

SISTEM PEMANTAUAN KUALITAS UDARA BERBASIS GSM DI KAWASAN BANDUNG METROPOLITAN

AIR QUALITY MONITORING SYSTEM BASED ON GSM IN BANDUNG METROPOLITAN AREA

Muhammad Riadhi Subardi, Indra Chandra*, Rahmat Awaludin Salam
Program Studi S1 Teknik Fisika, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom
riadhyadhy@student.telkomuniversity.ac.id, *indrachandra@telkomuniversity.ac.id,
awaludinsalam@gmail.com

Abstrak

Pencemaran udara yang semakin meningkat merupakan salah satu permasalahan lingkungan yang terjadi di kota-kota besar di Indonesia. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sistem pemantauan kualitas udara dengan parameter ukur yang terdiri dari konsentrasi karbon dioksida (CO_2) dan partikulat ($\text{PM}_{2.5}$), serta dilengkapi dengan parameter meteorologi seperti temperatur (T), kelembapan relatif (RH), intensitas cahaya (I), tekanan (P), curah hujan, dan kecepatan/arahan angin (WS/WD). Penelitian ini menggunakan panel surya untuk sumber tegangan cadangan. Terdapat baterai untuk menyimpan sumber energi listrik dan modul *charger* yang berfungsi untuk mengontrol pengisian daya baterai dari panel surya. Lokasi pengukuran dilakukan di dua lokasi, yaitu Gedung Tokong Nanas (R1) dan Gedung Deli (R2), Universitas Telkom, Bandung, yang dilakukan pada 1 Februari 2019 - 31 Januari 2020. Komunikasi data menggunakan GSM (SIM900A) yang dikirimkan ke *cloud database* per 2 menit dan disimpan di *data logger*. Hasil pengukuran di kedua lokasi memiliki perbedaan pada musim kemarau, hujan, dan pancaroba. Rata-rata harian dan per 8 jam masing-masing untuk konsentrasi $\text{PM}_{2.5}$ dan CO_2 di R1 dan R2 adalah $44 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dan 521 ppm, serta $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dan 621 ppm di musim hujan. Sedangkan untuk musim kemarau adalah $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dan 491 ppm, serta $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dan 686 ppm. Pada musim pancaroba, konsentrasi polutan yang terukur yaitu $41 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dan 504 ppm, serta $61 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dan 672 ppm. Konsentrasi $\text{PM}_{2.5}$ dan CO_2 di R2 lebih tinggi daripada di R1 dikarenakan lokasi R2 lebih rendah dari R1 dan dipengaruhi oleh aktivitas antropogenik. Lokasi R1 lebih tinggi konsentrasi pada musim hujan karena *planetary boundary layer* di musim hujan mengalami penurunan yang mengakibatkan kualitas udara dipengaruhi oleh transportasi jarak jauh dari polutan. Sedangkan untuk lokasi R2, konsentrasi di musim kemarau lebih tinggi terjadi karena aktivitas vegetasi yang lebih aktif di musim kemarau.

Kata kunci: Bandung Metropolitan, GSM, kualitas udara, *low-cost* sensor, musim.

Abstract

Increased level of air pollution is one of the environmental problems that occur in big cities in Indonesia. This study aims to develop an air quality monitoring system with measuring parameters are carbon dioxide (CO_2) and particulate matter ($\text{PM}_{2.5}$), as well as meteorological parameters (temperature (T), relative humidity (RH), light intensity (I), pressure (P), precipitation, and wind speed/direction (WS/WD)). The system is equipped by solar panels as a backup voltage source, a battery to store the electrical energy from the solar panel, and a charger module that functions to control battery charging from the solar panel. Location measurements were carried out in 2 locations, namely Tokong Nanas Building (R1) and Deli Building (R2), Universitas Telkom, Bandung, which was conducted on February 1, 2019 - January 31, 2020. Data communication uses GSM (SIM900A) which is sent to the cloud database every 2 minutes and stored in the data logger. The measurement results at the two locations differed from the dry, rainy, and transition seasons. The daily and 8-hour average for the concentration of $\text{PM}_{2.5}$ and CO_2 in R1 and R2 respectively is $44 \mu\text{g}/\text{m}^3$ and 521 ppm and $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ and 621 ppm in the rainy season, while for the dry season is $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ and 491 ppm, and $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ and 686 ppm. In the transition season, these concentrations are $41 \mu\text{g}/\text{m}^3$ and 504 ppm, and $61 \mu\text{g}/\text{m}^3$ and 672 ppm. The concentrations of $\text{PM}_{2.5}$ and CO_2 in R2 are higher than in R1. This is because the location of R2 is lower than R1 and it is influenced by the location of the anthropogenic activity. Location R1 has a higher concentration in the rainy season because the planetary boundary layer in the rainy season has decreased which results in transboundary air pollution mixing with local air pollution. Whereas for the R2 location the concentration in the dry season was higher because the vegetation activity was more active in the dry season.

Keywords: air quality, Bandung Metropolitan, GSM, low-cost sensors, seasonal.

1. Pendahuluan

Pencemaran udara yang berasal dari aktivitas manusia memiliki dua sumber yaitu yang bergerak seperti kendaraan bermotor dan sumber yang tidak bergerak seperti kawasan industri, pembakaran sampah secara langsung, dan lainnya [1]. Salah satu pencemaran udara yang dihasilkan dari aktivitas manusia yaitu partikulat (*particulate matter*, PM). Berdasarkan ukurannya, terdapat PM_{2.5} yaitu partikel padatan atau cairan yang tersuspensi di udara yang ukuran diameternya lebih kecil atau sama dengan 2,5 mikrometer. PM_{2.5} dapat terbentuk di dalam maupun luar ruangan. Aktivitas merokok, memasak, menyalakan lilin, dan memanaskan ruangan dapat menyebabkan pembentukan PM_{2.5} di dalam ruangan. Sementara di atmosfer, terdapat dua klasifikasi partikel yaitu primer dan sekunder. Partikel primer berasal dari kegiatan industri, kendaraan bermotor, dan debu dengan kandungan di dalamnya yaitu sulfur dioksida, (SO₂), NO_x, karbon monoksida (CO), dan timbal (Pb). Sedangkan partikel sekunder bisa berasal dari transformasi fisika-kimia dari gas yang dikenal dengan proses fotokimia, dan dapat ditemukan dalam bentuk garam sulfat, nitrat, dan sebagainya [2].

Akibat dari pencemaran udara akan mengakibatkan kualitas udara menjadi tidak baik. Indeks kualitas udara (AQI) merupakan indeks untuk melaporkan kualitas udara harian. Indeks kualitas udara dihitung dari empat jenis polutan utama di udara yang diatur oleh *clean air act*: ozon, partikel, karbon monoksida, dan sulfur dioksida. Untuk masing-masing polutan ini, *Environmental Protection Agency* (EPA) telah menetapkan standar kualitas udara untuk melindungi kesehatan masyarakat. Terdapat nilai dari masing-masing parameter untuk melihat seberapa baik kualitas udara di suatu lokasi pengukuran dan dinyatakan dengan level AQI. Semakin tinggi nilai AQI, semakin besar tingkat polusi udara. Oleh karena itu, kualitas udara penting untuk dipantau karena akan memberi informasi tentang kualitas udara lokal yang dapat mempengaruhi tingkat kesehatan.

Kriteria penentuan lokasi yang akan dipantau kualitas udaranya yaitu area dengan konsentrasi pencemaran tinggi dan daerah dengan kepadatan penduduk tinggi. Pemantauan kualitas udara ini ditunjukkan kepada masyarakat agar mengetahui bagaimana kualitas udara di lokasinya dengan batasan kualitas udara yang sudah ditetapkan oleh EPA [3]. Jika konsentrasi polutan melewati ambang batas, akan berdampak terhadap kesehatan manusia ataupun lingkungan. Dampak terhadap manusia yaitu iritasi saluran pernapasan, batuk, kesulitan bernapas, asma, meningkatkan risiko bronkitis, serangan jantung dan kematian serta berkurangnya jarak pandang manusia. Hal ini tidak hanya terjadi pada manusia namun juga dapat terjadi pada hewan [4].

Bandung, atau disebut juga sebagai *Bandung Metropolitan Area* (BMA), merupakan ibukota provinsi Jawa Barat dan salah satu kota besar di Indonesia yang memiliki jumlah penduduk 7.624.877 jiwa pada tahun 2010. Sedangkan di tahun 2011, jumlah penduduk di BMA bertambah mencapai 7.801.297 jiwa [5]. Meningkatnya jumlah penduduk maka pencemaran udara yang diakibatkan aktivitas manusia meningkat. Tidak hanya dipengaruhi oleh pertumbuhan penduduk, BMA juga memiliki topografi yang dikelilingi pegunungan sehingga membentuk cekungan yang mengakibatkan potensi inversi. Kejadian inversi dapat menyebabkan pengendapan polutan yang menghasilkan konsentrasi yang pekat [6]. Akibat dari pertumbuhan penduduk dan letak BMA dengan topografi yang dikelilingi pegunungan, pencemaran udara yang dihasilkan dari aktivitas manusia seperti PM_{2.5} dapat terperangkap dan akan membahayakan manusia.

Menurut studi AIRPET pada tahun 2001-2004 menyatakan bahwa rata-rata konsentrasi massa PM_{2.5} di Bandung pada musim hujan sebesar 18 µg/m³, sedangkan di musim kemarau sebesar 44 µg/m³ [7]. Studi lainnya mengenai pengukuran konsentrasi massa PM_{2.5} telah dilakukan di Beijing pada tahun 2015 secara *real-time* dengan 35 stasiun pada September 2014 - Agustus 2015. Didapat bahwa konsentrasi PM_{2.5} lebih tinggi di musim hujan daripada musim kemarau dengan konsentrasi rata-rata mencapai 140 µg/m³, sedangkan musim kemarau mencapai 80 µg/m³ [8]. Penelitian terbaru mengenai pengukuran konsentrasi partikel dengan *low-cost sensor* (Sharp GP2Y1010AU0F) yang dilakukan melalui studi eksperimental dan komputasi. Bahan sodium klorida, silika, dan sukrosa aerosol digunakan sebagai partikel uji dengan distribusi ukuran partikel yang diukur menggunakan *Scanning Mobility Particle Sizer* (SMPS). Studi ini mengukur konsentrasi partikel dengan *low-cost sensor* menggunakan modul nirkabel yaitu XBEE untuk mengirim data pengukuran ke salah satu web [9].

Selain itu, penelitian mengenai pengukuran CO₂ secara serempak dilakukan di SPD Kototabang dan Bandung dengan sistem pemrosesan berbasis web secara *real-time*. Berdasarkan data yang dihasilkan pada periode 1-26 Maret 2010, rata-rata konsentrasi CO₂ di Kototabang adalah 403,5 ppm [10]. Sementara itu rata-rata konsentrasi CO₂ di Bandung 397,2 ppm. Oleh karena itu, dalam penelitian ini dibuat alat yang dapat mengukur konsentrasi massa PM_{2.5} dan CO₂ berbasis

low-cost sensor di kawasan cekungan udara Bandung Raya, pada struktur horizontal. Data dikirim secara *real-time* dengan menggunakan modul GSM, serta mengirimkannya ke web untuk mempermudah pemantauan kualitas udara dan kinerja alatnya. Data hasil pengukuran selama 1 tahun, diolah, dan kemudian ditampilkan untuk melihat pengaruh musim pada kualitas udara di cekungan udara Bandung Raya.

2. Metodologi Penelitian

2.1 Tempat dan Waktu Kegiatan

Kegiatan penelitian ini dilaksanakan di dua tempat yaitu atap Gedung Tokong Nanas (R1) dan Gedung Deli (R2), Universitas Telkom. Letak geografis pengukuran di Gedung Tokong Nanas berada pada *latitude* 6°58'22.6"S dan *longitude* 107°37'45.7"E, dengan tinggi bangunan ±35 meter dari permukaan tanah. Sedangkan lokasi pengukuran di Gedung Deli terletak pada *latitude* 6°58'31.8"S, *longitude* 107°37'46.0"E, dengan tinggi bangunan ±10 meter dari R1. Kedua lokasi dirancang untuk mengamati perbedaan pengaruh dari polusi lokal yang diakibatkan oleh kegiatan manusia seperti pembakaran sampah, kendaraan bermotor di sekeliling kawasan kampus, pembangunan perumahan, dan kawasan industri yang berada di Dayeuhkolot. Lokasi ini menjadi sangat penting untuk mengamati polutan yang mengendap akibat terperangkapnya polusi di kawasan cekungan Bandung [11].

2.2 Alat Ukur Kualitas Udara

Sistem pemantauan kualitas udara dibangun dengan cara melakukan integrasi modul-modul *low-cost sensor* partikulat dan gas, parameter cuaca, serta GSM dengan Arduino Mega sebagai mikrokontroler. Pada pengerjaannya sistem tersebut dilengkapi dengan *printed circuit board* (PCB) yang dirancang sebagai jalur yang menghubungkan sensor dengan mikrokontroler. Sensor yang digunakan yaitu: (a) SKU:SEN0177 untuk mengukur konsentrasi massa PM_{2.5}, (b) SKU:SEN0219 (karbon dioksida, CO₂), (c) DHT22 (temperatur (T) dan kelembapan relatif (RH)), (d) BMP180 (tekanan udara, P), (e) BH1750 (intensitas cahaya, I), HMC5883L (arah angin, WD), dan (g) *hall effect sensor* (kecepatan angin, WS).

Data hasil pengukuran berupa konsentrasi PM_{2.5}, CO₂, T, RH, P, dan I dikirim per 2 menit dari 2 lokasi ke *cloud database* dengan menggunakan komunikasi data pada modul SIM900A berbasis GSM. Basis data yang digunakan adalah Thingspeak yang bersifat *open source*. Thingspeak ini memiliki fitur visual berupa grafik dan menampilkan datanya secara *real-time* oleh pengguna melalui perangkat yang terhubung ke internet <https://thingspeak.com/channels/690870> (R1) dan <https://thingspeak.com/channels/905593> (R2). Sistem pemantauan kualitas udara ini dilengkapi dengan *data logger* yang bertujuan untuk menyimpan hasil pengukuran dan informasi waktu. *Data logger* berfungsi untuk mengantisipasi kehilangan data akibat tidak dapat mengirim data oleh modul GSM.

2.3 Shelter dan Chamber

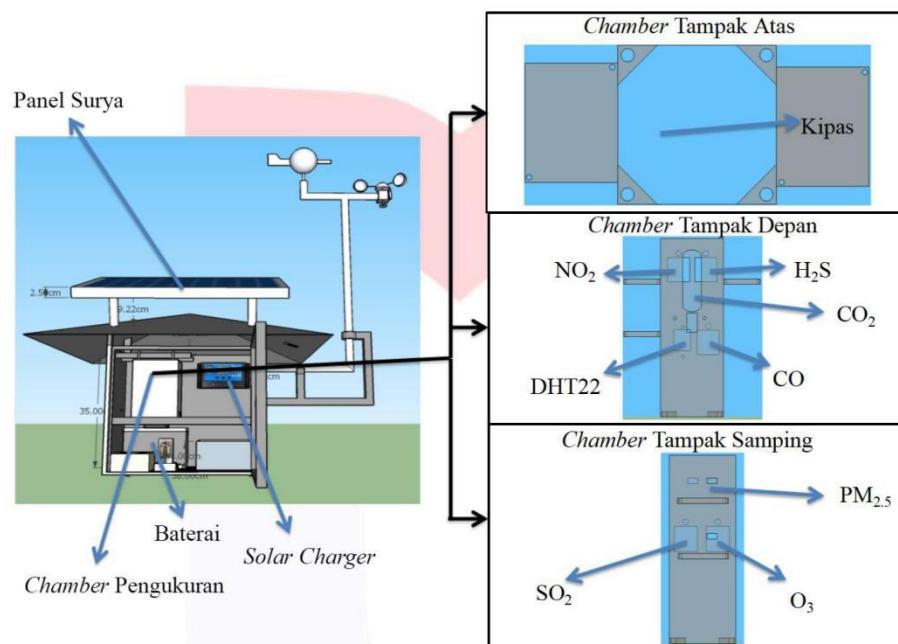
Pada **Gambar 1**, diperlihatkan rancangan *shelter* sebagai stasiun pengukuran, dengan ukuran 40 x 35 x 25 cm digunakan untuk meletakkan dan melindungi sensor dan perangkat lainnya agar tidak mudah rusak pada saat melakukan pengukuran langsung. Kondisi pada bagian atas *shelter* telah ditempatkan untuk sensor intensitas cahaya dan panel surya dengan daya yang di hasilkan yaitu 20 *watt peak*. Selain itu, terdapat baterai dan *solar charger* yang berfungsi sebagai sumber tegangan cadangan jika terjadi matinya sumber tegangan utama. Design *shelter* yang telah di modifikasi dengan memberikan celah udara (*inlet*) pada bagian kiri, kanan, depan, dan belakang agar udara yang masuk ke dalam dapat diukur dengan sensor secara optimal. Udara yang masuk ke dalam *shelter* akan di tarik dengan menggunakan kipas yang terdapat di *chamber*. *Chamber* dengan ukuran 6 x 6 x 17 cm yang berbahan *stainless steel* bertujuan untuk meletakkan sensor gas (CO₂, NO₂, H₂S, CO, O₃, dan SO₂), partikulat (PM_{2.5}), temperatur dan kelembapan relatif (DHT22) agar udara yang tertarik langsung terukur oleh sensor. Udara yang telah melewati *chamber* akan keluar melalui *outlet* yang terletak pada bagian bawah *shelter*.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Keseluruhan Data Hasil Pengukuran

Pengukuran dilakukan di gedung Tokong Nanas (R1) dan Gedung Deli (R2) Universitas Telkom, Bandung pada periode 1 Februari 2019 - 31 Januari 2020 (**Gambar 2**). Pengukuran ini dilakukan untuk melihat perbedaan setiap musimnya dimana ada 3 musim yang terjadi di Indonesia

yaitu musim kemarau, musim hujan, dan musim pancaroba. Terjadinya 3 musim di Indonesia dikarenakan perbedaan pergerakan angin yaitu angin monsun barat dan angin monsun timur. Pergerakan angin yang terjadi pada musim kemarau yaitu pergerakan angin monsun timur di mana angin ini berembus dari Benua Australia menuju Benua Asia. Angin ini terjadi pada bulan April - September 2019 yang dapat menyebabkan kondisi udara menjadi kering dan temperatur meningkat. Selain itu, pergerakan angin yang terjadi pada musim hujan yaitu angin monsun barat di mana angin ini berembus dari Benua Asia menuju Benua Australia. Angin monsun barat terjadi pada bulan November 2019 - Februari 2020 yang menyebabkan masa udara menjadi basah dan menghasilkan hujan [12]. Berbeda halnya dengan musim pancaroba yang merupakan peralihan antara pergerakan angin monsun timur dan barat yang menyebabkan tekanan udara dan temperatur berubah serta pergerakan angin menjadi bercampur. Peralihan antara angin monsun timur dan barat terjadi pada bulan Maret 2019 sedangkan untuk peralihan antara angin monsun barat dan timur terjadi pada bulan Oktober 2019 [13].



Gambar 1. Rancangan tiga dimensi pada *shellter* dan *chamber*.

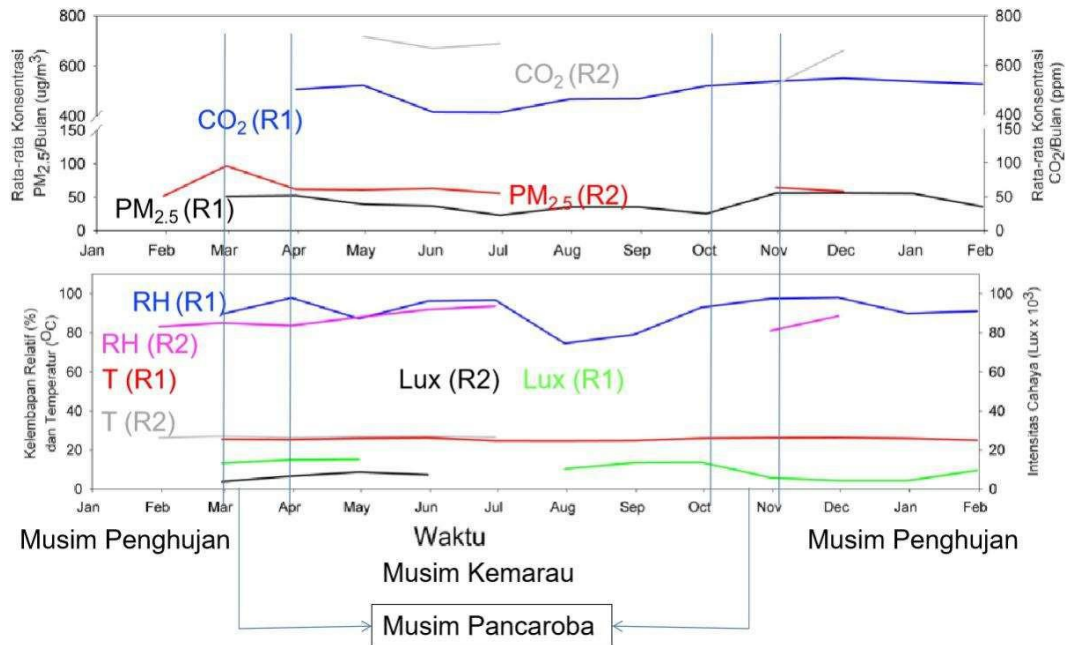
Pada **Gambar 2**, konsentrasi $PM_{2.5}$ dan CO_2 pada musim hujan lebih tinggi dibandingkan musim kemarau. Namun pada musim pancaroba yang tepatnya pada bulan Oktober terjadi kenaikan. Hal ini terjadi karena musim pancaroba merupakan perpindahan antara musim kemarau ke musim hujan. Rata-rata konsentrasi $PM_{2.5}$ dan CO_2 di musim hujan yaitu $44 \mu g/m^3$ dan 521 ppm untuk lokasi pengukuran R1. Sedangkan untuk lokasi R2 yaitu $60 \mu g/m^3$ dan 621 ppm. Sementara itu, konsentrasi $PM_{2.5}$ dan CO_2 di musim kemarau yaitu $35 \mu g/m^3$ dan 491 ppm di R1 dan $60 \mu g/m^3$ dan 686 ppm untuk lokasi di R2. Selain musim hujan dan musim kemarau ada juga musim pancaroba yaitu pada bulan Maret dan Oktober dengan rata-rata konsentrasinya yaitu $41 \mu g/m^3$ dan 504 ppm di R1, sedangkan di R2 yaitu $61 \mu g/m^3$ dan 672 ppm. Konsentrasi pada musim hujan seharusnya lebih tinggi di bandingkan dengan musim kemarau ataupun musim pancaroba. Hal ini dikarenakan pada saat musim hujan, kegiatan pembakaran biomassa untuk menghangatkan rumah dan/atau akhir musim panen dimana pembakaran jerami di ladang meningkat.

3.2 Perbandingan Data antar Musim

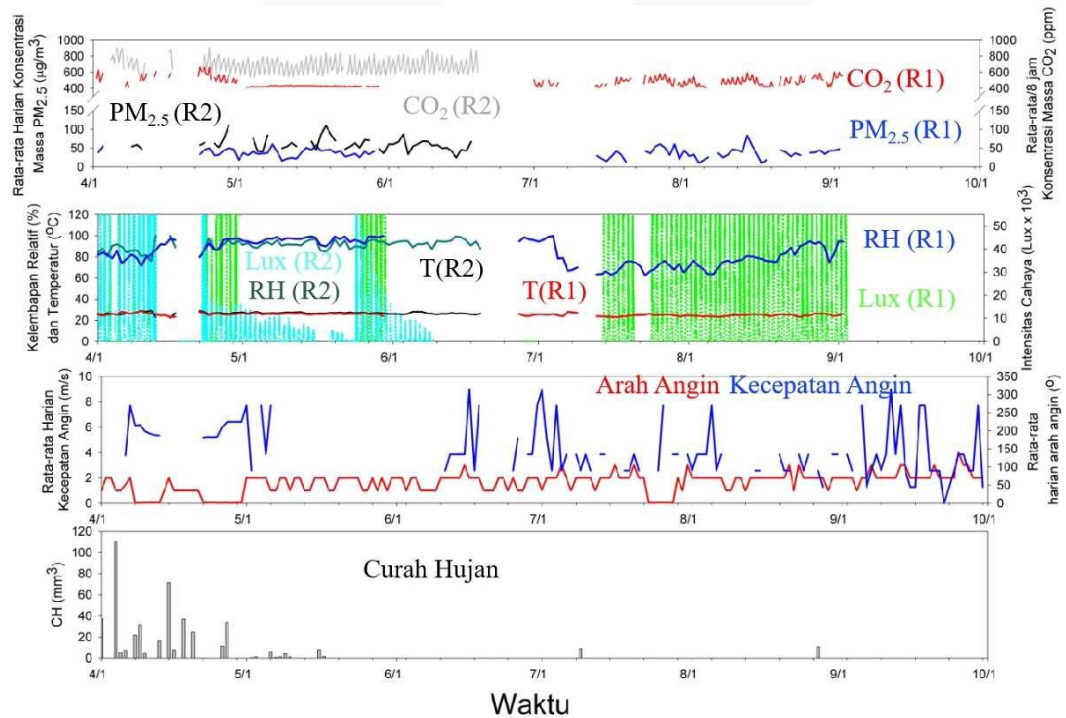
3.2.1 Musim Kemarau

Pada **Gambar 3**, konsentrasi massa $PM_{2.5}$ di stasiun R1 mendekati nilai $100 \mu g/m^3$, namun masih lebih rendah dari stasiun R2. Sedangkan untuk konsentrasi CO_2 pada stasiun R1 terbilang buruk karena konsentrasi CO_2 di musim kemarau memiliki nilai yaitu 670 ppm sedangkan nilai ambang batas pada konsentrasi massa CO_2 berada di 250-350 ppm. Berbeda halnya dengan konsentrasi $PM_{2.5}$ dan CO_2 di stasiun R2, data konsentrasi polutan lebih tinggi di bandingkan di R1 [7]. Faktor tersebut dikarenakan lokasi R2 lebih dekat dengan tempat tinggal penduduk, pembakaran

sampah dan jalan Bojongsoang maka tidak heran jika konsentrasi massa di R2 lebih tinggi. Pada pengukuran banyak terjadi kehilangan data yang disebabkan tidak terkirimnya data ke *Thingspeak* dan matinya sumber tegangan yang akan digunakan oleh alat pengukuran. Agar mengurangi terjadinya kehilangan data, maka pada program ditambahkan *reset* untuk SIM900A (GSM) agar pada saat pengiriman tidak terkirim ke *Thingspeak* maka program tersebut akan me-reset modul SIM900A dan sinyal.



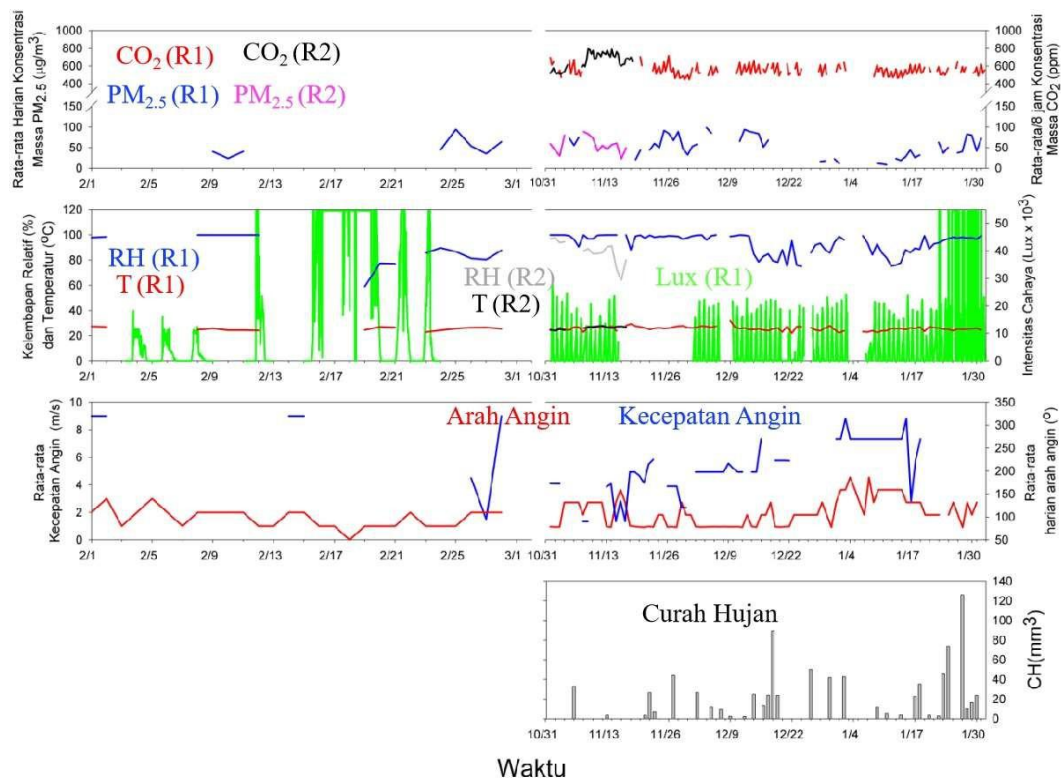
Gambar 2. Data hasil pengukuran pada Februari 2019 - Januari 2020.



Gambar 3. Rata-rata konsentrasi polutan $PM_{2.5}$, CO_2 , dan parameter meterologi (T , RH , I , WS , WD , curah hujan) di musim kemarau.

3.2.2 Musim Hujan

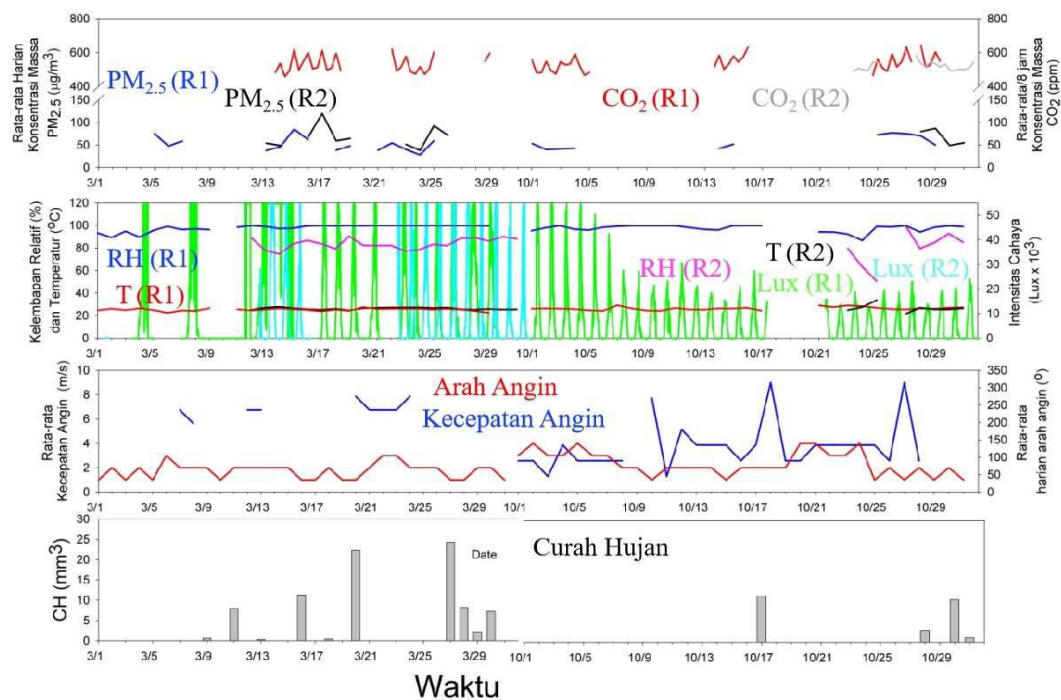
Pada **Gambar 4**, hasil pengukuran $PM_{2.5}$ dan CO_2 di stasiun R1 pada musim hujan cukup tinggi di dibandingkan pada musim kemarau. Hal ini terjadi karena, aktivitas penduduk di musim hujan meningkat untuk melakukan pembakaran sampah rumah tangga, pemakaian alat rumah tangga, dan pemakaian kendaraan. Selain itu pada musim hujan temperatur di permukaan menjadi lebih rendah dan radiasi panas semakin berkurang yang menyebabkan konveksi udara semakin stabil dan membentuk lapisan inversi di permukaan. Faktor tersebut mengakibatkan polutan yang dipancarkan dari permukaan terperangkap dan menghasilkan rata-rata konsentrasi $PM_{2.5}$ lebih tinggi dari musim kemarau [8]. Namun, kenaikan nilai konsentrasi CO_2 disebabkan aktivitas vegetasi yang menyerap CO_2 untuk proses fotosintesis menurun. Hal ini dikarenakan cahaya matahari tidak dapat menyinari secara maksimal sehingga rata-rata konsentrasi CO_2 di stasiun R1 pada musim hujan lebih tinggi dari musim kemarau. Pada musim kemarau di bulan Juni-Agustus, tidak ada proses belajar mengajar di lingkungan Universitas Telkom. Berbeda dengan lokasi R2 yang mana konsentrasi $PM_{2.5}$ dan CO_2 lebih tinggi di musim kemarau dibanding dengan musim hujan.



Gambar 4. Rata-rata konsentrasi polutan $PM_{2.5}$, CO_2 , dan parameter meterologi (T , RH , I , WS , WD , curah hujan) di musim hujan.

3.2.3 Musim Pancaroba

Pada **Gambar 5** rata-rata nilai pengukuran $PM_{2.5}$ dan CO_2 pada musim pancaroba di stasiun R1 mencapai nilai $80 \mu g/m^3$ dan 600 ppm. Sedangkan untuk stasiun R2 mencapai $100 \mu g/m^3$ dan 600 ppm. Tingginya nilai pengukuran $PM_{2.5}$ di stasiun R2 dikarenakan perbedaan ketinggian dari kedua lokasi dan nilai pengukuran tersebut terjadi pada bulan Maret yang mana pergantian dari musim hujan ke musim kemarau. Nilai pengukuran di bulan Oktober baik stasiun R1 dan R2 lebih rendah dari bulan Maret dikarenakan pada bulan Maret sering terjadi hujan yang menyebabkan temperatur di permukaan menjadi rendah dan kondisi atmosfer menjadi stabil yang membuat polutan di permukaan terperangkap.



Gambar 5. Rata-rata konsentrasi polutan $PM_{2.5}$, CO_2 , dan parameter meteorologi (T , RH , I , WS , WD , curah hujan) di musim pancaroba.

3.3 Kondisi Atmosfer

Pada **Tabel 1** kondisi arah angin di setiap musim memiliki arah angin yang berbeda. Arah angin di musim kemarau yang dominan bergerak dari tenggara dengan potensi sumber emisi dari pembangunan perumahan dan jalan Bojong Soang dengan rata-rata kecepatan angin 1,62 m/s. Sedangkan pada musim hujan selatan dan barat dengan potensi sumber emisi dari kawasan Industri, jalan Dayeuhkolot, tol Padaleunyi, pembakaran sampah, dan rumah penduduk dengan rata-rata kecepatan angin 1,28 m/s. Musim pancaroba yang mana terjadi di bulan Maret dan Oktober memiliki perbedaan arah angin. Pada bulan Maret arah angin berasal dari barat sedangkan di bulan Oktober dari timur-tenggara dengan potensi sumber emisi dari kawasan Industri, jalan Dayeuhkolot, tol Padaleunyi, pembangunan perumahan, jalan Bojong Soang dengan rata-rata kecepatan angin 2,04 m/s. Jarak antara stasiun ukur R1 dan R2 yaitu 300 m yang menyebabkan penundaan pengukuran. Semakin tinggi nilai kecepatan angin maka penundaan pembacaan semakin berkurang.

3.4 Pengaruh Planetary Boundary Layer

Pada **Gambar 7** temperatur potensial yang digunakan menjadi per 30 menit dikarenakan untuk menurunkan temperatur lingkungan lebih lama di bandingkan dengan menaikkan temperatur. Ketiga musim ini memiliki kondisi yang berbeda, pada musim pancaroba temperatur yang tertinggi terjadi di bulan Maret. Hal ini dikarenakan terjadi pergantian musim dari musim hujan menuju musim kemarau dengan nilai temperatur potensial tertinggi mencapai 319 K dan pada bulan Oktober di musim pancaroba mengalami penurunan yang membuat kondisi atmosfer menjadi lebih stabil.

Pada musim kemarau dan hujan, nilai temperatur potensial terendah dari kedua musim yaitu 295 K, namun temperatur pada musim kemarau cenderung lebih tinggi di bandingkan musim hujan. Penyebab dari rendahnya temperatur potensial di musim hujan dikarenakan penurunan suhu di permukaan dan radiasi panas yang semakin berkurang. Rendahnya nilai temperatur potensial di stasiun R1 dikarenakan perbedaan ketinggian dimana semakin tinggi lokasi ketinggian maka semakin rendah suhu yang terukur.

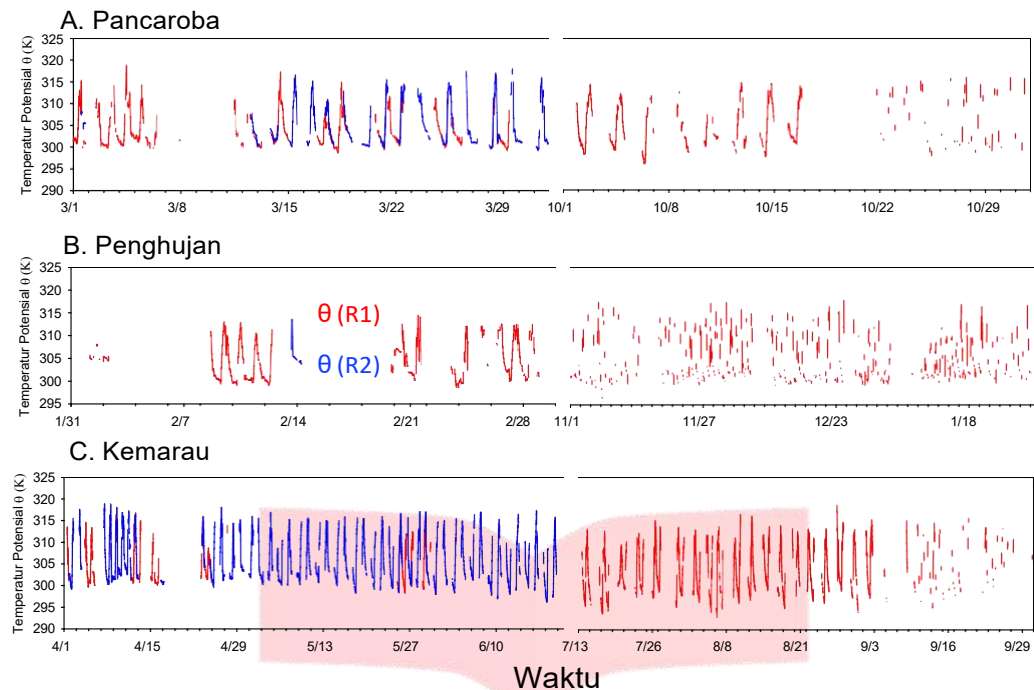
Berdasarkan perbedaan ketinggian, nilai konsentrasi $PM_{2.5}$ dan CO_2 di dua lokasi yang terjadi pada musim hujan dan musim kemarau memiliki perbedaan yang signifikan. Hal ini disebabkan pada musim hujan suhu di permukaan mengalami penurunan dan kondisi atmosfer menjadi stabil yang menyebabkan pembentukan lapisan inversi di permukaan dan mengakibatkan polutan dari permukaan terperangkap [14]. Oleh karena itu nilai konsentrasi $PM_{2.5}$ dan CO_2 pada musim hujan

lebih tinggi di bandingkan dengan musim kemarau. Kondisi atmosfer yang stabil di musim hujan dapat menyebabkan penurunan *Planetary Boundary Layer* (PBL). Stabil dan tidaknya ditandai dengan nilai $d\theta/dz > 0$ dan $d\theta/dz < 0$. Stabilitasnya PBL menyebabkan sumber polutan yang dominan berasal dari polutan lokal bergerak menuju pencampuran akibat dari angin lembah dan angin laut. Daerah pencampuran inilah polutan lokal dan polutan lintas batas bertemu [15].

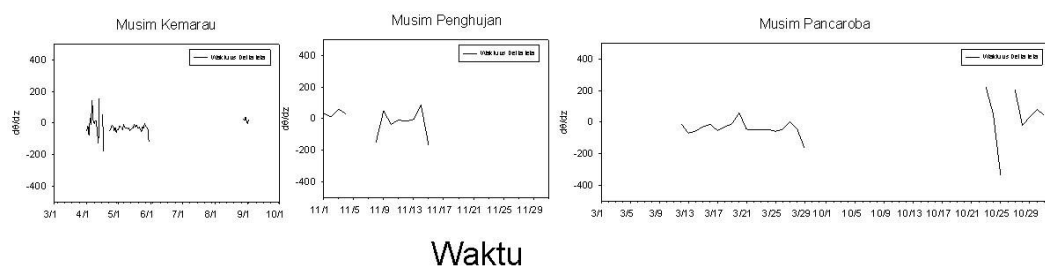
Tabel 1 Arah dan kecepatan angin serta potensi sumber emisi pada musim kemarau, hujan, dan pancaroba.

Musim	Bulan	Arah Angin	Kecepatan Angin (m/s)			Sumber Emisi
			Min	Rata-rata	Max	
Kemarau	April	Selatan	0,197	0,372	2	Pembakaran Sampah, Rumah Penduduk
	Mei	Tenggara	1	1,635	2	Pembangunan Perumahan, Jalan Bojong Soang, Rumah Penduduk
	Juni	Tenggara	1	1,667	3	Pembangunan Perumahan, Jalan Bojong Soang, Rumah Penduduk
	Juli	Barat	1	1,967	3	Kawasan Industri Jalan Dayeuhkolot, Tol Padaleunyi
	Agustus	Timur-Tenggara	1	1,903	3	Pembangunan Perumahan, Jalan Bojong Soang, Rumah Penduduk
	September	Timur	1	2,233	4	Pembangunan Perumahan, Jalan Bojong Soang
Hujan	Februari	Barat	2	1,571	3	Kawasan Industri Jalan Dayeuhkolot, Tol Padaleunyi
	November	Selatan Tenggara	0,0092	0,951	3	Pembakaran Sampah, Rumah Penduduk
	Desember	Selatan	0,0038	0,524	2	Pembakaran Sampah, Rumah Penduduk
	Januari 2020	Barat	1	2,1	4	Kawasan Industri Jalan Dayeuhkolot, Tol Padaleunyi
Pancaroba	Maret	Barat	1	1,741	3	Kawasan Industri Jalan Dayeuhkolot, Tol Padaleunyi
	Oktober	Timur - Tenggara	1	2,354	4	Pembangunan Perumahan, Jalan Bojong Soang, Rumah Penduduk

Pada **Gambar 8** di musim kemarau nilai $d\theta/dz$ cenderung < 0 yang mana jika nilainya < 0 maka kondisi udaranya tidak stabil. Berbeda halnya dengan musim hujan yang cenderung $d\theta/dz > 0$ kondisi ini menandakan udara stabil. Faktor yang terpenting yaitu perbedaan temperatur antara permukaan dengan udara. Jika permukaan lebih hangat lapisan campuran akan terbentuk di waktu siang hari. Demikian juga, jika permukaan lebih dingin akan terciptanya PBL yang stabil [16].



Gambar 7. Data temperatur potensial terhadap waktu di R1 dan R2 pada musim kemarau, hujan, dan pancaroba.



Gambar 8. Data $d\theta/dz$ terhadap waktu di R1 dan R2 pada musim kemarau, hujan, dan pancaroba.

4. Kesimpulan

Penelitian mengenai pemantauan konsentrasi $PM_{2.5}$ dan CO_2 serta meteorologi (T, RH, P, I, WS, WD) berbasis *low-cost sensor* secara *real-time* dengan cara membuat sistem alat ukur di dua lokasi dengan perbedaan ketinggian ± 15 m dan jarak ± 300 m antara lokasi satu dengan lainnya (Gedung Tokong Nanas/R1 dan Gedung Deli/R2) dilaksanakan pada 1 Februari – 31 Januari 2020. Data yang dihasilkan dikirim ke *database* dan menggunakan data logger per 2 menit dimana *ThingSpeak* bertindak untuk penyedia *open source cloud database*. Data logger dipasang untuk mengantisipasi terjadinya hilang data.

Berdasarkan data hasil pengukuran, konsentrasi $PM_{2.5}$ di stasiun R1 saat musim hujan lebih tinggi dari musim kemarau dan pancaroba karena pada musim hujan aktivitas masyarakat dalam penggunaan alat-alat rumah tangga meningkat. Pada musim hujan dimana temperatur di permukaan yang rendah dan radiasi panas yang berkurang menyebabkan konveksi udara yang semakin stabil dan membentuk lapisan inversi permukaan yang dapat merangkap polutan yang dipancarkan dari permukaan yang menghasilkan rata-rata konsentrasi $PM_{2.5}$ lebih tinggi dari musim kemarau untuk stasiun R1. Rata-rata konsentrasi CO_2 yang lebih tinggi di musim hujan karena aktivitas vegetasi untuk melakukan fotosintesis tidak dapat terjadi secara maksimal karena keadaan tertutup awan. Selain dari pengaruh vegetasi, kecepatan dan arah angin dapat mempengaruhi konsentrasi pengukuran serta mengetahui sumber emisi berasal dari polutan lokal maupun jarak jauh. Ketiga musim memiliki arah angin yang berbeda, dengan musim kemarau yang dominan dari arah timur-tenggara, lalu musim hujan yang mana pada bulan November dan Desember dari arah selatan sedangkan Februari dan Januari dari arah barat. Selain itu, pada musim pancaroba bulan Maret dan Oktober memiliki arah yang berlawanan yaitu dari arah barat dan timur.

Dilihat dari fungsi ketinggian kondisi udara $d\theta/dz > 0$ yang berarti lebih stabil dan *Planetary Boundary Layer* (PBL) turun. Hal ini yang menyebabkan polutan lokal dan polutan lintas batas yang telah tercampur cenderung bergerak menuju ke permukaan. Sedangkan konsentrasi di stasiun R2 > R1 karena lokasi R2 itu berada dekat dengan sumber polutan (jalan kendaraan, tempat pembakaran sampah, rumah penduduk). Pada musim kemarau di R2 rata-rata konsentrasi $PM_{2.5}$ dan CO_2 lebih tinggi daripada musim pancaroba dan hujan. Kenaikan konsentrasi di musim kemarau juga dipengaruhi oleh arah dan kecepatan angin yang mana arah angin dominan berasal dari tenggara dimana lokasi sumber polutan seperti kendaraan bermotor, pembangunan perumahan, dan pembakaran sampah.

Daftar Pustaka

- [1] Simandjuntak.A.G, "Pencemaran udara", Buletin Limbah, 2013.
- [2] Air Quality Expert Group, "Particulate Matter in the UK: Summary", 2005.
- [3] Environmental Protection Agency, "A Guide to Air Quality and Your Health", 2014.
- [4] Yonando Devana.Y.S.B, "Dampak Polusi Terhadap Makhluk Hidup Dalam Karya Ilustrasi", Serupa The Journal of Art Education, 2019.
- [5] Badan Pusat Statistik Jawa Barat. [Online]. (<https://jabar.bps.go.id/>) (diakses pada 4 Februari 2019).
- [6] Sumaryati, "Polusi Udara di Kawasan Cekungan Bandung", Berita Dirgantara, 2007.
- [7] Oanh.N.K, 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, and Lindgren.E.S, "Particulate air pollution in six Asian cities: Spatial and temporal distributions, and associated sources", 2006.
- [8] Chen.W, Yan.L, Zhao.H, "Seasonal variations of atmospheric pollution and air quality in Beijing", 2015.
- [9] Biswas.P, Li.J, "Optical Characterization Studies of a Low-Cost Particle Sensor", Aerosol and Air Quality Research, 2017.
- [10] Awaludin.A, Nugroho.G.A, Latief.C, and Budiyono.A, "Rancang bangun alat pengukur dan sistem jaringan data CO_2 di Indonesia berbasis web", Jurnal Sains Dirgantara, 2011.
- [11] Sya'bani.A, Chandra.I, Majid.L.I, Vaicdan.F, Barus.R.A.A, Abdurrachman.A, & Salam.R.A, "Pemantauan Konsentrasi $PM_{2.5}$ dan CO_2 Berbasis Low-Cost Sensor secara Real-Time di Cekungan Udara Bandung Raya", 2020
- [12] Assad.S.I, "Analisis Peran Cuaca dan Iklim Terhadap Hasil Tangkapan Ikan Nelayan Di Pesisir Utara Jawa (Pantura) Di TPI (Tempat Pelelangan Ikan) Tambak Lorok Kelurahan Tanjung Mas Kecamatan Semarang Utara", Universitas Muhammadiyah Surakarta, 2019.
- [13] Hastuti.R.P, "Pengaruh Paket Edukasi Talasemia (PEdTal) Terhadap Kualitas Hidup Anak Talasemia", Jurnal Kesehatan, 2016.
- [14] Fan.H, DavidJ.S, "Modeling the impacts of anthropogenic heating on the urban climate of Philadelphia: a comparison of implementations in two PBL schemes", 2005.
- [15] Kaimal.J.C, Finnigan.J.J, "Atmospheric boundary layer flows their structure and measurement", Oxford: Oxford University Press. 1994.Fan, H. & Sailor, D. 2005.
- [16] Stull.R.B, "Practical meteorology: an algebra-based survey of atmospheric science", 2018.