

ANALISIS KUALITAS UDARA DALAM RUANGAN PADA KANTOR TERBUKA DI UNIVERSITAS TELKOM

INDOOR AIR QUALITY ANALYSIS OF OPEN OFFICES IN TELKOM UNIVERSITY

Hanif Shidki¹, Indra Chandra², Ery Djunaedy³

^{1,2}Program Studi S1 Teknik Fisika, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom

³Pusat Penelitian Kinerja Bangunan dan Kota

hshidki@student.telkomuniversity.ac.id¹, indrachandra@staff.telkomuniversity.ac.id²,
erydjunaedy@gmail.com³

Abstrak

Penelitian dilakukan di empat ruangan kantor terbuka di kawasan Universitas Telkom selama 24 jam untuk parameter non-biologi, serta dua kali pengukuran pada pagi dan siang hari untuk parameter biologi. Alat ukur non-biologi yang digunakan berbasis *low-cost sensor* yaitu sensor $PM_{2.5}$ dan CO_2 , yang dilengkapi dengan sensor temperatur (T) dan kelembapan relatif (RH). Hasil pengukuran menunjukkan bahwa konsentrasi rata-rata 24 jam $PM_{2.5}$ dan 8 jam CO_2 di dalam ruangan adalah $82 \mu g/m^3$ dan 710 ppm pada ruangan A, $86 \mu g/m^3$ dan 1044 ppm pada ruangan B, $85 \mu g/m^3$ dan 1105 ppm pada ruangan C, serta 1259 ppm pada ruangan D. Konsentrasi tersebut telah melebihi baku mutu yang diprasyaratkan ($37,5 \mu g/m^3$ dari SS 554 Singapura atau $35 \mu g/m^3$ dari PerMenKes RI No. 1077 Tahun 2011 untuk partikulat, serta 1000 ppm dari PerMenKes RI No. 48 Tahun 2016 untuk CO_2). Tingginya konsentrasi partikulat (mencapai $72 \mu g/m^3$) dan karbon dioksida (1300-1600 ppm) pada jam kerja, salah satunya disebabkan oleh perancangan ruangan yang tidak memiliki sistem ventilasi. Pertukaran udara yang tidak terkontrol menyebabkan masuknya partikulat dari udara luar ke dalam ruangan, serta menyebabkan penumpukan CO_2 dikarenakan stagnasi udara ruangan. Pada pengukuran mikroorganisme, didapatkan bahwa sebagian besar bakteri yang ada di udara ruangan tersebut adalah *staphylococcus*, *streptococcus*, dan *enterobacteriaceae*, yang secara umum ditemukan pada tubuh manusia. Kondisi udara ruangan seperti temperatur, kelembapan, dan adanya makanan/materi biologi, sangat optimal bagi bakteri-bakteri tersebut untuk berkembang biak. Oleh karenanya, permasalahan kualitas udara dapat diatasi melalui perancangan ataupun renovasi ruangan ber-AC agar memiliki sistem ventilasi yang terfiltrasi serta memberikan sirkulasi udara yang baik di dalam ruangan.

Kata Kunci: Kualitas udara dalam ruangan, $PM_{2.5}$, CO_2 , *Staphylococcus*, *Streptococcus*, *Enterobacteriaceae*.

Abstract

The research was conducted on four open offices in the Telkom University area, measurements for every office are done for 24 hours, and two times (in the morning and the afternoon) for the biological parameters. The non-biological measuring devices used for the research are low-cost based sensors which are $PM_{2.5}$ sensors, CO_2 sensors, and temperature (T) sensors with relative humidity (RH) sensors. The indoor air quality shown from the measurements did not qualify the standards/regulations applicable. Measurements shows that the 24-hour average of $PM_{2.5}$ concentrations and 8-hour average of CO_2 concentrations are $82.3 \mu g/m^3$ and 710 ppm in room A, $86 \mu g/m^3$ and 1044 ppm in room B, $84.5 \mu g/m^3$ and 1105 ppm in room C, 1259 ppm in room D. These concentrations exceed the quality standards required ($37.5 \mu g/m^3$ from Singaporean SS 554 or $65 \mu g/m^3$ from PerMenKes RI No.1077 Year 2011 for particulates, also 1000 ppm from PerMenKes RI No. 48 Year 2016 for CO_2). The high concentrations of particulates (reaching $72 \mu g/m^3$) and carbon dioxide (1300-1600 ppm) in working hours, can be caused by the design of the room which have no ventilation systems. The uncontrolled exchange of air causes the entrance of particulate matters from the outdoor air, and also causes the buildup CO_2 due to the stagnation of air in the room. The measurements of microorganisms shows that the majority of bacterias in the indoor air is of the *staphylococcus*, *streptococcus*, and *enterobacteriaceae* genus, which are commonly found in human bodies. Indoor air conditions which are temperature, humidity, and the presence of food/biological materials, are very optimal for the said bacterias to breed and multiply. This states that condition of the indoor air (temperature, humidity, and presence of biological materials) are

very optimal for said bacterias to multiply. Therefore, the problems of indoor air quality can be solved through designing and/or renovating the air-conditioned rooms to have a ventilations system which gives enough filtered air for the rooms and its inhabitants.

Keywords: *Indoor air quality, PM_{2.5}, CO₂, Staphylococcus, Streptococcus, Enterobacteriaceae.*

1. Pendahuluan

Dewasa ini manusia menghabiskan sebagian besar hidupnya di dalam sebuah ruangan atau bangunan. Melakukan aktivitas demi aktivitas manusia bernapas dan berinteraksi dengan udara yang ada pada lingkungan ruangan dan bangunan tersebut. Seperti halnya udara pada lingkungan luar, udara pada sebuah lingkungan dalam ruangan memiliki komposisi kontaminan juga layaknya udara luar. Secara garis besar, kontaminan-kontaminan tersebut dapat dibagi menjadi dua kategori, yaitu biologis dan non-biologis. Kontaminan biologis meliputi jamur, bakteri, mikroba, hingga virus, sedangkan kontaminan non-biologis terdiri dari *particulate matter* (PM) atau materi partikulat yang dapat dikategorikan lebih lanjut menjadi PM_{2.5}, partikel-partikel yang memiliki diameter tidak lebih dari 2.5 mikrometer, serta karbon dioksida. Maka dari itu, kontaminan-kontaminan tersebut sangat memengaruhi manusia melalui kualitas udara dalam ruangan. [1, 2]

Hingga saat ini, penelitian-penelitian yang telah dilakukan untuk mengetahui kualitas udara dari sebuah ruangan, diperlukan alat yang tidak murah dan tentu membutuhkan tenaga yang tidak sedikit, serta keahlian khusus untuk bisa mengoperasikan, seperti penggunaan *Fluke 975 AirMeter* untuk mengukur karbon dioksida, dan *DustTrak II Aerosol Monitor* untuk mengukur partikulat pada sebuah penelitian tahun 2017. Namun, seiring dengan berkembangnya teknologi, mulai diciptakan metode-metode pengukuran menggunakan alat yang lebih murah, lebih mudah digunakan, serta lebih mudah didapatkan, untuk mendapatkan sebuah gambaran terhadap kualitas udara sebuah ruangan. [3, 4]

Maka dari itu, kualitas udara sebuah ruangan yang selalu berinteraksi dengan manusia, merupakan komponen penting dari bangunan yang sangat berpengaruh terhadap keadaan bangunan dan penghuninya. Ditambah dengan sedikitnya penelitian maupun data yang ada mengenai kualitas udara dalam ruangan di Indonesia, perlu dilakukan penelitian mengenai kualitas udara dalam ruangan, serta potensi sebab dan akibat dari kualitas udara dalam ruangan yang ditemukan

Penelitian ini diduga akan menemukan kualitas udara dalam ruangan yang tidak memenuhi standar dan regulasi yang berlaku secara nasional maupun internasional pada semua parameter yang diukur, dan diduga bahwa hal ini terjadi disebabkan oleh perancangan ruangan yang tidak memadai untuk mencapai kualitas udara yang memenuhi standar.

2. Metodologi Penelitian

2.1. Definisi Kualitas Udara

Kualitas udara dalam ruangan adalah sebuah indikator mengenai baik atau buruknya udara di lingkungan dalam ruangan dan bangunan. Manusia yang menghabiskan mayoritas dari waktunya di dalam sebuah ruangan, menyebabkan kualitas udara dalam ruangan sangat berpengaruh terhadap kesehatan dan kebugaran jasmani dari penghuni ruangan itu sendiri. Melalui aspek-aspek fisis, kimiawi, maupun biologis udara dalam ruangan, kualitas udara dalam ruangan berubah dikarenakan kontaminan-kontaminan yang terkandung pada aspek-aspek tersebut. Definisi maupun baik atau buruknya sebuah kualitas udara dalam ruangan, bervariasi berdasarkan tempat ataupun institusi yang menetapkan. Berdasarkan *American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers* (ASHRAE), kualitas udara dalam ruangan yang baik adalah udara yang tidak mengganggu dan menyakiti penghuni dengan mempertimbangkan tingkat kontaminan udara serta keadaan termal lingkungan [5]. Dalam standar kualitas udara dalam ruangan negara Singapura yaitu SS 554, dijelaskan bahwa kualitas udara dalam ruangan sangatlah penting karena sebagian besar dari masyarakat menghabiskan waktunya di dalam ruangan, serta bahwa kualitas udara dalam ruangan yang baik sangatlah terkait dengan kenyamanan, dan resiko kesehatan yang didapat melalui kontak dan menghirup udara tersebut haruslah rendah. [6]

2.2. Parameter Pengukuran Kualitas Udara Dalam Ruangan

Parameter-parameter kualitas udara dalam ruangan yang diukur, secara garis besar dapat dibagi menjadi dua kategori, yaitu non-biologis dan biologis. Parameter non-biologis terdiri dari temperature (T), kelembapan relatif (RH), partikulat PM_{2.5}, dan CO₂. Temperatur dan kelembapan relatif di udara dalam ruangan adalah dua parameter kualitas udara dalam bangunan yang paling mudah dan paling umum untuk diukur. Kedua parameter ini berpengaruh tidak hanya terhadap kualitas udara, namun juga pada faktor-faktor yang memengaruhi kualitas tersebut, termasuk pergerakan partikel-partikel di udara, hingga laju berkembang biaknya mikroorganisme. Tingginya kedua parameter tersebut di dalam ruangan tidak hanya akan menyebabkan ketidaknyamanan pada penghuni, namun juga akan menimbulkan penyakit-penyakit

seperti *sick building syndrome*, yang timbul dikarenakan ketidak-nyamanan penghuni terhadap keadaan bangunan yang mereka tempati, serta memiliki gejala berupa pusing, sakit tenggorokan, sampai demam [1].

Parameter non-biologis lainnya adalah partikulat. Berasal dari berbagai sumber, dimulai dari emisi kendaraan bermotor, asap hasil kegiatan industri, sampai keadaan alam di sekitar kita sendiri, dengan ukurannya yang mikroskopis, dapat dengan mudah masuk ke dalam tubuh dan menyebabkan gangguan-gangguan kesehatan terutama pada paru-paru dan jantung sehingga menyebabkan gejala batuk, sesak napas, dan asma. Demi kesesuaian dengan metode dan alat pengukuran, maka dalam penelitian ini digunakan PM_{2.5} sebagai parameter kualitas udara di dalam ruangan [7].

Parameter non-biologis yang terakhir adalah karbon dioksida (CO₂). Gas CO₂ merupakan gas yang tidak berbau maupun tidak berwarna, dapat dihasilkan melalui hasil pembakaran dan juga hasil pernapasan. Dalam sebuah ruangan yang tidak ada kegiatan pembakaran, maka sumber utama dari CO₂ adalah penghuni ruangan itu sendiri. Sulitnya CO₂ untuk dideteksi tanpa alat, membuat gas tersebut merupakan salah satu kontaminan yang berbahaya pada udara dalam ruangan, terutama pada tingkat yang tinggi dapat menyebabkan sesak napas [8]. Melalui konsentrasi gas karbon dioksida di udara dalam ruangan, dapat diketahui juga laju pertukaran udara setiap jam atau *air change per hour* (ACH) ruangan yang menyatakan laju bertukarnya udara dalam ruangan dengan udara di luar ruangan. Melalui pengukuran konsentrasi CO₂ ruangan dan dengan mengetahui laju berkurangnya konsentrasi CO₂, dapat diketahui laju pertukaran udara setiap jamnya dikarenakan sifat ruangan yang tidak memiliki ventilasi tetapi memiliki infiltrasi. [8, 9]

Parameter biologis dari kualitas udara ruangan merupakan mikroorganisme yang ada di udara. Makhluk hidup atau organisme-organisme yang berukuran mikroskopis. Di udara dalam ruangan, unsur biologis dari kontaminan yang ada diisi oleh mikroorganisme-mikroorganisme tersebut, yang umumnya terdiri dari jamur (*fungi*) dan bakteri, juga virus. Mikroorganisme yang ada di udara ruangan, dapat berasal dari berbagai sumber, termasuk dari penghuni ruangan itu sendiri. Penghuni pada ruangan tidak hanya manusia, namun dapat juga berarti hewan-hewan atau tumbuh-tumbuhan yang ada di ruangan, dapat membawa mikroorganisme ke udara dalam ruangan secara sengaja maupun tidak.

Adanya mikroorganisme di udara dalam ruangan mengindikasikan bahwa ruangan tersebut adalah lingkungan yang cocok bagi mikroorganisme tersebut untuk tumbuh, baik dari segi temperatur, kelembapan, maupun makanan yang berupa material-material biologis yang ada di ruangan, seperti sisa-sisa makanan ataupun sel kulit mati yang tertinggal di permukaan-permukaan. Umumnya, mikroorganisme yang berada di udara dalam ruangan bersifat mesofil, yang berarti bahwa mikroorganisme tersebut tumbuh optimum pada temperatur 15-55°C. Tubuh manusia pada keadaan normal memiliki temperatur tubuh 37°C, karena hal tersebut, mayoritas patogen-patogen, mikroorganisme yang menyebabkan penyakit, yang menyerang manusia adalah mikroorganisme yang bersifat mesofil. Namun, adanya mikroorganisme pada udara bukan berarti akan secara langsung menyebabkan penyakit kepada penghuni ruangan, kebanyakan mikroorganisme yang kita temukan di udara di dalam ruangan sama dengan yang kita temukan di udara luar, maupun di sekitar tubuh kita, tetapi layaknya parameter-parameter lain, tingkat populasi dari mikroorganisme memiliki nilai ambang batas agar mengurangi kemungkinan pertumbuhannya patogen-patogen di udara tersebut. [10, 11]

2.3. Alat Ukur Berbasis Sensor *Low-Cost*

Demi pengukuran yang mudah dilakukan, portabilitas alat yang tinggi, serta biaya yang relatif rendah, maka penelitian ini menggunakan alat ukur berbasis sensor *low-cost*. Tabel 1 memberikan daftar alat yang akan digunakan oleh penelitian. Pengukuran konsentrasi partikulat didapatkan menggunakan sensor SEN0177 yang menggunakan hamburan laser untuk mendeteksi partikulat yang ada di udara, dan memberikan data dalam bentuk µg/m³ atau jumlah konsentrasi materi partikulat yang ada dalam satu meter kubik udara. Sensor gas berbasis sinar inframerah SEN0219 digunakan sebagai pendeteksi konsentrasi karbon dioksida. Sedangkan temperatur dan kelembapan relatif diukur menggunakan sensor berbasis termistor dan sensor kelembapan kapasitif yaitu DHT22. Sensor-sensor yang digunakan pada penelitian ini dipilih karena kemampuannya dalam mengukur cukup memenuhi kebutuhan sebagai alat pengukuran parameter-parameter kualitas udara dalam ruangan, serta kemudahan mendapatkannya dan biayanya yang relatif rendah.

Tabel 1. Daftar modul-modul yang digunakan dalam penelitian

No.	Nama Alat	Fungsi
1	SEN0177	Sensor pendeteksi partikulat
2	SEN0219	Sensor pendeteksi karbon dioksida
3	DHT22	Sensor suhu dan kelembapan

2.4. Pengukuran Pasif Kontaminan Mikrobiologis

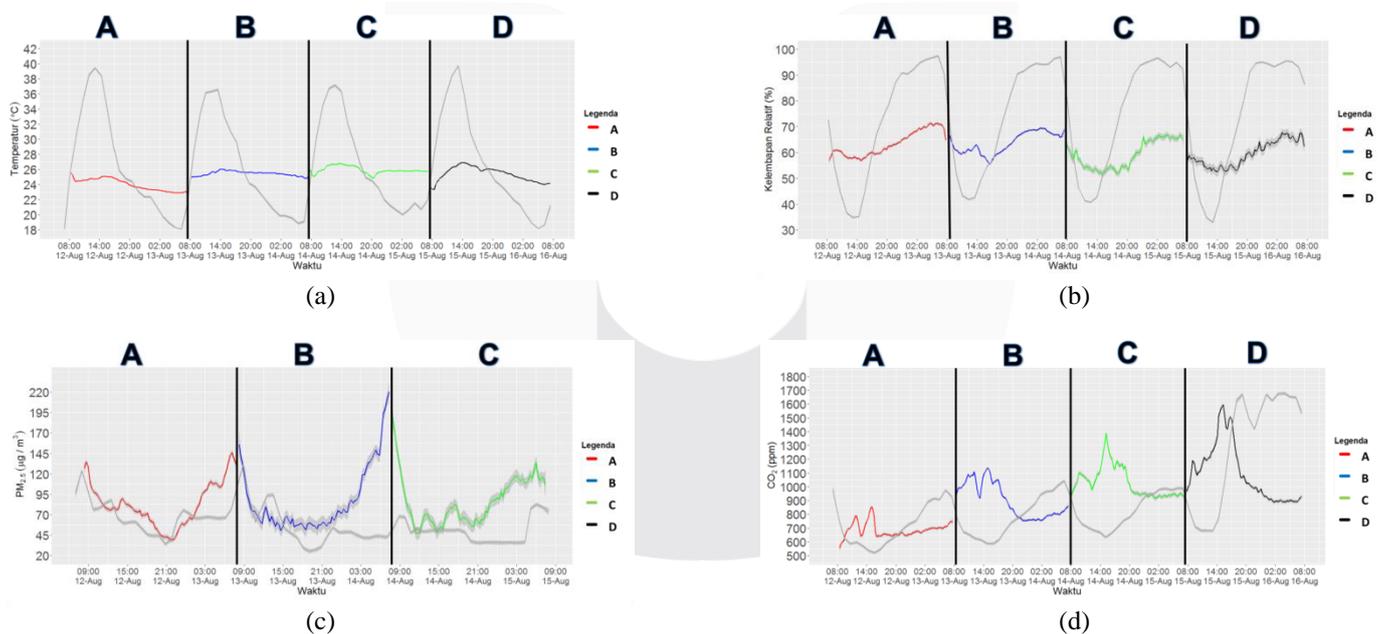
Data kontaminan mikrobiologis yang berupa mikroorganisme di udara didapatkan melalui metode pengukuran pasif yang bergantung pada mikroorganisme yang telah jatuh dan menempel pada media kultivasi. Maka dari itu, metode pengukuran pasif membutuhkan sejumlah waktu demi menangkap atau menampung mikroorganisme yang ada di udara dalam ruangan. Data mikroorganisme lalu direpresentasikan oleh CFU/m²/Jam atau perbandingan antara jumlah koloni yang terbentuk dengan luas area media kultivasi serta durasi terpaparnya media dengan udara ruangan. Metode ini memberikan sebuah hasil kualitatif melalui metode yang mudah dan murah untuk dilakukan, serta mudah disterilisasi, dapat dilakukan secara bersamaan di banyak lokasi, dan tidak mengganggu keadaan dan aliran udara di sekitar lokasi pengambilan sampel. Media kultivasi pada penelitian ini adalah:

1. Trypticase Soy Agar (TSA), yang digunakan untuk kultivasi mikroorganisme heterotropik, mikroorganisme memakan karbon organik.
2. Mac Conkey Agar (MCA), yang digunakan untuk kultivasi, isolasi, dan diferensiasi bakteri koliform dan enterik. Bakteri koliform dan enterik mudah ditemukan di tanah, air, dan tanaman serta usus makhluk hidup.
3. Mannitol Salt Agar (MSA), yang digunakan untuk kultivasi genus *Staphylococcus*, bakteri yang umumnya ditemukan pada kulit dan selaput lendir manusia.
4. Sabouraud Dextrose Agar (SDA), yang digunakan untuk kultivasi jamur dan ragi.
5. Media-media tersebut dapat secara menyeluruh memberikan gambaran mengenai mikroorganisme yang ada di udara dalam ruangan.

3. Pembahasan

3.1 Data Kualitas Udara

Setelah pengukuran dilakukan di setiap ruangan, didapatkan gambaran kualitas udara dari ruangan yang diukur, yang lalu juga dibandingkan dengan kualitas udara di luar untuk mengetahui pengaruh udara luar terhadap udara di dalam ruangan.



Gambar 1. Grafik data kualitas udara dalam ruangan yang diukur.

Grafik-grafik diatas memperlihatkan kualitas udara pada ruangan yang diukur berdasarkan parameter-parameter pengukurannya. Gambar 1 (a) memperlihatkan perubahan temperatur dalam ruangan dan di luar ruangan. Melalui grafik ini, dapat kita lihat bahwa seiring dengan kenaikan temperatur pada udara di luar ruangan, temperatur udara dalam juga mengalami kenaikan temperatur. Hal ini memastikan temperatur udara dalam ruangan dipengaruhi oleh udara di luar ruangan, tetapi, dengan adanya pengondisi udara pada setiap ruangan, menyebabkan kenaikan temperatur yang terjadi tidak terlalu besar pada kisaran $\pm 2^{\circ}\text{C}$. Dari pengukuran juga didapatkan bahwa dari temperatur rata-rata delapan jam, ruangan C memiliki rata-rata $26,3^{\circ}\text{C}$, angka tersebut sudah melewati batas regulasi kualitas udara dalam ruangan di Indonesia yaitu 26°C , namun kelebihan nilai ini dapat diabaikan karena akurasi sensor yang ada pada $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$

Pada Gambar 1 (b), diperlihatkan perubahan kelembapan relatif udara di luar ruangan dan di dalam ruangan, tentu perubahan ini berbanding terbalik dengan perubahan temperatur yang terjadi. Dilihat dari grafik tersebut, kelembapan relatif di dalam ruangan juga berubah seiring dengan perubahan kelembapan relatif di udara luar, tetapi, perubahan yang terjadi tidak terlalu tinggi dikarenakan adanya pengondisi udara pada setiap ruangan. Dari pengukuran juga diketahui bahwa kelembapan relatif rata-rata delapan jam ruangan B adalah 60,4%, yang mengartikan bahwa kelembapan relatif ruangan tersebut sudah melewati batas regulasi kualitas udara dalam ruangan di Indonesia yaitu 60%, namun kelebihan nilai ini dapat diabaikan karena akurasi sensor yang ada pada $\pm 2\%$.

Gambar 1 (c) menggambarkan perubahan konsentrasi $PM_{2,5}$ di udara dan luar ruangan. Pada dua dari tiga ruangan yang diukur, perubahan konsentrasi materi partikulat di dalam ruangan dengan di luar ruangan hanya memiliki sedikit perbedaan. Melalui fenomena ini, dapat disimpulkan bahwa pergerakan konsentrasi dan pengaruh utama konsentrasi $PM_{2,5}$ di ruangan yang diukur berasal adalah konsentrasi pada udara luar. Tetapi, konsentrasi $PM_{2,5}$ di udara dalam ruangan yang lebih tinggi dibandingkan di luar dapat disebabkan oleh penghuni ruangan itu sendiri, melalui aktivitasnya yang menyebabkan terciptanya materi partikulat baru, maupun suspensi kembali dari debu-debu yang telah menetap yang menyebabkan kenaikan pada konsentrasi. Seperti yang telah dibahas sebelumnya, kenaikan pada hari pertama pengukuran (12 Agustus – 13 Agustus) disebabkan oleh kenaikan yang terjadi juga pada konsentrasi $PM_{2,5}$ di udara luar. Namun, hal tersebut belum bisa menjelaskan kenaikan yang terjadi pada pengukuran hari kedua (13 Agustus – 14 Agustus) di mana konsentrasi $PM_{2,5}$ di udara luar tidak naik bersama dengan konsentrasi di udara dalam ruangan. Kenaikan pada pagi hari dapat saja disebabkan oleh aktivitas pembersihan ruangan, tetapi untuk mengetahui sebab pasti dari fenomena ini perlu dilakukan penelitian kembali. Dari pengukuran yang dilakukan didapatkan bahwa rata-rata 24 jam konsentrasi $PM_{2,5}$ adalah $82,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pada ruangan A, $86 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pada ruangan B, dan $84,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pada ruangan C. Nilai-nilai tersebut sudah melebihi standar baku mutu rata-rata konsentrasi harian udara luar yang ditetapkan oleh PP RI No. 41 Tahun 1999 yaitu $65 \mu\text{g}/\text{m}^3$, serta standar konsentrasi untuk udara dalam ruangan yaitu SS 54 pada $37,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. [6, 12]

Pada Gambar 1 (d), digambarkan perubahan konsentrasi karbon dioksida di udara dalam ruangan dan di luar ruangan. Tingginya konsentrasi CO_2 di udara dalam ruangan yang ditemukan dapat mengartikan bahwa laju pertukaran udara yang terjadi pada ruangan tidak cukup memadai untuk mengakomodasikan jumlah penghuni yang ada pada ruangan tersebut sehingga udara ruangan yang stagnan dan memiliki konsentrasi karbon dioksida yang tinggi. Meningkatnya konsentrasi CO_2 terjadi dikarenakan kepadatan penghuni ruangan pada saat itu, ditambah dengan kecilnya laju ventilasi atau pertukaran udara antara udara segar dengan udara dalam ruangan. Kedua hal ini adalah penyebab dari tingginya konsentrasi karbon dioksida, terutama pada jam kerja, dan lalu merendah di luar jam kerja. Hal ini dapat dibuktikan melalui konsentrasi di udara dalam ruangan yang tinggi walaupun konsentrasi di udara luar rendah. Fenomena ini pernah juga terjadi pada sebuah penelitian yang dilakukan pada tahun 2013, mengenai hubungan perubahan konsentrasi karbon dioksida pada sebuah kamar tidur dengan laju aliran udara yang mengalir ke dalam ruangan tersebut. [13]

Tabel 2. Data *air change per hour* setiap ruangan dan asumsi produksi karbondioksida.

Ruangan	Periode	Air Change per Hour	Laju infiltrasi (m^3/menit)	Laju ventilasi yang dibutuhkan (m^3/menit)	Laju produksi CO_2 ruangan (m^3/menit)
A	12:05 – 12:25	0,553	7,26	105,1	20 Penghuni
	15:00 – 16:00	0,296	3,89		0,216
B	15:00 – 16:00	0,142	0,51	28,8	20 Penghuni
	17:05 – 21:00	0,06	0,22		0,324
C	15:10 – 17:00	0,142	2,04	114,7	35 Penghuni
	19:10 – 20:00	0,172	2,47		0,378
D	15:10 – 16:00	0,159	2,28	114,7	30 Penghuni
	16:45 – 19:00	0,03	0,43		0,324

Tabel 2 memberikan data laju ventilasi pada ruangan serta laju ventilasi yang dibutuhkan untuk ruangan. Data ini didapat melalui perhitungan berdasarkan kecepatan penurunan konsentrasi karbon dioksida di dalam ruangan berdasarkan periode pengukurannya. Periode-periode tersebut dipilih melalui konstannya laju perubahan konsentrasi CO_2 pada periode tersebut. Data laju infiltrasi dan laju produksi karbon dioksida mengonfirmasikan kembali bahwa tingginya tingkat karbon dioksida yang ditemukan disebabkan oleh ventilasi yang ada pada ruangan tidak memadai untuk mengakomodasikan ruangan, serta melalui data laju produksi CO_2 ruangan, dapat dilihat bahwa infiltrasi yang terjadi, yang berperan sebagai ventilasi, tidak cukup untuk mengakomodasi laju produksi CO_2 yang terjadi pada ruangan berdasarkan

jumlah penghuni ruangan (pada ruangan C, dan mendekati pada ruangan D). Agar konsentrasi CO₂ dapat menurun, maka ruangan-ruangan perlu memiliki sistem ventilasi udara yang memadai, sehingga dapat menukar udara ruangan yang penuh dengan CO₂ dengan udara segar.



Gambar 3. Konsentrasi mikroorganisme yang terindikasi di ruangan yang diukur

Gambar 3 memperlihatkan konsentrasi mikroorganisme yang pada masing-masing titik pengukuran, dan pada kedua waktu pengukuran. Melalui grafik diatas, dapat dilihat bahwa pada ruangan-ruangan yang memiliki penghuni lebih banyak (A, C, D), mikroorganisme yang ada pada ruangan juga cenderung lebih banyak. Hal ini dapat terjadi dapat disebabkan oleh berbagai sumber, salah satunya adalah lebih banyaknya penghuni dapat berarti juga lebih banyak mikroorganisme yang terbawa ke dalam ruangan maupun dihasilkan di dalam ruangan oleh penghuni. Banyaknya penghuni yang juga dapat diartikan sebagai lebih banyaknya material biologis sebagai makanan mikroorganisme yang ditinggalkan oleh penghuni, dalam bentuk kulit mati maupun makanan penghuni itu sendiri. Melalui metode kultivasi mikroorganisme, bakteri yang ditemukan pada ruangan yaitu genus *staphylococcus*, *streptococcus*, dan *enterobacteriaceae* adalah bakteri-bakteri yang secara umum ditemukan di badan manusia, terutama *staphylococcus* dan *streptococcus* yang umumnya ditemukan pada kulit dan rambut manusia, serta *enterobacteriaceae* yang merupakan bakteri-bakteri yang ditemukan dari usus manusia. Melalui metode-metode pewarnaan (Gram, dan LPCB) serta tes katalase pada media kultivasi, ditemukan juga jamur genus *candida*, yang biasanya ditemukan pada kulit dan usus manusia, dan jamur genus *aspergillus* yang umumnya ditemukan pada vegetasi-vegetasi yang mengurai. Adanya mikroorganisme-mikroorganisme tersebut, belum bisa membuktikan bahwa ruangan-ruangan tersebut memiliki udara yang aman ataupun tidak aman hanya dari mengetahui genus mikroorganisme yang ada, namun dibutuhkan pengukuran dan penelitian lebih lanjut hingga ditemukannya spesies-spesies spesifik dalam kuantitas yang spesifik yang dapat membahayakan penghuni ruangan

3.2 Sebab dan Akibat Potensial Kualitas Udara yang Ditemukan Dalam Ruangan

Melalui analisis dan pembahasan sebelumnya, dapat dilihat bahwa ruangan-ruangan yang diukur gagal memenuhi standar kualitas udara pada faktor konsentrasi PM_{2.5} dan konsentrasi gas karbon dioksida, hal ini terjadi karena desain dari ruangan-ruangan tersebut. Semua ruangan yang diukur dirancang untuk memiliki sebuah sistem pengondisi udara atau sistem AC, namun ruangan-ruangan tersebut tidaklah dirancang untuk mengakomodasi sistem AC tersebut.

Berdasarkan ASHRAE Standard 62.1, standar yang menyatakan dasar-dasar dan standar ventilasi udara sebuah ruangan untuk mencapai kualitas udara yang dapat diterima penghuni, sebuah ruangan yang memiliki pengondisi udara haruslah kedap terhadap infiltrasi atau pertukaran udara antara ruangan dengan udara luar secara tidak terkontrol dan terencana, maupun pertukaran udara lainnya selain melalui sistem ventilasi yang telah dirancang [14].

Oleh karena itu, sebuah ruangan yang memiliki sistem AC juga harus memiliki sistem ventilasi yang dapat mengakomodasi pertukaran udara untuk ruangan tersebut. Fungsi dari sistem AC hanya memberikan pengondisian udara ruangan secara temperatur, dan bukan untuk memberikan udara segar untuk mengakomodasi pernapasan penghuni ruangan. Ruangan-ruangan yang diukur, tidak dirancang untuk memiliki sebuah sistem ventilasi, ditambah dengan adanya faktor-faktor potensial penyebab adanya infiltrasi seperti jendela, pintu yang selalu terbuka, maupun dinding ruangan yang tidak rapat, menyebabkan pertukaran udara yang ada pada ruangan hanya dari infiltrasi-infiltrasi tersebut, dan sangat

tidak memadai sebagai sumber udara segar untuk penghuni ruangan. Hal ini yang menyebabkan konsentrasi $PM_{2.5}$ dan gas karbon dioksida pada ruangan yang diukur dapat lebih besar dari konsentrasi di udara luar.

Maka dari itu, permasalahan tingkat konsentrasi $PM_{2.5}$ dan karbon dioksida yang melebihi standar yang berlaku, dapat diselesaikan dengan merancang ataupun merenovasi ruangan agar memiliki sebuah sistem ventilasi udara, dengan catatan bahwa sistem ventilasi tersebut dapat memberikan suplai udara yang mencukupi untuk ruangan, serta memiliki sistem filtrasi udara yang sesuai dengan standar yang berlaku. Penambahan sistem ventilasi pada ruangan juga mengartikan bahwa ruangan-ruangan harus dirancang dengan tidak memiliki sumber infiltrasi, maka jendela-jendela yang dapat dioperasikan harus ditutup secara permanen, serta pintu ruangan tidaklah bisa dibuka setiap saat, serta sela-sela antar pintu maupun jendela harus diberikan sebuah penghambat agar udara tidak bertukar melalui sela-sela tersebut.

4. Kesimpulan

Di awal penelitian ini, diduga bahwa ruangan-ruangan yang diukur akan memiliki udara yang tidak memenuhi standar maupun regulasi kualitas udara dalam ruangan dikarenakan parameter-parameter yang diukur sudah melewati nilai ambang batas. Tetapi, yang ditemukan adalah bahwa mayoritas dari ruangan masih memenuhi standar pada parameter temperatur dan kelembapan relatif, walaupun nilai-nilai tersebut sangat dekat dengan nilai ambang batas seperti ruangan B yang memiliki rata-rata temperatur 8 jam 25,5°C dan kelembapan relatif 60,4%, dan ruangan-ruangan ini hanya tidak memenuhi standar pada aspek konsentrasi $PM_{2.5}$ yang dibatasi pada 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ oleh US EPA, ataupun 37,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ oleh SS 554, dan juga baku mutu rata-rata konsentrasi harian dalam ruangan rumah di Indonesia yaitu 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ yang ditetapkan oleh PerMenKes RI No. 1077 Tahun 2011, serta 1000 ppm berdasarkan regulasi CO_2 oleh PerMenKes RI No. 48 Tahun 2016

Konsentrasi $PM_{2.5}$ yang terukur sudah melebihi nilai ambang batas dan memasuki kategori tidak sehat untuk yang sensitif pada semua ruangan, 88,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ untuk ruangan A, dan 72 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ untuk ruangan B dan C, dapat diatributkan kepada fakta bahwa ruangan-ruangan yang diukur tidak kedap udara, atau mengalami pertukaran dengan udara luar secara sengaja, melalui jendela yang dibuka atau pintu yang dibuka, maupun secara tidak disengaja, melalui infiltrasi, seperti celah pada dinding, dan sambungan antara jendela dengan dinding. Hal ini menyebabkan konsentrasi materi partikulat di udara ruangan berubah mengikuti dengan perubahan konsentrasi materi partikulat di udara luar, tetapi dengan konsentrasi yang lebih tinggi dikarenakan adanya penghuni yang padat dan banyaknya aktivitas penghuni pada ruangan tersebut.

Konsentrasi karbon dioksida yang juga melebihi nilai ambang batas pada tiga dari empat ruangan yang diukur, yaitu pada ruangan B dengan rata-rata 8 jam 1044 ppm dan memuncak pada 1312 ppm, ruangan C yang memiliki rata-rata 8 jam 1105 ppm dan mencapai 1615 ppm, serta ruangan D yang memiliki rata-rata 8 jam 1259 ppm dan mengalami konsentrasi yang mencapai 1740 ppm pada jam-jam tipikal di mana penghuni ada di dalam ruangan, fenomena ini timbul karena kurangnya pertukaran udara pada ruangan-ruangan yang diukur. Hal ini dapat dibuktikan melalui bertolak belakangnya perubahan antara konsentrasi karbon dioksida di dalam dan di luar ruangan, serta rendahnya nilai ACH atau air change rate per hour yang menyatakan laju pertukaran udara dalam ruangan dengan udara luar. Buruknya ACH tersebut yang lalu memberikan nilai laju udara yang masuk ke dalam ruangan, menjelaskan bahwa ruangan-ruangan yang diukur tidaklah memiliki sistem ventilasi yang memadai. Tidak adanya sistem ventilasi yang memadai menyebabkan pertukaran antara udara dalam ruangan dengan udara segar tidak terjadi dengan baik. Ditambah dengan tingginya jumlah penghuni serta aktivitasnya, menyebabkan tingkat konsentrasi CO_2 di udara dalam ruangan lebih besar dari konsentrasi di udara luar.

Daftar Pustaka:

- [1] A. P. Jones, "Indoor air quality and health," *Atmospheric Environment*, p. 30, 1999.
- [2] J. A. Gilbert and B. Stephens, "Microbiology of the built environment," *Nature Reviews Microbiology*, Aug. 2018, doi: 10.1038/s41579-018-0065-5.
- [3] M. Hussin, M. R. Ismail, and M. S. Ahmad, "Air-conditioned university laboratories: Comparing CO_2 measurement for centralized and split-unit systems," *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, vol. 29, no. 2, pp. 191–201, Apr. 2017, doi: 10.1016/j.jksues.2014.08.005.
- [4] G. Deng et al., "Indoor/outdoor relationship of $PM_{2.5}$ concentration in typical buildings with and without air cleaning in Beijing," *Indoor and Built Environment*, vol. 26, no. 1, pp. 60–68, Jan. 2017, doi: 10.1177/1420326X15604349.
- [5] R. and A.-C. E. American Society of Heating, *ASHRAE Handbook--HVAC Applications (SI Edition)*. Atlanta: ASHRAE, 2015.
- [6] P. Chan, "Indoor Air Quality and the Law in Singapore," *Indoor Air*, vol. 9, no. 4, pp. 290–296, Dec. 1999, doi: 10.1111/j.1600-0668.1999.00009.x.
- [7] O. US EPA, "Particulate Matter (PM) Basics," *US EPA*, 19-Apr-2016. [Online]. Available: <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics>. [Accessed: 24-Oct-2018].
- [8] A. Persily, "Indoor Carbon Dioxide Concentrations in Ventilation and Indoor Air Quality Standards," p. 8.

- [9] K. Nowak, K. Nowak-Dzieszko, and A. Marcinowski, "Analysis of ventilation air exchange rate and indoor air quality in the office room using metabolically generated CO₂ .," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 415, p. 012028, Nov. 2018, doi: 10.1088/1757-899X/415/1/012028.
- [10] *Clinical handbook of air pollution-related diseases*. New York, NY: Springer Berlin Heidelberg, 2018.
- [11] J. M. Willey, L. Sherwood, C. J. Woolverton, and L. M. Prescott, *Prescott, Harley, and Klein's microbiology*, 7th ed. New York: McGraw-Hill Higher Education, 2008.
- [12] "pp41-1999.pdf" .
- [13] P. Batog and M. Badura, "Dynamic of Changes in Carbon Dioxide Concentration in Bedrooms," *Procedia Engineering*, vol. 57, pp. 175–182, 2013, doi: 10.1016/j.proeng.2013.04.025.
- [14] R. L. Hedrick *et al.*, "ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2013," in *ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2013*, .

