

ANALISIS PAPARAN BIOAEROSOL SECARA PERSONAL DALAM KEHIDUPAN SEHARI-HARI

ANALYSIS OF PERSONAL EXPOSURE TO BIOAEROSOL IN DAILY ACTIVITIES

Irma Zauhar Nafisah, Indra Chandra*, Amaliyah Rohsari Indah Utami

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

¹irmazauharnafisah@student.telkomuniversity.ac.id, ²indrachandra@telkomuniversity.ac.id,

³amaliyahriu@telkomuniversity.ac.id

Abstrak

Selain konsentrasi gas dan partikulat di udara yang berdampak terhadap tingkat polusi udara, bioaerosol dapat memberikan kontribusi pencemaran sampai 30% di lingkungan perkotaan. Secara keseluruhan manusia dapat terpapar melalui polutan non-biologi, seperti materi partikulat berukuran 2,5 mikrometer ke bawah ($PM_{2.5}$) serta gas Karbon Dioksida (CO_2), ataupun mikroorganisme (biologi). Manusia yang terpapar polutan berdampak buruk terhadap kesehatan seperti toksik akut, termasuk demam, malaise, dan penurunan fungsi paru yang diakibatkan oleh infeksi bakteri. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi hubungan bioaerosol dengan parameter non-biologi (T, RH, $PM_{2.5}$, CO_2 , kecepatan angin, arah angin) serta mengetahui potensi paparan bioaerosol (bakteri) secara personal. Pengukuran dilakukan di Tempat Pembuangan Sampah Terbuka (TPST) sekitar kampus pada 13 Agustus 2020. Hal ini bertujuan untuk melihat kondisi ekstrem pertumbuhan bakteri dan persebaran aerosol ke daerah sekitarnya. Mekanisme pengukuran sampel biologi dilakukan secara paralel dengan alat ukur non-biologi pada pagi (sebelum pembakaran) dan sore hari (setelah pembakaran) selama dua menit dengan dua kali pengulangan. Pada penelitian ini digunakan alat sampling mikroorganisme secara aktif dengan menggunakan *Andersen Singler Stage Impactor* sebagai perangkap bakteri ke dalam media PCA. Sampel media kemudian diidentifikasi sampai pada tingkatan genus menggunakan metode kultur. Sementara itu, *Low-Cost Sensor* digunakan untuk mengukur parameter non-biologi yang digunakan untuk mengetahui kualitas udara serta faktor meteorologi. Hasilnya, bakteri yang teridentifikasi tidak bisa dihitung secara kuantitatif. Hal ini karena tingginya kontaminasi limbah sampah organik dan anorganik di TPST, serta pengambilan waktu sampel yang berlebihan. Hal ini berdampak pada tingginya pertumbuhan bakteri sehingga terjadi penumpukan pada media PCA. Meskipun demikian, beberapa bakteri teridentifikasi dari genus *Bacillus Sp* dan *Micrococcus* pada pengukuran pagi dan sore hari dengan konsentrasi CO_2 dan $PM_{2.5}$ rata-rata masing-masing sebesar 584-816 ppm dan 86-124 $\mu g/m^3$ pada kelembapan relatif 97-100% dan temperatur 26 °C. $PM_{2.5}$ yang dihasilkan terhitung melebihi ambang batas karena pembakaran sampah secara terus-menerus. Sumber emisi lokal ini mengakibatkan terdampaknya lingkungan sekitar (polutan tersebar ke arah barat dan barat daya dengan kecepatan 2 m/s) sehingga mempengaruhi kualitas udara di dalam ruangan yang berada disekitarnya.

Kata kunci : *Andersen sampler*, bioaerosol, CO_2 , $PM_{2.5}$.

Abstract

Exceeded level of gas and particulates concentrations in the air have an impact on air pollution, one of the gases is bioaerosol that it contribute up to 30% of pollution in urban environments. In general, humans can be exposed through non-biological pollutants, such as particulate matter less than 2.5 micrometers in size ($PM_{2.5}$) and carbon dioxide (CO_2), or microorganisms (such as bacteria). Humans are exposed to adverse health effects such as acute toxicity, including fever, malaise, and decreased lung function caused by bacterial infections. This study aims to identify the relationship between bioaerosol and non-biological parameters (T, RH, $PM_{2.5}$, CO_2 , wind speed, wind direction) and to determine the potential exposure to bioaerosol (bacteria) personally. Measurements were carried out at the Open Garbage Disposal Site (TPST) around the campus on August 13, 2020. This aims to see the extreme conditions for bacterial growth and the spread of aerosols to the surrounding area. The mechanism for measuring biological samples is carried out in parallel with non-biological measuring instruments in the morning (before burning) and in the evening (after burning) for two minutes with two repetitions. In this study, an active microorganism sampling tool was used by using the *Andersen Singler Stage Impactor* to trap bacteria into PCA media. The media samples were then identified to the genus level using culture methods. Meanwhile, the *Low-Cost Sensor* is used to measure the non-biological parameters used to determine air quality and meteorological factors. As a result, the identified bacteria cannot be counted quantitatively. This is due to the high contamination of organic and inorganic waste at the TPST, as well as excessive sampling time. This has an impact on the high growth of bacteria resulting in a buildup on the PCA media. However,

several bacteria were identified from the genus *Bacillus Sp* and *Micrococcus* in the morning and evening measurements with mean CO_2 and $PM_{2.5}$ concentrations of 584-816 ppm and 86-124 $\mu g/m^3$ respectively at a relative humidity of 97-100%. and a temperature of 26 °C. The $PM_{2.5}$ produced is considered to have exceeded the threshold due to continuous burning of waste. This local emission source has an impact on the surrounding environment (pollutants are scattered to the west and southwest at a speed of 2 m/s) so that it affects indoor air quality around it.

Keywords: Andersen sampler, bioaerosol, CO_2 , $PM_{2.5}$.

1. Pendahuluan

Pencemaran udara menimbulkan perhatian besar di dunia karena memiliki dampak terhadap kesehatan manusia [1] dan dianggap berbahaya terutama di lingkungan perkotaan [2]. Polutan yang dilepaskan ke atmosfer oleh aktivitas manusia menyebabkan penurunan kualitas udara yang signifikan dan berdampak terhadap kesehatan manusia seperti kematian dini, pernafasan, dan kardiovaskular [3]. Selain gas dan partikulat, sekitar 24% dari jumlah total partikel dan 5-10% dari total massa partikulat di atmosfer bersumber dari bioaerosol baik berasal dari sumber alami ataupun antropogenik [4, 5]. Bioaerosol merupakan partikel udara yang berasal dari agen biologi seperti jamur, bakteri, tungau debu, spora jamur, virus, dan serbuk sari serta fragmennya, termasuk berbagai anti-gen dengan ukuran 0.02 sampai 100 μm [6, 7]. Kondisi iklim yang panas dan lembap di suatu wilayah dapat memicu pertumbuhan mikroorganisme [8, 9]. Kelangsungan hidup dan viabilitas merupakan salah satu aspek penting untuk menganalisis keberadaan bioaerosol yang tersebar melalui udara sebagai perantara. Dalam pertukaran di atmosfer, bioaerosol mengalami transformasi kimia, fisik, dan penuaan biologi saat berinteraksi dengan radiasi ultraviolet (UV), foto-oksidan, serta berbagai polutan udara seperti zat asam, Nitrogen Oksida (NO_x), senyawa aromatik, dan jelaga [10]. Bioaerosol mencapai permukaan bumi berupa *dry/wet deposition* jika terbasuh oleh air sehingga akan membentuk koloni di lokasi yang baru [11].

Korelasi antara bioaerosol dengan partikulat materi ($PM_{2.5}$), karbon organik, suhu, dan kelembapan relatif telah diteliti secara dinamis di Tempat Pembuangan Sampah Terbuka (TPST) Cincinnati, Ohio, Amerika Serikat. Penelitian menunjukkan bahwa bioaerosol (jenis fungi dan *pollen*) mempunyai korelasi positif terhadap partikulat dan temperatur di atmosfer. Faktor temperatur sangat berpengaruh terhadap partikulat. Analisis regresi menunjukkan bahwa intensitas temperatur yang tinggi mempunyai pengaruh yang buruk terhadap viabilitas beberapa jenis bioaerosol. Sedangkan temperatur mempunyai korelasi terbalik terhadap kelembapan relatif. Secara lebih lanjut, bioaerosol ini dapat menyebabkan peningkatan gejala pernapasan pada manusia seperti infeksi, alergi, toksik pada organisme yang ditularkan melalui proses inhalasi atau deposisi [12, 13, 14]

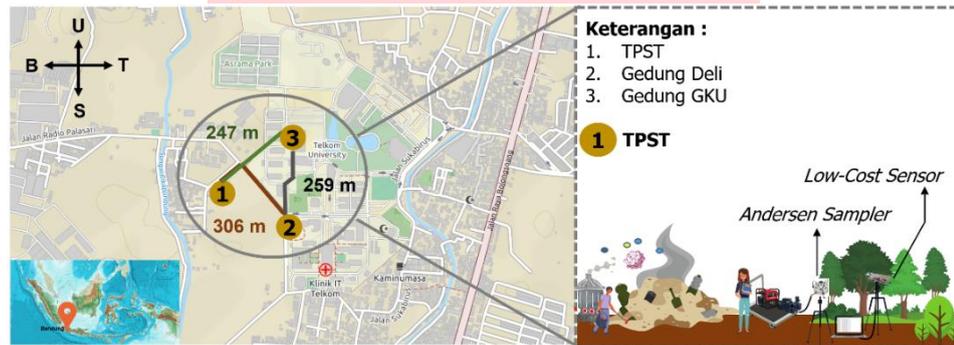
Pada penelitian sebelumnya, konsentrasi CO_2 dan $PM_{2.5}$ dapat melebihi ambang batas, mencapai 1300-1600 ppm untuk CO_2 dan 72 $\mu g/m^3$ pada $PM_{2.5}$ pada jam kerja. Sedangkan mikroorganisme yang teridentifikasi melalui pengambilan sampel dengan metode pasif pada atap sebuah ruangan, terdapat bakteri-bakteri yang umum ditemukan di tubuh manusia, seperti *Staphylococcus*, *Streptococcus*, dan *Enterobacteriaceae* [15]. Penelitian selanjutnya mengenai kualitas udara pengukuran non-biologi menggunakan *low-cost sensor* dilakukan diluar ruangan, yaitu pada aktivitas Pasar Minggu di sekitar Universitas Telkom, Bandung. Konsentrasi CO_2 berada pada rentang 550-931 ppm, konsentrasi NO_2 0-0,13 ppm, dan $PM_{2.5}$ stabil di $\sim 62 \mu g/m^3$, terukur pada temperatur 24-27 °C dan kelembapan relatif 92,2-80,4%. Peningkatan yang signifikan terlihat pada konsentrasi CO_2 yang diakibatkan oleh banyaknya respirasi manusia [16]. Penelitian bioaerosol dan non-biologi di dalam ruangan dilakukan pada Tahun 2019, menunjukkan adanya bakteri *Enterobacteriaceae sp*, *Streptococcus sp*, *Bacillus sp*, *Enterococcus sp*, dan *Staphylococcus sp* (794 ppm untuk CO_2 , 20 $\mu g/m^3$ pada $PM_{2.5}$, 27°C dan 75% RH) [17]. Penelitian bioaerosol dan non-biologi di dalam ruangan dilanjutkan pada Tahun 2020, menunjukkan adanya *Staphylococcus*, *Streptococcus*, *Micrococcus* dan *Bacillus* (648 ppm untuk CO_2 , 51 $\mu g/m^3$ pada $PM_{2.5}$, 26°C dan 97% RH) [18]. Berdasarkan penelitian bioaerosol dan non-biologi di dalam ruangan, menunjukkan bahwa terdapat aktifitas mikroorganisme terukur diluar ruangan.

Dengan demikian, perlu dilakukan (1) pengamatan kualitas udara ($PM_{2.5}$, CO_2) dan faktor meteorologi (temperatur, kelembapan relatif, kecepatan angin, arah angin) di lingkungan Universitas Telkom dan sekitarnya, dan (2) melakukan pengukuran konsentrasi bioaerosol dan non-biologi di lingkungan Universitas Telkom dan sekitarnya menggunakan alat ukur *portable* bioaerosol dan alat ukur non-biologi. Hasil pengukuran bioaerosol dan non-biologi diharapkan dapat mengetahui potensi paparan bioaerosol dan non-biologi dalam kegiatan sehari-hari di TPST dan sekitarnya, serta diharapkan mampu menjadi referensi sebagai bahan pertimbangan upaya perlindungan kesehatan dan kebersihan di lingkungan Universitas Telkom dan sekitarnya.

2. Metodologi Penelitian

2.1 Lokasi dan Waktu Pengukuran

Pengukuran dilaksanakan di TPST Jalan Babakan Radio, Citeureup, Kecamatan Dayeuhkolot, Bandung, Jawa Barat. Lokasi pengukuran TPST berjarak 247 meter dari Gedung GKU dan 306 meter dari Gedung Deli. Adapun lokasi pengukuran bioaerosol dan non-biologi ditunjukkan pada Gambar 1. Pengambilan sampel bakteri dilakukan pada 13 Agustus 2020, sedangkan identifikasi bakteri dilakukan di Laboratorium Mikrobiologi Universitas Jenderal Achmad Yani, Bandung. Observasi faktor yang mempengaruhi keberadaan bakteri di udara meliputi kualitas udara ($PM_{2.5}$, CO_2) dan faktor meteorologi (T, RH, kecepatan angin, arah angin). Kondisi umum di TPST turut mempengaruhi observasi faktor meteorologi ditunjukkan pada Tabel 1. Kegiatan pengukuran dilakukan pada pagi hari atau sebelum pembakaran sampah dan sore hari atau setelah pembakaran sampah.



Gambar 1. Lokasi pengukuran bioaerosol dan non-biologi di TPST Jalan Babakan Radio, Citeureup, Kecamatan Dayeuhkolot, Bandung, Jawa Barat.

Tabel 1. Kondisi umum TPST Jalan Babakan Radio, Citeureup, Kecamatan Dayeuhkolot, Bandung, Jawa Barat.

Variabel	Tempat Pembuangan Sampah Terbuka
1. Luas tempat (m^2)	40 x 40
2. Jenis Sampah	Organik dan anorganik
3. Kapasitas Sampah	2 s.d 3 kubik per-hari
a. Sebelum Pandemi	<1 kubik per-hari
b. Sedang Pandemi	
4. Konstruksi Tempat Pembakaran Sampah	
a. Alat pembakaran	Menyerupai cerobong asap
b. Jumlah alat pembakaran	1 buah
5. Kondisi Lingkungan Tempat Pembakaran	
a. Penyimpanan Sampah	Sampah organik dan anorganik ditumpuk menjadi beberapa tumpukan di tempat terbuka
b. Proses pembakaran	Sampah organik dipisahkan dari sampah anorganik, kemudian dibakar secara bertahap
c. Kondisi tanah	Bercampur dengan sampah organik sehingga tanah sangat lembap, membentuk genangan dan mengeluarkan aroma tidak sedap. Ketika hujan, air menggenang bercampur dengan sampah organik dan anorganik
d. Fasilitas di Tempat Pembakaran	1 kamar mandi dan 1 kamar tidur tidak layak huni
6. Waktu Pembakaran	
a. Pagi hari	Sebelum pandemi: 06.00 WIB Sedang pandemi : 07.00 WIB s.d sore hari, bergantung pada kapasitas sampah
b. Sore hari	Sebelum pandemi: 16.00 WIB s.d selesai

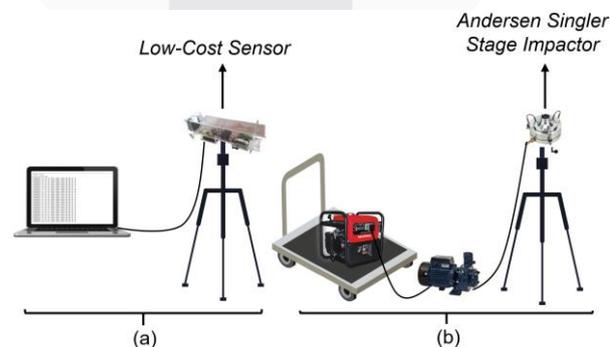
2.2 Alat Ukur Bioaerosol dan Non-Biologi

Alat ukur yang digunakan dalam pengukuran bioaerosol adalah *Andersen Singler Stage Impactor* (*BioStage Impactor*) dengan bantuan slang dan pompa 28.3 L/menit. Medium yang digunakan pada

pengukuran bioaerosol menggunakan agar-agar *Plate Count Agar* (PCA). Agar-agar disesuaikan dalam pelat berukuran 90-100 mm dengan *Standard BioStage* 400 [19]. Alat ini bekerja dengan mengambil sampel menggunakan metode impaktor. Metode tersebut bekerja dengan cara memaksa partikel padat atau semi-padat masuk menuju *single stage impactors* dengan cara dipompa sehingga bisa dihitung jenis sampler bioaerosol secara mikroskopis. Pengukuran bioaerosol dilengkapi dengan modul lainnya seperti troli, jenset, pompa, dan media PCA.

Kualitas udara dan kondisi meteorologi di lingkungan Universitas Telkom dan sekitarnya dipantau menggunakan alat pemantauan non-bioaerosol atau *low-cost sensor*. *Low-cost sensor* dilengkapi dengan sensor $PM_{2.5}$ dan CO_2 untuk mengukur kualitas udara serta T dan RH untuk mengukur faktor meteorologi udara sekitar. Sensor $PM_{2.5}$ merupakan sensor yang digunakan untuk mengukur partikulat berukuran 2,5 mikrometer ke bawah. Sensor ini bekerja dengan prinsip hamburan cahaya, yaitu partikulat yang berukuran 2,5 mikrometer ke bawah yang berada di lingkungan akan masuk ke dalam *inlet* dengan cara ditarik oleh kipas. Laser ($\lambda = 630-680$ nm) akan memancarkan cahaya secara lurus ke ruang kosong. Apabila terjadi hamburan cahaya ketika terdapat partikulat yang berukuran 2,5 mikrometer ke bawah maka foto detektor akan menerima intensitas cahaya tersebut yang disebabkan oleh sudut hamburan, panjang gelombang, indeks bias, dan bentuk/jenis partikulat. Sinyal listrik keluaran foto detektor akan diperkuat dengan *filter amplifier* lalu dikonversi oleh *microcontroller unit* (MCU) menjadi sinyal digital dan nilai konsentrasi massa $PM_{2.5}$ dapat terukur [20].

Pengukuran CO_2 menggunakan sensor non-dispersive infrared (NDIR). Sensor NDIR menggunakan cahaya *infrared* (IR) yang dipancarkan oleh sumber IR ($\lambda = 4,3 \mu m$) dan memiliki salah satu panjang gelombang yang sama dengan CO_2 (2,7, 4,3, dan $15 \mu m$). 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 ujung yang berlawanan. Ketika sejumlah intensitas cahaya yang dipancarkan oleh sumber IR melewati ruang pengukuran, maka CO_2 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 hanya diteruskan ke detektor IR. Intensitas cahaya IR yang diserap sebanding dengan jumlah konsentrasi CO_2 di dalam ruang ukur [21]. Pengukuran kelembapan relatif digunakan untuk merefleksikan kondisi kelembaban di udara dalam studi penelitian [22]. Kelembaban relatif tidak bisa mencerminkan kadar air di lingkungan karena bergantung pada temperatur lingkungan. Adapun alat pengukuran bioaerosol dan non-biologi dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. (a) Modul alat ukur non-biologi: laptop dan *low-cost sensor* (T, RH, $PM_{2.5}$ dan CO_2); (b) Modul utama yang digunakan pada pengukuran bioaerosol: troli, jenset, pompa, sampler, dan media PCA.

2.3 Teknik Pengambilan Sampel

Pengambilan data pemantauan bioaerosol dan non-biologi di luar ruangan dilakukan secara paralel dan dinamis. Waktu pengukuran bioaerosol dilakukan pada pagi dan sore hari sebanyak 2 kali pengambilan sampel bakteri, masing-masing durasi pengambilan sampel yaitu 2 menit. Sementara pengukuran non-biologi dilakukan sejak pengambilan sampel bakteri awal sampai akhir. Hal ini disebabkan untuk mencapai pengukuran lebih dari 1 menit. Alat pengukuran non-biologi menggunakan *low cost sensor* bertujuan untuk mengukur temperatur (T), kelembapan udara (RH), $PM_{2.5}$, dan gas CO_2 . Prosedur pengukuran non-biologi yaitu: (1) instrumen pengukuran biologi dan non-biologi di letakan pada tripod dengan ketinggian 1.5 meter atau sejajar dengan pernafasan manusia, (2) Pengambilan sampel bioaerosol (bakteri) dilakukan secara paralel dengan pengambilan sampel non-biologi, (3) Pengukuran dilakukan secara dinamis di Tempat Pembuangan Sampah Terbuka. Sedangkan *Andersen Singler Stage Impactor* merupakan alat untuk perangkap bakteri menggunakan median PCA. Media tersebut diidentifikasi lebih lanjut sampai tahap genus di Laboratorium Mikrobiologi Unjani, Cimahi.

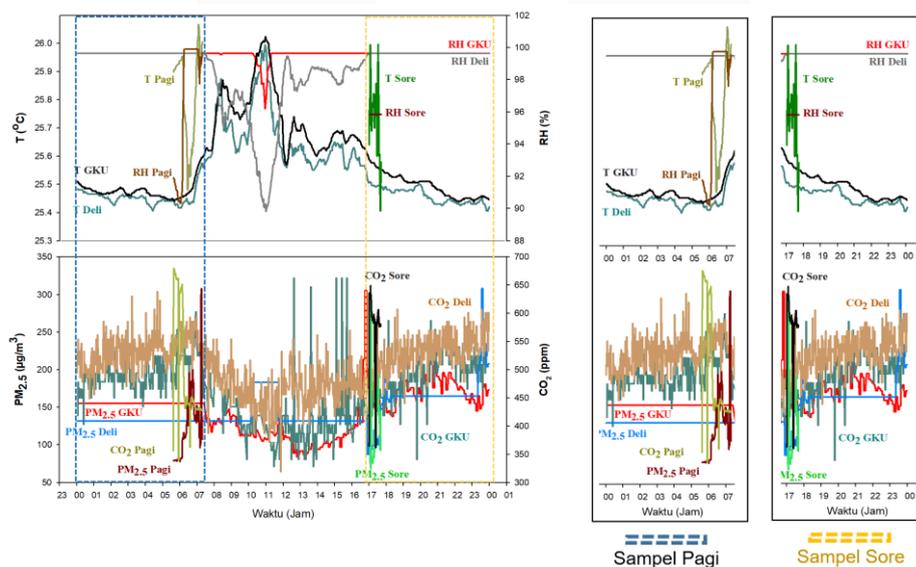
3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Data Pengukuran Kualitas Udara, Faktor Meteorologi di Tempat Pembuangan Sampah Terbuka (TPST)

Pada Gambar 3 merupakan rata-rata kondisi kualitas udara dan faktor meteorologi di TPST, stasiun tetap Gedung GKU dan Gedung Deli. Sebagai sumber perbandingan, pengamatan rata-rata kualitas udara dan faktor meteorologi di ambil dari dua stasiun tetap. Kedua stasiun tetap ini dijadikan sumber perbandingan untuk melihat potensi persebaran bioaerosol (bakteri) di TPST melalui emisi PM_{2.5} dari hasil pembakaran sampah, perbedaan kondisi kualitas udara dan faktor meteorologi di wilayah Universitas Telkom dan sekitarnya. Parameter kualitas udara yang diukur adalah PM_{2.5} dan gas CO₂ (Karbon Dioksida), sedangkan faktor meteorologi terdiri dari temperatur dan kelembapan relatif.

Berdasarkan pengukuran kualitas udara pada pagi hari (pukul 07.04 s.d 07.14 WIB), terdapat PM_{2.5} yang sangat melimpah di TPST yaitu sebesar 86 µg/m³. Beberapa hal dapat diamati dari tabel tersebut bahwa, PM_{2.5} yang terukur di stasiun tetap Gedung GKU dan Gedung Deli berturut-turut 17 µg/m³ dan 71 µg/m³. Perbedaan konsentrasi ini disebabkan oleh aktifitas petugas di TPST mulai membakar sampah kering dengan intensitas pembakaran yang sangat kecil. Jika sampah dibakar dengan kapasitas yang besar, maka asap akan menutupi tempat pembakaran dan menyebar sesuai kecepatan dan arah angin sehingga PM_{2.5} yang terukur semakin tinggi. Berbeda dengan CO₂ yang terukur pada pagi hari, konsentrasi CO₂ TPST 816 ppm, Gedung GKU 567 ppm, dan Gedung Deli 515 ppm. Konsentrasi CO₂ terukur lebih tinggi karena dekat Gedung GKU sudah dimulai aktifitas pembangunan Gedung Baru yang melibatkan banyak pegawai sudah beraktifitas sejak dini hari. Jika dilihat dari faktor meteorologi, temperatur dan kelembapan relatif yang terukur di TPST, stasiun tetap Gedung GKU dan Gedung Deli tidak jauh berbeda. Rata-rata kualitas udara dan faktor meteorologi disajikan pada Tabel 2.

Berdasarkan pengukuran sore hari, terukur 124 µg/m³ PM_{2.5} di TPST. Pembakaran sampah kering menjadikan konsentrasi PM_{2.5} yang terukur sore hari di Tempat pembakaran sampah lebih tinggi dibandingkan stasiun tetap Gedung GKU dan stasiun tetap Gedung Deli. Berdasarkan rata-rata PM_{2.5} pada pagi hari dan sore hari, bahwa selisih konsentrasi yang terukur sebesar 38 µg/m³ meskipun sudah dilakukan pembakaran sejak pagi hari. Hal ini disebabkan karena terjadinya hujan disiang hari sampai satu jam sebelum pengukuran, sehingga tanah menjadi sangat lembap. Hal ini mengakibatkan kelembapan sebelum pembakaran maupun setelah pembakaran tidak jauh berbeda.



Gambar 3. Kualitas udara dan faktor meteorologi di TPST, stasiun tetap Gedung GKU dan Deli pada 13 Agustus 2020.

Tabel 2. Rata-rata kualitas udara dan meteorologi di TPST, stasiun tetap Gedung GKU dan Gedung Deli pada 13 Agustus 2020.

Parameter	Tempat Pembuangan Sampah Terbuka		Gedung GKU	Gedung Deli
	Pagi	Sore		
RH (%)	97	100	100	95
T (°C)	26	26	24	26
CO ₂ (ppm)	816	584	567	515
PM _{2.5} (µg/m ³)	86	124	17	71

3.2 Konsentrasi Bakteri di Tempat Pembuangan Sampah Terbuka (TPST)

Pengukuran mikroorganisme di TPST tidak membuktikan hasil perhitungan kuantitatif. Hal ini mengakibatkan hasil identifikasi dinyatakan TBUD (jumlah mikroorganisme tidak bisa dihitung) karena terjadinya penumpukan bakteri pada media PCA. Akibatnya, mikroorganisme bakteri hanya bisa diidentifikasi sampai tahap genus. Pengukuran pertama atau sebelum pembakaran sampah dilakukan pada pagi hari pukul 07.04-07.06 WIB dan 07.12-07.14 WIB, kemudian dilanjutkan pengukuran kedua setelah pembakaran sampah pada sore hari pukul 17.07-17.09 WIB dan 17.15-17.17 WIB. Hasil identifikasi menyatakan bahwa sebelum pembakaran atau setelah pembakaran, genus yang berhasil diidentifikasi adalah *Bacillus Sp* dan *Micrococcus*.

Berdasarkan data, mikroorganisme teridentifikasi yang dinyatakan TBUD disebabkan oleh beberapa hal. Menurut Paul A. Baron dan Klaus Willeke, dalam bukunya yang berjudul *Aerosol Measurement: Principles, Techniques, and Applications*, meskipun beberapa dari sampler telah dikarakterisasi, perbandingan hasil studi lapangan tidak selalu sebanding satu sama lain. Beberapa faktor disebabkan oleh waktu pengumpulan sampel yang berlebihan, volume sampel yang bervariasi, dan beberapa lainnya karena parameter operasional yang berbeda dari masing-masing sampler [23]. Beberapa faktor yang menyebabkan hasil identifikasi bakteri dinyatakan TBUD adalah sebagai berikut.

3.2.1. Tingginya Kontaminasi di Tempat Pembuangan Sampah Terbuka (TPST)

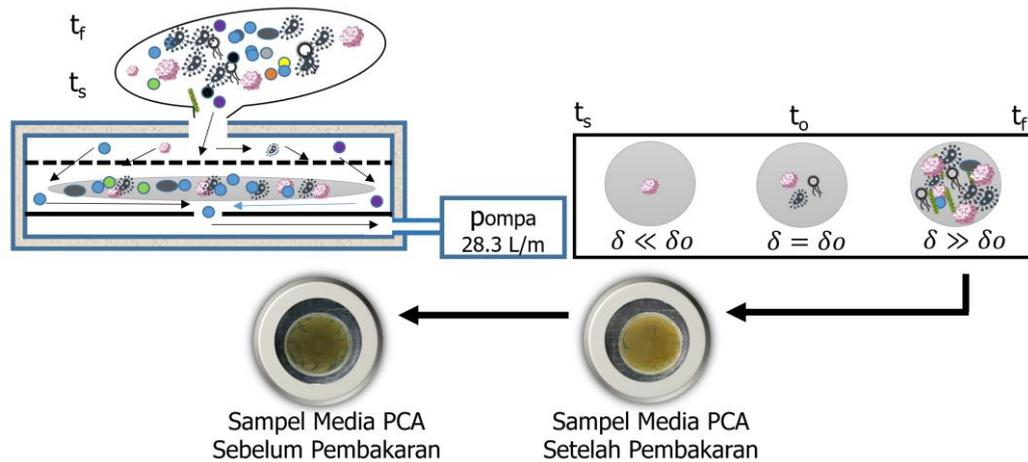
Beberapa pemicu keberadaan mikroorganisme dalam jumlah besar adalah limbah antropogenik seperti limbah pembakaran sampah [24]. Kondisi lingkungan di TPST dengan kelembapan rata-rata 97% di pagi hari menjadikan tempat tersebut sebagai media tumbuh dan berkembangnya mikroorganisme dalam jumlah besar. Kondisi tanah yang berair, lembap, dan timbunan sampah organik serta anorganik membuat mikroorganisme bioaerosol tumbuh tak terkendali. Mikroorganisme di TPST semakin tidak terkendali ketika hujan turun di siang sampai sore hari, menyebabkan kondisi lingkungan di TPST sangat lembap dan membentuk genangan air bercampur dengan sampah organik serta anorganik.

Genangan air selalu menjadi reservoir yang baik untuk pertumbuhan mikroorganisme dan menjadi sumber potensi keberadaan bioaerosol [24, 25, 26]. Genangan air yang berasal dari proses hujan, percikan, ataupun gelembung yang mengandung bioaerosol mungkin tertinggal di udara setelah penguapan cairan menyebabkan bakteri gram negatif, aktinomiset, dan alga sebagai unsur umum dari ekosistem [24] bercampur dengan mikroorganisme lainnya yang berasal dari limbah organik dan anorganik di TPST sehingga mempengaruhi kondisi udara. Kondisi udara akibat tumpukan sampah organik yang membusuk menyebabkan udara di TPST dan sekitarnya menjadi tercemar. Salah satu faktor meteorologi yaitu kecepatan angin menyebabkan kontaminasi $PM_{2.5}$ sebagai dampak dari pembakaran sampah tersebar di daerah tersebut dan sekitarnya.

3.2.2. Waktu Pengumpulan Sampel Berlebihan

Salah satu bagian penting strategi pengambilan sampel bioaerosol (bakteri) adalah waktu pengumpulan sampel [27]. Pengumpulan sampel dalam waktu yang relatif lama atau berlebihan mengakibatkan konsentrasi bioaerosol yang terperangkap di media PCA melebihi kapasitas sehingga bioaerosol (bakteri) menumpuk dan tidak bisa diidentifikasi secara menyeluruh. Berdasarkan penelitian, konsentrasi bioaerosol akan bervariasi terhadap waktu, biasanya periode konsentrasi rendah diikuti oleh periode konsentrasi tinggi ataupun sebaliknya [27]. Durasi pengukuran konsentrasi bioaerosol yang dilakukan di TPST pada 13 Agustus 2020, menghasilkan kepadatan permukaan sampel sangat tinggi. Secara visual, partikel yang terperangkap dalam medium PCA terletak berdekatan bahkan menumpuk, sehingga hasil identifikasi Laboratorium menyatakan bahwa medium PCA yang digunakan sebagai media pertumbuhan bakteri tidak dapat dihitung secara kuantitatif.

Gambar 4 menjelaskan faktor pendukung lainnya seperti polutan sebagai dampak dari pembakaran sampah di lokasi tersebut memungkinkan partikel bioaerosol tertutup oleh partikel debu [27] pada periode awal (t_a) sampai periode akhir (t_s) pengambilan sampel. Hal ini mengakibatkan identifikasi kepadatan permukaan sampel terhambat karena kepadatan permukaan sampel lebih besar dari kepadatan sampel optimal ($\delta \gg \delta_o$). Jika kepadatan permukaan sampel lebih besar dari kepadatan sampel optimal pada permukaan medium PCA, mikroorganisme yang terperangkap dapat tumbuh bersama atau menghambat pertumbuhan satu sama lain. Hal tersebut menyebabkan penghitungan dan identifikasi yang tidak akurat sehingga hasil Laboratorium menyatakan jumlah bakteri tidak dapat dihitung dan hanya sebagian genus bakteri yang bisa diidentifikasi.



Gambar 4. Sampling bioaerosol (bakteri) dan hasil identifikasi genus bakteri.

3.3 Dampak Kualitas Udara dan Faktor Meteorologi Terhadap Pertumbuhan Bakteri

Selain dipengaruhi oleh metode pengambilan sampel, konsentrasi mikroorganisme yang terukur di TPST juga dipengaruhi oleh faktor lingkungan ($PM_{2.5}$) dan kondisi udara (seperti: suhu, radiasi UV, kecepatan angin, dan kelembapan). Berdasarkan penelitian, kondisi udara berpengaruh signifikan terhadap komunitas bakteri [28]. Penelitian bioaerosol (bakteri) yang dilakukan di Gedung Deli (dalam ruangan) telah dilakukan pada 12 Agustus 2020. Berdasarkan data kualitas fisik udara dalam ruangan dengan suhu rata-rata 26.25°C , kelembapan relatif rata-rata 97.23% , $PM_{2.5}$ $51.28 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dan kualitas udara kimia dengan gas CO_2 648.25 ppm, teridentifikasi bakteri genus *Bacillus Sp*, *Micrococcus*, *Staphylococcus Sp*, dan *Streptococcus Sp*. Kualitas fisik dan kimia di luar ruangan diperoleh dari pengamatan stasiun tetap Gedung Deli dan GKU secara berurutan terhitung suhu rata-rata 32.03°C , kelembapan relatif rata-rata 70.07% , $PM_{2.5}$ $73.15 \mu\text{g}/\text{m}^3$, CO_2 396.82 ppm di stasiun tetap Gedung Deli serta suhu rata-rata 32.22°C , kelembapan relatif rata-rata 83.42% , $PM_{2.5}$ $131.23 \mu\text{g}/\text{m}^3$, CO_2 548.5 ppm di Gedung GKU.

Selanjutnya, dilakukan penelitian hubungan kualitas udara dan faktor meteorologi terhadap bakteri diluar ruangan, tepatnya di TPST pada 13 Agustus 2020. Hasilnya, teridentifikasi sebagian bakteri dari genus *Bacillus Sp* dan *Micrococcus*. Dengan kata lain, bakteri genus *Bacillus Sp* dan *Micrococcus* yang berjarak 400 meter dari Tempat Pembuangan Sampah Terbuka, memungkinkan terbawa ke Gedung Deli (dalam ruangan) melalui udara. Genus bakteri tersebut bisa sampai ke dalam ruangan melalui genangan limbah air yang menguap dan menghasilkan residu di udara yang mengandung bakteri, berpindah melalui udara ataupun menempel pada kulit manusia [29].

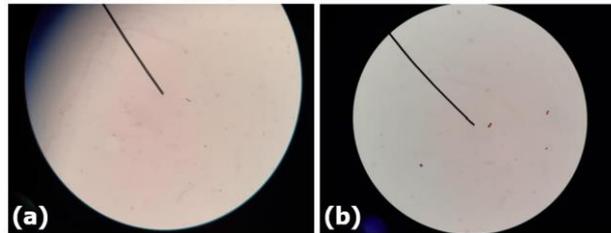
Meskipun beberapa genus bakteri punah ketika terbawa udara, beberapa genus bakteri seperti *Micrococcus* yang teridentifikasi di TPST yang cenderung tumbuh dalam bentuk koloni di habitat aslinya (seperti air, tanah, dan sebagai biofilm) dapat melekat disuatu permukaan biologis ataupun benda mati. Akibatnya, setiap kali bakteri menjadi partikel cair atau padat yang tersuspensi diudara, partikel tersebut sering muncul sebagai mikrokoloni yang melekat pada bahan lain [30] seperti pada substrat kulit makhluk hidup. Sehingga potensi paparan bakteri ini sangat besar ketika makhluk hidup yang terpapar oleh bioaerosol di TPST membawa bakteri ke Gedung Deli (dalam ruangan), menyebabkan bakteri tersebut tumbuh dan berkembang membentuk koloni baru.

Kontaminasi bioaerosol yang sangat tinggi menyebabkan genus yang bisa diidentifikasi berasal dari genus yang mempunyai dinding sel positif. Bakteri yang mempunyai dinding sel positif ini mempunyai endotoksin seperti genus *Bacillus sp* dan *Micrococcus*. Genus tersebut memiliki kemampuan tahan terhadap panas dan stabil secara kimiawi. Bakteri tersebut mempertahankan aktivitas biologisnya setelah sel bakteri tidak lagi dapat hidup. Manusia yang terpapar oleh bakteri yang memiliki dinding sel positif dapat menyebabkan efek toksik akut, termasuk demam, malaise, dan penurunan fungsi paru [29]. Kondisi kualitas fisik dan kimia yang mendukung tumbuh dan berkembangnya bakteri dapat dilihat pada Tabel 4. Tabel 4 tersebut menjelaskan hasil pengukuran kualitas fisik, kimia, dan biologi di TPST.

Tabel 4. Rata-rata kualitas fisik, kimia, dan biologi udara di TPST.

Variabel	TPST		Gedung GKU	Gedung Deli	Standar Kualitas Udara Lingkungan
	Pagi 161 menit	Sore 42 menit	1260 menit	1380 menit	
1. Kualitas Fisik Udara					
T (°C)	26	26	24	26	
RH (%)	99	100	100	95	
PM _{2.5} (µg/m ³)	114	124	17	71	65/24 jam
2. Kualitas Kimia Udara					
CO ₂ (ppm)	594	584	567	515	400-500 ppm/8 jam
3. Kualitas Biologi Udara					
Genus Bakteri	<i>Bacillus Sp</i> dan <i>Micrococcus</i>				

Berdasarkan identifikasi morfologi bakteri genus *Bacillus sp*, sebelum ataupun sesudah pembakaran mempunyai warna abu dan swarming. Meskipun dinyatakan TBUD, genus dinyatakan memiliki pertumbuhan melalui media enrichment dan tidak ada pertumbuhan melalui media differential. Tersangka bakteri gedus *Bacillus sp* ini memiliki beta hemolysis darah dan merupakan bakteri gram positif. Gambar 5 bagian (a) merupakan pewarnaan gram *Bacillus sp*, sedangkan bagian (b) merupakan pewarnaan gram *Micrococcus*. *Micrococcus* merupakan bakteri yang berasal dari gram positif. Morfologi *Micrococcus* sama dengan *Bacillus sp* jika dilihat dari segi morfologi koloni, yaitu berwarna abu dan swarming. *Micrococcus* juga memiliki pertumbuhan melalui media enrichment dan tidak ada pertumbuhan melalui media differential.

Gambar 5. (a) Pewarnaan gram *Bacillus sp* dan (b) *Micrococcus*.

Kondisi lingkungan di TPST pada Tabel 4 tidak menutup kemungkinan bahwa ditempat tersebut melimpah genus bakteri yang mengandung dinding sel negatif. Bakteri lingkungan atau bakteri yang hidup dari bahan organik dan membusuk bisa ditemukan di manapun [24], salah satunya di TPST. Bakteri yang mempunyai dinding sel negatif kemungkinan melimpah di tempat tersebut, karena beberapa bakteri lingkungan adalah patogen oportunistik. Bakteri ini dapat menyerang individu dengan kondisi respon imunologis yang lemah. Misalnya, beberapa spesies dalam genus *Legionella* yang termasuk patogen oportunistik dan beberapa spesies tersebut dapat berbaaur dengan aerosol yang tersuspensi diudara dan menyebabkan penyakit serius pada orang terdampak [25].

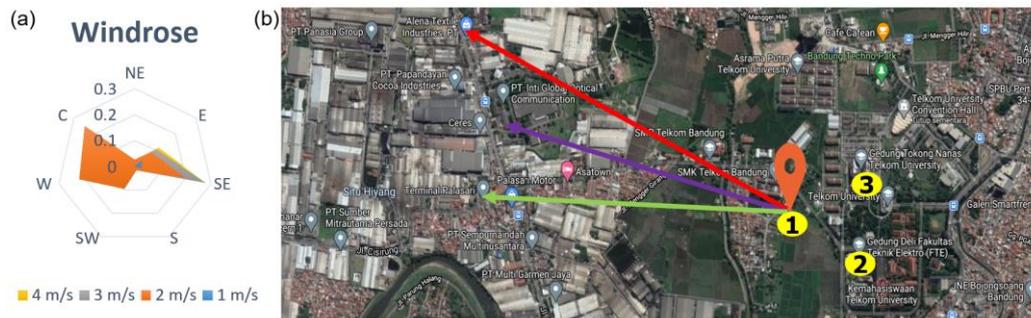
3.4 Potensi Persebaran Bakteri dari Emisi Pembakaran Sampah dan Sekitarnya

Potensi persebaran bioaerosol (bakteri) dari hasil emisi pembakaran PM_{2.5}, besar kemungkinan bisa tersebar di udara bersama bioaerosol yang berasal dari sampah organik yang secara bersamaan berada di TPST. Terlebih lagi, bioaerosol (bakteri) yang berada di permukaan bumi dan biasanya paling melimpah di bagian terendah atmosfer atau lapisan batas planet (PBL). Proses transportasi PBL tersebut akan mempengaruhi penyebaran dan distribusi mikroorganisme, kecepatan evolusi, pembentukan spesies baru, adaptasi komunitas mikroba, dan mengubah kondisi lingkungan [31, 32]. Melalui proses transportasi PBL, bioaerosol (bakteri) berpotensi tersebar ke daerah sekitar TPST melalui polutan udara (PM_{2.5} dan CO₂) dan kondisi udara yang mendukung (pola angin, arah angin, dan kecepatan angin).

3.4.1 Poutan Udara dan Kondisi Udara

Selain tingginya tingkat pencemaran lingkungan di TPST, potensi persebaran bioaerosol (bakteri) juga dapat dilihat dari tingginya konsentrasi PM_{2.5} yang dihasilkan dari emisi sebelum dan sesudah

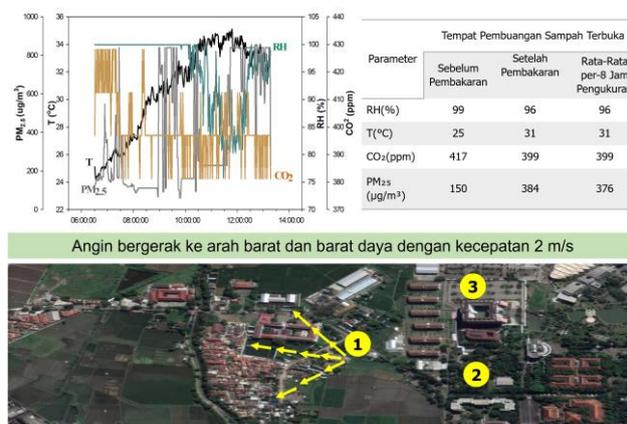
pembakaran sampah. Gambar 6 merupakan kondisi kualitas udara yang terukur di TPST dan kualitas udara pendukung pada 13 Agustus 2020. Terukur rata-rata $PM_{2.5}$ di TPST pada pagi dan sore hari berturut-turut sebesar $86 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dan $124 \mu\text{g}/\text{m}^3$, rata-rata $PM_{2.5}$ di stasiun tetap Gedung GKU dan Gedung Deli berturut-turut $17 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dan $71 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Konsentrasi yang semakin tinggi dari pagi hingga sore hari disebabkan oleh pembakaran emisi sampah secara terus-menerus sehingga menyebabkan polutan tersebar menuju arah barat dan barat daya dengan kecepatan 2 m/s. Pola angin yang mengarah ke barat dan barat daya tersebut mempengaruhi transportasi dan mendorong penyebaran partikel bioaerosol dan polutan lainnya dari emisi pembakaran sampah ke daerah sekitarnya. Berdasarkan *Analysis Forward Trejectory* pada 13 Agustus 2020, polutan dari TPST dapat tersebar hingga keluar pulau. Hal ini menunjukkan bahwa emisi yang dihasilkan dari pembakaran sampah sangat tinggi dan berpotensi tinggi menyebabkan dampak buruk terhadap kesehatan bagi manusia yang terpapar.



Gambar 6. (a) Kecepatan angin pada Agustus 2020; (b) Potensi persebaran emisi pembakaran sampah pada 13 Agustus 2020.

Pengukuran kualitas udara dan faktor meteorologi kemudian dilanjutkan pada 14 November 2020. Hal ini dilakukan untuk melihat potensi persebaran bioaerosol (bakteri) melalui emisi pembakaran sampah dengan waktu pengukuran yang lebih lama yaitu 8 jam pengukuran di TPST. Rata-rata kualitas udara, faktor meteorologi dan grafik pengukuran serta arah pergerakan polutan dapat dilihat pada Gambar 7. Berdasarkan pengukuran, sebelum pembakaran terhitung rata-rata kelembapan relatif 99%, suhu 25°C , gas CO_2 417 ppm, dan $PM_{2.5}$ $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Mengacu pada peraturan Republik Indonesia nomor 41 tahun 1999 mengenai standar mutu udara, batas normal kualitas udara di suatu wilayah untuk $PM_{2.5}$ sebesar $65 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dalam 24 jam, sedangkan $PM_{2.5}$ yang terukur rata-rata dipagi hari (pembakaran skala kecil) melebihi ambang batas.

Hal tersebut menunjukkan bahwa kualitas udara di TPST sangat tercemar dan berpotensi tinggi menyebarkan bioaerosol (bakteri) ke wilayah sekitarnya sehingga potensi tingginya tingkat paparan terhadap kesehatan pernafasan, tidak hanya dialami oleh petugas pembakaran sampah, namun juga manusia yang terpapar di sekitar tempat pembakaran. Manusia yang terpapar bioaerosol (bakteri) secara langsung ataupun tidak langsung (melalui emisi pembakaran) dan memasuki ruangan tertutup, kemungkinan besar menyebabkan tumbuhnya komunitas bakteri di tempat tersebut yang terbawa dari TPST. Kualitas udara semakin tidak terkendali ketika berlangsungnya pembakaran sampah di ruangan terbuka tanpa *insulator*. Data terhitung bahwa $PM_{2.5}$ setelah pembakaran sampah mencapai rata-rata $384 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Tingginya $PM_{2.5}$ akibat pembakaran sampah menyebabkan tingginya potensi persebaran bioaerosol (bakteri) ke arah barat.



Gambar 7. Potensi persebaran emisi pembakaran sampah pada 14 November 2020.

4. Kesimpulan

Telah dilakukan penelitian analisis paparan bioaerosol dan non-biologi menggunakan *Andersen Singler Stage Impactor* dan *Low-Cost Sensor* di Tempat Pembuangan Sampah Terbuka (TPST). Teridentifikasi bahwa faktor penyebab bakteri yang tidak bisa dinyatakan secara kuantitatif di TPST adalah tingginya kontaminasi limbah organik dan limbah antropogenik seperti PM_{2.5}. Hal ini disebabkan oleh kondisi lingkungan yang tercemar akibat genangan limbah sampah, pembakaran sampah secara terus-menerus sehingga polutan PM_{2.5} semakin tinggi menyebabkan potensi persebaran bakteri dan atau polutan menjadi tinggi. Akibatnya, polutan menyebar ke daerah sekitar TPST (berdasarkan arah dan kecepatan angin) sehingga mempengaruhi kualitas udara di dalam ruangan yang berasal dari manusia terdampak di luar ruangan ataupun terbawa melalui udara. Begitupun dengan CO₂, konsentrasi ini menjelaskan adanya proses respirasi pada manusia. Manusia yang terdampak bakteri dan polutan dari TPST akan membantu proses penyebaran bakteri ke dalam ruangan sehingga bakteri akan membentuk koloni baru. Dengan demikian, penting untuk melakukan percobaan pengukuran bioaerosol menggunakan *Andersen Six Stage* untuk mengetahui konsentrasi kuantitatif bakteri di TPST yang berpotensi tinggi menyebarkan bakteri dan memberikan dampak buruk terhadap lingkungan sekitarnya.

5. Referensi :

- [1] R. D. Brook and a. al, "Air Pollution and Cardiovascular Disease: A Statement for Healthcare Professionals From the Expert Panel on Population and Prevention Science of the American Heart Association," *Circulation*, vol. 109, pp. 2655-2671, 2004.
- [2] P. Zannin, A. Ferreira and Szeremetta, "Evaluation of noise pollution in urban parks," *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 118, p. 423-433., 2006.
- [3] W. Selmi and e. al, "Air pollution removal by trees in public green spaces in Strasbourg city, France," *Urban Forestry & Urban Greening*, vol. 17, p. 192-201, 2016.
- [4] Herr and e. al, "Effects of bioaerosol polluted outdoor air on airways of residents: a cross sectional study," *Occup Environ Med*, vol. 60, p. 336-342, 2003.
- [5] S. Matthias Maser and R. Jaenicke, "The size distribution of primary biological aerosol particles with radii >0.2 um in an urban/rural influenced region," *Atmospheric Research*, vol. 39, pp. 279-286, 1995.
- [6] N. Kalogerakis and e. al, "Indoor air quality—Bioaerosol measurements in domestic and office premises," *Journal of Aerosol Science*, vol. 36, p. 751-761, 2005.
- [7] S. Pillai and S. & Ricke, "Review/synthèse bioaerosols from municipal and animal wastes: Background and contemporary issues," *Canadian Journal of Microbiology*, vol. 48, p. 681-696, 2002.
- [8] S. Narulita and et.al, "Geographic Information System (GIS) application on urban forest development in Bandung City," p. 279, 2015.
- [9] A. Odewabi and et.al, "Adenosine deaminase activity and immunoglobulin levels as potential systemic biomarkers of occupational hazards and health status in municipal solid waste management workers," vol. 35 (1), p. 1-12, 2003.
- [10] J. Fröhlich-Nowoisky and e. al, "Bioaerosols in the Earth system: Climate, health, and ecosystem interactions," *Atmospheric Research*, vol. 182, pp. 346-376, 2016.
- [11] J. Dutkiewicz and Lacey, "Bioaerosols And Occupational Lung Disease," p. 25, 1994.
- [12] D. Martuzevicius and e. al, "Correlation of ambient inhalable bioaerosols with particulate matter and ozone: A two-year study," *Environmental Pollution*, vol. 140, pp. 16-28, 2006.
- [13] M. Fisher and e. al, "Emerging fungal threats to animal, plant and ecosystem health," *Nature*, vol. 484, p. 186-194, 2012.
- [14] B. JKM and a. H. MS, "Aerial dispersal of pathogens on the global and continental scales and its impact on plant disease," *Science*, vol. 297, p. 537-541, 2002.
- [15] H. Shidki, *Indoor Air Quality Analysis of Open Offices in Telkom University*, Bandung, 2019.
- [16] M. F. AZIZ, *Horizontal Structure of CO₂, NO₂, and PM_{2.5} Concentration in Dayeuhkolot, The Ggreater Bandung Air Basin*, Bandung: Universitas Telkom, 2019.
- [17] A. H. Firdaus, "Prastudi Pemantauan Bioaerosol di Dalam Ruangan dan Analisisnya," Bandung, 2019.

- [18] R. R. Shania, "Pemantauan Kualitas Udara Dalam Ruang Menggunakan Impaktor di Gedung Deli, Universitas Telkom, Bandung," Bandung, 2020.
- [19] J. M. Marcher, "Microorganisms, Positive-Hole Correction of Multiple-Jet Impactors for Collecting Viable Microorganisms," *American Industrial Hygiene Journal*, vol. 50(11), pp. 561-568, 1989.
- [20] F. Vaicdan, I. Chandra and d. A. Suhendi, "Pengamatan konsentrasi massa PM2.5 di cekungan udara Bandung Raya," *e-Proceeding of Engineering*, vol. 6(1), pp. 1181-1188, 2019.
- [21] R. J. Hodgkinson and et.al, "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*, vol. 186, no. 10.1016/j.snb.2013.06.006, pp. 580-588, 2013.
- [22] P. Dangla and W. Dridi, "Rebar corrosion in carbonated concrete exposed to variable humidity conditions. Interpretation of Tuutti's curve," *Corrosion Science*, vol. 51, p. 1747–1756, 2009.
- [23] T. Reponen, K. Willeke and a. S. Grinsphun, "Biological Partical Sampling," in *Aeosol Measurement: Principles, Techniques, and Applications*, New York, 2001, p. 757.
- [24] T. Reponen, K. Willeke and S. Grinsphun, "Biological partical Sampling," in *Aerosol Measurement*, United States of America, 605 Third Avenue New York, 2001, p. 756.
- [25] K. G. M. Shapiro and I. S. Snyder, "Legionella and the Environmet," *CRC Crit Rev Environ Control*, vol. 17, pp. 133-185, 1987.
- [26] ACGIH, "Bioaerosols: Assesment and Control," 1999.
- [27] T. Reponen, K. Willeke and S. Grinsphun, "Biological Partical Sampling," in *Aerosol Measurement*, United States of America, 605 Third Avenue New York, 2001, p. 764.
- [28] T. Maki and at.al, "Variations in airborne bacterial communities at high altitudes over the Noto Peninsula (Japan) in response to Asian dust events," *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 17, pp. 11877-11897, 2017.
- [29] T. Reponen, K. Willeke and S. Grinsphun, "Biological Particle Sampling," in *Aerosol Measurement*, United States of Maerica, 605 Third Avenue New Yor, 2001, p. 752.
- [30] W. Eduard and D. Heederik, "Methods for Quantitative Assessment of Airborne Levels of Noninfectious Microorganisms in Highly Contaminated Work Environments," *American Industrial Hygiene Association Journal*, vol. 59, p. 113–127, 1998.
- [31] J. Frohlich-Nowoisky and al.at, "Biogeography in the air: fungal diversity over land and oceans," *Biogeosciences*, vol. 9, p. 1125–1136, 2012.
- [32] A. M. Womack, B. J. M. Bohannan and J. L. Green, "Biodiversity and biogeography of the atmosphere," *Center for Ecology and Evolutionary Biology*, vol. 365, p. 3645–3653, 2010.