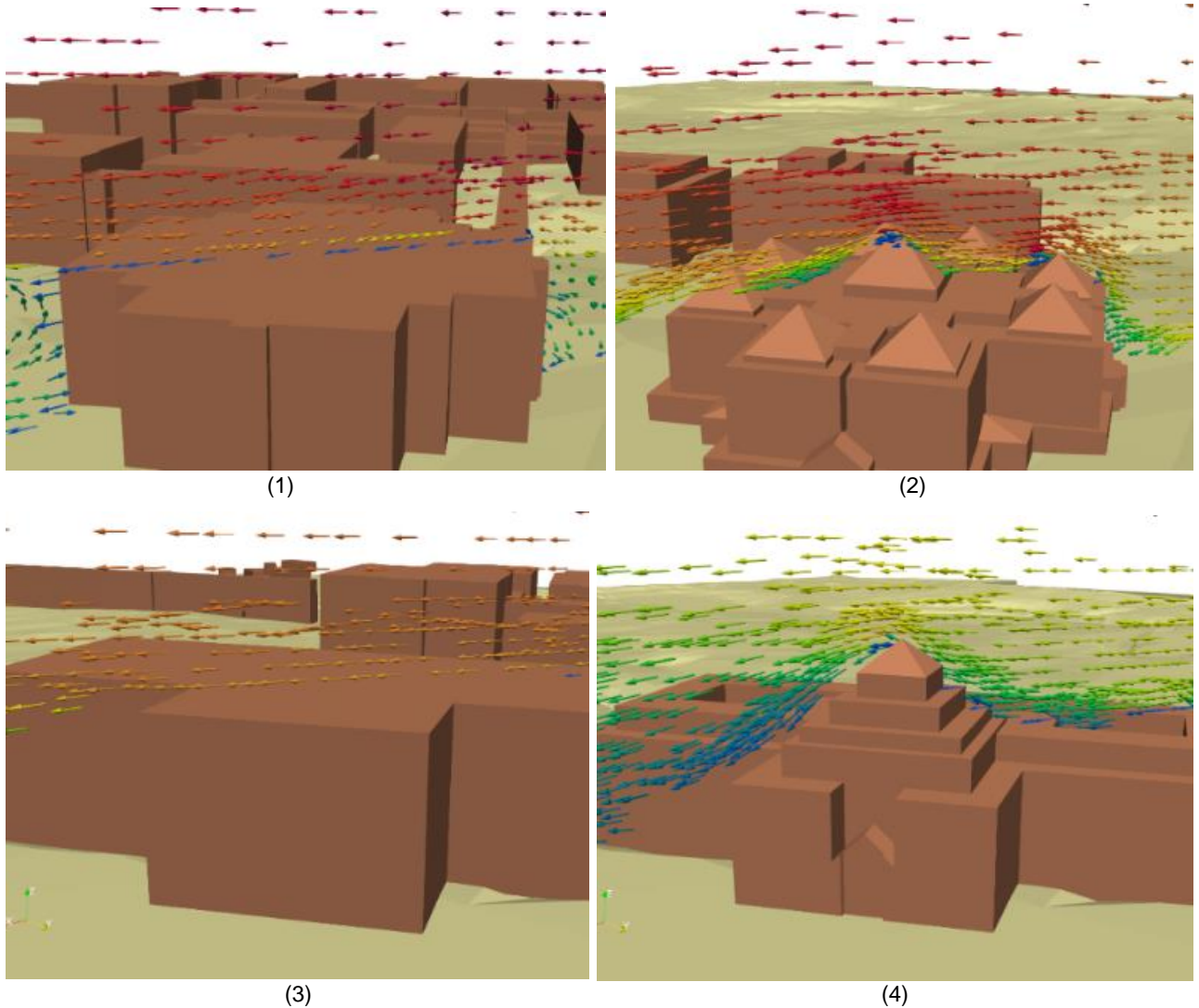
simulasi aliran angin adalah LOD1, dimana bangunan dianggap sebagai model blok prismatic dengan atap datar. Hasil simulasi aliran angin menunjukkan bahwa aliran angin yang melintas di atas bangunan akan bergantung pada LOD bangunan tersebut. **Gambar 9** menunjukkan hasil simulasi aliran angin di sekitar atap beberapa model 3D bangunan Kampus ITB Jatinangor.



Gambar 9. Ilustrasi aliran angin di sekitar atap bangunan LOD1.

Meskipun geometri LOD1 memberikan visualisasi yang tepat untuk aliran angin di sekitar

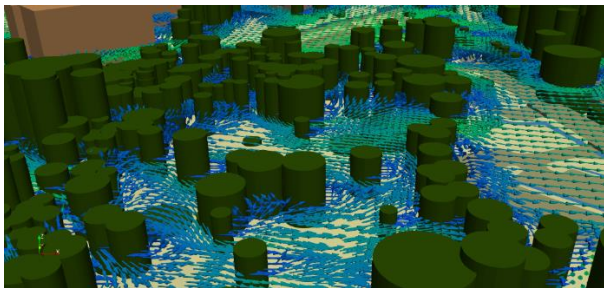
bangunan, tetapi **Gambar 9** menunjukkan bahwa angin hanya akan mengalir melintasi bangunan secara datar tanpa memperhitungkan bentuk atapnya. Ini akan menyebabkan informasi yang didapatkan dari visualisasi aliran angin di atas bangunan menjadi kurang akurat karena pada kenyataannya, bentuk atap dari suatu bangunan akan mempengaruhi angin yang melintas di atasnya. Untuk mendapatkan perbandingan yang lebih jelas, simulasi aliran angin dilakukan pada tiga model 3D bangunan LOD2 di Kampus ITB Jatinangor, yaitu gedung perpustakaan, KOICA Cyber Security Center, serta gedung utama Kampus ITB Jatinangor. Hasil simulasi aliran angin pada ketiga model 3D bangunan LOD2 ini kemudian dibandingkan dengan hasil simulasi aliran angin pada model 3D LOD1-nya untuk dilihat perbedaannya. **Gambar 9** menunjukkan perbedaan antara hasil simulasi aliran angin pada bangunan LOD1 dengan bangunan LOD2 pada arah 288° dan kecepatan awal 0,75 m/s.



Gambar 10. Perbandingan hasil simulasi aliran angin pada gedung perpustakaan LOD1 (1) dan LOD2 (2) serta pada gedung utama Kampus ITB Jatinangor LOD1 (3) dan LOD2 (4).

Dapat dilihat pada **Gambar 9** bahwa ada dan tidak adanya atap pada model 3D bangunan memberikan perbedaan yang sangat signifikan terhadap hasil simulasi aliran angin. Detail atap yang dimiliki oleh model 3D bangunan LOD2 tidak hanya mempengaruhi aliran angin yang melintas di atas suatu bangunan, tetapi juga mempengaruhi lintasan angin di sekitar bangunan-bangunan tersebut. Dalam hal ini, dapat dilihat bahwa hasil simulasi pada bangunan LOD2 memberikan informasi aliran angin yang lebih sesuai dengan keadaan sebenarnya daripada hasil simulasi pada bangunan LOD1.

Hal yang serupa berlaku pada objek pohon. Dalam simulasi ini, bentuk LOD1 pohon hanya dianggap sebagai silinder prismatik sederhana. Dapat dilihat dari hasil simulasi aliran angin pada **Gambar 10** bahwa kondisi aliran angin di sekitar model 3D LOD1 pohon menjadi tidak ideal terhadap kondisi yang sebenarnya. Pada model 3D LOD1 pohon, terjadi penyederhanaan terhadap geometri pohon dimana tidak ada batas yang jelas antara batang pohon dan daun pohon. Lebar pohon dalam simulasi ini pun dianggap terwakilkan oleh diameter kanopi pohon terlebar, padahal pada kenyataannya pohon memiliki geometri yang rumit. Implikasi dari menggunakan diameter kanopi terlebar dari suatu pohon sebagai objek simulasi aliran angin adalah bahwa informasi aliran angin hanya akan menjadi akurat di ketinggian dimana pohon memiliki diameter yang sama dengan diameter yang digunakan dalam simulasi aliran angin.



Gambar 11. Aliran angin di sekitar pepohonan.

Oleh karena hasil simulasi aliran angin akan bergantung kepada *hex mesh* dan proses *hex meshing* menggunakan model 3D sebagai data masukan, dapat ditarik kesimpulan bahwa hasil simulasi aliran angin akan bergantung kepada model 3D yang digunakan. Maka dari itu, untuk memperoleh informasi aliran angin yang sesuai dengan keadaan sebenarnya, penting untuk mempertimbangkan penggunaan LOD yang lebih tinggi untuk simulasi aliran angin.

KESIMPULAN

Simulasi aliran angin dengan OpenFOAM pada model 3D CityGML LOD1 lanskap menghasilkan informasi aliran angin yang dapat mengalami perubahan arah dan kecepatan berdasarkan pengaruh geometri model 3D yang dilaluinya, tetapi tidak dapat memberikan visualisasi

yang akurat terhadap karakter aliran angin di sekitar atap bangunan dan di sekeliling pohon. Oleh karena itu, simulasi aliran angin di kawasan perkotaan dan lanskap dapat dilakukan pada model 3D CityGML dengan mempertimbangkan *Level of Detail* model 3D yang digunakan, karena *Level of Detail* merupakan aspek penting yang dapat mempengaruhi akurasi karakter aliran angin di sekitar bangunan dan pohon.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terselesainya penelitian ini ini tidak terlepas dari dukungan dan bimbingan dari berbagai pihak baik itu bersifat moril maupun materil. Utamanya, Penulis mengucapkan terima kasih banyak kepada Dr. Deni Suwardhi, S.T., M.T dan Dr.rer.nat Wiwin Windupranata, S.T., M.Si., Institut Teknologi Bandung, selaku dosen pembimbing.

DAFTAR PUSTAKA

- Angerik, V. (2009). *Analisis Respon Beban Angin Pada Bangunan Beton Tingkat Tinggi Yang Menggunakan Sistem Outrigger Truss*. Retrieved from <http://repository.usu.ac.id/handle/123456789/11752>
- ANSYS, I. (2011). *Ansys Fluent 14.0: Users Guide | License | Command Line Interface*. U.S.A: SAS IP, Inc. Retrieved from <https://www.scribd.com/doc/140163383/Ansys-Fluent-14-0-Users-Guide>
- Biljecki, F., Ledoux, H., Du, X., Stoter, J., Soon, K. H., & Khoo, V. H. S. (2016). The most common geometric and semantic errors in CityGML datasets. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 4(2W1), 13–22. Copernicus GmbH. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-2-W1-13-2016>
- Caretto, L. S., Gosman, A. D., Patankar, S. V., & Spalding, D. B. (2007). Two calculation procedures for steady, three-dimensional flows with recirculation. *Proceedings of the Third International Conference on Numerical Methods in Fluid Mechanics*, 60–68. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/bfb0112677>
- David Batara, Y. (2012). Pembuatan Model Tiga Dimensi (3D) Sistem Informasi Geografis (SIG) untuk Visualisasi Wilayah Kota. *Jurnal Poros Teknik*, 4(1). Retrieved from <https://ejournal.poliban.ac.id/>
- Gobeawan, L., Lin, E. S., Tandon, A., Yee, A. T. K., Khoo, V. H. S., Teo, S. N., ... Poto, M. T. (2018). Modeling trees for virtual Singapore: From data acquisition to CityGML models. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 42(4/W10), 55–62. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W10-55-2018>
- Gröger, G., Kolbe, T. H., Czerwinski, A., & Nagel, C. (2008). *OpenGIS City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard, Version 1.0.0*. Retrieved from <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:134074067>

- Gröger, Gerhard, & Plümer, L. (2012). CityGML - Interoperable semantic 3D city models. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 71, 12–33. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2012.04.004>
- Kang, G., Kim, J. J., Kim, D. J., Choi, W., & Park, S. J. (2017). Development of a computational fluid dynamics model with tree drag parameterizations: Application to pedestrian wind comfort in an urban area. *Building and Environment*, 124, 209–218. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.08.008>
- Lauder, B. E., & Spalding, D. B. (1974). The numerical computation of turbulent flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 3(2), 269–289. [https://doi.org/10.1016/0045-7825\(74\)90029-2](https://doi.org/10.1016/0045-7825(74)90029-2)
- Ledoux, H. (2018). val3dity: validation of 3D GIS primitives according to the international standards. *Open Geospatial Data, Software and Standards*, 3(1). <https://doi.org/10.1186/s40965-018-0043-x>
- Siswantara, A. I., Daryus, A., & Budiarmo. (2016). Pemodelan Turbulen Anisotropik untuk Simulasi CFD dalam Aliran Kompresibel. *Prosiding SENTRA (Seminar Teknologi Dan Rekayasa)*, 0(2), 2527–6050. <https://doi.org/10.22219/SENTRA.V0I2.1803>
- Tominaga, Y., Mochida, A., Yoshie, R., Kataoka, H., Nozu, T., Yoshikawa, M., & Shirasawa, T. (2008). AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96(10–11), 1749–1761. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2008.02.058>
- Trisyanti, S. W., Suwardhi, D., & Harto, A. B. (2017). 3D City/Landscape Modeling Non-Building Thematic: Vegetation. *GeoSmart Asia 2017*. Retrieved from <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:221662248>
- Yoshie, R., Mochida, A., Tominaga, Y., Kataoka, H., Harimoto, K., Nozu, T., & Shirasawa, T. (2007). Cooperative project for CFD prediction of pedestrian wind environment in the Architectural Institute of Japan. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 95(9–11), 1551–1578. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2007.02.023>

Halaman ini sengaja kami kosongkan

GIS-MULTI CRITERIA DECISION ANALYSIS FOR CONFLICTED LAND ALLOCATION

Case Study: Adjoining Area of D'Aguilar National Park, Brisbane, Australia

(*SIG-Multi Criteria Decision Analysis untuk Konflik Alokasi Lahan: Studi Kasus Area Berdekatan Taman Nasional D'Aguilar, Brisbane, Australia*)

Muhamad Iqbal Januadi Putra^{1,2}

¹School of Earth and Environmental Science, University of Queensland

²Department of Geography, Universitas Indonesia

St Lucia 4072, Steele Building, Queensland, Australia

E-mail: m.putra@uqconnect.edu.au

Diterima: 4 Maret 2021; Direvisi : 18 Maret 2021; Disetujui untuk Dipublikasikan : 28 April 2021

ABSTRACT

The D'Aguilar National Park, Brisbane, Australia, is one area that has the potential to experience land-use conflict in the future due to the presence of biodiversity landscape value that needs to be protected and the growth of settlement area within this area. The research using Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) and Geographic Information System (GIS) method to determine the suitability area for a particular purpose has been widely used, yet only limited research has tried to apply it for the conflicting purpose. This paper aims to allocate the location for each residential development and conservation area in the adjoining area of D'Aguilar National Park. This research covers the GIS method in processing the MCDA to develop the model which has many factors to support the decision making, including for the conflicting purpose. Moreover, the method also used GIS-fuzzy MCDA or widely known as GIS-Fuzzy MCDA (GIS-FMCD). The result of this research shows that allocating the conflicting land area is quite different from the non-conflicting one. Applying MCDA for the conflicting purpose requires different decision-making to show which area would be optimal to allocate.

Keywords: Conflicting area, GIS, land allocation, MCDA

ABSTRAK

Taman Nasional D'Aguilar, Brisbane, Australia merupakan salah satu kawasan yang berpotensi mengalami konflik penggunaan lahan di masa mendatang, karena keberadaan nilai lanskap keanekaragaman hayati yang perlu dilindungi dan adanya pertumbuhan kawasan permukiman. Penelitian yang dilakukan dengan menggunakan pendekatan Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) dan Sistem Informasi Geografis (SIG) dalam menentukan area kesesuaian sudah banyak dilakukan, namun tidak banyak yang menjelaskan bagaimana metode ini dapat diaplikasikan untuk area dengan konflik kepentingan. Penelitian ini bertujuan untuk mengalokasikan area untuk pengembangan pemukiman dan kawasan konservasi di area kawasan sekitar Taman Nasional D'Aguilar. Penelitian ini mencakup metode GIS dalam memproses MCDA dengan model yang memiliki banyak faktor untuk mendukung pengambilan keputusan, termasuk untuk kepentingan yang bertentangan. Secara rinci, metode GIS-fuzzy MCDA atau yang lebih dikenal dengan GIS-Fuzzy MCDA (GIS-FMCD) juga digunakan dalam penelitian ini. Hasil penelitian menunjukkan bahwa alokasi lahan untuk kawasan dengan konflik kepentingan memiliki pendekatan yang berbeda dengan area tanpa konflik. Pengaplikasian MCDA untuk area konflik membutuhkan proses pengambilan keputusan yang berbeda untuk menentukan wilayah mana yang optimal untuk dialokasikan

Kata kunci: Alokasi lahan, MCDA, SIG, wilayah konflik

INTRODUCTION

The rapid growth of human population and development will require more demand on the land area for settlement. This process involves the land-use change from a non-built up area into a built area. However, the land-use allocation for new settlement areas is almost always linked to the land conflict due to the multisector land needs. One area that has the potential to experience land use conflict in the future is the adjoining of D'Aguilar National Park,

Queensland, Australia. The land development in the adjoining D'Aguilar National Park is one fact that cannot be avoided. The land allocation conflict might happen in this area due to the existence of biodiversity landscape value that needs to be protected. Nevertheless, the surrounding area of D'Aguilar National Park keeps growing. Therefore, land use allocation is required to accommodate the land-use need for both residential area and conservation area to prevent the land use conflict in the future.

The objective of this research is to allocate an area of 60-80 km² for each residential development and conservation area in adjoining D'Aguilar National Park. This project utilizes a Geographic Information System (GIS), which is an advanced method for spatial analysis to model future land-use allocation. This method can accommodate multi-criteria such as economy, society, and environmental factors so that the allocation of residential and conservation areas can be modeled. The Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) is used to structure the multi-faceted criteria, decisions, and alternatives for allocating the residential and conservation area (Greene et al., 2011) to develop the model which has many factors to support the decision making.

While implementing the GIS-MCDA for determining the suitability area for particular purposes has been proposed by many researchers, there is only a limited paper that discusses the implementation of GIS-MCDA for the conflicting area, for instance, the case of allocating the land for residential and conservation areas. GIS-MCDA beyond only a technical process in spatial modeling. It involves the decision-making from multiple factors in the model and usually involves a large set of multiple and conflicting criteria (Malczewski, 2006; Rikalovic et al., 2014). The lack of reasonable explanation of previous research is lying for the MCDA with multi-objectives. Eastman et al. (1995) stated that the MCDA analytical process could be categorized into complementary objectives (for the non-conflicting purpose) or conflicting objectives. Greene et al. (2011) proposed the term of MCDA for the conflicting purpose by multiple-objective decision making (MODM). The conflicting objective should be solved through the prioritization process (Eastman et al., 1995).

Most of the research conducted for allocating the conflicting purpose have not applied conflicting objective analytical processes, such as Akbulut et al. (2018) and Putra et al. (2019) which undertaken the MCDA approach for allocating the residential and green area within the urban space. From this standpoint, this research covers the implementation of a conflicting objective analytical process in allocating the residential and conservation area in the adjoining area of D'Aguilar National Park. Moreover, this paper also used GIS-fuzzy MCDA or widely known as GIS-Fuzzy MCDA (GIS-FMCD) to help the decision-making. The integration of fuzziness in GIS-MCDA would allow the decision-makers to consider the effect of indeterminate criteria and to handle the uncertainty (Morris & Jankowski, 2005). Then, the decision for allocating the residential and conservation area would be undertaken by applying the MODM approach.

METHOD

Study Area

This project was conducted to allocate the future residential and conservation area in the adjoining largest national park close to Brisbane City, namely the D'Aguilar National Park (**Figure 1**). The adjoining area of D'Aguilar National Park is only 12 km from the center of Brisbane City and quite accessible from the city. The rural area close to this park has a population density of about 50 people per square kilometer, while the area where urbanized is settled by approximately 2100 people per square kilometer (Rossi et al., 2015). This condition shows that the adjoining of D'Aguilar National Park has been started to develop for human settlement areas, while at the same time this park was created to protect the primary ecosystem. Therefore, this park has the potential to experience land-use conflict in the future.

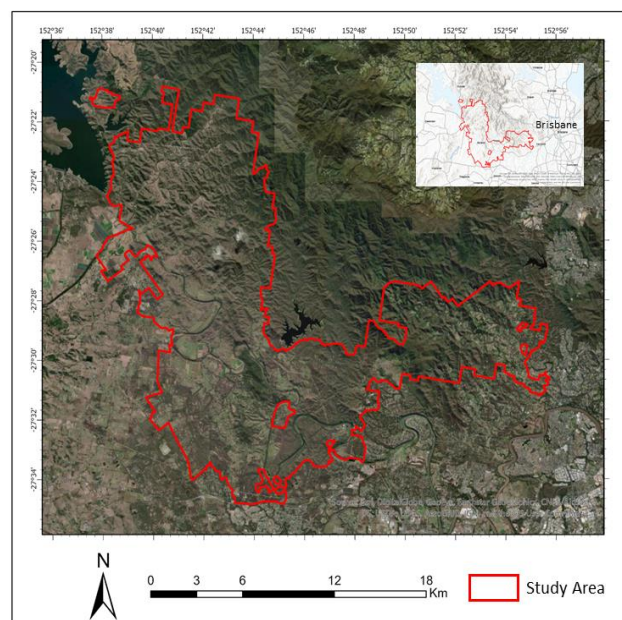


Figure 1. The study area is located in D'Aguilar National Park and surrounds Brisbane, Australia.

Data Processing

GIS fuzzy multi-criteria decision analysis (GIS-FMCD) is a set of methods and tools to support decision making by combining the geographical dataset and preferences value from the expert and integrated it using fuzzy membership function (FMF) theory (Feizizadeh et al., 2014). In the fuzzy membership function (FMF), each parameter will be converted into a value between 0 – 1, depending on the certain degree of each parameter within the model (Ziaei et al., 2012). FMF can be applied through seven possible fuzzy functions (*Linear, MS Small, MS Large, Small, Large, Gaussian, Near*) depending on user decision (Domazetovic et al., 2019). Eastman et al., (1995) suggested the fuzzy logic method is used for spatial data processing, instead of the scoring value since the result is

showing better output. The spatial analysis is processed based on the fuzzy set concept, while the MCDA approach is used to help the procedures to make decisions. This method consists of four main steps in order to get the final result of land use allocation, there are; criteria selection, standardization, transformation (weighting), and decision procedure making (Nyerges & Jankowski, 2009).

The criteria selection is the first procedure to select the criteria for each objective. Eastman et al. (1995) state that criteria in MCDA consist of factor and constraint. Allocating the conservation and residential area requires the proper criteria selection and the primary standard for each objective. As the objective of this project to allocate the future land for conservation and residential area, the factor criteria used is representing the standard to fulfill a suitable location for each objective. The constraint criteria would be used as the constraint and not included in the data processing. Meanwhile, standardization is the process to change the selected criteria into the same particular scale. This step would ensure that each criterion has the same scale so that it can be analyzed together. The next step is weighting, which is the process to transform each criterion based on its importance level.

Table 1 and **Table 2** depict the criteria used for residential and conservation area allocation, its standardization result, and the weighting value, which represent how important the criterion is compared to others. The attribute value for each criterion was defined according to expert opinion through voting and literature review. The only constraint criteria used in this project is the water body constraint used for residential development criteria. Then, the criteria were transformed into a preferences scale by using a fuzzy logic membership function (FMF). Ziaei, et al (2012) show the use of fuzzy membership small and large to define the standardization of factor criteria. Each criterion is ranked and marked by its suitability level which ranging from 0, as the lowest suitability value, and 1 as the highest suitability level. While the fuzzy logic can be used to modeling the overall suitability as well, the weighted linear combination (WLC) method is used to model the overall suitability for each objective. This process is represented by the weighting process to show the importance value for each criterion in each objective.

The first factor criteria used for residential area suitability is the proximity to the watercourse. This criterion is used to determine the suitable area for residential, which can have minimal impact from water hazards (such as a flood) (Puntsag, 2014). Therefore, the cost algorithm (the farther from this feature, the more benefit obtained) was applied to this criterion (Nyerges & Jankowski, 2009). The second criterion used in this project is the hazard-prone area from bushfire. Both proximities to the watercourse and hazard-prone area share the same weighting value (15%). The flatness with a weighting score of

20% is used as the next criterion, which assesses the impact of landscape steepness on human activities. Therefore, the highest rank for the flatness criterion is given to the area where the landscape is flat. The two last criteria represent the economic factor for the residential area, which has the highest weighting score (25%). Both proximities to roads and facilities (transportation shelter/station, retail, school, hospital, worship place) are considered since their impact on the economic value for society. Therefore, these criteria are determined using a benefit algorithm where the shortest distance from the feature would give the highest suitability (Nyerges & Jankowski, 2009). The last criteria used is the constraint of the water body where the residential area should not be built on a water body.

The first criterion used to determine the suitable conservation area is the vegetation cover density (weighting score 10%). This criterion is gained from Landsat 8 OLI imagery processed using the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). Li et al. (2018) used this criterion to determine the biological value for selecting the protected area of Fuping County through vegetation density coverage condition. The higher value of NDVI represents the denser coverage of vegetation. Li et al. (2018) also used the elevation criterion to select the suitable conservation area regarding the water catchment process (weighting score 15%).

Another criterion used for this model is the remnant biological status which assesses the status of protected vegetation species. The vegetation which is categorized as endangered would be prioritized to be protected. The last criterion used is the proximity to other national parks. Conserving a new protected area would be prioritized to the area connected to the existing conservation area so that the ecological value of the new conservation area could be higher. Both last criteria share the highest weighting score (30%) since the most important criteria.

The last step is the decision making which is the central process in the MCDA method. A decision rule is used to select the alternative of the objective from most to least desirable (Nyerges & Jankowski, 2009). Green et al. (2011) classify the MCDA method as two main types according to the number of objectives used in the MCDA procedure, there are multiple-attribute decision making (MADM) and multiple-objective decision making (MODM). MADM is used for complementary or multiple objectives. Meanwhile, MODM is mostly used for decision making, where the objectives are conflicting with each other. Since this project covers the objective for conflicting land use (residential and conservation area), the MCDA method would focus on the MODM method. The MODM selection is conducted to the result of weighted linear combination (WLC) processing from residential and conservation suitability areas.

Table 1. Standardized criteria for the rural living (residential) suitability area.

Criteria	Spatial Attribute	Suitability Fuzzy Value					Weighting
		Very Low	Moderate	Moderate	Very High	Very High	
Proximity to watercourse	Watercourse buffer (m)	<1000	1000- 2000	2000- 3000	3000- 4000	>4000	15%
Hazard prone area	Bushfire hazard potential intensity	Very high potential	High potential	Medium potential	Potential	No Potential	15%
Flatness	Slope (°)	>20	15-20	10-15	5-10	0-5	20%
Proximity to road	Road buffer (m)	>1500	1000-1500	500-1000	250-500	0-250	25%
Proximity to facilities	Road point of interest buffer (m)	>800	600-800	400-600	200-400	<200	25%
Water body constraint	Water body distribution						

Table 2. Standardized criteria for the conservation suitability area.

Criteria	Spatial Attribute	Suitability Fuzzy Value					Weighting
		Very Low	Moderate	Moderate	Very High	Very High	
Vegetation cover density	NDVI value	<0	0-0.2	0.2-0.4	0.4-0.6	>0.6	15%
Elevation	Elevation/DEM (m)	0-9	9-21	21-37	37-56	>56	15%
Protected vegetation	Remnant biological status	"Non-rem"	-	No Concern	-	"Endangered" OR "of Concern"	35%
Proximity to other national parks	National park buffer (m)	0-500	500-1000	1000-2000	2000-4000	>4000	35%

RESULT AND DISCUSSION

Suitability for Residential Area

The result of the standardization for each criterion is visualized in **Figure 2**. The area represented by dark brown shows the high suitability score for each criterion. In contrast, the white area visualizes the area which has a low suitability score. The spatial distribution of each suitability level shows the various patterns. However, very high and high

suitability levels for each criterion tend to agglomerate in the eastern and southern of the study area. According to the proximity of the road, watercourse, and point of interest (POI) criteria, the middle part of the study area tends to have low suitability since the absence of road and POI facilities and the presence of water streams in this area. The tendency of high and very high suitability score for bushfire prone area and flatness criteria also distributed in the eastern and southern study area.

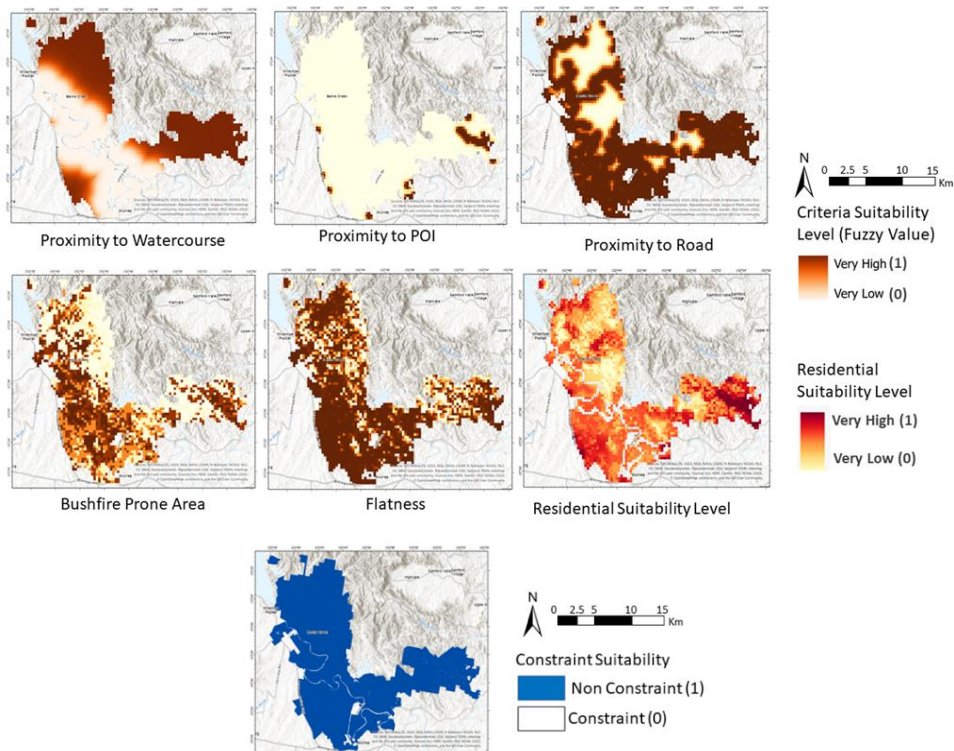


Figure 2. Criteria selection for residential allocation area. The criteria consist of factor (proximity to watercourse, proximity to POI, proximity to road, bushfire prone are, flatness) and constraint (watercourse).

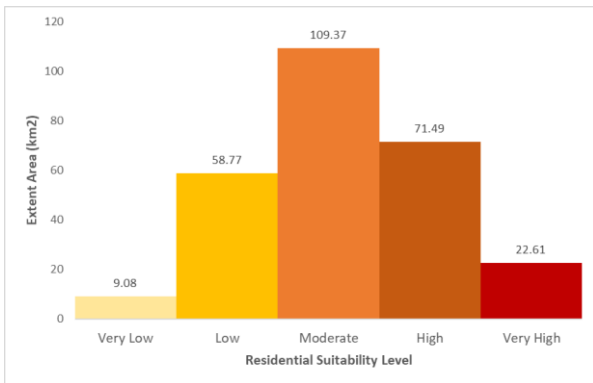


Figure 3. The extent area for each residential suitability area.

The spatial pattern of all criteria used for this suitability model determines the spatial distribution for suitable residential areas. As can be seen in **Figure 2**, the tendency of high and very high suitability scores from criteria influence the spatial suitability distribution in suitable residential areas. The very high suitability area is located in the eastern and southern part of the study area, followed by the same pattern for the high suitability area. The area with high and very high suitability score is characterized by close to the road, point of interest/POI (facilities), and far from the watercourse. Besides, this area is also distributed in the area where the flatness suitability is high and very high.

As same as the spatial distribution pattern from each criterion, the very high and high suitability area for new conservation location is located along the northern to the eastern boundary line of the study area. Most of the high and very high suitability areas are spread in the high elevation area, high density of

vegetation coverage, and the area close to the existing national park. Few areas of the ideal location for new conservation are also located in the middle to the southern part of the study area, following the presence of endangered vegetation species in this area.

Suitability for Conservation Area

The result of the suitability area and the standardized criteria for conservation suitability modeling can be seen in **Figure 4**. As the rationalities of a suitable location for a conservation area in the earlier discussion, the proposed new conservation area ideally is located in the high elevation, high vegetation density coverage, close to the existing conservation area, and having the endangered species within it. The area characterized by these conditions for each criterion is visualized by dark blue color. The distribution of the ideal location for each criterion is varying. However, the tendency of the ideal location for the new conservation area is along the north to the eastern boundary line of the study area.

Regarding the bushfire-prone criterion, the high and very high suitability area for residential allocation is located in the potential and no potential of bushfire area. The very high suitability area contributes to only 8.33% of the total study area or about 22.61 km² (**Figure 3**). Meanwhile, the extent area for high suitability area is 71.49 km² or about 26.35% of the total extent of the study area. The most extensive area is given to moderate suitability, which has 109.7 km² or more than 40% of the total study area.

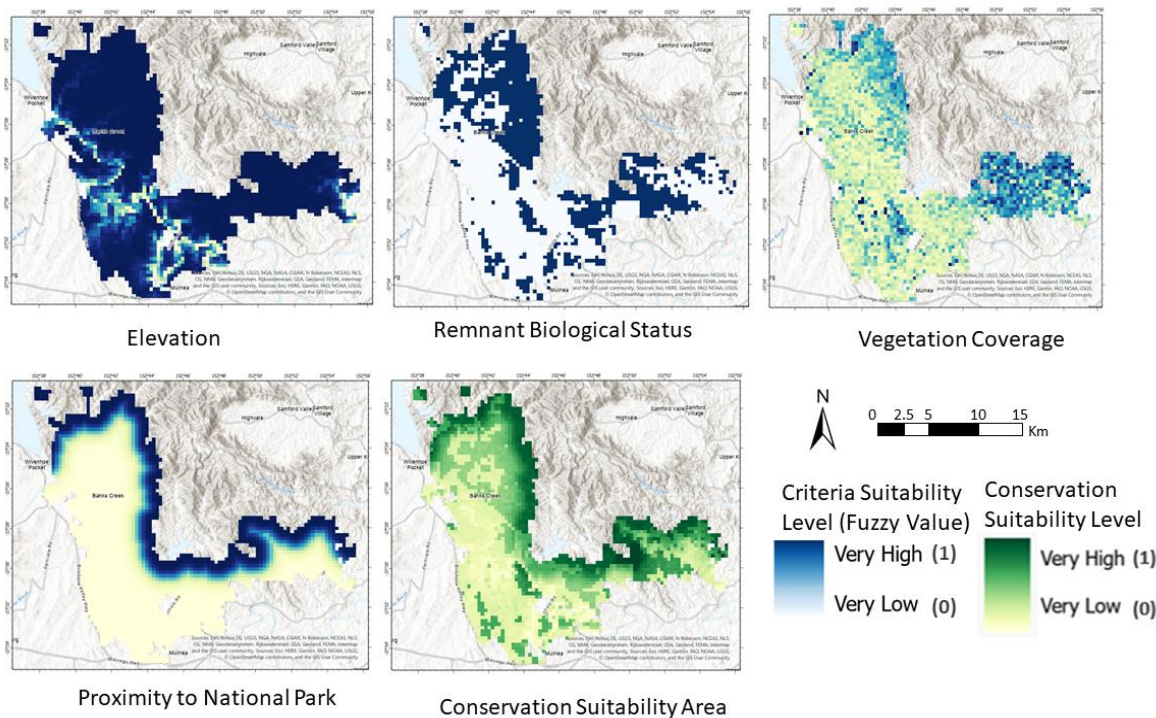


Figure 4. Criteria selection for conservation allocation area. The criteria consist of factor criteria (elevation, remnant biological status, vegetation coverage, and proximity to other national parks).

On the other hand, the low and very low suitability classes cover the area in the southern-western-northern of the study area. As can be analyzed, the spatial distribution trend of conservation suitability area is mostly following the suitability score of distance to existing national park criteria. This pattern can be understood as this criterion contributes to the highest weighting (30%), together with the remnant biological status criterion.

Figure 5 shows detailed information for each suitability level class. As presented in this figure, the very high suitability covers the area of 24.07 km² or about 8.8% of the total study area. Meanwhile, the high suitability area covers the area of 68.3 km² or about 25.17%. The proposed new conservation area is dominated by a low suitability class which covers more than 30% of the total extent of the study area.

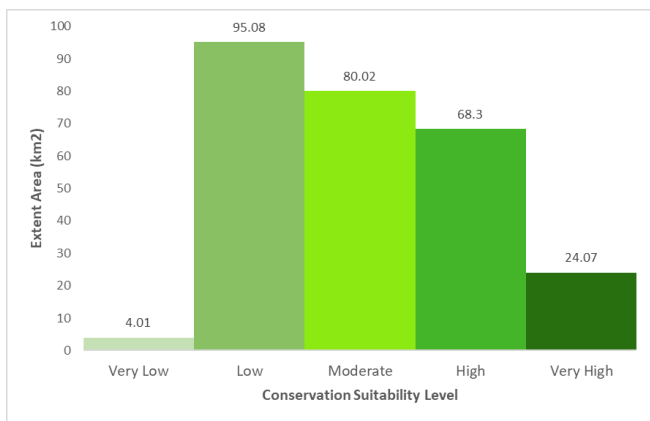


Figure 5. The extent area for each conservation suitability area.

Multi-Criteria Decision Analysis for Land Allocation in Conflicting Purpose

The selection for a new residential and new conservation allocation area involves advanced analysis. The analysis requires the evaluation and classification process according to their suitability of each purpose (Mokarram & Aminzadeh, 2010). This process is conducted using the MODM method to

determine the best location for both conflicting land-use allocations. Both land-use allocations are competing with each other. Therefore, the analysis is conducted through the prioritization of each objective (Eastman et al., 1995). The selection for land-use allocation requires the combination of both suitability maps for both objectives. The selection is determined through scatterplot analysis according to the combined value of both suitability. The raster cell value determines the decision of land-use allocation according to the suitability axis for each objective. The scatterplot which visualized the process of land use allocation selection is presented in **Figure 6**.

The selection of allocation areas can yield in three main areas; the conflicted area, proposed residential area, and proposed conservation area. As can be seen in **Figure 6**, the possible conflict area is located in the area where both land use allocations for residential and conservation have high-very high suitability. This area is located in the eastern part of the study area. Meanwhile, the area that is suitable for a residential allocation area is located in the combination of high-very high suitability for residential area and very low-moderate suitability for the conservation area. In contrast, the suitable location for the conservation area is located in a combination of high-very high suitability for the proposed conservation area and very low-moderate suitability for the residential area.

The proposed residential area has resulted in the total extent area of 65.5 km². This area is distributed along the southern-western and in the eastern part of the study area (**Figure 7**). This area is located in the area that is closest to the road and point of interest (POI), flat area, having minimum impact of bushfire, and far from the watercourse. Meanwhile, the proposed conservation area results are distributed along the boundary of the study area and the existing national park with a total area of 70.5 km². As can be seen in **Figure 7**, the proposed conservation area consists of two main areas, in the central-northern and eastern of the study area.

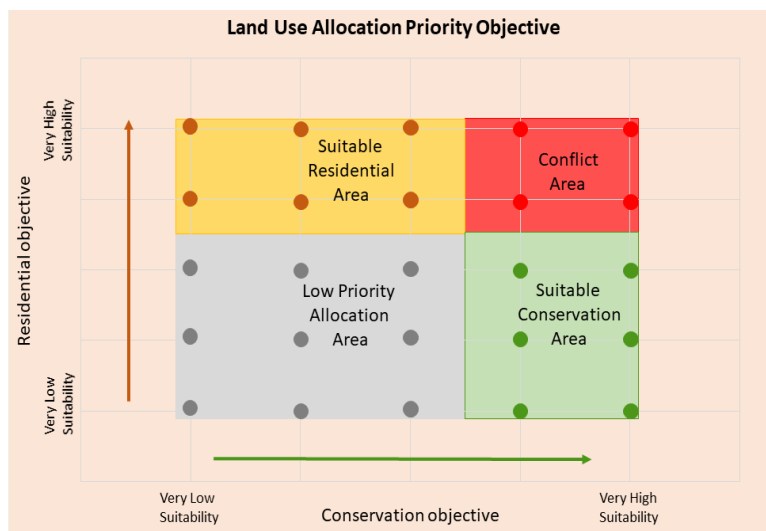


Figure 6. Scatterplot for land use allocation selection according to priority objective.

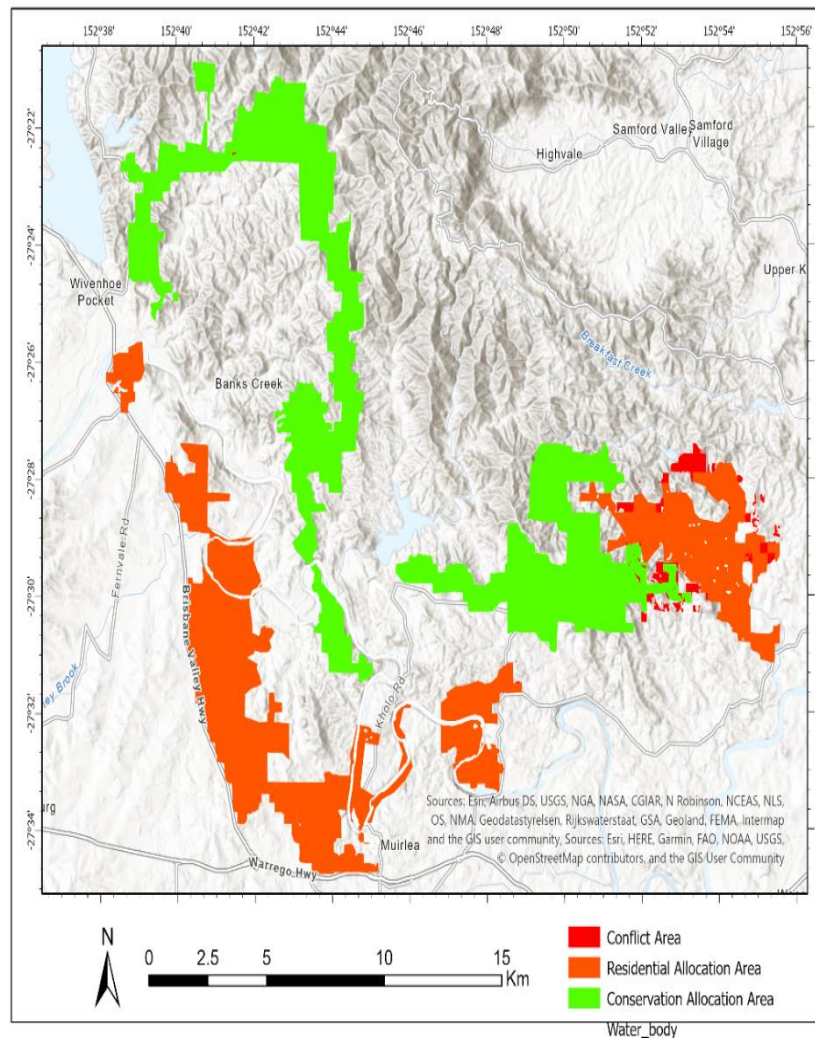


Figure 7. Land allocation for residential and conservation areas.

GIS-FMCSA can be used to determine the suitable site location through decision-making rule, yet this method has several limitations. Even though the fuzzy concept can cover the uncertainty of scoring value for each criterion, this concept has limitations on its degree membership. Feizizadeh, et al. (2014) show that the degree of membership has a significant impact on the standardization process. The ambiguity of how much membership degree should be applied could impact the output result of standardization. Regardless of the fuzzy method used in this project, the spatial resolution also has implications for the result. Since particular criteria (for example the water body constraint) need higher spatial resolution to result in good output. The higher spatial resolution is a critical point that needs to be addressed in further project/research.

CONCLUSION

Allocating the residential and conservation area in the adjoining area of D’Aguilar National Park should be conducted by the MCDA conflicting objective approach. The implementation of this approach considers the conflicting purpose for both residential and conservation areas. The proposed

residential area has resulted in the total extent area of 65.5 km². This area is distributed along the southern-western and in the eastern part of the study area. Meanwhile, the proposed conservation area resulted is distributed along the boundary of the study area and the existing national park with a total area of 70.5 km² which is located in the central-northern and eastern of the study area.

ACKNOWLEDGEMENT

This research is supported by the Queensland Government of Australia, which provided important data for this research.

REFERENCES

Akbulut, A., Ozcevik, O., & Carton, L. (2018). Evaluating suitability of a GIS-AHP combined method for sustainable Urban and environmental planning in Beykoz District , Istanbul Evaluating Suitability of a GIS – AHP combined method for sustainable urban and environmental planning in Beykoz District, Istanbul. *International Journal of Sustainable Development Planning*, 13(8), 1103–1115. <https://doi.org/10.2495/SDP-V13-N8-1103-1115>

Domazetovic, F., Siljeg, A., Loncar, N., & Maric, I. (2019).

- GIS automated multicriteria analysis (GAMA) method for susceptibility modelling. *MethodsX*, 6, 2553–2561. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2019.10.031>
- Eastman, J. R., Jin, W., Kyem, P. A. K., & Toledano, J. (1995). Raster Procedures for Multi-Criteria /Multi-Objective Decisions. *Photogrammetric, Engineering& Remote Sensing*, 61, 539–547.
- Feizizadeh, B., Roodposhti, M. S., Jankowski, P., & Blaschke, T. (2014). A GIS-based extended fuzzy multi-criteria evaluation for landslide susceptibility mapping. *Computers and Geosciences*, 73, 208–221. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2014.08.001>
- Greene, R., Devillers, R., Luther, J. E., & Eddy, B. G. (2011). GIS-Based Multiple-Criteria Decision Analysis. *Geography Compass*, 5(6), 412–432.
- Li, Z., Fan, Z., & Shen, S. (2018). Urban Green Space Suitability Evaluation Based on the AHP-CV Combined Weight Method: A Case Study of Fuping County , China. *Sustainability*, 10(8). <https://doi.org/10.3390/su10082656>
- Malczewski, J. (2006). GIS - based multicriteria decision analysis: a survey of the literature. *International Journal of Geographical Information Science*, 20(7). <https://doi.org/10.1080/13658810600661508>
- Mokarram, M., & Aminzadeh, F. (2010). Gis-Based Multicriteria Land Suitability Evaluation Using Ordered Weight Averaging With Fuzzy Quantifier: A Case Study In Shavur Plain , Iran. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38(2), 508–512.
- Morris, A., & Jankowski, P. (2005). Spatial Decision Making Using Fuzzy GIS. In *Fuzzy Modeling with Spatial Information for Geographic Problems*. (pp. 275–298). Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/3-540-26886-3_13
- Nyerges, T. L., & Jankowski, P. (2009). *Regional and Urban GIS: A Decision Support Approach* (1st ed., pp. 136–159). Guilford Press.
- Puntsag, G. (2014). Land Suitability Analysis For Urban And Agricultural Land Using Gis : Case Study In Hvita To Hvita , Iceland. *United Nations University Land Restoration Training Programme*. Retrieved from <http://www.unulrt.is/static/fellows/document/Puntsag2014.pdf>
- Putra, M. I. J., Affandani, A. Y., Widodo, T., & Wibowo, A. (2019). Spatial Multi-Criteria Analysis for Urban Sustainable Built Up Area Based on Urban Heat Island in Serang City. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 338(1). Depok: IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/338/1/012025>
- Rikalovic, A., Cosic, I., & Lazarevic, D. (2014). GIS Based Multi-Criteria Analysis for Industrial Site Selection. *Procedia Engineering*, 69, 1054–1063. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.03.090>
- Rossi, S. D., Byrne, J. A., & Pickering, C. M. (2015). The role of distance in peri-urban national park use: Who visits them and how far do they travel?. *Applied Geography*, 63, 77-88. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2015.06.008>
- Ziaei, M., Hajizadeh, F., Ahmadzadeh, S. S. R., & Jahanifar, K. (2012). A Combined Model of GIS and Fuzzy Multi Criteria Decision Analysis (FMCD) for Suitable Evaluation /Selection of Industrial Areas, Birjand , Iran. *Recent Researches in Environmental Science and Landscaping*, 174–179.

**MAJALAH ILMIAH GLOBE
VOLUME 23 TAHUN 2021**

Indeks Penulis

A

Agung Budi Harto, 43
Agung Syetiawan, 1
Ahmad Cahyadi, 21
Arnadi Murtiyoso, 43

B

Bayu Elwantyo B. Dewantoro, 35
Budhy Soeksmantono, 43

D

Deni Suwardhi, 43
Dudy D. Wijaya, 43

E

Erik Febriarta, 21

G

Ghalizha Z. Izzaty, **43**

I

Irman Firmansyah, 13

L

Lucky Rakananda Hasandy, 35

M

Mangapul Parlindungan Tambunan, 1
Muhamad Iqbal Januadi Putra, 53

R

Rudy P. Tambunan, 1

S

Septian Vienastra, 21
Sheffiera Indriyaningtyas, 35

T

Tatan Sukwika, 13

W

Wiwin Windupranata, 43

Y

Yusniar Rah Ayu Ristiantri, 1

**MAJALAH ILMIAH GLOBE
VOLUME 23 TAHUN 2021**

Indeks Subjek

- A**
Airtanah, 21,22,24, 25,26,27, 28,29,30,31,33,34
- B**
Banggai Kepulauan, 21,23,24,27,20,32
Batugamping Korai, 21,22,24,27,29,30,31
- C**
CityGML, 43, 44, 46,50,51
CO, 30,35,36,37,38,39,40,41
Conflicting Area, 53,54
COVID-19, 1,2,3, 4, 5,6, 7,8,9,10,11,12,35,
38,39,40,41, 42
- D**
Daya Dukung, 13, 14, 15, 16, 17,19, 20, 33
DRASTIC, 21,24,25,26,27,29,30,31,32,33,34
- G**
GIS, 3,5,11, 12,20,33, 51,53,54,59,60
- K**
Kemampuan Lahan, 13,14,15,16,17,19
Kerentanan, 1,2,3,21,23,24,25,26,27,28,29,30,
31,32,33,34
Komputasi Berbasis-Cloud, 35
- L**
Land Allocation,53,58,59
Level of Detail, 43,44,48,50
- M**
MCDA, 5,53,54,55,59,60
- N**
Network Analysis, 1,5,6,7
- O**
OpenFOAM, 43,44,47,50
- P**
Pemanfaatan Pola Ruang, 13,20
Permukiman, 13,14,17,18,19,20,31, 53
PSBB, 11,35,36,38,39,40,41
- R**
Rumah Sakit Rujukan, 1,2,3,4,5, 6, 7, 8, 9,10, 11
- S**
Sentinel-5P, 35,36,37,38,39,41
Simulasi Aliran Angin, 43,44,45,46,47,48,49,50
Spasial Dinamik, 13

UCAPAN TERIMA KASIH
KEPADA MITRA BESTARI MAJALAH ILMIAH GLOBE
VOLUME 23 TAHUN 2021

1. Wirastuti Widyatmanti, S.Si., Ph.d
2. Dr. Ir. Khursatul Munibah, M.Sc
3. Dr. Djati Mardiatno, M.Si
4. Dr. Budi Susetyo
5. Dr. Rayna Sari Dewi
6. Ir. Irmadi Nahib, M.Si
7. Ir. Yatin Suwarno, M.Sc
8. Drs. Jaka Suryanta, M.Sc
9. Ir. Sri Lestari, M.Agr
10. Dr. Ir. Jawoto Sih Setyono, MDP
11. Dr. Ing. Widodo Setiyo Pranowo

PEDOMAN PENULISAN MAJALAH ILMIAH GLOBE

Majalah Ilmiah Globe adalah publikasi ilmiah melalui proses *review* yang diterbitkan oleh Badan Informasi Geospasial bekerja sama dengan Masyarakat Ahli Penginderaan jauh Indonesia (MAPIN). Majalah ini berisi tulisan ilmiah dan kajian literatur tentang pengumpulan, pengolahan dan analisis data tentang informasi geospasial tematik serta tema lain yang terkait.

Persyaratan umum naskah adalah merupakan naskah asli hasil karya penulis, belum pernah dipublikasikan sebelumnya, tidak sedang dalam proses publikasi di jurnal lain, ditulis sesuai format yang telah ditentukan. Naskah yang masuk akan ditelaah oleh Mitra bestari dan dewan redaksi. Dewan redaksi berhak mengedit tulisan dalam hal gaya penulisan, format dan kejelasan kalimat serta memutuskan apakah naskah dapat diterbitkan atau tidak.

Redaksi menerima naskah yang sesuai dengan *scope* untuk dipublikasikan dalam majalah ilmiah ini. Naskah hendaknya dikirim ke:

Sekretariat Redaksi Majalah Ilmiah Globe

Pusat Penelitian Promosi dan Kerja Sama, Badan Informasi Geospasial

Jl. Raya Jakarta Bogor Km. 46 Cibinong Jawa Barat 16911

Telp. 021-87906041 Fax 021-87906041

Website: <http://jurnal.big.go.id/index.php/GL/index>

E-mail: majalah.globe@big.go.id, majalahglobe@gmail.com

Pengajuan naskah

Penulis harus mengirimkan naskah melalui e-journal dengan terlebih dahulu mendaftarkan diri sebagai *Author* dan *login* melalui website <http://jurnal.big.go.id/index.php/GL/index>

Penulisan naskah

Naskah dapat ditulis dalam Bahasa Indonesia maupun Bahasa Inggris. Naskah diketik dalam Microsoft Word dengan 1 kolom untuk abstrak dan 2 kolom untuk isi. Ukuran kertas A4. Jenis huruf untuk seluruh ISI tulisan menggunakan Arial 10pt dan spasi (line spacing) 1. Panjang naskah terdiri dari 8-12 halaman (halaman harus genap) termasuk tabel dan gambar serta maksimal ukuran file setiap naskah tidak lebih dari 10Mb.

Sistematika Penulisan

Template penulisan naskah secara lengkap dapat diunduh melalui website Jurnal Geomatika.

Kerangka tulisan disusun dengan urutan sebagai berikut: Judul, Identitas Penulis, Afiliasi, Abstrak, Kata Kunci, Pendahuluan, Metode, Hasil dan Pembahasan, Kesimpulan, Ucapan Terima Kasih, dan Daftar Pustaka.

Judul harus akurat, jelas, spesifik. Judul utama ditulis dengan huruf kapital, sedangkan sub judul menggunakan huruf kecil dengan huruf besar di setiap awal kata. Judul dibuat dalam 2 bahasa (Indonesia dan Inggris), apabila tulisan dalam bahasa Indonesia, maka judul dalam Bahasa Inggris ditulis dalam tanda kurung dengan huruf Tahoma 12 point miring.

Identitas Penulis ditulis secara lengkap tanpa disingkat, tanpa gelar dan jabatan profesional.

Afiliasi penulis meliputi: nama departemen/unit, nama universitas/nama instansi, alamat, kota, kode pos, negara. Penulis korespondensi (termasuk alamat e-mail) ditulis dengan menambahkan tandasuperscript setelah nama. Bila penulis memiliki afiliasi yang berbeda, diberikan kode nomor berbeda di akhir nama penulis dengan format superscript. Bila semua penulis memiliki afiliasi/instansi yang sama, kode nomor tidak perlu dituliskan.

Abstrak memberikan pengantar singkat disertai masalah, tujuan, metode, ringkasan hasil serta kesimpulan penelitian, ditulis dalam satu paragraf dalam 1 kolom maksimal 250 kata. Abstrak dibuat dalam 2 bahasa. Apabila naskah dalam Bahasa Indonesia, maka abstrak dengan Bahasa Indonesia ditulis terlebih dahulu kemudian abstrak dalam Bahasa Inggris dan sebaliknya.

Kata Kunci/Keyword minimal 3 kata atau frasa dipisahkan dengan tanda koma yang menunjukkan subjek-subjek utama di dalam naskah.

Isi tulisan dimulai dari PENDAHULUAN, METODE, HASIL DAN PEMBAHASAN, KESIMPULAN, UCAPAN TERIMA KASIH DAN DAFTAR PUSTAKA. Isi tulisan dibuat dengan 2 kolom dengan huruf Arial 10pt.

Tabel dibuat ringkas dan diberi judul yang singkat tetapi jelas hanya menyajikan data esensial dan mudah dipahami. Tabel diberi catatan secukupnya, termasuk sumbernya. Setiap tabel diberi nomor secara berurutan di dalam naskah. Untuk tabel yang ukurannya melebihi satu kolom, maka dapat menempati area dua kolom.

Gambar, Grafik dan Foto harus tajam dan jelas agar cetakan berkualitas baik. Semua simbol di dalamnya harus dijelaskan. Gambar, grafik dan foto

memiliki kedalaman minimal 300 dpi. Gunakan *textbox* untuk menyisipkan gambar. File gambar asli mohon disertakan pada lampiran terpisah (*supplementary file*).

Kesimpulan simpulan harus menjawab tujuan penelitian dan disusun dalam bentuk narasi dan bukan pointer.

Ucapan terima kasih ucapan terima kasih wajib dituliskan penulis, ditujukan kepada pihak-pihak yang membantu penulis dalam melakukan penelitian misalnya pemberi data atau pemberi dana.

Daftar Pustaka Referensi hendaknya dari sumber yang jelas dan terpercaya, minimal berjumlah 10 referensi. Setiap referensi yang tercantum dalam daftar pustaka harus dikutip (disitir) pada naskah dan sebaliknya setiap kutipan harus tercantum dalam daftar pustaka. Referensi primer harus lebih dari 80% dan diterbitkan dalam 5 tahun terakhir. Referensi yang dicantumkan dalam naskah mengikuti pola baku dengan disusun menurut abjad berdasarkan nama (keluarga) penulis pertama dan tahun publikasi, dengan sistem sitasi *American Physiological Association* 6th Edition. Setiap artikel yang dikirimkan ke Geomatika harus menggunakan perangkat lunak pengelolaan referensi (*reference management software*) yang mendukung *Citation Style Language* seperti Mendeley, Zotero, EndNote dan lainnya.

Contoh penulisan di dalam Daftar Pustaka adalah sebagai berikut:

Aziz, N. (2006). Analisis Ekonomi Alternatif Pengelolaan Ekosistem Mangrove di Kecamatan Barru, Kabupaten Barru. Universitas Diponegoro.

(Contoh referensi **Skripsi/Tesis/Disertasi**)

Brown, S. (1997). Estimating Biomass and Biomass Change of Tropical Forest. Retrieved September 17, 2007, from <http://cdm.unfccc.int/Panels/ar>.

(Contoh referensi **Naskah Online**)

Danoedoro, P. (2009). Land-use Information from the Satellite Imagery: Versatility and Contents for Local Physical Planning. Queensland: LAP Lambert Acad. Publisher.

(Contoh referensi dalam **Buku**)

Indonesia, R. Undang-undang No. 4 tentang Informasi Geospasial (2011).

(Contoh referensi dalam **Undang-undang**)

Neumeyer, J. (2010). Superconducting Gravimetry. In G.Xu (Ed.), *Sciences of Geodesy - I* (pp. 340–406). Springer-Verlag Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-11741-1>

(Contoh referensi **bagian dari Buku**)

Othman, A., & Gloaguen, R. (2013). River Courses Affected by Landslides and Implications for Hazard Assessment: A High Resolution Remote Sensing Case Study in NE Iraq–W Iran. *Remote Sensing*, 5(3), 1024–1044.

(Contoh referensi **Artikel dalam Jurnal**)

Setiawan, I. B. (1999). Studies on environmental change and sustainable development of Cidanau Watershed. In *International Workshop on Sustainable Resources Management of Cidanau Watershed* (p. 235). Bogor.

(Contoh referensi dalam **Naskah Prosiding**)

Catatan:

- **Pustaka berupa diktat kuliah, bahan presentasi, dan dokumentasi perseorangan yang belum dipublikasi resmi tidak diperkenankan untuk digunakan/ dicantumkan**

Sekretariat

Badan Informasi Geospasial

Jl. Raya Jakarta-Bogor, Km. 46 Cibinong

Kabupaten Bogor, Jawa Barat, 16911, Indonesia

Telp. 021-8752062 fax. 021-8752064

e-mail: majalah.globe@big.go.id

Homepage: jurnal.big.go.id/index.php/GL

P-ISSN 1411-0512

