



## ARTIKEL PENELITIAN

## Analisis perubahan sistem kualitas udara Kota Yogyakarta pada masa pandemi COVID-19

Himawan Novianto<sup>1,\*</sup>, Muhammad Mufti Azis<sup>2</sup>, Hilya Mudrika Arini<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Magister Teknik Sistem, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Jl. Teknik Utara No. 3, Berek, Yogyakarta 55281, Indonesia

<sup>2</sup>Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Jl. Grafika No. 2, Kampus UGM, Yogyakarta 55281, Indonesia

<sup>3</sup>Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Jl. Grafika No. 2, Kampus UGM, Yogyakarta 55281, Indonesia

Disubmit 4 Januari 2022; direvisi 30 Januari 2022; diterima 31 Januari 2022



**OBJECTIVES** While several studies have discussed the reduction in air pollutant concentrations during the COVID-19 pandemic, not many have looked at the relationship between the variables of air quality and the level of community mobilities. In this study, the relationship between the variables of air pollutants, meteorological factors, and the level of community mobilities were investigated in Yogyakarta, Indonesia. **METHODS** The phenomena of the relationship between air quality system and mobilities during the 2020 COVID-19 pandemic was divided into two periods: (a) Activity Restrictions (April to July 2020) and (b) New Normal (August to December 2020). A comparison of air pollutant concentrations before and during the COVID-19 pandemic showed a change in the form of improving air quality in Yogyakarta City, from the Good category: 31.85% to 90.37% PSI (*chi-square asymp. sig. < 0.05*). **RESULTS** The results obtained from this study showed that air pollutants PM<sub>10</sub>, SO<sub>2</sub>, and CO decreased by 18%, 93%, and 74%, while O<sub>3</sub> increased by 104% during the 2020 COVID-19 pandemic. Primary air pollutants PM<sub>10</sub>, SO<sub>2</sub>, and CO had a positive relationship to the meteorological factor of sunshine, but had a negative relationship to secondary air pollutant O<sub>3</sub> and meteorological factors of air temperature, humidity, rainfall, and wind speed. Restrictions on communi-

ty activities outside the home generally led to improved air quality, where a decrease in transportation mobility became a variable that affected the decrease in primary air pollutants in Yogyakarta City. **CONCLUSIONS** Activity restrictions affected secondary air pollutant, where an increase in O<sub>3</sub> occurred when indoor and transportation mobilities increased.

**KEYWORDS** air pollution; biplot; meteorology; mobility; regression analysis

**TUJUAN** Beberapa penelitian membahas penurunan konsentrasi polutan udara selama masa pandemi COVID-19, namun belum banyak penelitian yang membahas kaitan antara variabel kualitas udara dan tingkat mobilitas masyarakat. Penelitian ini menyelidiki keterkaitan hubungan antara variabel polutan udara, faktor meteorologi, dan tingkat mobilitas masyarakat di Kota Yogyakarta. **METODE** Fenomena hubungan sistem kualitas udara dan mobilitas masa pandemi COVID-19 tahun 2020 terbagi dalam dua periode: (a) Pembatasan Aktivitas (April s.d. Juli 2020) dan (b) Normal Baru (Agustus s.d. Desember 2020). Kualitas udara Kota Yogyakarta sebelum dan pada masa pandemi COVID-19 menunjukkan perbaikan, dari kategori Baik: 31,85% menjadi 90,37% ISPU (*chi-square asymp. sig. < 0,05*). **HASIL** Polutan udara PM<sub>10</sub>, SO<sub>2</sub>, dan CO menurun sebesar 18%, 93%, dan 74%, sedangkan O<sub>3</sub> meningkat sebesar 104% pada masa pandemi COVID-19 tahun 2020. Polutan udara primer PM<sub>10</sub>, SO<sub>2</sub>, dan CO berhubungan positif terhadap faktor meteorologi penyinaran matahari, tetapi berhubungan negatif terhadap polutan udara sekunder O<sub>3</sub> serta faktor meteorologi suhu udara, kelembaban udara, curah hujan, dan kecepatan angin. **KESIMPULAN** Pembatasan aktivitas masyarakat di luar rumah secara umum menyebabkan perbaikan kualitas udara, di mana penurunan mobilitas transportasi menjadi variabel yang mempengaruhi penurunan polutan udara primer di Kota Yogyakarta. Pembatasan aktivitas mempengaruhi polutan udara sekunder, di mana kenaikan O<sub>3</sub> terjadi ketika mobilitas dalam ruangan dan transportasi meningkat.

**KATA KUNCI** analisis regresi; *biplot*; meteorologi; mobilitas; polusi udara

\*Korespondensi: [himawann91@gmail.com](mailto:himawann91@gmail.com)

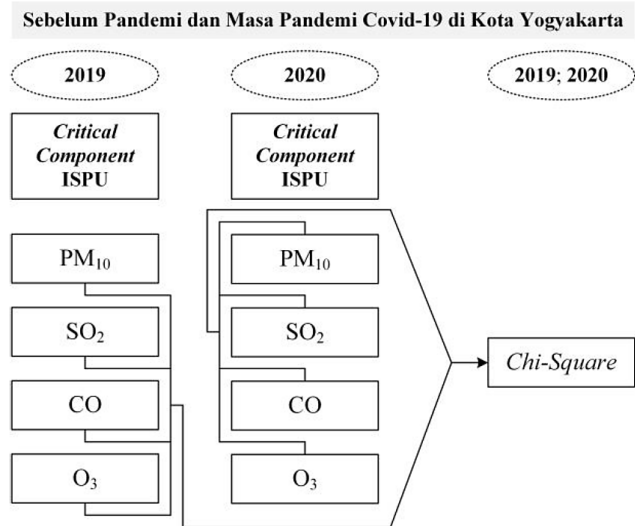
1. PENDAHULUAN

Polusi udara saat ini sedang menjadi perhatian utama di kota-kota modern, karena pengaruhnya terhadap kesehatan masyarakat dan ekonomi global (Idrees dan Zheng 2020). Menurut Organisation for Economic Co-operation and Development (2014), polusi udara telah mengambil alih penyebab utama kematian dini yang sebelumnya didominasi kondisi sanitasi yang buruk dan kurangnya sumber air minum.

Pada tahun 2020, virus Corona jenis baru (SARS-CoV-2) telah menyebar, yang disebut sebagai penyakit Coronavirus 2019 (COVID-19) (Yuliana 2020). Tinjauan kualitas udara pada masa pandemi COVID-19 telah menjadi topik pembahasan baru dan penting di berbagai kota di seluruh dunia, dengan ditemukan adanya tren perubahan berupa peningkatan kualitas udara.

Sulaymon dkk. (2021) telah menemukan terjadinya peningkatan kualitas udara yang signifikan selama lockdown COVID-19 di Wuhan, Cina. Hasil pengukuran Saxena dan Raj (2021) untuk polutan udara PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, NO<sub>2</sub>, dan CO akibat lockdown selama pandemi COVID-19 di kota-kota India Utara, seperti Delhi, Noida, Gurugram, dan Agra, diamati mengalami penurunan yang signifikan, sementara O<sub>3</sub> meningkat di Agra dan menurun di semua stasiun lain selama lockdown. Dang dan Trinh (2021) menemukan konsentrasi NO<sub>2</sub> dan PM<sub>2.5</sub> secara global dari 164 negara menurun sebesar 5% dan 4%. Jiaxin dkk. (2021) mendapatkan hasil kualitas udara pada masa pandemi COVID-19 tahun 2020 di Wuhan, Cina diketahui jauh lebih baik, dibandingkan periode yang sama sebelum masa pandemi tahun 2019. Tindakan karantina ketat selama lockdown Ding dkk. (2021) telah menghasilkan penurunan emisi sumber antropogenik di Dataran Cina Utara dibandingkan dengan periode yang sama tahun 2019. Investigasi dampak respons COVID-19 dan meteorologi terhadap kualitas udara di Selandia Baru yang ditinjau oleh Talbot dkk. (2021) menemukan hasil bahwa selama masa pandemi COVID-19, konsentrasi NO<sub>2</sub> berkurang, sedangkan konsentrasi PM<sub>10</sub> dan PM<sub>2.5</sub> juga berkurang, tetapi pada tingkat yang lebih rendah daripada NO<sub>2</sub>.

Akibat penerapan lockdown atau pembatasan aktivitas, terjadi peningkatan kualitas udara di berbagai wilayah karena berkurangnya kegiatan industri dan transportasi (Arfiani dan Azizah 2021). Tinjauan peningkatan kualitas udara pada masa pandemi COVID-19 di Indonesia telah dilakukan, seperti di Jakarta (Rizi D. dkk. 2019) dan Kawasan ITDC Nusa Dua, Bali (Sulistiani dkk. 2021). Pada masa pandemi COVID-19, terjadi penurunan konsentrasi rata-rata PM<sub>10</sub> dan PM<sub>2.5</sub> di Jakarta pada Maret 2020 dibandingkan dengan Maret ta-



GAMBAR 1. Analisis-1a: Uji statistika chi-square.

hun sebelumnya (Rizi D. dkk. 2019). Sulistiani dkk. (2021) juga menemukan adanya penurunan konsentrasi SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, CO, TSP, dan H<sub>2</sub>S selama masa pandemi COVID-19 dan normal baru, sedangkan konsentrasi O<sub>3</sub> meningkat dibandingkan periode normal.

Polusi udara menjadi perhatian Indonesia sesuai arah kebijakan Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (TPB). Upaya pencapaian Tujuan Pembangunan Berkelanjutan menjadi prioritas pembangunan nasional Indonesia (Kementerian PPN/Bappenas 2020), di mana Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta menjadi provinsi kedua yang meluncurkan Rencana Aksi Daerah Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (DPR RI 2019).

Kota Yogyakarta adalah salah satu Kota pusat kegiatan nasional dan kawasan andalan (Noviani 2010) dan pariwisata merupakan salah satu sektor penting perekonomian Kota Yogyakarta (RKPD Kota Yogyakarta 2020). Dalam konsep "sustainable way" (Arida 2012), industri pariwisata didasarkan atas ketersediaan sumber daya alam, salah satunya seperti udara yang dijadikan sebagai objek sekaligus produk. Pertambahan penduduk yang meningkat di Kota Yogyakarta berkorelasi pada penyediaan pendukung wisata, seperti pembangunan hotel, rumah makan, maupun penyediaan jasa transportasi umum (main tourism suprastructure), sehingga memiliki korelasi kuat dengan kualitas udara (DLH Kota Yogyakarta 2021).

Penelitian ini membahas tentang pentingnya pemantauan kualitas udara untuk keselamatan manusia dan lingkung-

TABEL 1. Variabel-variabel penelitian.

No.	Terikat (Dependent)	Antara (Intervening)	Bebas (Independent)
1	Particulate Matter 10 (PM <sub>10</sub> )	Suhu Udara Rata-rata (T <sub>avg</sub> )	Mob. Retail dan Rekreasi (M <sub>RR</sub> )
2	Sulfur Dioksida (SO <sub>2</sub> )	kelembaban Udara Rata-rata (RH <sub>avg</sub> )	Mob. Toko Bahan Makanan dan Apotek (M <sub>GP</sub> )
3	Karbon Monoksida (CO)	Curah Hujan (RR)	Mob. Taman (M <sub>P</sub> )
4	Ozon (O <sub>3</sub> )	Lamanya Penyinaran Matahari (ss)	Mob. Pusat Transportasi Umum (M <sub>TS</sub> )
5	-	Kecepatan Angin Rata-rata (ff <sub>avg</sub> )	Mob. Tempat Kerja (M <sub>W</sub> )
6	-	-	Mob. Area Permukiman (M <sub>R</sub> )

PM<sub>10</sub>, SO<sub>2</sub>, CO, O<sub>3</sub> (ISPU); T<sub>avg</sub> (°C), RH<sub>avg</sub> (%), RR (mm), ss (jam), ff<sub>avg</sub> (m/s); M<sub>RR</sub>, M<sub>GP</sub>, M<sub>P</sub>, M<sub>TS</sub>, M<sub>W</sub>, M<sub>R</sub> (% Laju Aktivitas). a) Variabel terikat/polutan udara sesuai Kep. KA Bapedal No.: KEP-107/KABAPEDAL/11/1997 dan PERMEN LHK RI No. P.14/MENLHK/SETJEN/KUM.1/7/2020; b) Variabel antara/faktor meteorologi sesuai PERMEN LHK RI No. P.14/MENLHK/SETJEN/KUM.1/7/2020; dan c) Variabel bebas/tingkat mobilitas masyarakat sesuai Google's COVID-19 Community Mobility Reports.

an, terhadap kondisi kualitas udara Kota Yogyakarta. Beberapa penelitian terdahulu telah membahas penurunan konsentrasi polutan udara selama masa pandemi COVID-19 (Mansori dkk. 2018), tetapi masih sedikit penelitian yang membahas hubungan sistem kualitas udara dan mobilitas. Melalui penelitian ini, hubungan antara variabel polutan udara, faktor meteorologi, dan mobilitas diselidiki secara lebih lanjut.

Perubahan sistem kualitas udara adalah kondisi peningkatan dan/atau penurunan dari beberapa variabel polutan udara utama yang ditinjau terhadap fenomena faktor-faktor lain yang turut mempengaruhinya. Melalui analisis penelitian ini faktor-faktor yang diselidiki antara lain sebagai berikut: (1) Perubahan sistem kualitas udara pada masa pandemi COVID-19 tahun 2020 terhadap sebelum masa pandemi tahun 2019 di Kota Yogyakarta, yang meliputi: (a) Komparasi kondisi kualitas udara antara tahun 2019 dan 2020, dan (b) Variabel yang paling dominan dalam penentuan kualitas udara tahun 2019 dan 2020; serta (2) Hubungan sistem kualitas udara dan mobilitas pada masa pandemi COVID-19 tahun 2020 di Kota Yogyakarta.

Sistem kualitas udara merupakan sistem yang memuat unsur variabel meliputi polutan udara dan faktor meteorologi. Keberadaan polutan udara di lingkungan dipengaruhi oleh kondisi meteorologi (Yan dkk. 2016). Dalam Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan RI No.P.14/MENLHK/SETJEN/KUM.1/7/2020 disebutkan data meteorologi mempengaruhi konsentrasi udara ambien. Sedangkan, variabel mobilitas merupakan variabel tingkat mobilitas masyarakat selama masa pandemi COVID-19 yang mencatat jumlah kunjungan masyarakat serta memetakan berbagai tren pergerakan dari waktu ke waktu berdasarkan geografi di berbagai kategori lokasi.

2. METODE PENELITIAN

Jenis penelitian adalah studi *ex-post facto* yang dilakukan setelah peristiwa yang ditinjau terjadi atau non-eksperimental serta tidak dilakukan perlakuan atau intervensi terhadap variabel bebasnya (Ibrahim dkk. 2018). Desain penelitian asosiatif yang digunakan meninjau hubungan antar variabel sis-

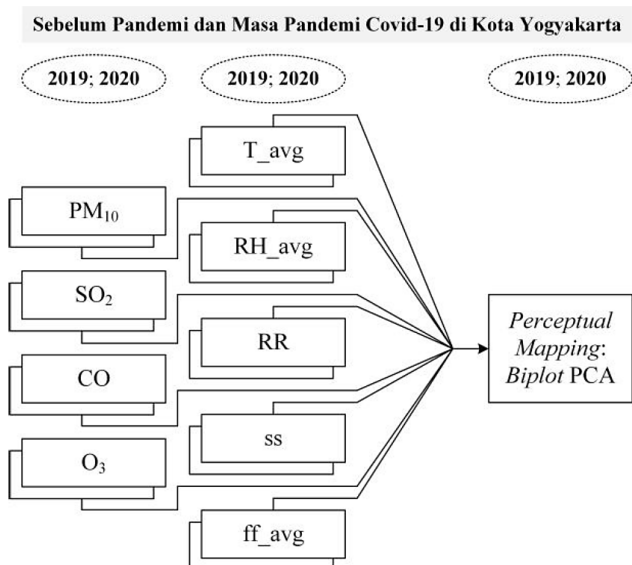
tem kualitas udara dan tingkat mobilitas terkait pandemi COVID-19 secara simetris, kausal, dan interaktif. Data penelitian yang digunakan berupa data kuantitatif yang diolah menggunakan teknik analisis statistika.

2.1 Bahan penelitian

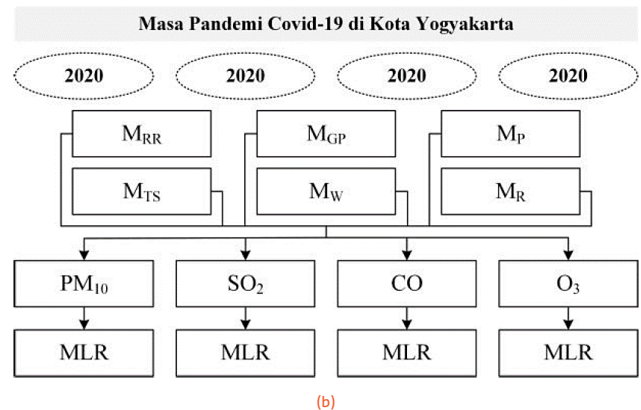
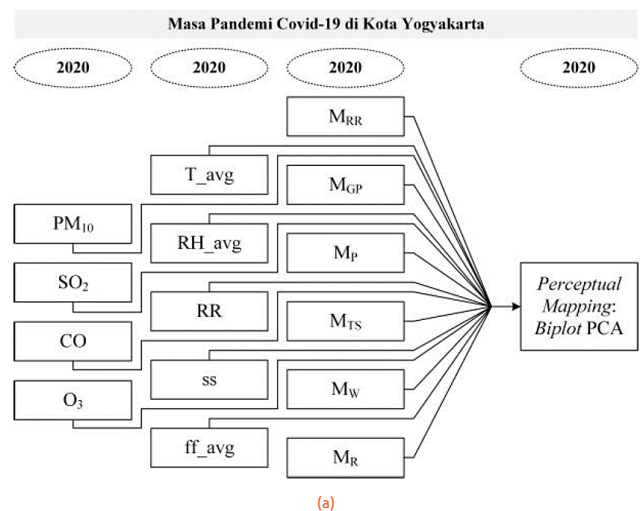
Penelitian menggunakan data sekunder atau bahan dokumen, yang dikumpulkan setelah kejadian yang dipersoalkan berlangsung atau telah terjadi (Suryabrata 2003). Data penelitian, meliputi: (a) Data polutan udara dari Dinas Lingkungan Hidup Kota Yogyakarta berupa data Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU) *time-series* harian tahun 2019 dan 2020, (b) Data faktor meteorologi dari BMKG Klimatologi Yogyakarta berupa data meteorologi *time-series* harian tahun 2019 dan 2020, dan (c) Data mobilitas masyarakat pada berbagai lokasi dari Google's reports berupa data mobilitas *time-series* harian tahun 2020.

Variabel penelitian berupa: (1) Polutan udara, (2) Faktor meteorologi, dan (3) Tingkat mobilitas masyarakat pada berbagai lokasi, pada Tabel 1, yang didasarkan dari penelitian terdahulu tentang topik kualitas udara terkait pandemi COVID-19 oleh Rizi D. dkk. (2019), Sulaymon dkk. (2021), Gao dkk. (2021), dan Sulistiani dkk. (2021).

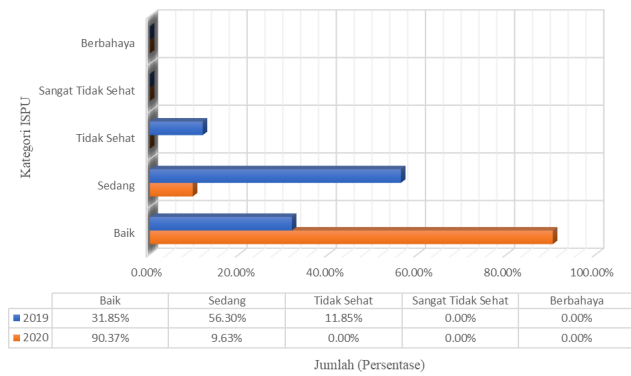
Data penelitian terbatas pada sumber data dalam rentang waktu tertentu, seperti data variabel polutan udara sebelum dan masa pandemi dari (19/08/2019 s.d. 31/12/2019 dan 01/04/2020 s.d. 31/12/2020). Selain itu, data variabel ting-



GAMBAR 2. Analisis-1b: Perceptual mapping: biplot.



GAMBAR 3. Analisis-2: Perceptual Mapping: Biplot dan Multiple Linear Regression/MLR. (a) Perceptual Mapping: Biplot; (b) Multiple Linear Regression/MLR.



**GAMBAR 4.** Komparasi tingkat polusi udara Kota Yogyakarta antara 2019 dan 2020. Sumber: DLH Kota Yogyakarta, 2021a; hasil pengolahan penulis, 2021. Keterangan: data 19/08/19-31/12/19 dan 19/08/20-31/12/20. ISPU sesuai Kep. KA Bapedal No.: KEP-107/KABAPEDAL/11/1997.

kat mobilitas masyarakat selama masa pandemi COVID-19 dari (01/04/2020 s.d. 31/12/2020).

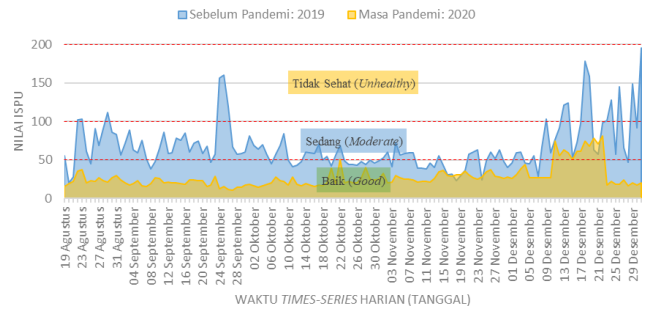
Penelitian ini dilakukan pada tinjauan lokasi di Kota Yogyakarta, Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta, Indonesia. Wilayah Kota Yogyakarta terbentang antara 110°24'19" sampai 110°28'53" B.T. dan 7°15'24" sampai 7°49'26" L.S. Waktu analisis penelitian dilaksanakan pada tahun 2021.

### 2.2 Cara penelitian

Metode analisis disajikan pada Gambar 1–3. Persiapan penelitian, meliputi: (a) Kebutuhan data, dan (b) Perangkat pengolahan data berupa SPSS Statistics serta Microsoft Excel.

Tinjauan analisis menggunakan: (a) Analisis statistika komparasi metode pengujian *chi-square*, (b) *Perceptual mapping* metode *biplot* PCA, dan (c) Pengaruh variabel bebas terhadap variabel terikat metode regresi linear. Alasan penggunaan metode analisis tersebut karena: (a) *Chi-square* termasuk studi analisis statistika komparasi untuk membandingkan keadaan variabel dari dua sampel atau lebih (Susilawati dkk. 2017), (b) Analisis *biplot* PCA menyajikan *perceptual map* dua dimensi secara lebih jelas dan ringkas, dan (c) Analisis regresi berfungsi mengukur hubungan pengaruh variabel bebas terhadap variabel terikat.

Wabah COVID-19 melanda Provinsi DIY sejak 15 Maret 2020 (Sucahyo 2020). Sejak 16 Maret 2020, Gubernur DIY telah meminta masyarakat untuk membatasi aktivitas dan turut aktif memerangi penyebaran virus *Corona* (Pemerintah Daerah D. I. Yogyakarta 2020). Metode pada Gambar 1 dan 2 memuat variabel polutan udara dan/atau faktor meteorologi dengan waktu data sebelum pandemi (19/08/2019 s.d.



**GAMBAR 5.** Komparasi *critical component* ISPU Kota Yogyakarta 2019 dan 2020. Keterangan: data 19/08/19-31/12/19 dan 19/08/20-31/12/20. Berdasarkan nilai ISPU tertinggi (*critical component*) harian

31/12/2019) dan pada masa pandemi COVID-19 (19/08/2020 s.d. 31/12/2020). Metode pada Gambar 3 memuat variabel polutan udara, faktor meteorologi, dan/ atau tingkat mobilitas masyarakat pada berbagai lokasi dengan waktu data pada masa pandemi COVID-19 (01/04/2020 s.d. 31/12/2020).

Rangkaian metode analisis penelitian tersebut didesain untuk menyelidiki alasan atau penyebab fenomena hubungan antar variabel sistem kualitas udara Kota Yogyakarta terkait pandemi COVID-19.

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 3.1 Komparasi kualitas udara 2019 dan 2020

Tingkat polusi udara Kota Yogyakarta antara 19 Agustus 2019 s.d. 31 Desember 2019 dan 19 Agustus 2020 s.d. 31 Desember 2020 dilakukan komparasi terhadap kategori Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU), yang disajikan pada Tabel 2 dan Gambar 4. Kondisi kualitas udara Kota Yogyakarta terlihat mengalami perubahan berupa peningkatan atau perbaikan, dari kategori Baik: 31,85% ISPU pada tahun 2019 menjadi Baik: 90,37% ISPU pada tahun 2020.

Melalui hasil analisis perhitungan didapatkan peningkatan kualitas udara yang signifikan pada masa pandemi COVID-19 di Kota Yogyakarta. Pada masa pandemi COVID-19 dari (19/08/20-31/12/20) dibandingkan sebelum pandemi dari (19/08/19-31/12/19), konsentrasi polutan udara PM<sub>10</sub>, SO<sub>2</sub>, dan CO mengalami penurunan sebesar 18%, 93%, dan 74%, sedangkan konsentrasi O<sub>3</sub> meningkat sebesar 104%.

Komparasi *critical component* ISPU Kota Yogyakarta antara sebelum pandemi tahun 2019 dan masa pandemi tahun 2020 disajikan pada Gambar 5. *Critical component* polutan udara Kota Yogyakarta sebelum pandemi dari (19/08/19-31/12/19) ditandai oleh CO (99,26%) dan PM<sub>10</sub> (0,74%), se-

**TABEL 2.** Komparasi angka dan kategori ISPU Kota Yogyakarta antara 2019 dan 2020.

No.	Kategori	Indeks	Tahun 2019		Tahun 2020	
			Jumlah (Hari)	Persentase (%)	Jumlah (Hari)	Persentase (%)
1	Baik	1 – 50	43	31,85	122	90,37
2	Sedang	51 – 100	76	56,3	13	9,63
3	Tidak Sehat	101 – 199	16	11,85	0	0
4	Sangat Tidak Sehat	200 – 299	0	0	0	0
5	Berbahaya	300 – lebih	0	0	0	0
Total			135	100	135	100

Keterangan: data 19/08/19-31/12/19 dan 19/08/20-31/12/20. ISPU sesuai Kep. KA Bapedal No: KEP-107/KABAPEDAL/11/1997. Sumber: DLH Kota Yogyakarta, 2021a; hasil pengolahan penulis, 2021.

**TABEL 3.** Nilai rata-rata polutan udara dan faktor meteorologi tahun 2019 dan 2020.

No.	Subjek (Bulan)	PM <sub>10</sub> (ISPU)	SO <sub>2</sub> (ISPU)	CO (ISPU)	O <sub>3</sub> (ISPU)	T_avg (°C)	RH_avg (%)	RR (mm)	ss (jam)	ff_avg (m/s)
1	Aug-19	23	4	73	15	24,5	78	0,1	7,4	2
2	Sept-19	23	4	72	9	25,3	76	0	7,6	3
3	Okt-19	18	2	55	6	26,7	78	0,1	8,4	3
4	Nov-19	15	3	48	10	27	80	4,6	6,9	3
5	Des-19	21	3	88	18	26,8	85	11,7	5,8	2
6	Aug-20	21	0	14	22	26,2	83	0	9	2
7	Sept-20	16	0	14	17	26,3	84	2,9	6,7	3
8	Okt-20	16	0	18	17	26,4	84	9,1	4	2
9	Nov-20	14	0	21	28	27,1	82	9,4	5,2	2
10	Des-20	14	0	21	33	26,3	85	20,5	4,3	2

Sumber: DLH Kota Yogyakarta, 2021a; BMKG Klimatologi Yogyakarta, 2021; Hasil kompilasi pengolahan penulis, 2021.

dangkan masa pandemi COVID-19 dari (19/08/20-31/12/20) ditandai oleh O<sub>3</sub> (62,96%), CO (20,00%), dan PM<sub>10</sub> (17,04%).

Melalui *non-parametric test* uji *Kolmogorov-Smirnov* (Gambar 5) didapatkan hasil bahwa nilai *critical component* ISPU tahun 2019 maupun 2020 tidak berdistribusi normal, yang ditunjukkan dengan nilai *asympt. sig.*  $0,000 < 0,05$ . Kemudian, berdasarkan analisis uji *chi-square* diperoleh hasil nilai *asympt. sig.*  $0,000 < 0,05$ , sehingga diketahui bahwa terdapat perbedaan kualitas udara Kota Yogyakarta antara sebelum pandemi tahun 2019 terhadap masa pandemi COVID-19 tahun 2020.

### 3.2 Variabel dominan 2019 dan 2020

Pada Tabel 3 disajikan nilai rata-rata variabel sistem kualitas udara per bulan antara sebelum pandemi tahun 2019 dan masa pandemi COVID-19 tahun 2020 di Kota Yogyakarta.

Kecukupan data penelitian (Tabel 3) dapat diterima karena nilai *KMO Measure*  $0,652 > 0,5$ , serta signifikansi nilai *Bartlett's Test*  $0,015 < 0,05$  Hair Jr. dkk. (2010), dalam (Chan dan Idris 2017), sehingga data keseluruhan memiliki korelasi antar variabel. Titik batas nilai *Measure of Sampling Adequacy* (MSA) setiap variabel: PM<sub>10</sub> {0,608}, SO<sub>2</sub> {0,715}, CO {0,558}, O<sub>3</sub> {0,688}, T\_avg {0,471}, RH\_avg {0,859}, RR {0,678}, ss {0,641}, dan ff\_avg {0,610}  $> 0,50$  (Hair Jr. dkk. 2010), sehingga setiap variabel memiliki korelasi yang mencukupi terhadap setiap variabel lainnya, kecuali T\_avg. Meskipun, variabel T\_avg tetap dipertahankan untuk dinilai keberadaannya dalam analisis. Dengan demikian, secara umum data penelitian layak untuk dilanjutkan ke dalam proses *perceptual mapping: biplot*.

Pada Gambar 6 disajikan *perceptual map: biplot* sistem kualitas udara Kota Yogyakarta untuk setiap variabel dominan antara sebelum pandemi tahun 2019 dan masa pandemi COVID-19 tahun 2020. Berdasarkan hasil analisis *perceptual mapping: biplot* didapatkan total pembentukan varians sampai komponen kedua adalah 74,487%.

Berdasarkan Gambar 6, beberapa variabel paling dominan dalam penentuan kualitas udara tahun 2019 dan 2020, dirangkum pada Tabel 4.

Variabel paling dominan sebelum pandemi tahun 2019 adalah polutan udara PM<sub>10</sub>, SO<sub>2</sub>, dan CO, serta faktor meteorologi Lamanya Penyinaran Matahari (ss) dan Kecepatan Angin Rata-rata (ff\_avg). Sedangkan, variabel paling dominan masa pandemi tahun 2020 adalah polutan udara O<sub>3</sub>, serta faktor meteorologi Suhu Udara Rata-rata (T\_avg), kelembab-

an Udara Rata-rata (RH\_avg), dan Curah Hujan (RR). Meskipun demikian, nilai rata-rata faktor meteorologi antara sebelum pandemi tahun 2019 dan masa pandemi COVID-19 tahun 2020 diketahui tidak jauh berubah, tetapi berfluktuasi setiap bulannya.

Rangkuman penjelasan kualitas udara Kota Yogyakarta sebelum pandemi tahun 2019 dan masa pandemi COVID-19 tahun 2020 berdasarkan variabel dominannya, disajikan pada Tabel 5. Faktor meteorologi di Kota Yogyakarta memiliki karakteristik yang khas, di mana faktor meteorologi pada bulan Desember ketika polutan udara O<sub>3</sub> tinggi, faktor meteorologi curah hujan dan kelembaban udara juga tinggi.

Hasil *perceptual map: biplot* (Gambar 6) yang telah didapatkan terkait penurunan PM<sub>10</sub>, SO<sub>2</sub>, CO, serta naiknya O<sub>3</sub> masa pandemi COVID-19 di Kota Yogyakarta, ternyata sejalan dengan literatur penelitian terdahulu oleh Sulaymon dkk. (2021) yang menyatakan selama pembatasan aktivitas pada masa pandemi COVID-19, konsentrasi PM<sub>10</sub>, CO, dan SO<sub>2</sub> menurun, sedangkan O<sub>3</sub> meningkat. Sulistiani dkk. (2021) juga mendapatkan hasil tinjauan bahwa konsentrasi polutan udara, seperti SO<sub>2</sub> dan CO selama masa pandemi COVID-19 dan normal baru menurun, sedangkan konsentrasi O<sub>3</sub> meningkat, dibandingkan dengan periode normal. Fan dkk. (2021) menyatakan bahwa konsentrasi O<sub>3</sub> umumnya meningkat selama pembatasan aktivitas masa pandemi COVID-19.

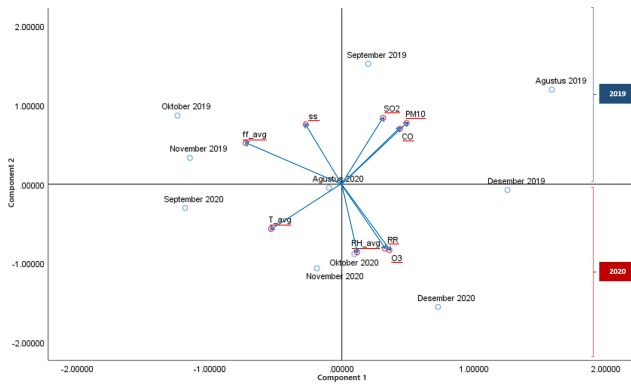
### 3.3 Hubungan sistem kualitas udara dan mobilitas 2020

Pada Tabel 6 disajikan nilai rata-rata variabel sistem kualitas udara dan mobilitas per bulan pada masa pandemi COVID-19 tahun 2020 di Kota Yogyakarta.

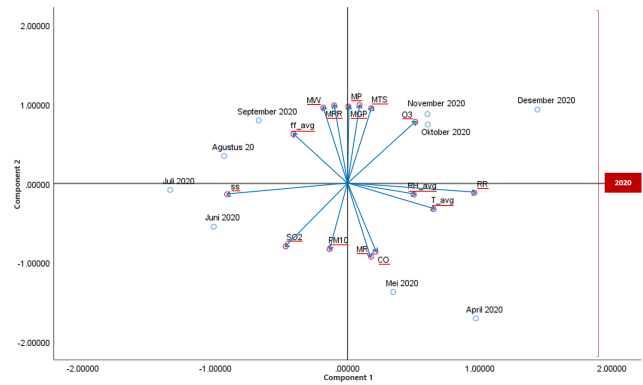
Berdasarkan Gambar 7, pembagian periode sistem kualitas udara dan mobilitas masa pandemi COVID-19 tahun 2020, disajikan pada Tabel 7.

**TABEL 4.** Variabel paling dominan penentuan kualitas udara tahun 2019 dan 2020.

Sebelum Pandemi: 2019	
Polutan Udara	PM <sub>10</sub> , SO <sub>2</sub> , CO
Faktor Meteorologi	ss, ff_avg
Masa Pandemi: 2020	
Polutan Udara	O <sub>3</sub>
Faktor Meteorologi	T_avg, RH_avg, RR



GAMBAR 6. Perceptual map: biplot variabel kualitas udara dominan tahun 2019 dan 2020.



GAMBAR 7. Perceptual map: biplot hubungan sistem kualitas udara dan mobilitas tahun 2020.

Rangkuman penjelasan hubungan sistem kualitas udara dan mobilitas masa pandemi tahun 2020 di Kota Yogyakarta, disajikan pada Tabel 8.

### 3.4 Pengaruh mobilitas terhadap polutan udara 2020

Pada Tabel 9 disajikan data polutan udara dan tingkat mobilitas masyarakat Kota Yogyakarta pada masa pandemi COVID-19 tahun 2020. Data yang digunakan adalah data *time-series* harian dari 01 April 2020 s.d. 31 Desember 2020.

Model analisis regresi linear berganda berupa polutan udara sebagai variabel terikat (*dependent/response variable*) dan tingkat mobilitas masyarakat sebagai variabel bebas (*independent/predictor variables*).

Hasil analisis regresi linear berganda untuk pengaruh tingkat mobilitas terhadap polutan udara Kota Yogyakarta pada masa pandemi COVID-19 tahun 2020 disajikan pada Tabel 10. Persamaan regresi linear berganda untuk polutan udara versus mobilitas Kota Yogyakarta tahun 2020, disajikan melalui Persamaan 1–4.

$$PM_{10} = 15,748 - 0,475(M_{GP}) + 0,037(M_P) + 0,023(M_{TS}) - 0,182(M_W) - 0,544(M_R) \tag{1}$$

$$SO_2 = 0,038 - 0,012(M_{GP}) - 0,012(M_P) + 0,005(M_{TS}) - 0,023(M_W) - 0,027(M_R) \tag{2}$$

$$CO = 18,403 - 0,317(M_{GP}) - 0,331(M_P) + 0,213(M_{TS}) - 0,374(M_W) - 0,785(M_R) \tag{3}$$

$$O_3 = 56,128 + 0,170(M_{GP}) - 0,287(M_P) + 1,075(M_{TS}) + 0,408(M_W) + 1,832(M_R) \tag{4}$$

Analisis multikolinearitas dipakai nilai *cut-off*: nilai *tolerance* < 0,10 atau *Variance Inflation Factor* (VIF) > 10 (Mustofa dan Nurfadillah 2021), sehingga melalui simulasi didapatkan kombinasi variabel bebas  $M_{GP}$ ,  $M_P$ ,  $M_{TS}$ ,  $M_W$ , dan  $M_R$  memenuhi syarat nilai *cut-off*.

Melalui Persamaan 1, diketahui kenaikan  $PM_{10}$  terjadi ketika  $M_{TS}$ ,  $M_P$  meningkat dan  $M_{GP}$ ,  $M_W$ ,  $M_R$  turun. Sedangkan, pada Persamaan 2–3, kenaikan  $SO_2$  dan  $CO$  terjadi ketika  $M_{TS}$  meningkat dan  $M_{GP}$ ,  $M_P$ ,  $M_W$ ,  $M_R$  turun. Melalui Persamaan 1–3, didapatkan arah hubungan ketika  $M_{TS}$  (Mobilitas Pusat Transportasi Umum) tinggi, artinya masyarakat lebih banyak menggunakan kendaraan sebagai sarana transportasi di jalan raya, sehingga konsentrasi polutan udara dari kendaraan bermesin meningkat. Polutan udara  $PM_{10}$ ,  $SO_2$ , dan  $CO$  merupakan polutan udara primer yang banyak dijumpai dari hasil pembakaran internal mesin kendaraan bermotor di perkotaan (Kelly dan Fussell 2015; Jining dan Yi 2002; Istirokhatun dkk 2016; Nuryuneni dan Hartono 2013)

Melalui Persamaan 4, diketahui kenaikan konsentrasi  $O_3$  terjadi ketika  $M_{GP}$ ,  $M_{TS}$ ,  $M_W$ ,  $M_R$  meningkat dan  $M_P$  turun. Variabel  $M_{GP}$ ,  $M_W$ , dan  $M_R$  adalah mobilitas di dalam ruangan, sedangkan  $M_P$  dan  $M_{TS}$  merupakan mobilitas taman dan transportasi. Kenaikan polutan udara  $O_3$  dapat disebabkan oleh mobilitas dari dalam ruangan dan transportasi. Polutan udara  $O_3$  dari dalam ruangan, salah satu contohnya adalah dari tempat kerja, seperti pada mesin fotokopi, pember-

TABEL 5. Penjelasan variabel kualitas udara dominan tahun 2019 dan 2020.

Bulan	Penjelasan
Agustus, September, Oktober, November, Desember 2019	Sebelum Pandemi: Polutan udara Particulate Matter 10 (PM10), Sulfur Dioksida (SO <sub>2</sub> ), dan Karbon Monoksida (CO) pada bulan-bulan di tahun 2019 ini menjadi polutan udara paling dominan dengan konsentrasi yang tinggi. Puncak polutan udara Karbon Monoksida (CO) terjadi pada bulan Desember, yang mencapai nilai rata-rata konsentrasi 88 ISPU. Faktor meteorologi pada bulan Oktober dan November ditandai dengan naiknya Lamanya Penyinaran Matahari (ss) dan Kecepatan Angin Rata-rata (ff_avg). Selain itu, pada bulan Desember terjadi peningkatan nilai faktor meteorologi kelembaban Udara Rata-rata (RH_avg) dan Curah Hujan (RR) yang disertai dengan naiknya polutan udara Ozon (O <sub>3</sub> ).
Agustus, September, Oktober, November, Desember 2020	Masa Pandemi: Pada bulan-bulan di tahun 2020 ini, polutan udara Ozon (O <sub>3</sub> ) berangsur mengalami peningkatan beserta faktor meteorologi Suhu Udara Rata-rata (T_avg). Meskipun, secara umum fluktuasi nilai Suhu Udara Rata-rata (T_avg) antara 2019 dan 2020 relatif tidak terlalu jauh berubah. Namun, untuk polutan udara Particulate Matter 10 (PM <sub>10</sub> ), Sulfur Dioksida (SO <sub>2</sub> ), dan Karbon Monoksida (CO) pada bulan-bulan di tahun 2020 ini (masa pandemi COVID-19) terlihat tren nilai yang sangat rendah dibandingkan pada bulan-bulan yang sama tahun 2019 (sebelum masa pandemi). Selain itu, pada bulan Oktober, November, dan Desember mulai terjadi peningkatan relatif cukup tinggi polutan udara Ozon (O <sub>3</sub> ), yang disertai dengan naiknya faktor meteorologi kelembaban Udara Rata-rata (RH_avg) dan Curah Hujan (RR). Sedangkan, puncak kenaikan polutan udara Ozon (O <sub>3</sub> ) terjadi pada bulan Desember dengan nilai rata-rata konsentrasi 33 ISPU.

TABEL 6. Nilai rata-rata sistem kualitas udara dan mobilitas tahun 2020.

No.	Subjek (Bulan)	CO (ISPU)	PM <sub>10</sub> (ISPU)	SO <sub>2</sub> (ISPU)	O <sub>3</sub> (ISPU)	T_avg (°C)	RH_avg (%)	RR (mm)	ss (jam)	ff_avg (m/s)
1	Apr-20	30	1	42	10	26,9	85	14,7	5	1
2	Mei 20	20	1	27	6	26,9	85	12,9	5,8	2
3	Juni 20	20	1	29	6	26,4	81	1,8	6,5	2
4	Juli 20	21	1	26	11	25,7	82	0,1	6,9	2
5	Agustus 20	22	1	17	17	25,8	85	1,7	7	2
6	Sept-20	16	0	14	17	26,3	84	2,9	6,7	3
7	Oktober 20	16	0	18	17	26,4	84	9,1	4	2
8	Nov-20	14	0	21	28	27,1	82	9,4	5,2	2
9	Desember 20	14	0	21	33	26,3	85	20,5	4,3	2

		% Laju Aktivitas*					
		M <sub>RR</sub>	M <sub>GP</sub>	M <sub>P</sub>	M <sub>TS</sub>	M <sub>W</sub>	M <sub>R</sub>
1	Apr-20	-48	-32	-58	-69	-38	18
2	Mei 20	-48	-31	-59	-77	-40	19
3	Juni 20	-33	-23	-45	-65	-29	14
4	Juli 20	-25	-18	-35	-57	-27	12
5	Agustus 20	-18	-13	-21	-49	-26	11
6	Sept-20	-18	-12	-25	-50	-22	12
7	Oktober 20	-17	-8	-20	-46	-24	11
8	Nov-20	-17	-9	-25	-43	-22	9
9	Desember 20	-16	-6	-17	-39	-25	12

\*Baseline: kondisi normal sebelum pandemi (median periode 5 minggu dari 03/01/20-06/02/20). Sumber: DLH Kota Yogyakarta, 2021a; BMKG Klimatologi Yogyakarta, 2021; Google's COVID-19 Community Mobility Reports, 2021; hasil kompilasi pengolahan penulis, 2021.

sih udara elektrostatis, dan lain sebagainya Nagda dkk. (1987) dalam Botkin (2003) dalam Suganda (2010) Polutan udara O<sub>3</sub> tidak hanya berasal dari dalam ruangan, tetapi juga dapat berasal dari polusi pembakaran internal mesin kendaraan bermotor yang salah satunya menghasilkan gas CO. Polutan udara CO telah diketahui sebagai salah satu prekursor yang sangat berpengaruh terhadap proses pembentukan O<sub>3</sub> di atmosfer Spivakovsky dkk. (2000) dalam Sulistiyono dkk. (2019). Dalam penelitiannya, Damara dkk. (2017) menjelaskan bahwa kawasan perkotaan menghasilkan konsentrasi CO paling tinggi, di mana sebagian besar konsentrasi CO tersebut berasal dari sektor transportasi kendaraan bermotor.

### 3.5 Pembahasan hasil analisis penelitian

Berdasarkan hasil analisis penelitian, kualitas udara Kota Yogyakarta mengalami perubahan berupa peningkatan atau perbaikan pada masa pandemi COVID-19 tahun 2020 terhadap tinjauan sebelum masa pandemi tahun 2019, yaitu dari kategori Indeks Standar Pencemar Udara/ISPU [Baik: 31,85%; Sedang: 56,30%; Tidak Sehat: 11,85%] pada tahun 2019 menjadi [Baik: 90,37%; Sedang: 9,63%; Tidak Sehat: 0,00%] pada tahun 2020. Kualitas udara Kota Yogyakarta antara sebelum pandemi tahun 2019 dan pada masa pandemi COVID-19 tahun 2020 terlihat dengan jelas perbedaannya melalui hasil analisis statistika pengujian *chi-square*, yang ditunjukkan

TABEL 7. Kategori periode sistem kualitas udara dan mobilitas tahun 2020.

Periode	Bulan	Bagian biplot
Pembatasan aktivitas	April–Juli 2020	Bawah x-axis
Normal baru	Agustus–Desember 2020	Atas x-axis

oleh nilai *asympt. sig.* < 0,05. Hasil peningkatan kualitas udara pada masa pandemi COVID-19 di Kota Yogyakarta tersebut sejalan dengan penelitian yang telah dilakukan di beberapa lokasi lain, baik di Indonesia maupun di beberapa negara lainnya, seperti di Jakarta (Rizi D. dkk. 2019); Wuhan (Sulaymon dkk. 2021); India Utara, seperti di Delhi, Noida, Gurugram, dan Agra (Saxena dan Raj 2021); rata-rata dari 164 negara secara global (Dang dan Trinh 2021); Wuhan, Cina (Jiaxin dkk. 2021); Tianjin, Dataran Cina Utara (Ding dkk. 2021); Selandia Baru (Talbot dkk. 2021); Cina dan Pakistan (Arfiani dan Azizah 2021); dan Kawasan ITDC Nusa Dua, Bali (Sulistiyono dkk. 2021). Penelitian tersebut mengungkapkan adanya penurunan konsentrasi beberapa polutan udara utama ketika diterapkannya pembatasan aktivitas pada masa pandemi COVID-19.

Penurunan polutan PM<sub>10</sub>, SO<sub>2</sub>, dan CO serta peningkatan O<sub>3</sub> di Kota Yogyakarta pada masa pandemi COVID-19 terlihat dari hasil analisis perhitungan dan *perceptual map: biplot* variabel kualitas udara dominan tahun 2019 dan 2020. Melalui hasil analisis *perceptual map: biplot* tahun 2019 dan 2020 tersebut diketahui bahwa variabel yang paling dominan sebelum masa pandemi tahun 2019 adalah polutan udara PM<sub>10</sub>, SO<sub>2</sub>, dan CO, serta faktor meteorologi Lamanya Penyinaran Matahari (ss) dan Kecepatan Angin Rata-rata (ff\_avg). Sedangkan, variabel yang paling dominan pada masa pandemi COVID-19 tahun 2020 adalah polutan udara O<sub>3</sub>, serta faktor meteorologi Suhu Udara Rata-rata (T\_avg), kelembaban Udara Rata-rata (RH\_avg), dan Curah Hujan (RR). Polutan udara PM<sub>10</sub>, SO<sub>2</sub>, dan CO mengalami penurunan pada masa pandemi COVID-19 tahun 2020 yang ditunjukkan pada *perceptual map: biplot* tahun 2019 dan 2020, di mana ketiga vektor variabel polutan udara tersebut berlawanan arah terha-

dap bulan-bulan di tahun 2020. Sedangkan, polutan udara O<sub>3</sub> mengalami peningkatan pada masa pandemi COVID-19 tahun 2020 yang ditunjukkan pada *perceptual map: biplot* tahun 2019 dan 2020, di mana vektor variabelnya searah terhadap bulan-bulan di tahun 2020. Komponen kritis polutan udara Kota Yogyakarta berupa CO yang tercatat mencapai nilai tertinggi untuk rata-rata konsentrasi pada bulan Desember 2019 sebesar 88 ISPU, bahkan sempat mencapai nilai konsentrasi sebesar 195 ISPU pada tanggal 31 Desember 2019. Aktivitas masyarakat pada libur Nataru sebelum pandemi pada akhir tahun 2019 tersebut memberikan penjelasan yang masuk akal akan tingginya tingkat polusi udara di Kota Yogyakarta.

Melalui analisis perhitungan diketahui persentase penurunan polutan udara PM<sub>10</sub>, SO<sub>2</sub>, dan CO pada masa pandemi COVID-19 tahun 2020 terhadap tinjauan sebelum pandemi tahun 2019 di Kota Yogyakarta masing-masing sebesar 18%, 93%, dan 74%. Sedangkan, persentase kenaikan konsentrasi O<sub>3</sub> pada masa pandemi COVID-19 tahun 2020 tersebut sebesar 104%. Sementara itu, penelitian Sulaymon dkk. (2021) terhadap tinjauan lokasi di Wuhan, Cina didapatkan penurunan polutan udara NO<sub>2</sub>, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, dan CO masing-masing turun sebesar 50,6%, 41,2%, 33,1%, dan 16,6% selama *lockdown* dibandingkan periode *pre-lockdown*. Konsentrasi O<sub>3</sub> meningkat sebesar 149% selama *lockdown*. Pada penelitian Saxena dan Raj (2021) untuk tinjauan kota-kota di India Utara, seperti Delhi, Noida, Gurugram, dan Agra, ternyata didapatkan hasil: penurunan PM<sub>2.5</sub> sebesar ~20-50% dengan penurunan terbesar di Noida; penurunan PM<sub>10</sub> sebesar 49% di Delhi; penurunan NO<sub>2</sub> sebesar ~10-70% dengan penurunan terbesar di Noida; serta penurunan CO sebesar ~10-60% dengan penurunan paling signifikan di Gurugram. Dang dan Trinh (2021) yang melakukan penyelidikan kualitas udara di 164 negara didapatkan hasil konsentrasi polutan udara NO<sub>2</sub> dan PM<sub>2.5</sub> secara global masing-masing menurun sebesar 5% dan 4%. Penyelidikan Jaxin dkk. (2021) di Wuhan, Cina mendapatkan konsentrasi NO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, dan TVOCs menurun masing-masing sebesar 38,23%, 30,25%, 32,92%, dan 39,80% pada masa pandemi COVID-19. Ding dkk. (2021) melakukan tinjauan di Tianjin, Cina mendapatkan hasil penurunan polutan udara NO<sub>2</sub> dan PM<sub>2.5</sub> masing-masing sebesar 22,7% dan 17,7% selama *lockdown* COVID-19. Talbot

dkk. (2021) meninjau kualitas udara di Selandia Baru selama pembatasan aktivitas akibat pandemi COVID-19, dengan hasil konsentrasi NO<sub>2</sub> di *roadside* berkurang sebesar 48% s.d. 54% dibandingkan nilai *Business-as-Usual* (BAU). Sedangkan, Arfiani dan Azizah (2021) mendapatkan hasil dengan penerapan *lockdown* di kota-kota besar India ternyata mampu mengurangi polusi udara hingga sebesar 50%.

Melalui analisis *perceptual map: biplot* tahun 2019 dan 2020, diketahui faktor meteorologi Kota Yogyakarta memiliki hubungan umum terhadap polutan udara di antara kedua tahun tersebut. Berdasarkan arah vektor variabelnya diketahui bahwa polutan udara primer PM<sub>10</sub>, SO<sub>2</sub>, dan CO memiliki hubungan positif (sudut vektor < 90°) terhadap faktor meteorologi penyinaran matahari, tetapi memiliki hubungan negatif (sudut vektor > 90°) terhadap polutan udara sekunder O<sub>3</sub> serta faktor meteorologi suhu udara, kelembaban udara, curah hujan, dan kecepatan angin. Polutan udara PM<sub>10</sub>, SO<sub>2</sub>, dan CO merupakan polutan udara primer karena substansi pencemar ditimbulkan langsung dari sumber pencemaran (Oktora 2008). Sedangkan, polutan udara O<sub>3</sub> adalah polutan udara sekunder yang terbentuk hasil reaksi fotokimia (Sulistiyono dkk. 2019). Penyinaran matahari mempengaruhi polutan yang terangkat dan melayang di udara (Cahyadi dkk. 2016). Suhu udara mempengaruhi disosiasi konsentrasi polutan udara (Istantinova dkk. 2012). Lalu, kelembaban udara mempengaruhi konsentrasi polutan udara, terkait penguapan uap air yang ditransfer ke udara (Istantinova dkk. 2012). kelembaban udara juga menentukan kondisi udara kering atau basah, terhadap kemampuan udara membawa polutan (Cahyadi dkk. 2016). Hujan menjadi komponen alami penyisihan polutan di udara, karena bersifat sebagai pembersih/*scrub* polutan udara. Pada lokasi dataran rendah, seperti Kota Yogyakarta, kecepatan angin relatif lambat. Topografi lokasi perkotaan yang tidak rata mempengaruhi gaya gesekan angin terhadap laju udara (Ginting 2017). Kecepatan angin mempengaruhi polutan udara terkait dengan dispersi dan dilusi (Verma dan Desai 2008; Istirokhatun dkk. 2016).

Berdasarkan hubungan umum faktor meteorologi Kota Yogyakarta terhadap polutan udara antara tahun 2019 dan 2020 yang diperoleh tersebut, apabila dibandingkan terhadap penelitian-penelitian sebelumnya di lokasi lain, maka terdapat persamaan dan perbedaan hasil hubungan antara

TABEL 8. Penjelasan hubungan sistem kualitas udara dan mobilitas tahun 2020.

Bulan	Penjelasan
April, Mei, Juni, Juli 2020	Periode Pembatasan Aktivitas: Wabah COVID-19 melanda DIY sejak 15 Maret 2020 (Sucahyo 2020). Pada periode ini terjadi penurunan mobilitas di luar ruangan dengan tingginya nilai Mobilitas Area Perumahan (MR), yang menunjukkan warga masyarakat lebih sering berada di dalam rumah daripada keluar rumah. Seperti dilansir dalam Pemda DIY (2020), sejak 16 Maret 2020, Gubernur DIY telah meminta masyarakat membatasi aktivitas dan turut aktif memerangi penyebaran COVID-19. Polutan udara dominan pada saat itu adalah Particulate Matter 10 (PM10), Sulfur Dioksida (SO <sub>2</sub> ), dan Karbon Monoksida (CO) meskipun nilainya relatif jauh di bawah kondisi normal sebelum pandemi. Faktor meteorologi dominannya adalah Suhu Udara Rata-rata (T_avg), kelembaban Udara Rata-rata (RH_avg), dan Curah Hujan (RR) yang terjadi pada bulan April dan Mei karena masih masuk musim penghujan. Sedangkan, pada bulan Juni dan Juli telah masuk musim kemarau yang ditandai dengan naiknya Lamanya Penyinaran Matahari (ss).
Agustus, September, Oktober, November, Desember 2020	Periode Normal Baru: Peraturan Gubernur DIY terkait tatanan normal baru (new-normal) telah disahkan pada bulan Juli 2020. Pada periode Agustus, September, Oktober, November, dan Desember, mulai terjadi peningkatan perlahan terhadap Mobilitas Retail dan Rekreasi (MRR), Toko Bahan Makanan dan Apotek (MGP), Taman (MP), Pusat Transportasi Umum (MTS), dan Tempat Kerja (MW) karena tatanan normal baru telah ditetapkan oleh Pemerintah Daerah DIY, sehingga beberapa aktivitas perkantoran dan bisnis telah mulai berjalan kembali. Meskipun demikian, pada masa normal baru tahun 2020 ini, rata-rata tingkat mobilitas tersebut masih berada di bawah kondisi normal sebelum pandemi. Selain itu, menjelang libur Natal dan akhir tahun/tahun baru, terjadi peningkatan polutan udara Ozon (O <sub>3</sub> ) terutama pada bulan November dan Desember, di mana dengan puncak konsentrasinya pada bulan Desember. Faktor meteorologi pada periode ini adalah meningkatnya nilai Kecepatan Angin Rata-rata (ff_avg) pada sekitar bulan September, meskipun nilai kecepatan angin Kota Yogyakarta sepanjang tahun relatif konstan dan lambat. Selain itu, tingginya konsentrasi Ozon (O <sub>3</sub> ) pada bulan Desember didukung juga dengan adanya kondisi meteorologi berupa naiknya kelembaban Udara Rata-rata (RH_avg) dan Curah Hujan (RR), di mana Ozon (O <sub>3</sub> ) dapat terbentuk melalui petir pada musim penghujan (Sari dkk. 2015).



polutan udara dan faktor meteorologi. Sulaymon dkk. (2021) dalam tinjauan kualitas udara terhadap faktor meteorologi sebelum, selama, dan setelah *lockdown* mendapatkan hasil bahwa: kecepatan angin berkorelasi negatif terhadap polutan  $PM_{2.5}$ ,  $PM_{10}$ ,  $NO_2$ , dan  $O_3$ ; kelembaban udara relatif berbanding terbalik terhadap polutan  $PM_{2.5}$ ,  $PM_{10}$ ,  $SO_2$ ,  $NO_2$ ,  $CO$ , dan  $O_3$ ; serta suhu udara berkorelasi positif dengan polutan udara selama *lockdown*. Gao dkk. (2021) memperoleh hasil faktor meteorologi memiliki pengaruh yang lebih besar terhadap  $PM_{2.5}$  daripada  $NO_2$  dan  $SO_2$ , karena kabut asap emisi industri dan kembang api dari daerah di sekitarnya serta kondisi iklim dimungkinkan menjadi penyebab naiknya konsentrasi  $PM_{2.5}$  di Beijing selama *lockdown*. Jiaxin dkk. (2021) menemukan korelasi yang jelas antara faktor meteorologi arah angin, kecepatan angin, suhu, dan kelembaban relatif dengan peningkatan kualitas udara selama *lockdown* pada tahun 2020 di Wuhan, Cina. Ding dkk. (2021) menemukan bahwa kondisi meteorologi yang buruk dan perayaan kembang api pada Festival Musim Semi 2020 di Tianjin, Cina telah menimbulkan bias terhadap konsentrasi polutan  $PM_{2.5}$  yang terukur selama *lockdown* COVID-19, sehingga diperlukan normalisasi menggunakan koefisien dispersi. Sulistiani dkk. (2021) juga mendapatkan hasil bahwa faktor meteorologi yang mempengaruhi kualitas udara di Kawasan ITDC Nusa Dua, Bali adalah kecepatan angin, di mana semakin tinggi kecepatan angin, maka konsentrasi  $O_3$  semakin rendah.

Kondisi faktor meteorologi Kota Yogyakarta pada semester kedua sebelum pandemi tahun 2019 dan semester kedua masa pandemi COVID-19 tahun 2020 sesuai hasil analisis *perceptual map: biplot* tahun 2019 dan 2020 tersebut ternyata memiliki karakteristik yang khas. Karakteristik faktor meteorologi yang khas di Kota Yogyakarta pada bulan Desember adalah ketika polutan udara  $O_3$  tinggi, curah hujan dan ke-

lembaban udara juga tinggi, di mana pada saat musim penghujan dengan curah hujan yang tinggi dan meningkatnya kelembaban udara, maka  $O_3$  dapat terbentuk melalui petir (Sari dkk. 2015). Rata-rata konsentrasi polutan udara  $O_3$  di Kota Yogyakarta pada bulan Desember tahun 2019 dan 2020 sama-sama lebih tinggi daripada bulan-bulan lain pada tahun yang sama, di mana pada bulan Desember 2020, rata-rata konsentrasi  $O_3$  tercatat mencapai nilai tertinggi sebesar 33 ISPU, serta sempat mencapai nilai konsentrasi sebesar 81 ISPU pada tanggal 22 Desember 2020.

Selanjutnya, hasil analisis *perceptual map: biplot* hubungan sistem kualitas udara dan mobilitas Kota Yogyakarta tahun 2020 mencatatkan informasi penting bahwa tingkat mobilitas masyarakat pada berbagai lokasi ternyata memiliki pengaruh terhadap kondisi sistem kualitas udara di Kota Yogyakarta pada masa pandemi COVID-19 tahun 2020 tersebut. Berdasarkan arah vektor variabel pada *perceptual map: biplot* tersebut didapatkan bahwa tingkat Mobilitas Retail dan Rekreasi ( $M_{RR}$ ), Toko Bahan Makanan dan Apotek ( $M_{GP}$ ), Taman ( $M_P$ ), Pusat Transportasi Umum ( $M_{TS}$ ), dan Tempat Kerja ( $M_W$ ) di Kota Yogyakarta berbanding terbalik (membentuk sudut vektor  $> 90^\circ$ ) dengan Mobilitas Area Perumahan ( $M_R$ ). Hal tersebut terlihat pada lokasi variabel  $M_{RR}$ ,  $M_{GP}$ ,  $M_P$ ,  $M_{TS}$ , dan  $M_W$  dalam *biplot* yang berada di sebelah atas *x-axis*, di mana berlawanan arah dengan variabel  $M_R$  yang berada di sebelah bawah *x-axis*. Penjelasan yang memungkinkan dari hasil tersebut adalah ketika Mobilitas Retail dan Rekreasi ( $M_{RR}$ ), Toko Bahan Makanan dan Apotek ( $M_{GP}$ ), Taman ( $M_P$ ), Pusat Transportasi Umum ( $M_{TS}$ ), dan Tempat Kerja ( $M_W$ ) menurun, artinya mobilitas masyarakat di luar rumah lebih rendah, sehingga Mobilitas Area Perumahan ( $M_R$ ) atau mobilitas masyarakat di dalam rumah meningkat. Beberapa penelitian terdahulu di beberapa lokasi la-

TABEL 9. Nilai polutan udara dan tingkat mobilitas tahun 2020.

No.	Waktu (Tanggal)	ISPU				% Laju Aktivitas*					
		$PM_{10}$	$SO_2$	$CO$	$O_3$	$M_{RR}$	$M_{GP}$	$M_P$	$M_{TS}$	$M_W$	$M_R$
1	01-04-20	13	1	23	16	-43	-20	-54	-57	-42	16
2	02-04-20	42	1	48	20	-45	-25	-53	-60	-43	18
3	03-04-20	52	2	57	15	-49	-32	-59	-64	-43	19
4	04-04-20	33	1	50	11	-55	-38	-70	-68	-32	18
5	05-04-20	16	1	43	12	-54	-37	-69	-72	-25	16
6	06-04-20	6	1	17	0	-44	-28	-52	-66	-43	18
7	07-04-20	17	1	52	8	-43	-26	-50	-63	-42	17
8	08-04-20	24	1	37	0	-44	-27	-53	-64	-42	17
9	09-04-20	19	1	32	0	-44	-26	-51	-64	-43	17
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
267	23-12-20	17	0	16	16	-8	3	-4	-23	-27	11
268	24-12-20	22	4	20	13	-6	7	13	-26	-43	14
269	25-12-20	18	2	16	5	-15	-9	6	-39	-56	19
270	26-12-20	15	2	18	1	-23	-14	-22	-40	-22	14
271	27-12-20	12	1	24	0	-12	-6	-7	-35	-6	9
272	28-12-20	9	0	16	2	-7	2	7	-36	-30	12
273	29-12-20	9	0	15	20	-15	-7	-4	-35	-31	14
274	30-12-20	6	0	17	10	-21	-9	-20	-32	-31	14
275	31-12-20	5	0	17	20	-9	16	7	-33	-43	14

Catatan: \*) *Baseline*: kondisi normal sebelum pandemi (median periode 5 minggu dari 03/01/20-06/02/20). Sumber: DLH Kota Yogyakarta, 2021a; Google's COVID-19 *Community Mobility Reports*, 2021; hasil kompilasi pengolahan penulis, 2021.

in menjelaskan bahwa *working from home*, pembatasan aktivitas masyarakat, serta tindakan karantina selama *lockdown* menjadi faktor yang sangat menentukan kondisi kualitas udara pada masa pandemi COVID-19, seperti yang dijelaskan pada penelitian oleh Rizi D. dkk. (2019) di Jakarta; Sulaymon dkk. (2021) di Wuhan, Cina; Saxena dan Raj (2021) di Delhi, No-ida, Gurugram, dan Agra; Dang dan Trinh (2021) di 164 nega-

ra secara global; Gao dkk. (2021) di Wuhan, Beijing, Shanghai, dan Guangzhou; Jiixin dkk. (2021) di Wuhan, Cina; Ding dkk. (2021) di Tianjin, Dataran Cina Utara; Talbot dkk. (2021) di Selandia Baru; Arfiani dan Azizah (2021) di Cina dan Pakistan; dan Sulistiani dkk. (2021) di Kawasan ITDC Nusa Dua, Bali.

Kontribusi hasil analisis penelitian terhadap penjelasan fenomena sebenarnya yang terjadi terkait dengan polutan

TABEL 10. Hasil analisis regresi linear berganda tahun 2020.

A. Dependent/Response Variable: Particulate Matter 10 (PM <sub>10</sub> )						
Model <sup>a</sup>	SS	df	MS	F	Sig.	R <sup>2</sup>
Regression	3612,908	5	722,582	10,729	0,000 <sup>e</sup>	0,166
Residual	18117,579	269	67,352	-	-	-
Total	21730,487	274	-	-	-	-
Uraian <sup>a</sup>	Konst.	M <sub>GP</sub>	M <sub>P</sub>	M <sub>TS</sub>	M <sub>W</sub>	M <sub>R</sub>
Koefisien	15,748	-0,475	0,037	0,023	-0,182	-0,544
Signifikansi	0	0	0,567	0,836	0,02	0,105
Tolerance	-	0,152	0,173	0,125	0,291	0,159
VIF	-	6,601	5,782	7,984	3,436	6,302
B. Dependent/Response Variable: Sulfur Dioksida (SO <sub>2</sub> )						
Model <sup>b</sup>	SS	df	MS	F	Sig.	R <sup>2</sup>
Regression	31,062	5	6,212	10,413	0,000 <sup>e</sup>	0,162
Residual	160,487	269	0,597	-	-	-
Total	191,549	274	-	-	-	-
Uraian <sup>b</sup>	Konst.	M <sub>GP</sub>	M <sub>P</sub>	M <sub>TS</sub>	M <sub>W</sub>	M <sub>R</sub>
Koefisien	0,038	-0,012	-0,012	0,005	-0,023	-0,027
Signifikansi	0,913	0,278	0,042	0,616	0,002	0,391
Tolerance	-	0,152	0,173	0,125	0,291	0,159
VIF	-	6,601	5,782	7,984	3,436	6,302
C. Dependent/response Variabel: Karbon Monoksida (CO)						
Model <sup>c</sup>	SS	df	MS	F	Sig.	R <sup>2</sup>
Regression	10719,761	5	2143,952	18,107	0,000 <sup>e</sup>	0,252
Residual	31851,599	269	118,407	-	-	-
Total	42571,36	274	-	-	-	-
Uraian <sup>c</sup>	Konst.	M <sub>GP</sub>	M <sub>P</sub>	M <sub>TS</sub>	M <sub>W</sub>	M <sub>R</sub>
Koefisien	18,403	-0,317	-0,331	0,213	-0,374	-0,785
Signifikansi	0	0,046	0	0,142	0	0,078
Tolerance	-	0,152	0,173	0,125	0,291	0,159
VIF	-	6,601	5,782	7,984	3,436	6,302
D. Dependent/response Variabel: Ozon (O <sub>3</sub> )						
Model <sup>d</sup>	SS	df	MS	F	Sig.	R <sup>2</sup>
Regression	20617,548	5	4123,51	28,579	0,000 <sup>e</sup>	0,347
Residual	38812,037	269	144,283	-	-	-
Total	59429,585	274	-	-	-	-
Uraian <sup>d</sup>	Konst.	M <sub>GP</sub>	M <sub>P</sub>	M <sub>TS</sub>	M <sub>W</sub>	M <sub>R</sub>
Koefisien	56,128	0,17	-0,287	1,075	0,408	1,832
Signifikansi	0	0,332	0,002	0	0	0
Tolerance	-	0,152	0,173	0,125	0,291	0,159
VIF	-	6,601	5,782	7,984	3,436	6,302

a: Dependent Variable: PM<sub>10</sub>; b: Dependent Variable: SO<sub>2</sub>; c: Dependent Variable: CO; d: Dependent Variable: O<sub>3</sub>; e: Predictors: (Constant), M<sub>GP</sub>, M<sub>P</sub>, M<sub>TS</sub>, M<sub>W</sub>, M<sub>R</sub> (% Laju Aktivitas<sup>\*)</sup>). Catatan: \*) Baseline: kondisi normal sebelum pandemi (median periode 5 minggu dari 03/01/20-06/02/20).

udara, faktor meteorologi, dan tingkat mobilitas masyarakat di Kota Yogyakarta digambarkan lebih jelas melalui *perceptual map: biplot* hubungan sistem kualitas udara dan mobilitas tahun 2020. Hasil *perceptual map: biplot* tersebut menjadi salah satu unsur baru yang diusung pada penelitian yang melengkapi terhadap penelitian terdahulu. Hasil analisis *perceptual map: biplot* mampu menjelaskan fenomena hubungan sistem kualitas udara dan tingkat mobilitas masyarakat pada berbagai lokasi di Kota Yogyakarta pada masa pandemi COVID-19 tahun 2020 yang terbagi ke dalam dua periode, yaitu: (a) Periode Pembatasan Aktivitas (April s.d. Juli 2020) dan (b) Periode Normal Baru (Agustus s.d. Desember 2020).

Sesuai hasil analisis penelitian ini, didapatkan bahwa polutan udara memiliki fungsi persamaan regresi terhadap tingkat mobilitas masyarakat pada berbagai lokasi. Kenaikan konsentrasi  $PM_{10}$ ,  $SO_2$ , dan CO terjadi ketika Mobilitas Pusat Transportasi Umum ( $M_{TS}$ ) meningkat. Polutan udara  $PM_{10}$ ,  $SO_2$ , dan CO merupakan polutan udara primer yang banyak dijumpai dari hasil pembakaran internal mesin kendaraan bermotor di perkotaan (Kelly dan Fussell 2015; Jining dan Yi 2002; Istirokhatun dkk. 2016; Nuryuneni dan Hartono 2013) Tinjauan sebelumnya oleh Wismadi (2021) dalam Pusat Studi Transportasi dan Logistik (Pustral) UGM (2021) juga mengungkapkan bahwa seiring dengan pertumbuhan laju motorisasi yang pesat, sumber bergerak atau transportasi darat terbukti menyumbang lebih dari 60% dari total emisi di Kota Yogyakarta. Penelitian oleh Gao dkk. (2021) yang menyelidiki dampak pandemi COVID-19 terhadap polusi udara yang dikaitkan dengan volume lalu lintas menyatakan bahwa *Passegger Volume of Public Transportation* (PVPT) merupakan faktor terpenting terhadap kenaikan dan penurunan polutan udara  $NO_2$  di Beijing. Sedangkan, untuk polutan udara  $O_3$  memiliki fungsi persamaan regresi yang menjelaskan bahwa kenaikan konsentrasi  $O_3$  terjadi ketika Mobilitas Toko Bahan Makanan dan Apotek ( $M_{GP}$ ), Pusat Transportasi Umum ( $M_{TS}$ ), Tempat Kerja ( $M_W$ ), dan Area Permukiman ( $M_R$ ) meningkat.

Berdasarkan pembahasan tersebut, diketahui bahwa penelitian ini menemukan adanya pengaruh aktivitas masyarakat terhadap kualitas udara ambien. Melalui analisis regresi pada bagian terakhir, diketahui bahwa sektor transportasi menjadi sektor yang menjelaskan peningkatan polutan udara primer  $PM_{10}$ ,  $SO_2$ , dan CO di Kota Yogyakarta. Kenaikan polutan udara  $O_3$  di Kota Yogyakarta dapat disebabkan oleh faktor, baik yang berasal dari mobilitas di dalam ruangan maupun transportasi. Berdasarkan temuan ini, maka hasil penelitian dapat dijadikan sebagai dasar oleh Pemerintah Daerah terutama oleh DLH Kota Yogyakarta, sebagai salah satu acuan dalam melakukan penerapan aturan yang berlaku terkait perlindungan dan pengelolaan lingkungan hidup, khususnya pencegahan dan pengendalian pencemaran udara. Penelitian ini juga menemukan bahwa hubungan yang terjadi terkait polutan udara, faktor meteorologi, dan tingkat mobilitas masyarakat pada berbagai lokasi pada masa pandemi COVID-19 tahun 2020 dapat digambarkan secara lebih jelas melalui *perceptual map: biplot*. Hasil analisis *perceptual map: biplot* yang didapatkan tersebut menjadi jembatan yang menghubungkan data terkait kualitas udara menjadi gambar/bagan model dua dimensi yang menjelaskan hubungan variabel polutan udara, faktor meteorologi, dan tingkat mobilitas masyarakat di Kota Yogyakarta, yang ternyata

juga sejalan dengan kebijakan Pemerintah Daerah yang ada. Dengan demikian, temuan penelitian ini mempunyai implikasi teoritis yang nyata terhadap ilmu pengetahuan terkait dengan atmosfer dan lingkungan. Selain itu, penulis juga ingin memberikan sumbangsih berupa analisis dan tulisan akan bahaya polusi udara dewasa ini kepada masyarakat bahwa permasalahan pencemaran udara tidak dapat dikesampingkan, karena menjadi permasalahan global penting yang telah mengambil alih penyebab utama kematian dini, yang sebelumnya didominasi oleh kondisi sanitasi yang buruk dan kurangnya sumber air minum (Organisation for Economic Co-operation and Development 2014).

Adapun keterbatasan penelitian ini adalah pengukuran sistem kualitas udara yang terbatas pada satu titik lokasi Kota Yogyakarta, dan bukan tersebar pada berbagai macam lokasi penelitian. Titik lokasi Kota Yogyakarta pada penelitian ini diasumsikan telah mewakili rata-rata kondisi kualitas udara di Kota Yogyakarta. Data polutan udara dan tingkat mobilitas masyarakat juga terbatas pada sumber data dalam rentang waktu tertentu. Terlepas dari keterbatasan tersebut, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi pada penelitian di masa yang akan datang dengan topik sistem kualitas udara terkait pandemi COVID-19. Selain itu, penulis juga berharap bahwa penelitian ini mampu memberikan kontribusi kepada pemerintah, *stakeholders*, dan masyarakat dalam bidang pelestarian lingkungan hidup terkait pencegahan dan pengendalian pencemaran udara, khususnya di wilayah perkotaan.

#### 4. KESIMPULAN

Pada masa pandemi COVID-19 tahun 2020, kualitas udara Kota Yogyakarta mengalami perubahan berupa peningkatan dari kategori Baik: 31,85% ISPU (tahun 2019) menjadi Baik: 90,37% ISPU (tahun 2020). Kualitas udara antara sebelum pandemi tahun 2019 dan masa pandemi COVID-19 tahun 2020 di Kota Yogyakarta berbeda secara signifikan yang ditunjukkan oleh nilai *chi-square asymp. sig.* < 0,05. Konsentrasi polutan udara  $PM_{10}$ ,  $SO_2$ , dan CO mengalami penurunan selama masa pandemi COVID-19 tahun 2020 dibandingkan dengan sebelum masa pandemi tahun 2019, sedangkan konsentrasi  $O_3$  meningkat. Polutan udara primer  $PM_{10}$ ,  $SO_2$ , dan CO memiliki hubungan positif terhadap faktor meteorologi penyinaran matahari, tetapi memiliki hubungan negatif terhadap polutan udara sekunder  $O_3$  serta faktor meteorologi suhu udara, kelembaban udara, curah hujan, dan kecepatan angin.

Fenomena hubungan sistem kualitas udara dan mobilitas masyarakat di Kota Yogyakarta pada masa pandemi COVID-19 tahun 2020 terbagi ke dalam dua periode, yaitu: (a) Pembatasan Aktivitas (April s.d. Juli 2020) dan (b) Normal Baru (Agustus s.d. Desember 2020). Kenaikan konsentrasi  $PM_{10}$ ,  $SO_2$ , dan CO terjadi ketika Mobilitas Pusat Transportasi Umum ( $M_{TS}$ ) meningkat, serta kenaikan konsentrasi  $O_3$  terjadi ketika mobilitas dalam ruangan ( $M_{GP}$ ,  $M_W$ ,  $M_R$ ) dan transportasi ( $M_{TS}$ ) meningkat.

#### DAFTAR NOTASI

$PM_{10}$ : Particulate Matter 10, ISPU

$SO_2$ : Sulfur Dioksida, ISPU

CO: Karbon Monoksida, ISPU

$O_3$ : Ozon (Permukaan), ISPU  
 $T_{avg}$ : Suhu Udara Rata-rata, °C  
 $RH_{avg}$ : kelembaban Udara Rata-rata, %  
 $RR$ : Curah Hujan, mm  
 $ss$ : Lamanya Penyinaran Matahari, jam  
 $ff_{avg}$ : Kecepatan Angin Rata-rata, m/s  
 $M_{RR}$ : Mobilitas Retail dan Rekreasi, % Laju Aktivitas  
 $M_{GP}$ : Mobilitas Toko Bahan Makanan dan Apotek, % Laju Aktivitas  
 $M_P$ : Mobilitas Taman, % Laju Aktivitas  
 $M_{TS}$ : Mobilitas Pusat Transportasi Umum, % Laju Aktivitas  
 $M_W$ : Mobilitas Tempat Kerja, % Laju Aktivitas  
 $M_R$ : Mobilitas Area Permukiman, % Laju Aktivitas

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Dinas Lingkungan Hidup Kota Yogyakarta serta Departemen Teknik Kimia FT UGM, yang telah memberikan dukungan dalam penyediaan sumber data penelitian dan penerbitan naskah publikasi.

## DAFTAR PUSTAKA

- Arfiani ND, Azizah R. 2021. Pengaruh lockdown dan pembatasan aktivitas selama pandemi COVID-19 terhadap polusi udara di Asia. *Jurnal Penelitian Kesehatan Suara Forikes*. 12(3):280–286. <https://forikes-ejournal.com/index.php/SF/article/view/sf12313>.
- Arida INS. 2012. Buku ajar: pariwisata berkelanjutan. Bali: Sustain-press. [https://simdos.unud.ac.id/uploads/file\\_pendidikan\\_1\\_dir/27853e1951c3f72a0e6e8a0be2a9ed30.pdf](https://simdos.unud.ac.id/uploads/file_pendidikan_1_dir/27853e1951c3f72a0e6e8a0be2a9ed30.pdf).
- Botkin DB. 2003. *Environmental science: earth as a living planet* (4th ed.). *Management of Environmental Quality: An International Journal*. 14(5):623–623. doi:10.1108/meq.2003.14.5.623.4.
- Cahyadi W, Achmad B, Suhartono E, Razie F. 2016. The influence of meteorological factors and concentration particulate (PM10) to acute respiratory infections (ARI) (case study on the district of South Banjarbaru, Banjarbaru, year 2014–2015). *EnviroScienceteae*. 12(3):302–311. doi:10.20527/es.v12i3.2455.
- Chan LL, Idris N. 2017. Validity and reliability of the instrument using exploratory factor analysis and cronbach's alpha. *International Journal of Academic Research in Business and Social Sciences*. 7(10):400–410. doi:10.6007/IJARBSS/v7-i10/3387.
- Damara DY, Wardhana IW, Sutrisno E. 2017. Analisis dampak kualitas udara karbon monoksida (CO) di sekitar Jl. Pemuda akibat kegiatan car free day menggunakan program CALINE4 dan surfer (studi kasus: Kota Semarang). *Jurnal Teknik Lingkungan*. 6(1):1–14. <https://www.neliti.com/publications/192188/analisis-dampak-kualitas-udara-karbon-monoksida-co-di-sekitar-jl-pemuda-akibat-k>.
- Dang HAH, Trinh TA. 2021. Does the COVID-19 lockdown improve global air quality? New cross-national evidence on its unintended consequences. *Journal of Environmental Economics and Management*. 105(2021):102401. doi:10.1016/j.jeem.2020.102401.
- Ding J, Dai Q, Li Y, Han S, Zhang Y, Feng Y. 2021. Impact of meteorological condition changes on air quality and particulate chemical composition during the COVID-19 lockdown. *Journal of Environmental Sciences*. 109(2021):45–56. doi:10.1016/j.jes.2021.02.022.
- DLH Kota Yogyakarta. 2021. Laporan: analisis hasil pemantauan kualitas udara tahun 2020 Kota Yogyakarta. <https://lingkunganhidup.jogjakota.go.id/page/index/kualitas-air-dan-udara>.
- DPR RI. 2019. Laporan kunjungan kerja panja TPB/SDGs BKSAP DPR RI ke Provinsi D. I. Yogyakarta 23 s.d. 25 Agustus 2019. <http://www.dpr.go.id/dokakd/dokumen/BKSAP-13-526a86f8e40c8e0aca70030818996fdc.pdf>.
- Fan L, Fu S, Wang X, Fu Q, Jia H, Xu H, Qin G, Hu X, Cheng J. 2021. Spatiotemporal variations of ambient air pollutants and meteorological influences over typical urban agglomerations in China during the COVID-19 lockdown. *Journal of Environmental Sciences*. 106(2021):26–38. doi:10.1016/j.jes.2021.01.006.
- Gao C, Li S, Liu M, Zhang F, Achal V, Tu Y, Zhang S, Cai C. 2021. Impact of the COVID-19 pandemic on air pollution in Chinese megacities from the perspective of traffic volume and meteorological factors. *Science of The Total Environment*. 773(2021):145545. doi:10.1016/j.scitotenv.2021.145545.
- Ginting IAP. 2017. Analisis pengaruh jumlah kendaraan bermotor dan faktor meteorologi (suhu, kecepatan angin, dan kelembaban) terhadap konsentrasi karbon monoksida (CO) di udara ambien roadside (studi kasus: pintu tol Amplas dan pintu tol Tanjung Morawa) [bachelor thesis]. [Medan]: Universitas Sumatera Utara. <https://repositori.usu.ac.id/handle/123456789/3112>.
- Hair Jr JF, Black WC, Babin BJ, Anderson RE. 2010. *Multivariate data analysis: a global perspective*. New Jersey: Pearson Prentice Hall. <https://www.pearson.com/uk/educators/higher-education-educators/program/Hair-Multivariate-Data-Analysis-Global-Edition-7th-Edition/PGM916641.html>.
- Ibrahim A, Alang AH, Madi, Baharuddin, Ahmad MA, Darmawati. 2018. *Metodologi penelitian*. Makassar: Gunadarma Ilmu. <http://repositori.uin-alauddin.ac.id/12366/>.
- Idrees Z, Zheng L. 2020. Low cost air pollution monitoring systems: a review of protocols and enabling technologies. *Journal of Industrial Information Integration*. 17(2020):100123. doi:10.1016/j.jii.2019.100123.
- Istantinova DB, Hadiwidodo M, Handayani DS. 2012. Pengaruh kecepatan angin, kelembaban, dan suhu udara terhadap konsentrasi gas pencemar sulfur dioksida (SO2) dalam udara ambien di sekitar PT. Inti General Yaja Steel, Semarang. *Jurnal Teknik Lingkungan*. 2(1):1–10. <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/tlingkungan/article/view/2673>.
- Istirokhatun T, Agustini IT, Sudarmo S. 2016. Investigasi pengaruh kondisi lalu lintas dan aspek meteorologi terhadap konsentrasi pencemar SO2 di Kota Semarang. *Jurnal Presipitasi: Media Komunikasi dan Pengembangan Teknik Lingkungan*. 13(1):21. doi:10.14710/presipitasi.v13i1.21-27.
- Jiaxin C, Hui H, Feifei W, Mi Z, Ting Z, Shicheng Y, Ruoqiao B, Nan C, Ke X, Hao H. 2021. Air quality characteristics in Wuhan (China) during the 2020 COVID-19 pandemic. *Environmental Research*. 195(2021):110879. doi:10.1016/j.envres.2021.110879.

- Jining C, Yi Q. 2002. Point sources of pollution: local effects and its control. Encyclopedia of life support systems. Tsinghua: EOLSS Publishers/ UNESCO. <https://www.eolss.net/ebooklib/bookinfo/point-sources-pollution-local-effects-control.aspx>.
- Kelly FJ, Fussell JC. 2015. Air pollution and public health: emerging hazards and improved understanding of risk. *Environmental Geochemistry and Health*. 37(4):631–649. doi:10.1007/s10653-015-9720-1.
- Kementerian PPN/Bappenas. 2020. Sekilas SDGs. <https://sdgs.bappenas.go.id/sekilas-sdgs/>.
- Mansouri M, Harkat MF, Nounou M, Nounou H. 2018. Midpoint-radii principal component analysis -based EWMA and application to air quality monitoring network. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. 175(2018):55–64. doi:10.1016/j.chemolab.2018.01.016.
- Mustofa I, Nurfadillah M. 2021. Analisis pengaruh price earning ratio dan earning per share terhadap return saham pada sub sektor property and real estate yang terdaftar di BEI. *Borneo Student Research*. 2(2):1460–1468. <https://journals.umkt.ac.id/index.php/bsr/article/view/1959>.
- Nagda NL, Rector HE, Koontz MD. 1987. Guidelines for monitoring indoor air quality. New York: Hemisphere Publishing. <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=9100R4VF.txt>.
- Noviani R. 2010. Kinerja perekonomian kawasan andalan Joglosemar tahun 1996-2006. *Forum Geografi*. 24(2):137. doi:10.23917/forgeo.v24i2.5022.
- Nuryuneni A, Hartono. 2013. Penentuan potensi pencemaran karbon monoksida ambien di sekitar Malioboro, Kota Yogyakarta. *Jurnal Bumi Indonesia*. 2(4):1–9.
- Oktora B. 2008. Hubungan antara kualitas fisik udara dalam ruang (suhu dan kelembapan relatif) dengan kejadian Sick Building Syndrome (SBS) pada pegawai kantor pusat perusahaan jasa konstruksi X di Jakarta Timur tahun 2008 [bachelor thesis]. [Depok]: Departemen Kesehatan Lingkungan, Fakultas Kesehatan Masyarakat, Universitas Indonesia. <https://lib.ui.ac.id/file?file=digital/123416-S-5436-Hubunganantara-HA.pdf>.
- Organisation for Economic Co-operation and Development. 2014. The cost of air pollution: health impacts of road transport. Paris: OECD Publishing. doi:10.1787/9789264210448-en.
- Pemerintah Daerah D I Yogyakarta. 2020. Langkah terpadu pusat dan daerah tangani penyebaran virus korona. <http://inspektorat.jogjaprovo.go.id/2020/03/16/langkah-terpadu-pusat-dan-daerah-tangani-penyebaran-virus-korona/>.
- Pusat Studi Transportasi dan Logistik (Pustral) UGM. 2021. Pustral UGM mendukung kampanye: Jogja lebih bike. <https://pustral.ugm.ac.id/2021/02/23/pustral-ugm-mendukung-kampanye-jogja-lebih-bike/>.
- Rizi D UF, Suradi, Sunaryo, Agus A, Ahmad M, Kusumaningtyas SDA, Nurhayati H, Khoir AN, Sucioningsih C, Prih W NF. 2019. Analisis dampak diterapkannya kebijakan working from home saat pandemi COVID-19 terhadap kondisi kualitas udara di Jakarta. *Jurnal Meteorologi Klimatologi dan Geofisika*. 6(3):6–14. <https://jurnal.stmkg.ac.id/index.php/jmkg/article/download/141/115/>.
- RKPD Kota Yogyakarta. 2020. Peraturan Walikota Yogyakarta nomor 45 tahun 2019 tentang rencana kerja pemerintah Daerah Kota Yogyakarta tahun 2020. [https://jdih.jogjakarta.go.id/asset/naskah/2019\\_08\\_29\\_10\\_14\\_52-1508173035.pdf](https://jdih.jogjakarta.go.id/asset/naskah/2019_08_29_10_14_52-1508173035.pdf).
- Sari NK, Harsa H, Boedisantoso R. 2015. Penentuan korelasi curah hujan, ketinggian lapisan inversi dan hubungannya dengan kualitas udara ambien Kota Surabaya. *Jurnal Teknik ITS*. 4(1):111–116. doi:10.12962/j23373539.v4i1.8850.
- Saxena A, Raj S. 2021. Impact of lockdown during COVID-19 pandemic on the air quality of North Indian cities. *Urban Climate*. 35(2021):100754. doi:10.1016/j.uclim.2020.100754.
- Spivakovsky CM, Logan JA, Montzka SA, Balkanski YJ, Foreman-Fowler M, Jones DBA, Horowitz LW, Fusco AC, Brenninkmeijer CAM, Prather MJ, Wofsy SC, McElroy MB. 2000. Three-dimensional climatological distribution of tropospheric OH: update and evaluation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 105(D7):8931–8980. doi:10.1029/1999JD901006.
- Sucahyo N. 2020 Apr 15. Sebulan Corona di Yogyakarta, dari Satu Kasus menjadi 62. VOA Indonesia. <https://www.voaindonesia.com/a/sebulan-corona-di-yogyakarta-dari-satu-kasus-menjadi-62/5372694.html>.
- Suganda GW. 2010. Evaluasi kualitas udara dalam ruangan dan kejadian sick building syndrome di kantor pusat PT. X Jakarta [Master's thesis]. [Depok]: Universitas Indonesia. <https://lib.ui.ac.id/detail?id=20307315&lokasi=lokal>.
- Sulaymon ID, Zhang Y, Hopke PK, Zhang Y, Hua J, Mei X. 2021. COVID-19 pandemic in Wuhan: ambient air quality and the relationships between criteria air pollutants and meteorological variables before, during, and after lockdown. *Atmospheric Research*. 250(2021):105362. doi:10.1016/j.atmosres.2020.105362.
- Sulistiani I, Partama IGY, Kaler Surata SP, Sumantra IK. 2021. Dinamika kualitas udara ambien selama masa pandemi covid-19 di kawasan indonesia tourism development corporation nusa dua bali. *ECOTROPIC: Jurnal Ilmu Lingkungan (Journal of Environmental Science)*. 15(1):124. doi:10.24843/EJES.2021.v15.i01.p11.
- Sulistiyono A, Hartanto H, Fathuroyan F, Saputra D, Arifin IB. 2019. Studi profil ozon permukaan (O<sub>3</sub>) dan gas monoksida (CO) antara Kota Bandung dan bukit Kototabang. *Jurnal Ilmu Lingkungan*. 17(2):239. doi:10.14710/jil.17.2.239-244.
- Suryabrata S. 2003. Metodologi penelitian. Yogyakarta: Raja Grafindo Persada.
- Susilawati LKPA, Supriyadi, Widiasavitri PN, Tobing DH, Astiti DP, Rustika IM, Indrawati KR, Marheni A, Herdiyanto YK, Vembriati N, Suarya LMKS, Lestari MD, Wulanyani NMS, Wilani NMA, Budisetyani PW. 2017. Bahan ajar: teori dan konsep dasar statistika dan lanjut. Program Studi Psikologi, Fakultas Kedokteran, Universitas Udayana. Denpasar. [https://simdos.unud.ac.id/uploads/file\\_pendidikan\\_1\\_dir/6c9d9980ae31ae5e0451419a01e0fae5.pdf](https://simdos.unud.ac.id/uploads/file_pendidikan_1_dir/6c9d9980ae31ae5e0451419a01e0fae5.pdf).
- Talbot N, Takada A, Bingham AH, Elder D, Lay Yee S, Golubiewski NE. 2021. An investigation of the impacts of a successful COVID-19 response and meteorology on air quality in New Zealand. *Atmospheric Environment*. 254(2021):118322. doi:10.1016/j.atmosenv.2021.118322.
- Verma SS, Desai B. 2008. Effect of meteorological conditions

- on air pollution of Surat City. *Journal of International Environmental Application & Science*. 3(5):358–367.
- Wismadi A. 2021. Pusat studi transportasi dan logistik Universitas Gadjah Mada (Pustral UGM). <https://pustral.ugm.ac.id/>.
- Yan S, Cao H, Chen Y, Wu C, Hong T, Fan H. 2016. Spatial and temporal characteristics of air quality and air pollutants in 2013 in Beijing. *Environmental Science and Pollution Research*. 23(14):13996–14007. doi:[10.1007/s11356-016-6518-3](https://doi.org/10.1007/s11356-016-6518-3).
- Yuliana Y. 2020. Corona virus diseases (Covid-19): sebuah tinjauan literatur. *Wellness And Healthy Magazine*. 2(1):187–192. doi:[10.30604/well.95212020](https://doi.org/10.30604/well.95212020).