

Pemantauan Konsentrasi PM_{2.5} dan CO₂ Berbasis *Low-Cost Sensor* secara *Real-Time* di Cekungan Udara Bandung Raya

Real-Time Monitoring of PM_{2.5} and CO₂ Concentrations Based on Low-Cost Sensor in The Greater Bandung Air Basin

ASHARI SYA'BANI, INDRA CHANDRA*, LUTFI IKBAL MAJID, FURQAN VAICDAN,
ROBBI ADAM ALDINO BARUS, ARIEF ABDURRACHMAN, RAHMAT AWALUDIN SALAM

Program Studi S1 Teknik Fisika, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom
Jalan Telekomunikasi Terusan Buah Batu, Bandung 40257, Indonesia
Email: indrachandra@telkomuniversity.ac.id

ABSTRACT

Field observation of PM_{2.5} and CO₂ concentrations and meteorological conditions using low-cost sensors in real-time was carried out in the Greater Bandung air basin on Mar. 12 – Apr. 25, 2019. PM_{2.5} and CO₂ sensors, as well as detectors of meteorological parameters, have been calibrated in the Laboratory. The instruments were placed in two locations (± 300 m apart horizontally and ± 20 m vertically), namely Tokong Nanas Building (Location 1 / L1) and Deli Building (L2), Telkom University, Bandung. Data was stored in the data logger and sent to the cloud database every 2-min through the GSM module. The results show that the same air mass in both locations has identified, except for some events that are affected by anthropogenic activities (those concentrations in L2 > L1) and wind speed/direction (time delay). The daily-average PM_{2.5} and CO₂ concentrations at L1 and L2 are 52 $\mu\text{g m}^{-3}$ and 580 ppm, and 70 $\mu\text{g m}^{-3}$ and 809 ppm. PM_{2.5} and CO₂ mass concentrations relatively higher (± 172 $\mu\text{g m}^{-3}$ and 916 ppm) at night due to a stable atmosphere (potential temperature, $d\theta/dz > 0$, typical data from 20:00 to 3:00 local time), lower planetary boundary layer, and mixed local emissions and transboundary air pollutants. Meanwhile, lower CO₂ concentrations in daytime mostly occur due to the activity of vegetation, which actively absorbs CO₂ in the photosynthesis process. The fluctuation of those concentrations due to polluted air suggests that the performances of low-cost sensors can be adequately used properly for ambient air quality monitoring.

Keywords: CO₂, low-cost sensors, PM_{2.5}, potential temperature

ABSTRAK

Pemantauan konsentrasi PM_{2.5} dan CO₂ serta kondisi meteorologi berbasis *low-cost sensors* secara *real-time* di cekungan udara Bandung Raya telah dilakukan pada 12 Maret-25 April 2019. Sensor PM_{2.5} dan CO₂, serta detektor parameter meteorologi telah dikalibrasi di Laboratorium. Alat ukur ditempatkan di dua lokasi dengan perbedaan jarak ± 300 m dan ketinggian ± 20 m, yaitu Gedung Tokong Nanas (Lokasi 1 / L1) dan Gedung Deli (L2), Universitas Telkom, Bandung. Komunikasi data menggunakan modul GSM (SIM900A) dan data disimpan di *data logger* dan dikirimkan ke *cloud database* per 2 menit. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa massa udara di kedua lokasi memiliki tren data konsentrasi PM_{2.5} dan CO₂ yang relatif homogen, kecuali pada beberapa kejadian yang dipengaruhi oleh aktivitas antropogenik (konsentrasi PM_{2.5} dan CO₂ di L2 > L1) serta arah dan kecepatan angin (adanya perbedaan konsentrasi massa PM_{2.5} akibat penundaan waktu). Rerata harian konsentrasi PM_{2.5} dan CO₂ di L1 dan L2 berturut-turut adalah 52 $\mu\text{g m}^{-3}$ dan 580 ppm serta 70 $\mu\text{g m}^{-3}$ dan 809 ppm. Konsentrasi massa PM_{2.5} dan CO₂ yang relatif lebih tinggi (± 172 $\mu\text{g m}^{-3}$ dan 916 ppm) di malam hari akibat atmosfer yang lebih stabil (temperatur potensial, $d\theta/dz > 0$, tipikal dari pukul 20:00-03:00), penurunan *planetary boundary layer*, dan terjadinya pencampuran partikulat lokal dengan polutan udara lintas batas. Sedangkan, konsentrasi CO₂ yang relatif lebih rendah di siang hari sebagian besar terjadi akibat aktivitas vegetasi yang aktif menyerap CO₂ pada proses fotosintesis. Fluktuasi konsentrasi karena udara tercemar menunjukkan bahwa kinerja *low-cost sensors* dapat digunakan dengan baik untuk memantau kualitas udara di atmosfer.

Kata kunci: CO₂, *low-cost sensor*, PM_{2.5}, temperatur potensial

1. PENDAHULUAN

Pencemaran udara merupakan salah satu permasalahan lingkungan yang dihadapi kota-kota besar di Indonesia⁽¹⁾. Hal tersebut

dipengaruhi oleh berbagai faktor diantaranya: topografi, kependudukan, iklim, tingkat perkembangan sosio-ekonomi, dan industrialisasi⁽²⁾. Lebih lanjut Haryanto & Franklin

(2011) menyatakan bahwa $\pm 20\%$ dan $\pm 17\%$ hari udara bersih berkategori baik dalam setahun teridentifikasi di Jakarta dan Surabaya⁽¹⁾. Daerah metropolitan seperti Bandung Raya, yang terdiri atas Kota Bandung, Kota Cimahi, Kabupaten Bandung, Kabupaten Bandung Barat, dan Kabupaten Sumedang, memiliki topografi berupa cekungan, terletak pada ketinggian rata-rata ± 768 m, dimana pegunungan membatasi daerah tersebut secara horizontal⁽³⁾. Berdasarkan data proyeksi penduduk dari Badan Pusat Statistik (BPS), Provinsi Jawa Barat tahun 2010-2018, Bandung Raya memiliki total jumlah penduduk sekitar 9 jutaan jiwa⁽⁴⁾. Oleh karenanya, pesatnya pertumbuhan ekonomi dan urbanisasi di kota-kota besar berpotensi besar dalam meningkatkan penggunaan bahan bakar seperti pada kegiatan industri dan transportasi⁽⁵⁾.

Sumber polusi dapat berasal dari emisi lokal dan jarak jauh. Potensi lokal umumnya berupa gas Karbon Oksida (COx), Nitrogen Oksida (NOx), Sulfur Oksida (SOx), Oksida (Ox) dan partikulat yang tersuspensi di udara (SPM), dan berbagai logam berat (Pb, Fe, Zn, Cu). Asri & Hidayat (2005) menyatakan bahwa salah satu sumber utama NOx, SOx, dan TSP di Jakarta berasal dari kendaraan bermotor dan kegiatan industri⁽⁶⁾. Data konsentrasi CO₂ di Bandung tahun 2010 memiliki nilai rerata harian sebesar 397,2 ppm dengan jangkauan data 325,3- 502,5 ppm⁽⁷⁾. Hasil studi dari *Asian Regional Air Pollution Research Network* (AIRPET) tahun 2001-2004, khususnya wilayah Bandung, rata-rata harian dari konsentrasi massa PM_{2.5} pada musim kemarau sebesar $\pm 53 \mu\text{g m}^{-3}$. Kondisi udara lebih bersih terjadi pada musim hujan dengan rerata harian konsentrasi PM_{2.5} adalah $\pm 38 \mu\text{g m}^{-3}$ ⁽⁸⁾. Studi terbaru dari Santoso dkk. (2014) yang dilakukan pada tahun 2005-2012, rerata tahunan konsentrasi massa PM_{2.5} sebesar $\pm 22 \mu\text{g m}^{-3}$ ⁽⁹⁾. Nilai tersebut lebih tinggi dari batas ambang standar kualitas udara nasional Indonesia per tahun untuk PM_{2.5} ($15 \mu\text{g m}^{-3}$). Sementara itu, sumber utama polusi jarak jauh umumnya berasal dari aktivitas biogenik atau daerah lain di sekitar tempat terpaparnya polusi. Hal ini teridentifikasi dengan tingginya kandungan amonium sulfat yang berasal dari transportasi di laut, amonium nitrat yang berasal dari pertanian, dan garam laut di udara⁽¹⁰⁾. Proses ini juga dipengaruhi oleh kondisi iklim dan meteorologi yang terjadi kawasan Bandung Raya.

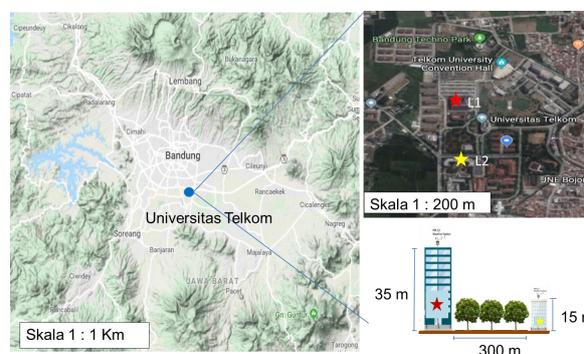
Penggunaan alat ukur konsentrasi PM_{2.5} dan CO₂ memegang peranan penting dalam menentukan valid tidaknya data yang dihasilkan. Alat ukur seperti *Tapered Element Oscillating Microbalance* (TEOM, Model 1400a) untuk PM_{2.5} dan *carbon dioxide gas analyzer* (Model 410i, Thermo Fisher Scientific, Inc.) untuk CO₂ banyak digunakan dalam pengamatan

lingkungan. Namun demikian, instrumen utama tersebut memiliki harga yang mahal sehingga tidak dapat digunakan pada pemantauan kualitas udara secara ekstensif. Untuk mengatasi hal tersebut, penggunaan *low-cost sensors* menjadi layak dan urgen untuk digunakan sebagai instrumen sekunder yang dapat diaplikasikan pada skala yang lebih luas. Pada penelitian ini, kami melakukan studi lapangan pengukuran konsentrasi PM_{2.5} dan CO₂ berbasis *low-cost sensor* yang berlokasi di Gedung Tokong Nanas dan Gedung Deli, Universitas Telkom, cekungan udara Bandung Raya, pada 12 Maret-25 April 2019. Faktor-faktor yang mempengaruhi lokasi pengukuran seperti kondisi meteorologi, massa udara, aktivitas antropogenik, serta dampak fotosintesis, akan dibahas pada bab Hasil dan Pembahasan.

2. BAHAN DAN METODE

2.1 Lokasi

Pengukuran dilakukan di dua lokasi, yaitu Gedung Tokong Nanas (Lokasi 1/L1; ketinggian ± 670 mdpl) dan Gedung Deli (L2; ± 650 mdpl), Universitas Telkom (-6.97,107.63), Bandung (Gambar 1). Posisi L1 berada di titik tertinggi sedangkan posisi L2 sejajar dengan ketinggian rerata pepohonan kawasan kampus. Kedua lokasi terpisah sejauh ± 300 m dan ketinggian ± 20 m, dirancang untuk dapat mengamati perbedaan pengaruh dari kegiatan masyarakat seperti pembakaran sampah (yang terdekat <500 m), jalan raya Dayeuhkolot di sebelah Barat, jalan raya Bojongsong di sebelah Timur dan jalan tol di sebelah utara (<2 km), kawasan industri yang dominan berada di kawasan Dayeuhkolot, serta pembangunan perumahan di kawasan Bandung Selatan. Dengan letaknya yang berada di salah satu titik terendah kawasan Bandung Raya, menjadikan lokasi ini sangat penting untuk mengamati polutan yang mengendap akibat potensi terperangkapnya polusi di cekungan udara tersebut.



Gambar 1. Lokasi pengukuran konsentrasi PM_{2.5} dan CO₂

2.2 Alat Ukur PM_{2.5} dan CO₂ Berbasis Low-Cost Sensor

Sensor PM_{2.5} yang digunakan adalah SKU:SEN0177 (model HK-A5, Beijing Hike IoT Technology Co., Ltd). Sensor bekerja pada tegangan 5 V dan arus maksimum 120 mA serta telah dilengkapi dengan internal *microcontroller unit* (MCU), sehingga sensor ini dapat langsung melakukan komunikasi secara serial dengan MCU lainnya. Deteksi PM_{2.5} menggunakan prinsip hamburan cahaya untuk mengukur konsentrasi partikulat di udara, dimana hamburan tersebut bergantung dari ukuran, bentuk, indeks bias, dan sudut hamburan partikel, serta panjang gelombang dari laser⁽¹¹⁾. Selain itu, pada lingkungan yang lembap, butiran-butiran uap air menempel pada partikulat di udara mengakibatkan akurasi sensor menjadi berkurang⁽¹²⁾. Beberapa *low-cost sensor* PM_{2.5} dilengkapi *heater* pada bagian *inlet* ruang ukur. Alat ini dapat mendeteksi ukuran diameter partikel dengan jangkauan 0,3-2,5 μm .

Sensor gas yang digunakan untuk mengukur CO₂ adalah SKU:SEN0219 (DFRobot). Catu daya yang diperlukan agar sistem beroperasi adalah 4.5-5.5 V, dengan arus maksimum 60 mA pada tegangan 5 V. Alat ini memiliki jangkauan pengukuran 0-5000 ppm. Cara kerja sensor ini berbasis *non-dispersive infrared* (NDIR) dimana sinar inframerah ($\lambda = 4,2 \mu\text{m}$) dipancarkan ke ruang pengukuran menuju filter optik yang terletak di depan detektor inframerah. Filter optik berfungsi untuk menyerap panjang gelombang selain dari panjang gelombang yang diserap oleh molekul gas CO₂. Intensitas cahaya (I) yang diteruskan akan ditangkap oleh detektor. Nilai konsentrasi CO₂ sebanding dengan perbedaan intensitas inframerah referensi dan yang dideteksi oleh detektor⁽¹³⁾. Sama dengan *low-cost sensor* berbasis optik lainnya, kelembapan pada ruang ukur dapat mengubah arah sinar optik yang menuju detektor. Namun demikian, kesalahan pembacaan akibat variasi kelembapan relatif (RH) pada sensor CO₂ tidak terlalu signifikan⁽¹⁴⁾.

2.3 Kalibrasi Sensor

Sensor PM_{2.5} telah dikalibrasi di laboratorium dengan cara membandingkan data antara sensor yang digunakan dengan alat utama (*Optical Particle Counter/OPC*; Model KC-01E, Rion Co., Ltd.). Sistem kalibrasi terdiri atas *particle generator* berbasis *nebulizer* (Model KG-02, Rion Co., Ltd.) yang berfungsi untuk menghasilkan partikel dengan diameter partikel berukuran 0,309 μm , 0,479 μm dan 1,005 μm menggunakan *polystyrene latex* (PSL), *diffusion dryer* yang berfungsi untuk menurunkan kadar kelembapan

pada partikel, serta alat ukur utama dan sensor yang akan diuji. Berdasarkan penelitian sebelumnya, sensor PM_{2.5} dapat bekerja optimal dengan nilai RH <80% sehingga perlu dilakukan koreksi konsentrasi massa PM_{2.5} dengan memberikan faktor pengali 0,7 apabila nilai RH \geq 80%⁽¹⁵⁾.

Sensor CO₂ yang digunakan menggunakan standar pabrik dimana sensor memerlukan waktu pemanasan (± 1 jam) sampai tegangan keluaran pada modul sensor sekitar 0,4 volt yang setara dengan 0 ppm. Tegangan maksimum dihasilkan sebesar 2 volt ekuivalen dengan 5000 ppm CO₂. Lebih lanjut, dilakukan perbandingan data secara sederhana antara sensor CO₂ dengan CO₂ meter (Model GCH-2018, Lutron Corp.) selama 1 jam pada kondisi ruangan dimana kedua alat diletakkan secara berdampingan. Tren data hasil pengujian memiliki kecenderungan yang sama antara sensor dengan CO₂ meter ($R^2 = 0,5$). Pada penelitian ini, tidak dilakukan pengujian pengaruh temperatur (T) dan tekanan (P) pada pembacaan konsentrasi CO₂. Penelitian lebih lanjut terhadap faktor-faktor lingkungan yang mempengaruhi pengukuran CO₂ berbasis NDIR sangat penting dilakukan agar dapat melakukan kompensasi nilai pembacaan dari sensor.

2.4 Stasiun Ukur Cuaca

Untuk mendukung proses analisis data hasil pengukuran konsentrasi PM_{2.5} dan CO₂, maka sistem dilengkapi dengan stasiun ukur parameter cuaca (T, RH, P, I), serta kecepatan dan arah angin (WS/WD) berbasis *low-cost sensor*. Sensor DHT22 digunakan untuk mengukur parameter T dan RH dengan resolusi $\pm 0,5$ °C dan $\pm 2\%$. Data hasil pengukuran sensor tersebut dibandingkan dengan aplikasi cuaca *online* dan didapat akurasi alat ukur lebih dari 75% pada toleransi kesalahan 1°C dan lebih dari 40% (5%)⁽¹⁶⁾. Sensor BMP180 digunakan untuk mengukur parameter tekanan udara yang diperlukan untuk perhitungan temperatur potensial. Pengukuran intensitas cahaya menggunakan sensor BH1750 yang cukup andal untuk mengidentifikasi perubahan intensitas cahaya matahari. Sensor HMC5883L digunakan untuk mengetahui arah angin, serta sensor *Hall Effect* untuk mengetahui kecepatan angin. Jenis dan fungsi sensor yang digunakan dalam pengukuran ini, serta jangkauan dan tipikal data hasil pengukuran dapat dilihat pada Tabel 1.

Data hasil pengukuran (PM_{2.5}, CO₂, T, RH, P, I) dikirim per 2 menit dari alat ukur yang dipasang di kedua lokasi ke *cloud database* dengan menggunakan modul SIM900A berbasis GSM. Aplikasi *database* yang digunakan adalah ThingSpeak yang bersifat *open source* dan memiliki fitur visual berupa grafik. Data dapat di-

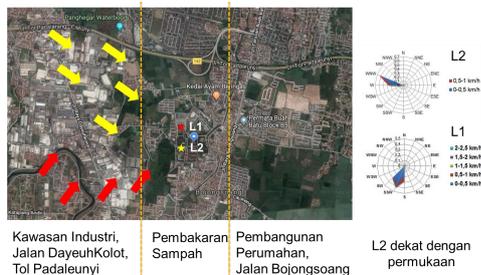
Tabel 1. Sensor yang digunakan selama masa pengukuran (12 Maret-25 April 2019)

Sensor	Parameter	Jangkauan	Tipikal Data
SKU:SEN0177	PM _{2.5}	0–999 $\mu\text{g m}^{-3}$	5–172 $\mu\text{g m}^{-3}$
SKU:SEN0219	CO ₂	0–5000 ppm	319–916 ppm
DHT 22	Temperatur (T) dan Kelembapan Relatif (RH)	-40–80 °C dan 0–100%	20–40,5 °C dan 34–99%
BMP 180	Tekanan (P)	300–1100 hPa	929,5–939 hPa
BH1750	Intensitas Cahaya (I)	0–65535 lux	0–54612 lux
HMC5883L	Arah Angin (WD)	0–360°	0–360°
Hall Effect	Kecepatan Angin (WS)	0–5 km h ⁻¹	0–2,5 km h ⁻¹

lihat secara *real-time* oleh pengguna melalui perangkat yang telah tersambung ke internet serta data hasil pengukuran dapat di unduh langsung di <https://thingspeak.com/channels/690870> untuk L1 dan <https://thingspeak.com/channels/672117> (L2). Sementara itu, kami memasang *data logger* untuk menyimpan data (PM_{2.5}, CO₂, T, RH, P, I, WS, WD) melalui *sim-card* (V-GEN) berkapasitas 2 GB, serta untuk mengantisipasi apabila terjadi kehilangan data akibat tidak dapat dikirimkannya data tersebut oleh modul GSM.

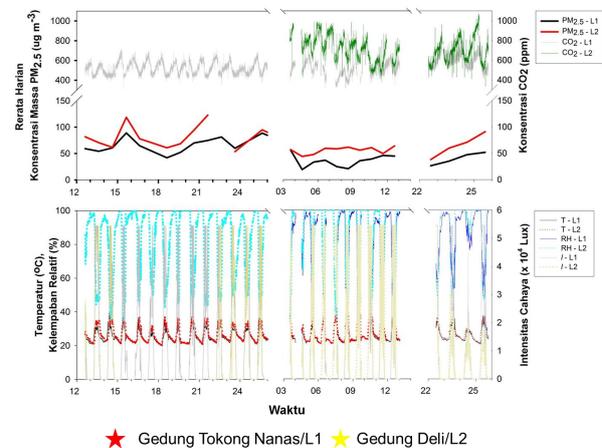
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengukuran konsentrasi PM_{2.5} dan CO₂, serta kondisi meteorologi (T, RH, P, I, WS dan WD) dilakukan di Gedung Tokong Nanas (L1) dan Gedung Deli (L2), Universitas Telkom, Bandung, pada periode 12 Maret - 25 April 2019 (Gambar 2). Dari hasil pengukuran, terlihat bahwa kondisi meteorologi relatif sama kecuali temperatur yang mengindikasikan posisi L1 lebih rendah daripada L2 (T (L1) < T (L2)). Intensitas cahaya dan kelembapan relatif dapat menandakan kondisi cerah, berawan, atau hujan. Tekanan udara (data tidak ditampilkan pada Gambar 2) dan temperatur kami gunakan untuk perhitungan data temperatur potensial. Data kecepatan dan arah angin (data tidak terdapat pada Gambar 2) digunakan untuk analisis arah massa udara (potensi sumber emisi dan penundaan waktu pengukuran di kedua lokasi).



Gambar 2. Arah dan kecepatan angin serta potensi sumber emisinya di cekungan udara Bandung Raya (3-13 April 2019)

Walaupun tren data menunjukkan kecenderungan yang sama, namun rerata harian konsentrasi PM_{2.5} dan CO₂ tampak lebih tinggi di L2 daripada L1 (Gambar 2). Hal ini dikarenakan lokasi pengukuran L2 lebih dekat dengan aktivitas masyarakat. Pada malam hari, kedua lokasi menunjukkan konsentrasi PM_{2.5} dan CO₂ yang lebih tinggi dibandingkan siang hari dikarenakan *planetary boundary layer* (PBL) mengalami penurunan yang mengakibatkan kondisi atmosfer menjadi lebih stabil dan potensi polutan jarak jauh masuk dan bercampur dengan emisi lokal ke dalam kawasan cekungan udara Bandung Raya. Pada siang hari, penurunan konsentrasi CO₂ di L2 lebih tinggi dibandingkan dengan L1 dikarenakan posisi L2 dekat dengan ruang terbuka hijau. Lebih detail hal ini akan dibahas pada sub-bab selanjutnya.



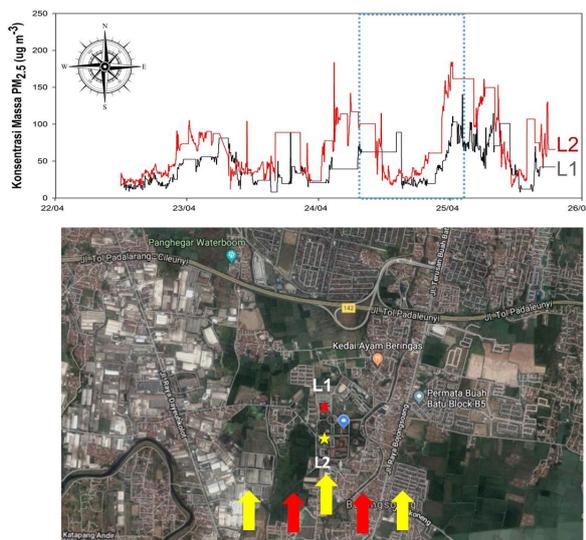
Gambar 3. Data pengukuran konsentrasi PM_{2.5} dan CO₂, serta meteorologi (12 Maret-25 April 2019)

3.1 Kondisi Massa Udara

Pada periode pengukuran 3-13 April 2019, arah angin di L2 cenderung bergerak ke arah tenggara dengan kecepatan 0-1 km jam⁻¹. Sumber polutan terindikasi berasal dari kawasan industri bagian utara, aktivitas kendaraan bermotor di jalan Dayeuhkolot, Tol Padaleunyi, dan pembakaran sampah rumah tangga di sekitar kampus (Gambar 3). Sebaliknya, sumber polutan dari arah selatan

dan sekitarnya terpantau menuju L1 dikarenakan arah angin menuju timur laut ($0-2,5 \text{ km jam}^{-1}$). Daerah tersebut teridentifikasi sebagai kawasan industri dan kegiatan rumah tangga lainnya. Perlu diperhatikan bahwa L2 berada di ketinggian ± 15 meter dari permukaan. Walaupun posisi alat ukur sedikit di atas rerata pepohonan di dalam kampus, hal ini mengakibatkan data pengukuran konsentrasi polutan di L2 lebih tinggi dibandingkan dengan L1 disebabkan oleh aktivitas antropogenik di sekitar kawasan kampus seperti pembakaran sampah dan kendaraan bermotor.

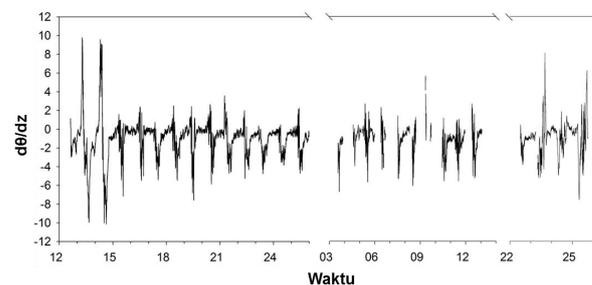
Selain faktor ketinggian, kedua lokasi juga dipengaruhi oleh arah angin. Berbeda dengan arah massa udara pada Gambar 3, data pada 22-25 April 2019 menunjukkan arah angin yang relatif sama di kedua lokasi dengan perbedaan ketinggian. Pada Gambar 4, konsentrasi massa $\text{PM}_{2.5}$ diambil dari Gambar 2 dengan resolusi data yang lebih tinggi (per 2 menit). Garis merah merupakan konsentrasi massa $\text{PM}_{2.5}$ yang terukur di L2 sedangkan warna hitam adalah data di L1. Tampak bahwa massa udara yang terbawa dari permukaan bergerak dari arah selatan ke utara. Hal ini terukur di kedua lokasi (L1 dan L2) dimana kedua arah angin cenderung menuju arah utara dengan kecepatan $0-1 \text{ km jam}^{-1}$. Dengan demikian, massa udara yang terbawa oleh angin terukur terlebih dahulu di L2, lalu kemudian terpantau di L1. Dapat dilihat bahwa L2 terletak segaris dengan L1. Hal ini menandakan terjadinya perbedaan waktu pengukuran konsentrasi $\text{PM}_{2.5}$ pada L1.



Gambar 4. Konsentrasi massa $\text{PM}_{2.5}$ serta arah angin di L1 dan L2 pada 22-25 April 2019

3.2 Pengaruh *Planetary Boundary Layer*

Berdasarkan pada Gambar 2, telah terjadi perbedaan yang signifikan dari data pengukuran $\text{PM}_{2.5}$ dan CO_2 di kedua lokasi yang terjadi pada siang dan malam hari, di mana nilai konsentrasi $\text{PM}_{2.5}$ dan CO_2 pada malam hari ($172 \mu\text{g m}^{-3}$ dan 916 ppm) lebih tinggi daripada siang hari ($5 \mu\text{g m}^{-3}$ dan 319 ppm). Hal ini dikarenakan keadaan atmosfer menjadi lebih stabil pada malam hari sehingga terjadinya penurunan PBL⁽¹⁷⁾. Stabil dan tidaknya keadaan atmosfer dapat dilihat pada nilai $d\theta/dz$. Apabila nilai $d\theta/dz > 0$ maka atmosfer dikatakan lebih stabil dan sebaliknya. Ketika atmosfer stabil, maka massa udara akan cenderung bergerak turun ke permukaan sehingga terjadinya penurunan PBL⁽¹⁸⁾.

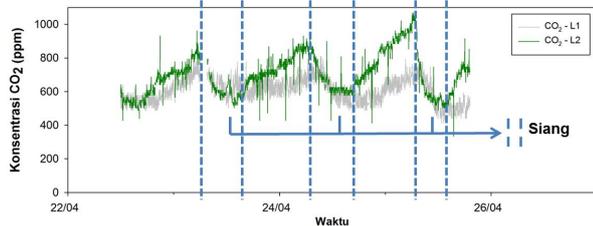


Gambar 5. Beda temperatur potensial di cekungan udara Bandung Raya pada 12 Maret-25 April 2019

Kami melakukan perhitungan temperatur potensial berdasarkan data tekanan dan temperatur (Gambar 5). Pada malam hari, PBL mengalami penurunan yang ditandai dengan nilai $d\theta/dz > 0$ yang biasanya terjadi dari pukul 20:00 WIB-03:00 WIB. Polutan pada daerah PBL bergerak turun menuju permukaan yang dibantu oleh angin gunung. Polutan terperangkap secara horizontal di cekungan udara Bandung Raya karena adanya pegunungan sehingga menyebabkan konsentrasi $\text{PM}_{2.5}$ dan CO_2 menjadi lebih tinggi. Lebih jauh, sumber polutan tidak hanya berasal dari emisi lokal tetapi juga berasal dari transportasi jarak jauh dan lintas batas negara/kawasan.

Pada siang hari, keadaan PBL di cekungan Bandung Raya lebih tinggi dari batas-batas topografi berupa pegunungan yang membatasi wilayah Bandung Raya akibat kenaikan temperatur, sehingga sumber polutan dominan berasal dari emisi lokal. Keadaan atmosfer berubah menuju keadaan normal ($d\theta/dz = 0$) lalu kembali ke keadaan tidak stabil ($d\theta/dz < 0$) yang biasanya terjadi dari pukul 08:00 WIB-16:00 WIB. Polutan yang berasal dari emisi lokal bergerak naik menjauhi permukaan, hal ini menyebabkan nilai $\text{PM}_{2.5}$ dan CO_2 mengalami penurunan karena polutan lokal terdistribusi secara vertikal menuju area pencampuran.

Walaupun demikian, kecepatan dan arah angin lokal (angin laut dan lembah) menyebabkan terangkutnya polutan lokal ke PBL sehingga memungkinkan tercampurnya dengan polutan akibat transportasi polutan lintas batas.



Gambar 6. Perbandingan data konsentrasi CO₂ di L1 dan L2 pada periode 22-25 April 2019

3.3 Pengaruh Fotosintesis

Pada Gambar 6 merupakan data konsentrasi CO₂ di L1 (warna garis abu-abu) dan L2 (hijau) pada periode 22-25 April 2019 yang diambil dari Gambar 3 dengan resolusi yang sama. Tampak bahwa konsentrasi CO₂ pada siang hari di kedua lokasi lebih rendah daripada malam hari yang terukur seperti siklus siang-malam secara periodik. Hal ini terjadi akibat adanya aktivitas vegetasi yang aktif menyerap CO₂ pada proses fotosintesis. Sedangkan konsentrasi CO₂ pada siang hari di L1 dan L2 tidak mengalami perbedaan yang signifikan bahkan hampir sama. Namun yang menarik adalah nilai konsentrasi CO₂ di L2 nilainya menurun drastis dan bahkan dapat mencapai nilai ±412 ppm (mendekati nilai CO₂ di L1). Perlu diperhatikan bahwa L2 terletak dekat dengan banyaknya vegetasi berupa pepohonan (Gambar 7). Hal ini tidak terlepas dari proses fotosintesis vegetasi yang membutuhkan intensitas cahaya, H₂O dan CO₂, memberikan bukti atas menurunnya kadar CO₂ pada siang hari⁽¹⁹⁾.



Gambar 7. Kondisi L2 yang terletak dekat dengan kawasan vegetasi di Kampus Universitas Telkom, Bandung

4. KESIMPULAN

Penelitian mengenai pemantauan konsentrasi PM_{2.5} dan CO₂ serta meteorologi (T , RH , P , I , WS , WD) berbasis *low-cost sensor* secara *real-time* telah dilaksanakan pada 12 Maret-25 April 2019. Sistem observasi dibangun dengan cara menempatkan alat ukur di dua lokasi dengan perbedaan ketinggian ±20 m dan jarak ±300 m (Gedung Tokong Nanas/L1 dan Gedung Deli/L2). Berdasarkan data hasil pengukuran, massa udara relatif homogen di kedua lokasi. Pengukuran dipengaruhi oleh asal massa udara, keadaan di siang dan malam hari, serta daerah terbuka hijau. Konsentrasi massa PM_{2.5} di L2 lebih besar daripada L1 dikarenakan lokasi L2 dekat dengan sumber polutan dari permukaan seperti kawasan industri, aktivitas kendaraan bermotor, dan pembakaran sampah rumah tangga secara langsung. Kecepatan dan arah angin mempengaruhi terjadinya pengukuran secara bertahap yang teridentifikasi di L2 terlebih dahulu lalu kemudian L1 pada 22-25 April 2019. Kondisi di malam hari menyebabkan konsentrasi PM_{2.5} dan CO₂ lebih tinggi (172 µg m⁻³ dan 916 ppm) dikarenakan keadaan atmosfer yang lebih stabil ($d\theta/dz > 0$, biasanya terjadi pada pukul 20:00-03:00). Turunnya PBL menyebabkan polutan lokal dan polutan lintas batas yang telah tercampur cenderung bergerak menuju ke permukaan. Sementara itu, pada siang hari konsentrasi CO₂ di L1 dan L2 menurun. Penurunan yang signifikan terjadi di L2 (sampai ±412 ppm) akibat adanya aktivitas vegetasi yang aktif menyerap CO₂ dalam proses fotosintesis. Secara umum *low-cost sensor* dapat digunakan dengan baik untuk mendeteksi adanya perubahan konsentrasi gas dan polutan di atmosfer. Durasi pengukuran yang relatif panjang (>1 bulan) serta rendahnya perawatan selama masa pengukuran menjadikan *low-cost sensor* dapat digunakan sebagai salah satu alternatif solusi, di samping alat utama, untuk mengatasi kesenjangan informasi data kualitas udara di seluruh daerah di Indonesia.

PERSANTUNAN

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Universitas Telkom, Indonesia, dan Universitas Kanazawa, Jepang, atas dukungan pembiayaan penelitian masing-masing melalui program Penelitian Kerja Sama Internasional 2018-2020 dan *Joint Research Program, the Institute of Nature and Environmental Technology 2019-2020*.

DAFTAR PUSTAKA

1. Haryanto, B., & Franklin, P. (2011). Air pollution: a tale of two countries. *Rev. Environ. Health*, 26 (1), 53-59. Doi: 10.1515/reveh.2011.008.
2. Li, L., Qian, J., Ou, C.-Q., Zhou, Y.-X., Guo, C., & Guo, Y. (2014). Spatial and temporal analysis of air pollution index and its timescale-dependent relationship with meteorological factors in Guangzhou, China, 2001-2011. *Environ. Pollut.*, 190, 75-81. Doi: 10.1016/j.envpol.2014.03.020.
3. Sumaryati (2011). Polusi Udara di Kawasan Cekungan Bandung. *Berita Dirgantara*, 12 (3), 83-89.
4. Proyeksi penduduk Jawa Barat 2010-2018. (2019). *Badan Pusat Statistik Provinsi Jawa Barat*.
5. Budiyo, Afif (2001). Pencemaran udara: dampak pencemaran udara pada lingkungan. *Berita Dirgantara*, 2 (1).
6. Asri, D. U., & Hidayat, B. (2005). Current transportation issues in Jakarta and its impacts on environment. *Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 5, 1792-1798.
7. Awaludin, A., Nugroho, G. A., Latief C., & Budiyo A. (2010). Rancang bangun alat pengukur dan sistem jaringan data CO₂ di Indonesia berbasis web. *Berita Dirgantara*, 8 (1).
8. Kim Oanh, N.T., Upadhyay, N., Zhuang, Y. -H., Hao, Z. -P., Murthy, D. V. S., Lestari, P., Villarin, J.T., Chengchua, K., Co, H. X., Dung, N. T., & Lindgren, E.S. (2006). Particulate air pollution in six Asian cities: spatial and temporal distributions, and associated sources. *Atmos. Environ.*, 40 (18), 3367-3380. Doi: 10.1016/j.atmosenv.2006.01.050.
9. Santoso, M., Lestiani, D. D., Kurniawati, S., Markwitz, A., Trompeter, W. J., Barry, B., & Davy, P. K. (2014). Long term airborne lead pollution monitoring in Bandung, Indonesia. *International Journal of PIXE*, 24 (03n04), 151-159. Doi: 10.1142/s0129083514400087.
10. Majid, L. I., Chandra, I., & Utami, A. R. I., (2019). Observasi Lapangan Mikropartikel Di Atmosfer Menggunakan Nanosampler Pada Cekungan Udara Bandung Raya. *eProceedings of Engineering*, 6 (1).
11. Jurányi, Z., Burtscher, H., Loepfe, M., Nenkov, M., & Weingartner, E. (2015). Dual-wavelength light-scattering technique for selective detection of volcanic ash particles in the presence of water droplets. *Atmos. Meas. Tech.*, 8, 5213-5222. Doi: 10.5194/amt-8-5213-2015.
12. Jayaratne, R., Liu, X., Thai, P., Dunbabin, M., & Morawska, L. (2018). The influence of humidity on the performance of a low-cost air particle mass sensor and the effect of atmospheric fog. *Atmos. Meas. Tech.*, 11, 4883-4890. Doi: 10.5194/amt-11-4883-2018.
13. Hodgkinson, J., Smith, R., Ho, W., Saffell, J. R., & Tatam, R. P. (2012). A low cost, optically efficient carbon dioxide sensor based on nondispersive infra-red (NDIR) measurement at 4.2 μm . *Proc. SPIE 8439, Optical Sensing and Detection II*, 843919. Doi: 10.1117/12.922258.
14. Marinov, M., Nikolov, G., Gieva, E., & Ganey, B. (2015). Improvement of NDIR carbon dioxide sensor accuracy. *38th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)*. Doi: 10.1109/isse.2015.7248042.
15. Vaicdan, F., Chandra, I., & Suhendi, A., (2019). Pengamatan Konsentrasi Massa PM_{2.5} Di Cekungan Udara Bandung Raya. *eProceedings of Engineering*, 6 (1).
16. Barus, R. A. A., Chandra, I., & Fathona, I. W., (2019). Rancang bangun *portable weather station* dalam mendukung pengamatan mikropartikel di cekungan udara Bandung Raya. *eProceedings of Engineering*, 6 (1).
17. Fan, H. & Sailor, D. (2005). Modeling the impacts of anthropogenic heating on the urban climate of Philadelphia: a comparison of implementations in two PBL schemes. *Atmos. Environ.*, 39 (1), 73-84. Doi: 10.1016/j.atmosenv.2004.09.031.
18. Kaimal, J. C. & Finnigan, J. J. (1994). *Atmospheric boundary layer flows: their structure and measurement*. Oxford: Oxford University Press.
19. Urry, L. A., Cain, M. L., Wasserman, S. A., Minorsky, P. V., & Reece, J. B. (2017). *Campbell Biology*, 11th Edition. New York: Pearson.