

Pemantauan Konsentrasi Gas (CO₂, NO₂) dan Partikulat (PM_{2.5}) pada Struktur Horizontal di Kawasan Dayeuhkolot, Cekungan Udara Bandung Raya

(Monitoring of Horizontal Structure of Gases (CO₂, NO₂) and Particulate (PM_{2.5}) Concentrations in Dayeuhkolot, Greater Bandung Air Basin)

Muhammad Farisqi Aziz, Arief Abdurrachman, Indra Chandra, Lutfi Ikbal Majid, Furqan Vaicdan, Rahmat Awaludin Salam

Program Studi S1 Teknik Fisika, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom

Riwayat naskah

Diterima: 19-11-2019

Direvisi: 18-11-2020

Disetujui: 30-11-2020

Korespondensi:

Indra Chandra
indrachandra@telkomuniversity.
ac.id

ABSTRAK

Salah satu sumber polusi lokal yang terjadi di Bandung Raya berasal dari kendaraan bermotor. Dari penelitian sebelumnya terindikasi bahwa konsentrasi *organic carbon* (OC) lebih tinggi dari *elemental carbon* (EC), konsentrasi OC primer lebih tinggi dari OC sekunder, dan konsentrasi *char-EC* lebih tinggi dari *soot-EC*. Penelitian tersebut menggunakan metode *dry sampling* dengan perangkat *cascade impactor* dan teridentifikasi bahwa OC, OC primer, dan *char-EC* berasal dari kendaraan bermotor khususnya mesin diesel, asap pabrik, dan debu jalan. Penelitian ini bertujuan untuk memantau dan menganalisis persebaran polusi lokal secara horizontal di daerah Dayeuhkolot, cekungan udara Bandung Raya. Pemantauan kualitas udara (CO₂, NO₂, dan PM_{2.5}) dengan menggunakan sepeda dilakukan pada tiga tipe lintasan: (1) jalur hijau, (2) lalu lintas rendah, dan (3) jalan raya. Ketiga lintasan memiliki karakteristik yang unik sesuai dengan estimasi sumber pencemar dan faktor lingkungan seperti pepohonan. Alat ukur yang digunakan berbasis *low-cost sensors* (CO₂, NO₂, dan PM_{2.5}), serta dilengkapi dengan sensor temperatur (T), kelembapan relatif (RH), dan *data logger*. Pengukuran dilakukan selama 15 kali pada Februari-Maret 2019. Rata-rata pengamatan dilakukan setiap ~2 jam dengan kecepatan rata-rata sepeda ~10 km jam⁻¹. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa alat dapat mendeteksi fluktuasi konsentrasi emisi gas/partikulat, yang dipengaruhi oleh konsentrasi polutan di udara sesaat yaitu dari kendaraan bermotor, pembakaran sampah, aktivitas pasar minggu, dan pengaruh hujan. Pada saat lampu merah di persimpangan jalan, tampak bahwa emisi langsung dari kendaraan bermotor dapat meningkatkan konsentrasi PM_{2.5} dan NO₂ menjadi 110 µg m⁻³ dan ~0,15 ppm pada selang waktu pengukuran ~10 menit. Faktor lainnya yang dapat meningkatkan nilai konsentrasi PM_{2.5} sebesar ~163 µg m⁻³ dari kondisi udara ambien (77-86 µg m⁻³) adalah pembakaran sampah (~4 menit). Sedangkan kegiatan rutin di pasar minggu pagi dapat meningkatkan konsentrasi CO₂ dan NO₂ menjadi ~931 ppm dan ~0,13 ppm (~8 menit). Air hujan yang biasa terjadi pada sore hari dapat menurunkan konsentrasi gas dan PM_{2.5}. Tingkat pembilasan partikulat (*r*) akibat hujan adalah ~30%.

Kata kunci: CO₂, kualitas udara, NO₂, PM_{2.5}, pemantauan melalui sepeda.

ABSTRACT

One of the main sources of local air pollution in Greater Bandung comes from vehicles. Based on previous studies, organic carbon (OC), primary OC, and char-elemental carbon (char-EC) concentrations are higher than EC, secondary OC, and soot-EC, respectively. A cascade impactor-based measurement of dry sampling has identified that OC, primary OC, and char-EC originated from diesel engines, factory fumes, and road dust. This study aims to monitor and analyze horizontal distribution of polluted air in

Dayeuhkolot, Greater Bandung air basin. We measured gases (CO₂ and NO₂) and particulate (PM_{2.5}) concentrations using a bicycle on three-types of trails, that is (1) green lanes, (2) less traffic, and (3) roads. These paths have unique characteristics based on their pollutant sources and environmental factors such as trees. The measurement used a developed instrument of low-cost sensors (CO₂, NO₂, and PM_{2.5}) which was also equipped by the temperature (T) and relative humidity (RH) sensors and data logger. We conducted field observation 15 times during February to March 2019. Each observation was carried out for ~2 hours with an average speed of the bicycle of ~10 km hour⁻¹. Those sensors can detect the fluctuation of pollutant concentration sourcing from transportation, residential waste-burning, market activity, and rain effect. Motor vehicles can increase the concentration of PM_{2.5} and NO₂ up to 110 µg m⁻³ and ~0.15 ppm in ~10 minutes. A sudden increase (~4 minutes) of PM_{2.5} concentration (peak of ~163 µg m⁻³) from ambient level (77-86 µg m⁻³) is coming from waste combustion. Meanwhile, routine activities of Sunday morning market can increase CO₂ and NO₂ to ~931 ppm and ~0.13 ppm (~8 minutes). Rainwater that usually occurs in the afternoon can reduce gas and PM_{2.5} concentrations. The scavenging rate of particulates (r) due to rain is ~30%.

Keywords: air quality, bike-borne monitoring, CO₂, NO₂, PM_{2.5}.

1. Pendahuluan

Bandung Raya merupakan salah satu wilayah metropolitan di Indonesia yang meliputi Kota Bandung, Kabupaten Bandung, Kabupaten Bandung Barat, Kota Cimahi, dan Kabupaten Sumedang (Jupri dan Mulyadi, 2017). Daerah ini terletak di Provinsi Jawa Barat dengan topografi berupa dataran tinggi yang dikelilingi oleh pegunungan sehingga membentuk sebuah cekungan. Kondisi tersebut tidak mendukung persebaran polusi udara secara horizontal (Sumaryati, 2011). Polusi yang ada dapat terperangkap di dalamnya. Salah satu penyebab pencemaran udara di Bandung Raya adalah emisi lokal yang berasal dari pabrik, transportasi, dan pembakaran sampah. Emisi secara langsung tersebut menyebabkan kualitas udara dapat melebihi batas ambang yang dapat mengganggu kesehatan masyarakat dan/atau tanaman. Sedangkan secara vertikal, polutan yang berada di dalam kota dapat tereduksi sampai ketinggian lapisan pencampuran di atmosfer (*atmospheric mixing layer height*) khususnya pada malam hari (Sumaryati, 2011).

Pola persebaran polusi udara ditentukan oleh kondisi meteorologi seperti arah/kecepatan angin. Arah angin dari tempat berpolusi dapat membawa polutan yang sangat jauh berpindah ke tempat lainnya. Barus dkk. (2019) telah melakukan penelitian di lantai 10, Gedung Tokong Nanas, Universitas Telkom, kawasan Dayeuhkolot, pada musim kemarau (Agustus-September 2018). Hasil penelitian tersebut menunjukkan

bahwa jalur massa udara mayoritas berasal dari arah tenggara (menggunakan NOAA HYSPLIT *back trajectory*) dengan lokasi sumber polusi seperti aktivitas biogenik dan antropogenik dari benua Australia dan sebagian dari wilayah Indonesia itu sendiri, serta transportasi kapal laut. Hal tersebut teridentifikasi dari kandungan partikulat yang dominan berupa amonium sulfat, amonium nitrat, dan garam laut (Majid dkk., 2019). Oleh karenanya, analisis permasalahan polusi udara di kawasan Bandung Raya semakin kompleks.

Salah satu daerah di kawasan Bandung Raya adalah Kecamatan Dayeuhkolot tepatnya di Kabupaten Bandung. Berdasarkan pengamatan pra studi yang telah kami lakukan, Kecamatan Dayeuhkolot merupakan daerah yang padat oleh aktivitas kendaraan bermotor yang merupakan salah satu sumber polusi lokal (Majid dkk., 2019; Vaicdan dkk., 2019; Abdurrachman dkk., 2020; Firdaus dkk., 2020; Nugroho dkk., 2020; Shidki dkk., 2020; Sya'bani dkk., 2020). Emisi yang dihasilkan dari kendaraan bermotor diantaranya berupa gas karbon monoksida (CO), karbon dioksida (CO₂), nitrogen oksida (NO_x), nitrogen dioksida (NO₂), hidrokarbon (HC), dan partikulat (PM_{2.5}) (Ong *et al.*, 2011). Majid dkk. (2019) melakukan analisis karbon pada sampel dan terukur bahwa nilai konsentrasi dari *organic carbon* (OC), OC primer, *char-elemental carbon* (*char-EC*) lebih tinggi daripada EC, OC sekunder, dan *soot-EC*. Hal ini mengindikasikan bahwa lokasi pengukuran dipengaruhi secara signifikan

oleh kendaraan bermotor, asap pabrik, debu jalanan, dan pembakaran sampah rumah tangga.

Banyaknya aktivitas kendaraan bermotor dan sumber polutan langsung lainnya mendorong kami untuk melakukan penelitian pengamatan emisi gas dan partikulat secara horizontal di Kecamatan Dayeuhkolot, cekungan udara Bandung Raya. Kami membuat alat ukur gas dan partikulat berbasis *low-cost sensors* (CO₂, NO₂, dan PM_{2.5}) yang dilengkapi dengan sensor temperatur (T) dan kelembapan relatif (RH). Penggunaan sensor ini dipilih karena berbiaya murah, ringkas, dan portabel jika dibandingkan dengan alat ukur utama (Genikomsakis *et al.*, 2018). Kami melakukan pengukuran secara bergerak dengan memasang alat tersebut pada sepeda, kemudian mengukur pada lintasan yang sudah kami rancang. Beberapa penelitian mengenai penggunaan sepeda sebagai media pengukuran bergerak dari polusi udara telah dilakukan oleh Hankey and Marshall (2015), Gozzi *et al.* (2016), dan Velasco *et al.* (2016). Dari hasil pengukuran lapangan, sensitivitas sensor dapat mengukur dengan baik setiap perubahan konsentrasi gas dan partikulat yang disebabkan oleh sumber polutan. Analisis penyebab naik turunnya konsentrasi gas dan partikulat dibahas pada Hasil dan Pembahasan baik secara kuantitatif maupun kualitatif.

2. Metodologi

2.1. *Low-cost Sensors Gas dan Partikulat*

Detektor gas portabel yang kami rancang berbasis *low-cost sensors*. Parameter ukur yang digunakan dalam alat ini terdiri dari konsentrasi CO₂, NO₂, dan PM_{2.5}, serta T dan RH. Sensor CO₂ (model SKU:SEN0219) yang digunakan bekerja menggunakan prinsip *non-dispersive infrared* (NDIR). NDIR menggunakan cahaya *infrared* (IR) yang dipancarkan oleh sumber IR ($\lambda = 4,3 \mu\text{m}$) dan memiliki salah satu panjang gelombang yang sama dengan CO₂ (2,7, 4,3, dan 15 μm). Terdapat empat komponen utama pada sensor NDIR yaitu sumber IR, ruang ukur, filter, dan detektor IR. Sumber IR berada di ujung ruang pengukuran, sedangkan detektor IR berada di sisi yang

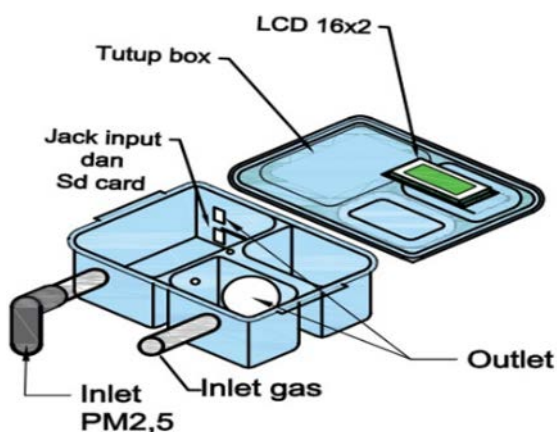
berlawanan. Ketika sejumlah intensitas cahaya yang dipancarkan oleh sumber IR melewati ruang pengukuran, maka CO₂ yang ada di dalamnya akan menyerap cahaya tersebut sedangkan cahaya yang tidak diserap akan diteruskan melewati filter. Filter berfungsi untuk menyaring frekuensi IR saja yang dapat diteruskan ke detektor IR. Intensitas cahaya IR yang diserap sebanding dengan jumlah konsentrasi CO₂ di dalam ruang ukur (Hodgkinson *et al.*, 2013).

Sensor NO₂ (model DGS-RESPIRR 968-041) menggunakan prinsip dasar sel elektrokimia (sel Galvani/Volta) untuk menghasilkan energi listrik dari reaksi reduksi-oksidasi (redoks). Sensor terdiri dari penghalang difusi (*diffusion barrier*), elektroda kerja (*sensing electrode*), elektroda *counter*, dan elektrolit. Pada lingkungan yang bebas dari gas reaktif, misalnya NO₂, oksigen akan berdifusi ke dalam sensor dan diserap oleh kedua elektroda. Hal tersebut akan menyebabkan tidak adanya perbedaan potensial listrik dari kedua elektroda sehingga tidak ada arus yang mengalir. Ketika gas reaktif berdifusi ke dalam sensor, gas tersebut akan mengalami reaksi redoks dan terjadi perbedaan potensial, sehingga arus dapat dihasilkan. Arus yang dihasilkan sebanding dengan konsentrasi gas yang masuk ke dalam sensor (Anderson and Hadden, 1999).

Sensor PM_{2.5} (model SKU:SEN0177) bekerja dengan prinsip hamburan cahaya. Partikulat (PM_{2.5}) yang ada di lingkungan akan masuk ke dalam *inlet* dengan cara ditarik oleh kipas. Laser ($\lambda = 630-680 \text{ nm}$) akan memancarkan cahaya secara lurus ke ruang kosong. Apabila terjadi hamburan cahaya ketika terdapat PM_{2.5}, maka foto detektor akan menerima intensitas cahaya tersebut berdasarkan sudut hamburan, panjang gelombang, indeks bias, dan bentuk/jenis partikulat. Sinyal listrik keluaran foto detektor akan diperkuat dengan *filter amplifier*, kemudian dikonversi melalui *analog-to-digital converter* (ADC) pada mikrokontroler (MCU) menjadi sinyal digital. Sinyal tersebut sebanding dengan nilai konsentrasi massa PM_{2.5} yang telah dikalibrasi sebelumnya (Vaicdan dkk., 2019). Jenis/model sensor yang digunakan, parameter ukur, dan jangkauan data pengukuran dari perangkat ini dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. *Low-cost sensors* yang digunakan dalam pengukuran konsentrasi gas (CO₂ dan NO₂) dan partikulat (PM_{2.5}), serta parameter meteorologi (T dan RH) di kawasan Dayeuhkolot, Bandung.

| Sensor | Parameter Ukur | Jangkauan | Kesalahan |
|---------------------|--------------------------------------|----------------------------|-----------------|
| SKU:SEN0219 | Karbon Dioksida (CO ₂) | 0 – 5000 ppm | ±50 ppm |
| DGS-RESPIRR 968-041 | Nitrogen Dioksida (NO ₂) | 0 – 20 ppm | ±0,4 ppm |
| SKU:SEN0177 | Partikulat (PM _{2.5}) | 0 – 500 µg m ⁻³ | ±10 ppm |
| DHT 22 | Temperatur dan Kelembapan | -40 – 80 °C dan 0 – 100% | ±0,5 °C ±2 % |



Gambar 1. Perancangan boks portabel detektor gas yang digunakan pada pengukuran konsentrasi gas (CO₂ dan NO₂) dan partikulat (PM_{2.5}), serta T dan RH di kawasan Dayeuhkolot, Bandung.

Semua sensor dihubungkan dengan MCU, jenis Arduino UNO, melalui jalur komunikasi analog dan serial, serta data hasil pengukurannya disimpan melalui *data logger* (Vaicdan dkk., 2019; Abdurrachman dkk, 2020). Detektor gas portabel dirancang melalui sebuah boks yang memungkinkan untuk menempatkan komponen/modul sensor, MCU, dan baterai yang dapat dipasang pada sepeda (Gambar 1). *Inlet* PM_{2.5} berbentuk ke bawah dengan tujuan dapat melindungi masuknya partikel besar (> 2,5 µm) dan air saat turun hujan. Material pada boks berbahan plastik menjadikannya tahan air dan pemasangannya pada sepeda dikondisikan agar tahan guncangan sehingga pengukuran konsentrasi gas dan partikulat tersebut dapat dilakukan pada struktur horizontal di kawasan Dayeuhkolot dengan baik.

2.2. Kalibrasi Sensor

Pada penelitian ini kami melakukan pengujian sensor CO₂ dengan membandingkan datanya dengan CO₂ Meter (model GCH-2018, Lutron Co. Ltd.). CO₂

meter merupakan alat untuk mengukur konsentrasi gas karbon dioksida, kelembapan, dan temperatur. Alat ukur tersebut bekerja berdasarkan NDIR dengan jangkauan pengukuran konsentrasi CO₂ 0-4000 ppm. Kedua alat ditempatkan di ruangan secara bersamaan dan berdampingan dalam waktu 1 jam. Berdasarkan hasil pengukuran, sensor dapat mengikuti pembacaan detektor dengan nilai linierisasi moderat ($R^2 = 0,5$) (Abdurrachman dkk., 2020).

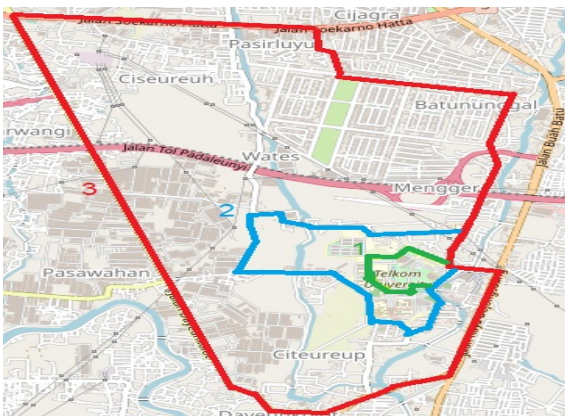
Sementara itu, kalibrasi pada sensor NO₂ tidak dilakukan. Kami hanya melakukan *setting zero-offset* pada sensor sesuai standar pabrik dan membandingkannya dengan sensor sejenis lainnya untuk melihat kualitas sensor yang digunakan. Hal ini untuk memastikan pembacaan datanya sesuai dengan prosedur yang dikeluarkan oleh pihak pengembang (Abdurrachman dkk., 2020). *Setting zero-offset* dilakukan dengan menghidupkan sensor selama satu jam di dalam ruangan menggunakan perangkat lunak *open source* (Tera Term). Pembacaan sensor akan menjadi lebih stabil ketika telah dilakukan proses *warming up*. Hal tersebut kami lakukan sesaat sebelum melakukan pengukuran di lapangan dan/atau ketika sensor NO₂ telah lama tidak dipakai dan nilai pembacaan konsentrasinya tidak stabil.

Sensor PM_{2.5} telah dikalibrasi dengan eksperimen yang dikerjakan oleh Vaicdan dkk. (2019). Alat-alat yang digunakan untuk kalibrasi adalah generator partikel, *diffusion dryer*, dan *optical partikel counter* (OPC, model KC-01E, Rion Co., Ltd.). Generator partikel bekerja dengan prinsip *nebulizer* yang mengubah larutan *polystyrene latex spheres* (PSL) menjadi *droplet* dengan ukuran diameter (Dp) yang digunakan yaitu 0,309 µm, 0,479 µm, dan 1,005 µm. Partikel dengan tingkat kelembapan yang tinggi kemudian dilewatkan ke *diffusion dryer*. Di dalam *diffusion dryer* terdapat silika gel yang berfungsi untuk menghilangkan uap air yang terkondensasi pada partikel-partikel tersebut.

Konsentrasi partikel kemudian diukur oleh sensor dan OPC secara simultan.

2.3 Lokasi Pengamatan dan Mekanisme Pengukuran

Pada penelitian ini, kami melakukan pemantauan konsentrasi gas dan partikulat, serta parameter meteorologi dengan menggunakan sepeda pada tiga tipe lintasan: (1) jalur hijau (jalan di dalam kampus Universitas Telkom), (2) lalu lintas rendah (jalan di lingkaran luar kampus), dan (3) jalan raya (Gambar 2). Lintasan 1 memiliki udara yang relatif lebih bersih dibandingkan dua jalur lainnya. Hal ini dikarenakan banyaknya ruang terbuka hijau (RTH) di kawasan tersebut dan rendahnya aktivitas kendaraan bermotor. Lintasan 2 banyak dipengaruhi oleh kegiatan masyarakat terutama pembakaran sampah rumah tangga secara langsung. Selain itu, jalur ini juga lebih banyak dilalui oleh kendaraan yang lewat untuk memotong waktu tempuh yang disebabkan jalur utama lebih ramai dan macet. Pada hari Minggu, terdapat kegiatan pasar dadakan di pintu masuk kampus. Lintasan 3 merupakan salah satu jalur terpadat di kawasan Bandung Raya dan tingginya potensi emisi lokal berasal dari kendaraan bermotor.



Gambar 2. Tiga lintasan yang digunakan untuk pemantauan konsentrasi gas (CO_2 dan NO_2) dan partikulat ($\text{PM}_{2.5}$): (1) jalur hijau, (2) lalu lintas rendah, dan (3) jalan raya, kawasan Dayeuhkolot, Bandung.

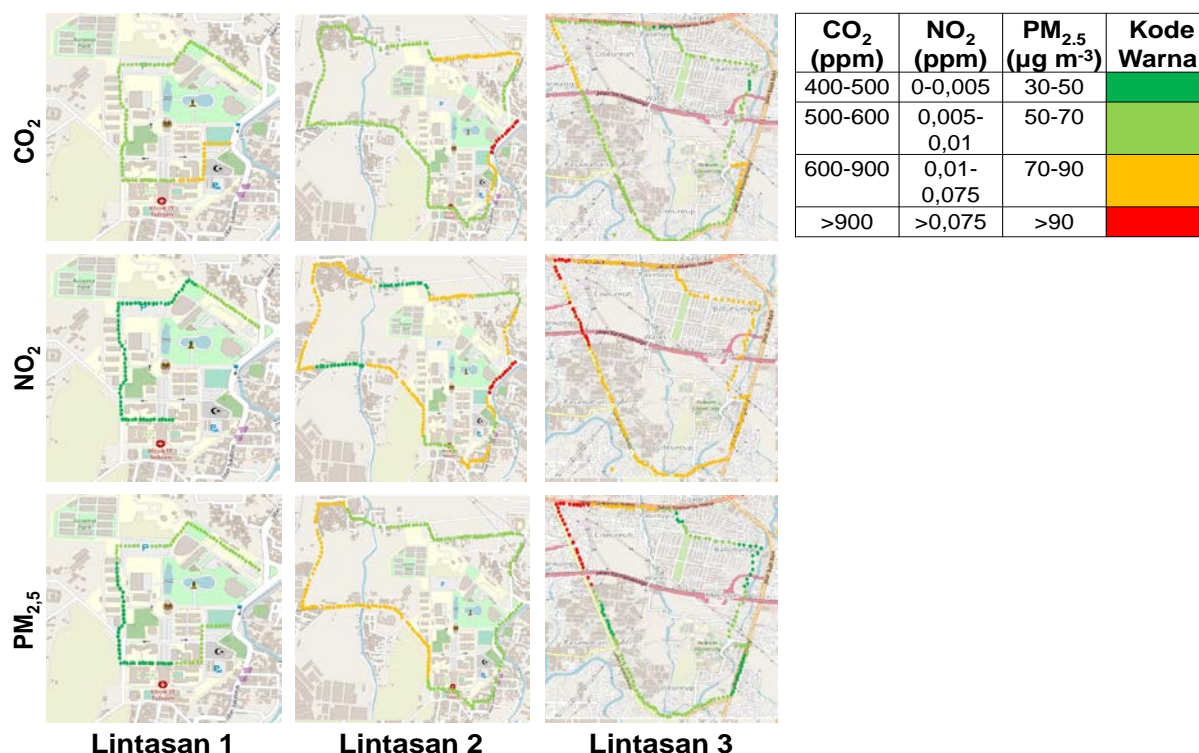
Pengukuran dilakukan selama 15 kali pada periode Februari-Maret 2019, yaitu setiap hari Minggu, serta pada hari kerja dan

libur. Pengukuran pada hari kerja dilakukan sebanyak tiga kali sedangkan satu kali pengukuran dilakukan pada hari libur. Tipikal waktu pengukuran dilakukan pada pagi (06:30-08:30 WIB), siang (13:00-15:00 WIB), dan sore (16:00-18:00 WIB) hari selama ~2 jam dengan kecepatan rata-rata sepeda yaitu ~10 km jam⁻¹. Sebelum proses observasi dilakukan, alat ukur, sepeda, dan kamera dipersiapkan sampai pada pembacaan sensor gas stabil, sepeda sudah siap digunakan, serta baterai kamera telah terpasang dan empat buah baterai cadangan disimpan di tempat yang mudah untuk dikeluarkan-masukkan dan terhindar dari air hujan. Stabilitas sensor gas dilakukan dengan menunggu selama ~1 jam sebelum proses pengukuran dilakukan.

Proses pengukuran dimulai pada lintasan 1 dengan jarak ~1,5 km selama ~10 menit. Selanjutnya pengukuran dilanjutkan pada lintasan 2 dengan jarak ~5 km selama ~35 menit. Lintasan 3 ditempuh sejauh ~13 km selama ~78 menit. Pada saat pengukuran, terutama di sore hari, biasanya terjadi hujan. Data hasil pengukuran disimpan pada *SD Card*. Analisis data dilakukan secara *offline* dengan melihat validasi data dari sensor dan melihat secara kualitatif melalui kamera. Secara umum, pengukuran tidak terganggu masalah teknis. Debu atau partikel berukuran besar ($> 2,5 \mu\text{m}$) diantisipasi dengan rancangan *inlet* pada boks. Sensor temperatur dan kelembapan ditempatkan di bawah boks untuk menghindari air hujan tetapi dapat bersentuhan dengan udara sekitar secara langsung.

3. Hasil dan Pembahasan

Persebaran nilai konsentrasi emisi gas dan partikulat yang terukur di setiap lintasan berbeda-beda, contohnya dapat dilihat pada tanggal 10 Februari 2019 yang ditampilkan pada Gambar 3 (terlihat gradasi warna dari hijau sampai merah atau dari konsentrasi rendah sampai tinggi). Perlu diperhatikan bahwa waktu pengukuran konsentrasi polutan adalah per 2 menit dan fluktuasi data yang disajikan bersifat spasial dan temporal, serta kategori yang digunakan tidak mengindikasikan baku mutu udara di lokasi pengukuran.



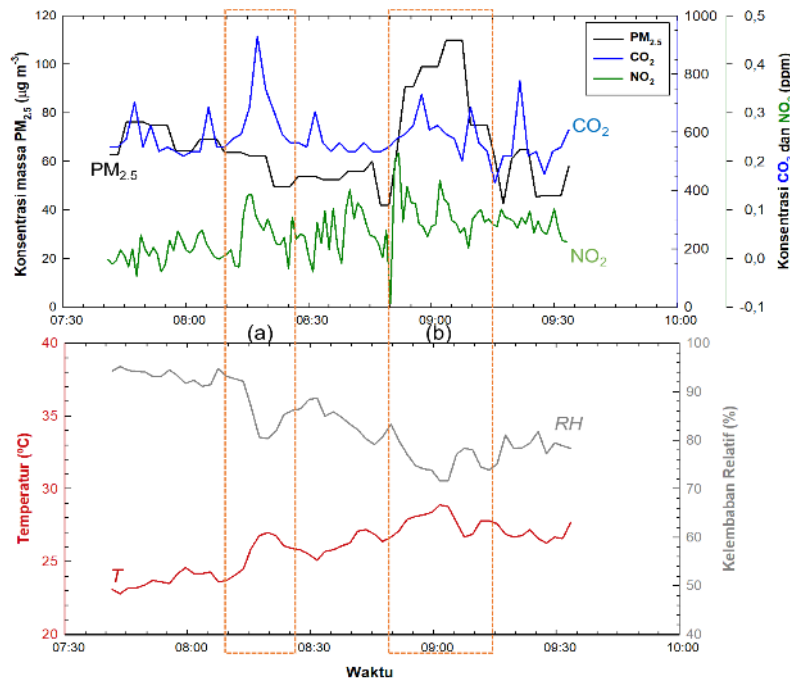
Gambar 3. Hasil pengukuran konsentrasi gas (CO₂ dan NO₂) dan partikulat (PM_{2.5}) pada 10 Februari 2019 di tiga lintasan: (1) jalur hijau, (2) lalu lintas rendah, dan (3) jalan raya, kawasan Dayeuhkolot, Bandung.

Pada Gambar 3 dapat dilihat bahwa pada lintasan pertama, konsentrasi polutan per lintasan dilihat secara vertikal cenderung bersih karena berada di dalam kawasan kampus dengan lalu lintas yang rendah serta banyaknya pepohonan. Konsentrasi CO₂ sebesar 600-900 ppm yang teridentifikasi di Gerbang 3 dipengaruhi oleh kendaraan yang masuk-keluar kampus. Lintasan kedua sedikit tercemar karena berada di lingkaran luar kawasan kampus yang merupakan jalan perumahan/ penduduk serta padat pemukimannya. Aktivitas di Minggu pagi (10 Februari 2019) didominasi oleh kegiatan masyarakat seperti pasar dadakan (konsentrasi CO₂ dan NO₂ yang tinggi) dan pembakaran sampah langsung dan/atau kendaraan bermotor (PM_{2.5} >65 µg m⁻³). Lintasan ketiga merupakan jalan raya, sehingga udara cenderung terpapar polusi khususnya di persimpangan jalan, dengan sumber emisi terbesar disebabkan oleh kendaraan bermotor. Kinerja *low-cost sensor* dalam penelitian ini, mampu mendeteksi fluktuasi data konsentrasi polutan yang disebabkan oleh perubahan lingkungan.

3.1. Pengaruh Pasar Minggu dan Kendaraan Bermotor

Pada pengukuran 10 Februari 2019, terdapat faktor yang meningkatkan konsentrasi CO₂, NO₂, dan PM_{2.5} yaitu aktivitas pasar minggu yang berada di jalan bagian depan pintu masuk utama kampus Universitas Telkom (lintasan 2) dan kendaraan bermotor di persimpangan Jalan Moh. Toha (lintasan 3) (Gambar 4).

Data yang ada telah divalidasi secara kualitatif dengan rekaman kamera. Pada kegiatan pasar, konsentrasi CO₂ berada pada rentang 550-931 ppm, konsentrasi NO₂ 0-0,13 ppm, dan PM_{2.5} stabil di ~62 µg m⁻³, yang terukur pada temperatur 24-27°C dan kelembapan 80-92%. Peningkatan konsentrasi CO₂ yang signifikan diakibatkan oleh banyaknya respirasi manusia (Kapalo *et al.*, 2019). Terlihat konsentrasi NO₂ sedikit meningkat pada lintasan 2 dibandingkan sebelumnya (sebelum jam 08:10) yang disebabkan oleh adanya aktivitas kendaraan bermotor (Ong *et al.*, 2011). Pada jam tertentu di hari Minggu, terutama di waktu sebelum pukul 10:00, kegiatan didominasi oleh aktivitas masyarakat di pasar. Hal ini didukung dengan tidak banyaknya aktivitas keluar-masuk kendaraan bermotor dari/ke kampus pada jam tersebut.



Gambar 4. Pengaruh (a) pasar minggu (lintasan 2) dan (b) kendaraan bermotor (lintasan 3) pada 10 Februari 2019 yang masing-masing menyebabkan konsentrasi gas (CO_2 dan NO_2) dan partikulat ($\text{PM}_{2.5}$) meningkat.

Pada lintasan 3, ketika pengukuran berada di persimpangan jalan raya, terlihat perubahan konsentrasi massa $\text{PM}_{2.5}$ yang mendadak mencapai $110 \mu\text{g m}^{-3}$ akibat tidak Bergeraknya kendaraan bermotor karena lampu merah, dengan kondisi temperatur 29°C , dan kelembapan 72%. Perubahan konsentrasi massa $\text{PM}_{2.5}$ akibat sektor transportasi juga telah dilaporkan oleh Franco *et al.* (2016). Sementara itu, konsentrasi NO_2 meningkat secara gradual karena perpindahan lintasan dari 1 ke 2 dan dari lintasan 2 ke 3, dengan nilai puncaknya berada pada lintasan 3 (0,21 ppm), serta kembali lagi ke konsentrasi rendah pada saat posisi pengukuran berada di kawasan kampus. Fluktuasi konsentrasi gas dan partikulat akibat kondisi di atas dapat terukur dengan baik menggunakan *low-cost sensors*.

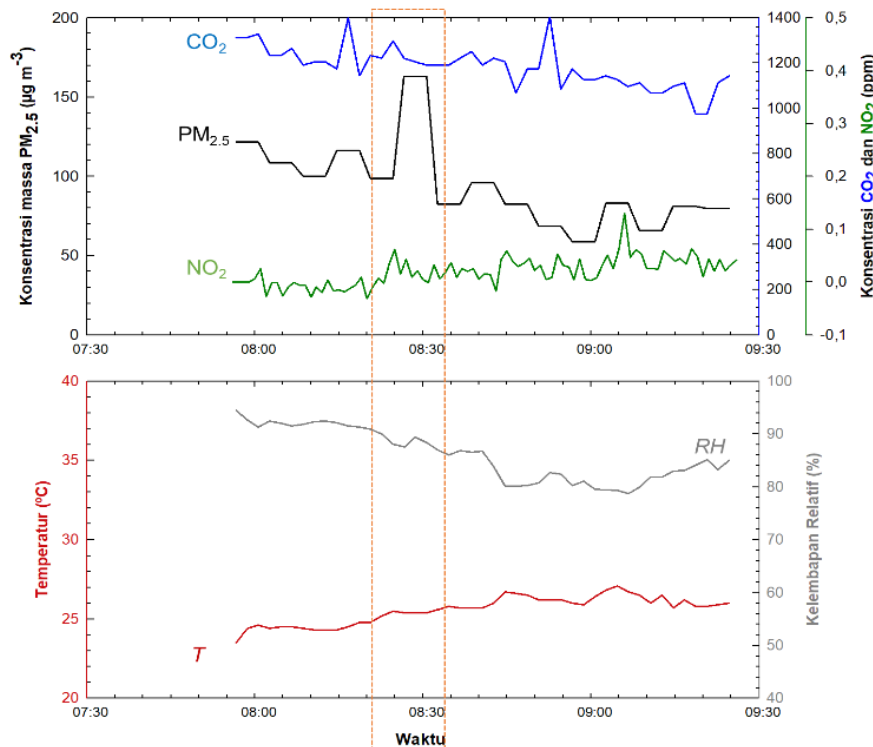
Perlu diketahui bahwa data dari sensor $\text{PM}_{2.5}$ telah dilakukan koreksi terhadap kelembapan $>80\%$. Sedangkan konsentrasi CO_2 dan NO_2 , masing-masing tidak dilakukan koreksi faktor temperatur/kelembapan dan sensitivitas terhadap gas lainnya.

3.2. Pengaruh Pembakaran Sampah

Pada pengukuran 17 Maret 2019, terdapat faktor lain yang meningkatkan emisi gas (CO_2 dan NO_2) dan $\text{PM}_{2.5}$ yaitu

pembakaran sampah secara langsung. CO_2 dan NO_2 , misalnya, yang merupakan gas yang tidak mudah terbakar (*non-flammable*), merupakan hasil dari pembakaran sempurna akibat reaksi dari sampah rumah tangga (organik/anorganik/campuran) dengan zat yang mudah terbakar seperti karbon, hidrogen, oksigen, nitrogen, sulfur, dan klorin (Wielgosiński, 2012). Sementara itu, pembentukan partikulat berasal dari bahan padat anorganik yang tidak mudah terbakar.

Hasil observasi pada lintasan 3 (Gambar 5), dengan jarak ~ 10 meter dari jalan raya, menunjukkan konsentrasi massa $\text{PM}_{2.5}$ mencapai $99\text{--}163 \mu\text{g m}^{-3}$ dan konsentrasi CO_2 ~ 1190 ppm, sedangkan konsentrasi NO_2 relatif stabil ($\sim 0,06$ ppm). Pengaruh kecepatan dan arah angin tidak diukur dalam pengamatan ini. Namun demikian, cukup jelas bahwa kenaikan konsentrasi gas dan partikulat tersebut mengindikasikan bahwa pembakaran sampah secara langsung berakibat pada tercemarnya udara sekitar. Penelitian lebih lanjut akibat pembakaran sampah dan dampaknya terhadap lingkungan perlu dilakukan dengan menggunakan sensor gas lainnya seperti metana (CH_4), karbon monoksida (CO), dan hidrokarbon (HC) (Ojha *et al.*, 2017; Shuk *et al.*, 2019).



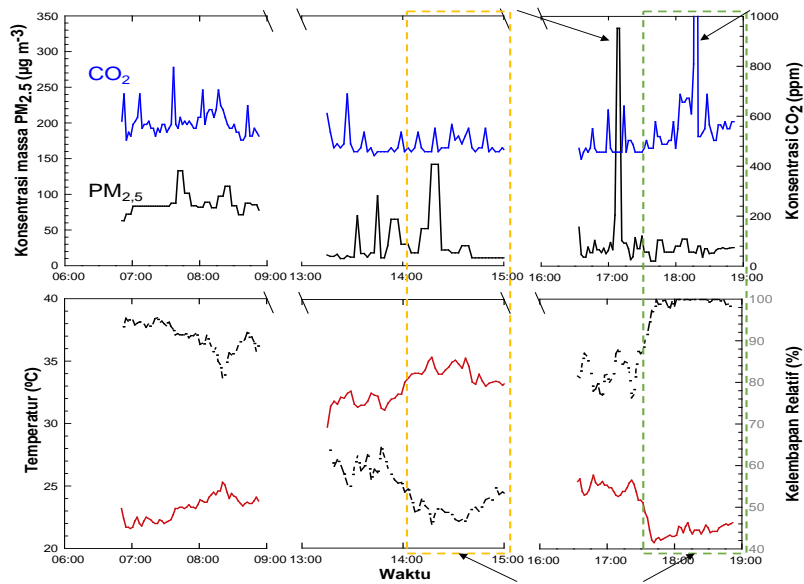
Gambar 5. Pengaruh pembakaran sampah rumah tangga secara langsung pada konsentrasi massa PM_{2.5} dan CO₂, di kawasan Dayeuhkolot, Bandung, pada 17 Maret 2019.

3.3. Pengaruh Hujan

Pengukuran 4 Februari 2019 dilakukan sebanyak 3 kali (pagi, siang dan sore). Pada sore hari hasil pengamatan dipengaruhi oleh hujan (Gambar 6). Pada saat pengukuran tersebut, tidak dilakukan pengukuran konsentrasi NO₂. Pada pagi hari, rerata konsentrasi CO₂ (>500 ppm) dan PM_{2.5} (>50 µg m⁻³) sedikit lebih tinggi dibandingkan dengan data yang terukur pada siang dan sore hari. Konsentrasi CO₂ pada siang hari adalah ~450 ppm, diukur pada temperatur 27-34°C dan kelembapan 47-70%. Sementara itu, konsentrasi PM_{2.5} pada periode terbatas (<20 menit) dapat mencapai 142 µg m⁻³ yang diakibatkan oleh kendaraan bermotor. Perlu diketahui bahwa pada saat pengukuran di sore hari, terdapat data konsentrasi PM_{2.5} dan CO₂ sesaat (beberapa menit) yang mengandung kesalahan dikarenakan faktor yang tidak diketahui (pada PM_{2.5}) serta

perangkat yang *reset* dengan sendirinya (CO₂).

Hujan terjadi pada sore hari di jalan raya kawasan Dayeuhkolot (lintasan 3) sekitar pukul 17:32 WIB dengan durasi hujan deras ~30 menit yang ditunjukkan pada Gambar 6. Saat hujan turun, dapat terlihat dengan jelas perubahan drastis temperatur dari 26°C ke 21°C dan kelembapan dari 76% ke 100%. Saat hujan di sore hari, terjadi penurunan konsentrasi massa PM_{2.5} (~36,4 µg m⁻³; biru) dibandingkan konsentrasi pada siang hari (52 µg m⁻³; titik berwarna jingga). Hal ini diakibatkan oleh adanya pembilasan polutan akibat air hujan dengan rasio pembilasan (*scavenging ratio* (*r*)) ~30%, dihitung berdasarkan konsentrasi massa partikulat sebelum dan sesudah terjadinya hujan (Feng dan Wang, 2012).



Gambar 6. Pengaruh perubahan konsentrasi massa $PM_{2.5}$ pada 4 Februari 2019 di lintasan 3 pada (a) siang hari dan (b) saat turun hujan di sore hari, kawasan Dayeuhkolot, Bandung.

4. Kesimpulan

Telah dilakukan studi lapangan pengukuran konsentrasi gas (CO_2 dan NO_2) dan partikulat ($PM_{2.5}$) dengan menggunakan sepeda di kawasan Dayeuhkolot, cekungan udara Bandung Raya, pada Februari-Maret 2019 (15 kali pengamatan). Observasi dilakukan setiap hari minggu, hari kerja, dan hari libur, masing-masing dilakukan pada pagi (~06:30 WIB), siang (~13:00 WIB), dan/atau sore hari (~16:00 WIB), selama ~2 jam dengan kecepatan rata-rata sepeda ~10 km jam^{-1} . Tiga jalur yang dilalui, dirancang untuk dapat melihat perbedaan yang signifikan antara jalur hijau (di dalam kawasan kampus Universitas Telkom), lalu lintas rendah, dan pengaruh aktivitas kendaraan bermotor di jalan raya, serta mengukur sensitivitas dari *low-cost sensors* yang digunakan terhadap berbagai faktor lingkungan yang terjadi. Ketiga sensor telah dikalibrasi di laboratorium.

Hasil pengukuran menunjukkan ketiga lintasan memiliki karakteristik yang unik dan memiliki hubungan yang kuat, khususnya akibat dari aktivitas manusia (antropogenik). Kegiatan pasar di hari Minggu (10 Februari 2019) dapat meningkatkan konsentrasi CO_2 dibandingkan hari lainnya. Hal ini dikarenakan banyaknya warga yang aktif beraktivitas pada kegiatan tersebut. Sedangkan konsentrasi $PM_{2.5}$ meningkat cukup signifikan, sampai 68 $\mu g m^{-3}$ lebih dari kondisi sebelumnya, ketika dilakukan pengamatan di persimpangan jalan raya. Pada 17 Maret 2019, pembakaran

sampah rumah tangga secara langsung juga ikut berkontribusi pada penambahan konsentrasi massa $PM_{2.5}$ sebesar ~64 $\mu g m^{-3}$. Selama periode pengukuran, sering terjadi hujan di sore hari, ditunjukkan dengan penurunan konsentrasi massa partikulat sebesar 30% yang teridentifikasi pada 4 Februari 2019. Tampak bahwa sensitivitas *low-cost sensors* cukup baik, karena masih dapat mendeteksi setiap perubahan konsentrasi polutan di ketiga jalur dengan kondisi lingkungan berbeda.

Perlu dicatat bahwa pengujian paparan emisi dari berbagai sumber menggunakan *low-cost sensors* belum menjadi acuan standar pengukuran. Namun demikian, melihat fluktuasi yang terekam pada alat ukur tersebut dan sensitivitasnya di setiap perubahan lokasi pengamatan, penggunaan alat ini cukup menjanjikan dan bisa menjadi pra-studi pemantauan kualitas udara. Kalibrasi pada skala laboratorium dan pengukuran secara bersamaan dengan alat ukur standar lainnya secara berkala, dapat meningkatkan metode pengukuran dan kualitas data hasil pengukuran, serta analisis dan interpretasi datanya. Adapun faktor-faktor teknis yang mempengaruhi proses pengukuran dengan *low-cost sensors* masih terus dipelajari dan ditingkatkan, baik dari sisi pengukuran, pengambilan data parameter ukur, maupun validasi datanya secara komprehensif pada penelitian lainnya.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Laboratorium Kualitas Udara, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung, Indonesia, dan Thermal Fluid and Particle System Laboratory, Kanazawa University, Jepang, atas kesempatannya untuk menggunakan perangkat ukur dalam rangka mengalibrasi sensor yang digunakan, serta Kementerian Riset, Teknologi, dan Pendidikan Tinggi, Indonesia, melalui program *Post-Doctoral* yang secara tidak langsung memberikan salah satu luaran yang digunakan dalam penelitian ini. Distribusi kontribusi penulisan makalah ini adalah sebagai berikut: Penulis Pertama dan Penulis Ketiga merupakan kontributor utama yang merancang penelitian serta menulis sebagian besar makalah ini; Penulis Pertama juga melakukan akuisisi dan pengolahan data; Penulis Kedua dan Penulis Kelima berkontribusi pada persiapan alat ukur berbasis *low-cost* sensor; Penulis Keempat dan Keenam berkontribusi dalam melakukan analisis dan interpretasi data.

Rujukan

- Abdurrachman, A., Chandra, I., & Salam, R.A. (2020). Rancang Bangun Alat Ukur Konsentrasi Gas CO₂ dan NO₂ untuk Pengamatan Emisi dari Pembakaran Sampah Rumah Tangga. *e-Proceeding of Engineering*, 7 (1), 1342-1349.
- Anderson, G.L. & Hadden, D.M. (1999). The Gas Monitoring Handbook. *New York, Ickus Guides*, Avocet Press Inc.
- Barus, R.A.A., Chandra, I., & Fathona, I.W. (2019). Rancang bangun Portable Weather Station dalam Mendukung Pengamatan Mikropartikel di Cekungan Udara Bandung Raya. *e-Proceeding of Engineering*, 6 (1), 1290-1297
- Feng, X. & S. Wang, S. (2012). Influence of Different Weather Events on Concentrations of Particulate Matter with Different Sizes in Lanzhou, China. *Journal of Environmental Sciences*, 24 (4), 665-674. doi: 10.1016/S1001-0742(11)60807-3.
- Firdaus, A.H., Utami, A.R.I., & Chandra, I. (2020). Prastudi Pemantauan Bioaerosol di Dalam Ruangan dan Analisisnya, *e-Proceeding of Engineering*, 7 (1), 1320-1327.
- Franco, J.F., Segura, J.F. & Mura, I. (2016). Air Pollution alongside Bike-paths in Bogotá-Colombia. *Frontiers in Environmental Science*, 4 (77). Doi: 10.3389/fenvs.2016.00077.
- Genikomsakis, K.N., Galatoulas, N.-F., Dallas, P.I., Ibarra, L.M.C., Margaritis, D., & Ioakimidis, C.S. (2018). Development and on-Field Testing of Low-cost Portable System for Monitoring PM_{2.5} Concentrations. *Sensors*, 18 (4), 1056. doi: 10.3390/s18041056.
- Gozzi, F., Ventura, G.D., & Marcelli, A. (2016). Mobile Monitoring of Particulate Matter: State of Art and Perspectives. *Atmospheric Pollution Research*, 7 (2), 228-234.
- Hankey, S. & Marshall, J.D. (2015). On-bicycle Exposure to Particulate Air Pollution: Particle Number, Black Carbon, PM_{2.5}, and Particle Size. *Atmospheric Environment*, 122, 65-73.
- Hodgkinson, J., Smith, R. Ho, W.O., Saffell, J.R. & Tatam, R.P. (2013). Non-dispersive Infra-red (NDIR) Measurement of Carbon Dioxide at 4.2 µm in a Compact and Optically Efficient Sensor. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 186, 580-588. doi: 10.1016/j.snb.2013.06.006.
- Jupri, & Mulyadi, A. (2017). Suburban Zoning of Bandung Raya Area. *Jurnal Pendidikan Geografi*, 17, 105-116, doi: 10.17509/gea.v17i2.6888.
- Kapalo, P., Mečiarová, L. Vilčeková, S., Burdová, E.K., Domnita, F., Bacotiu, C. & Péterfi, K.E. (2019). Investigation of CO₂ Production Depending on Physical Activity of Students. *International Journal of Environmental Health Research*, 29 (1), 31-44. doi: 10.1080/09603123.2018.1506570.
- Majid, L.I., Chandra, I. & Utami, A.R.I. (2019). Observasi Lapangan Mikro-Partikel di Atmosfer Menggunakan Nanosampler pada Cekungan Udara Bandung Raya. *e-Proceeding of Engineering*, 6 (1), 1149-1156.
- Nugroho, S., Chandra, I., & Salam, R.A. (2020). Potensi Kadar Konsentrasi CO₂ dan PM_{2.5} yang Dihasilkan dari Pembakaran Sampah Organik dan Anorganik Menggunakan Insinerator. *e-Proceeding of Engineering*, 7 (1), 1312-1319.
- Ojha, B., Illyaskutty, N., Knoblauch, J., Balachandran, M.R., & Kohler, H. (2017). High-temperature CO / HC gas

- Sensors to Optimize Firewood Combustion in Low-power Fireplaces. *J. Sens. Sens. Syst.*, 6, 237–246. Doi: 10.5194/jsss-6-237-2017.
- Ong, H.C., Mahlia, T.M.I., & Masjuki, H.H., (2011). A Review on Emissions and Mitigation Strategies for Road Transport in Malaysia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15 (8), 3516-3522. doi: 10.1016/j.rser.2011.05.006.
- Shidki, H., Chandra, I., & Djunaedy, E. (2020). Analisis Kualitas Udara Dalam Ruangan pada Kantor Terbuka di Universitas Telkom. *e-Proceeding of Engineering*, 7 (1), 1121-1128.
- Shuk, P., Mcguire C., & Brosha, E. (2019). Methane Gas Sensing Technologies in Combustion: Comprehensive Review. *Sensors & Transducers*, 229, 1-10.
- Sumaryati, (2011). Polusi Udara di Kawasan Cekungan Bandung. *Berita Dirgantara*, 12 (3), 83-89.
- Sya'bani, A., Chandra, I., Majid, L.I., Vaicdan, F., Barus, R.A.A., Abdurrachman, A. & Salam, R.A. (2020). Pemantauan Konsentrasi PM_{2.5} dan CO₂ Berbasis Low-cost Sensor Secara Real-time di Cekungan Udara Bandung Raya. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 21 (1), 009-015.
- Vaicdan, F., Chandra, I., & Suhendi, A. (2019). Pengamatan Konsentrasi Massa PM_{2.5} di Cekungan Udara Bandung Raya. *e-Proceeding of Engineering*, 6 (1), 1181-1188.
- Velasco, A., Ferrero, R., Gandino, F., Montrucchio, B. & Rebaudengo, M. (2016). A Mobile and Low-Cost System for Environmental Monitoring: A Case Study. *Sensors*, 16, 710.
- Wielgosiński, G., (2012). Pollutant Formation in Combustion Processes, *Advances in Chemical Engineering*, Dr. Zeeshan Nawaz (Ed.). *InTech*, 295-324.

