

## Pengaturan Sistem *Heating Ventilation and Air Conditioner* (HVAC) untuk Pencegahan Kontaminasi SARS-CoV-2 dalam Ruangan

Gratia Erlinda Tomaso<sup>1</sup>, Wani Devita Gunardi<sup>2</sup>, Ade Dharmawan<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Fakultas Kedokteran dan Ilmu Kesehatan, Universitas Kristen Krida Wacana, Jakarta, Indonesia

<sup>2</sup>Departemen Mikrobiologi, Fakultas Kedokteran dan Ilmu Kesehatan,  
Universitas Kristen Krida Wacana, Jakarta, Indonesia  
Alamat Korespondensi: wani.gunardi@ukrida.ac.id

### Abstrak

Virus SARS-CoV-2 (*Severe Acute Respiratory Syndrome Corona Virus-2*) termasuk dalam kelompok  $\beta$ -*coronavirus* yang merupakan virus RNA sense positif rantai tunggal dengan selubung lipid dan penyakit yang disebabkan disebut *Coronavirus Disease 2019* atau COVID-19. *World Health Organization* (WHO) secara resmi menyatakan wabah COVID-19 sebagai pandemi global dan pemerintah di seluruh dunia mulai menerapkan strategi untuk memperlambat penyebaran infeksi. Penularan SARS-CoV-2 umumnya melalui droplet tetapi penularan secara *airborne* (aerosol) juga mungkin terjadi. Ventilasi merupakan salah satu faktor yang memengaruhi transmisi secara *airborne* sehingga muncul pertanyaan tentang peran sistem *heating, ventilation, and air-conditioning* (HVAC) dalam penyebaran COVID-19 di lingkungan dalam ruangan. Penulis hendak mengkaji sumber-sumber kepustakaan yang tersedia yang membahas tentang kontaminasi udara dan area permukaan di lingkungan dalam ruangan dan pengaturan sistem HVAC dalam mencegah penyebaran SARS-CoV-2. Tulisan ini disusun dengan mengkaji 10 artikel jurnal penelitian yang berasal dari PubMed. Hasil kajian didapatkan bahwa pencegahan kontaminasi SARS-CoV-2 di dalam ruangan dengan sistem HVAC dapat dilakukan dengan meningkatkan laju ventilasi, menghindari sirkulasi udara kembali, menggunakan filter udara, *ultraviolet germicidal irradiation* (UVGI), serta rutin melakukan desinfeksi atau sterilisasi ruangan maupun permukaan.

**Kata Kunci:** HVAC, kontaminasi, lingkungan dalam ruangan, pencegahan, SARS-CoV-2

## *Regulation of the HVAC System for the Prevention of SARS-Cov-2 Contamination in The Indoor Environment*

### Abstract

SARS-CoV-2 (*Severe Acute Respiratory Syndrome Corona Virus-2*) belongs to the  $\beta$ -*coronavirus* group, which is a single-strain positive sense RNA virus with a lipid envelope, and the disease it causes is called the coronavirus disease 2019 or COVID-19. WHO has officially declared the COVID-19 outbreak a global pandemic, and governments around the world are starting to implement strategies to slow the spread of the infection. It is believed that transmission of SARS-CoV-2 by aerosol is also possible. Ventilation is one of the factors that affect airborne transmission, thus raising the questions about the role of the heating, ventilation and air-conditioning (HVAC) system in the spread of COVID-19 in the indoor environment. The aim of this study is to evaluate air and surface areas contamination in the indoor environment and the regulation of the HVAC system to prevent SARS-CoV-2 contamination. Article were searched by PubMed, and 10 articles were included in this study. The result showed that prevention of SARS-CoV-2 contamination in the indoor environment using the HVAC system can be done by increasing the ventilation rate, avoiding air re-circulation, using air filters and ultraviolet germicidal irradiation (UVGI), also routine disinfection or sterilization of rooms and surfaces.

**Keywords:** contamination, HVAC, indoor, prevention, SARS-CoV-2

### How to Cite :

Tomasoa G. E., Gunardi W. D., Dharmawan A. Pengaturan Sistem Heating Ventilation and Air Conditioner (HVAC) untuk Pencegahan Kontaminasi SARS-CoV-2 dalam Ruangan . J Kdokter Meditek, 2022; 28(2), 227–236. Available from: <http://ejournal.ukrida.ac.id/ojs/index.php/Meditek/article/view/2379/version/2477> DOI: <https://doi.org/10.36452/jkdoktermeditek.v28i2.2379>

## Pendahuluan

*Severe Acute Respiratory Syndrome Corona Virus-2 (SARS-Cov-2)* merupakan virus corona jenis baru penyebab Corona Virus Diseases-19 (COVID-19) yang ditemukan pada awal bulan Desember tahun 2019 di Wuhan, Cina.<sup>1,2,3</sup> Virus SARS-CoV-2 termasuk dalam kelompok Beta coronavirus ( $\beta$ -coronavirus), yang merupakan virus *Ribonucleic Acid* (RNA) *sense* positif dengan selubung lipid dari sub genus *sarbecovirus* (Sub famili: *Orthocoronavirinae*).<sup>4</sup> Virus SARS-Cov-2 memiliki tingkat transmisi yang sangat tinggi sehingga dalam waktu singkat COVID-19 telah menjangkit secara global dan dinyatakan sebagai pandemi oleh *World Health Organization* (WHO) pada 11 Maret 2020.<sup>3,5</sup>

Penularan utama atau transmisi SARS-CoV-2 adalah lewat droplet dari saluran pernapasan (saat pasien batuk, bersin, berbicara, dsb.) dan kontak langsung dengan permukaan yang telah terkontaminasi.<sup>2,6</sup> Namun, diyakini bahwa penularan secara *airborne* (aerosol) juga mungkin terjadi, di mana virus terperangkap dalam partikel berukuran  $<5\mu\text{m}$  untuk periode waktu yang panjang dan dapat ditularkan melalui jarak lebih dari 1 meter.<sup>2,6,7</sup> Walaupun transmisi aerosol masih luas diperdebatkan, WHO baru-baru ini mengakui bahwa transmisi aerosol dapat terjadi di lingkungan komunitas yang padat dan tertutup. Hal ini penting mengingat kontaminasi udara di sekitar pasien dengan COVID-19 dan tenaga kesehatan dapat mengandung implikasi serius akan strategi pengendalian wabah.<sup>8,9</sup>

Ventilasi merupakan salah satu faktor paling penting yang memengaruhi transmisi secara *airborne*.<sup>10,11</sup> Beberapa penyakit yang ditularkan melalui udara juga telah dikaitkan dengan sistem HVAC yang berfungsi buruk seperti fungsi kontrol suhu yang tidak tepat, kontrol kelembapan, distribusi udara, dan penyaringan sistem HVAC. Lalu muncul pertanyaan mengenai pengaturan *HVAC system* yang baik sehingga dapat mencegah penyebaran SARS-CoV-2 di lingkungan dalam ruangan baik sebagai faktor pemberat atau pencegah penularan.<sup>10</sup> Oleh karena itu, penulis mengkaji sumber-sumber kepustakaan yang tersedia yang membahas tentang kontaminasi udara dan area permukaan di lingkungan dalam ruangan serta peran sistem HVAC di dalamnya.

## Metodologi

Penulisan ini merupakan studi literatur yang menggunakan jurnal penelitian dan review jurnal. Pencarian literatur melalui internet menggunakan *database* ilmiah yang mendukung pemberian data seputar topik yang diangkat sesuai judul penulisan seperti PubMed. Literatur dicari dengan *keyword* yaitu “*Sars Cov 2*” AND “*Contamination*” AND “*Indoor*” AND “*Prevention*” AND “*HVAC*”. artikel yang memenuhi kriteria inklusi dan eksklusi sebagai berikut: Kriteria Inklusi: Jurnal dengan tema SARS-CoV-2 yang terkait sistem HVAC, dipublikasikan dalam kurun waktu tahun 2020-2021 (satu tahun), Jurnal dalam bahasa Inggris atau bahasa Indonesia, Lingkungan dalam ruangan sebagai lingkungan penelitian, dan Jurnal dalam jenis apa pun yang berhubungan dengan topik. Kriteria Eksklusi, yaitu: Jurnal hanya menampilkan abstrak, Peranan sistem HVAC dalam mencegah kontaminasi SARS-CoV-2 kurang dibahas

## Hasil dan Pembahasan

Transmisi SARS-CoV-2 secara *airborne* mungkin terjadi bila virus terperangkap dalam partikel berukuran  $<5\mu\text{m}$  dalam periode waktu yang panjang dan dapat ditularkan melalui jarak lebih dari 1 m.<sup>2,6,7</sup> Hal tersebut diperkuat dengan sejumlah penelitian yang telah melaporkan keberadaan virus SARS-CoV-2 pada sampel udara.<sup>12-16</sup> Oleh karena itu, pengaturan udara di lingkungan sekitar terutama di lingkungan tertutup sangat penting dalam rangka pencegahan infeksi SARS-Cov-2. Upaya pencegahan atau pengendalian infeksi SARS-Cov-2 yang dapat dilakukan di lingkungan dalam ruangan antara lain sterilisasi atau desinfeksi ruangan, permukaan, dan benda-benda di sekitar, juga manajemen serta kontrol sistem HVAC.<sup>17,18</sup>

Sistem HVAC merupakan sistem yang cocok untuk mengatur suhu dalam ruangan, kelembaban relatif, pola aliran udara dan kualitas udara. Namun, sistem HVAC dapat berubah menjadi penyebab kontaminasi mikroba di ruang tertutup dan memperburuk lingkungan bila desain dan operasi tidak tepat.<sup>19</sup> Meski demikian, hasil studi literatur ini menemukan 10 artikel baik berupa *systematic* atau *literatur review*, dan artikel penelitian yang mengulas bahwa sistem HVAC berperan sebagai sarana pencegahan kontaminasi SARS-CoV-2 apabila diatur dengan baik (Tabel 1).

**Tabel 1. Tindakan Pencegahan Kontaminasi SARS-Cov-2**

Jenis Ruangan	Metode Pencegahan	Referensi
Fasilitas kesehatan	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alat Pelindung Diri (APD) seperti <i>face shield</i>, masker N95</li> <li>• Menambah tingkatan ventilasi gedung</li> <li>• Filtrasi efisiensi tinggi (mis, HEPA filter)</li> <li>• Modifikasi penempatan tempat tidur pasien berdasarkan letak <i>Air Handling Unit</i> (AHU)</li> </ul>	20
Gedung Perkantoran	<i>Heating, Ventilation and Air-Conditioning</i> : Meningkatkan volume udara masuk, mengurangi volume udara balik dari dalam ruangan, jika menggunakan timer atur waktu operasi agar lebih lama dari waktu ruangan terokupasi (jika mungkin 24 jam), pakai <i>portable air purifier</i> bila perlu, suhu 17-28°C dan <i>relative humidity</i> (RH) 40%-60%	
Sekolah	<i>Social distancing</i> , HVAC: meningkatkan laju pertukaran udara/ <i>air change rate</i> , ventilasi natural jika memungkinkan, ventilasi mekanik jika tidak, suhu 17-28°C dan RH 40%-60%	
Museum	<i>Heating, Ventilation and Air-Conditioning</i> : suhu dan <i>relative humidity</i> (RH) terkontrol, peralatan HVAC yang memadai, peningkatan volume udara masuk, filter udara	
Teater	<i>Social distancing</i> HVAC: manajemen laju pertukaran udara dan filter udara, kontrol ventilasi, suhu dan RH, pasokan udara segar atau udara luar teater yang cukup	
Restoran, tempat karaoke, club, live house, gym, dll.	HVAC: kontrol ventilasi, suhu dan RH, pasokan udara luar/segar yang cukup, <i>air purifier</i> jika perlu pada ruangan kecil	21
Fasilitas kesehatan	Mengatur pergerakan udara antara ruangan dengan kebersihan tingkat tinggi, sedang, dan rendah tidak bercampur. Pengaturan sistem HVAC mengikuti <i>HVAC Design Manual for Hospitals and Clinics of ASHRAE</i> . Sterilisasi dengan sinar Ultra Violet (UV) bila diperlukan.	
Fasilitas Lansia	Ventilasi dan pasokan udara segar mengikuti aturan untuk rumah, namun untuk ruangan umum seperti ruang makan mengikuti aturan seperti bar atau tempat karaoke. Mencuci tangan jika kontak langsung tidak terhindarkan	
Rumah	Sistem ventilasi 24 jam dengan laju ventilasi 0,5-0,7 atau lebih per jam, kipas di toilet dan kamar mandi, ventilasi natural disarankan	
Taman, taman ria, dll	<i>Social distancing</i>	
Rumah dan apartemen	Memisahkan individu terinfeksi, membuka pintu dan jendela, gunakan alat <i>portable air-cleaning</i> bila memungkinkan, mencuci tangan, APD	
Fasilitas kesehatan	Peningkatan laju ventilasi dengan modifikasi sistem HVAC kontrol suhu, RH, arah dan distribusi aliran udara, tekanan udara negatif di ruangan isolasi, ventilasi natural, hindari <i>re-circulation</i> udara, alat pembersih dan desinfeksi udara seperti <i>Ultra Violet Germicidal Irradiance</i> (UVGI) atau <i>Germicide Ultraviolet</i> (GUV), dengan sistem “upper-room” atau dipasang pada sistem ventilasi atau <i>Air Conditioner</i> (AC)	22

Jenis Ruangan	Metode Pencegahan	Referensi
Ruangan lain	<i>Physical/social distancing</i> , tingkatkan laju ventilasi	
Rumah sakit ( <i>Intensive Care Unit (ICU)</i> , ruang isolasi, bangsal, dll)	<i>Physical distancing</i> , kebersihan per orang, penggunaan ventilasi (mekanik dan/atau natural), filtrasi udara, desinfeksi/pembersihan rutin sistem ventilasi	23
Ruangan non medis (kamar tidur, kantor, ruang kelas, dll)	<i>Heating, Ventilation and Air-Conditioning</i> : peningkatan pasokan udara segar, ventilasi natural, gunakan filter udara (MERV $\geq$ 13) mis, HEPA filter, pemeriksaan dan pembersihan rutin sistem HVAC, sistem HVAC harus selalu beroperasi saat ruangan terokupasi, suhu 68-74°F (20-23°C) saat musim dingin dan 75-80°F (24-26,5°C) saat musim panas, RH 40%-60%, kipas (dinding, meja, lantai) bila perlu	24
Rumah sakit	Sistem “ <i>three zones and two channels</i> ” di area bangsal, ventilasi tekanan negatif di ruang isolasi dengan 12 atau lebih pertukaran udara per jam, pemantauan kontaminasi udara dan permukaan, kebijakan desinfeksi ketat, kebersihan tangan, penggunaan APD, manajemen pembuangan APD atau sampah medis yang tepat, pasien ruang isolasi untuk memakai tiga lapis masker bedah setiap saat	25
Rumah sakit	Peningkatan aliran udara, penggunaan <i>Local Exhaust Ventilation (LEV)</i>	26
Dalam ruangan (tidak spesifik)	Kurangi polusi udara, sediakan ventilasi adekuat (suplai udara segar dari luar, kurangi sirkulasi udara kembali), perlengkapi sistem ventilasi dengan komponen kontrol infeksi <i>airborne</i> mis, <i>local exhaust</i> , filter udara efisiensi tinggi, GUV; hindari berkerumun di tempat dan kendaraan umum, <i>physical distancing</i> , masker wajah dan pelindung mata, desinfeksi area permukaan, cuci tangan	27
Dalam ruangan (tidak spesifik)	Laju ventilasi yang adekuat, tingkatkan laju pertukaran udara (penyesuaian sistem ventilasi dan gunakan ventilasi natural), penggunaan filter efisiensi tinggi (mis, <i>High Efficiency Particulate Air (HEPA) filter</i> ), UVGI, batasi jumlah orang dalam ruangan atau durasi mereka tinggal dalam ruangan, kontrol rutin sistem HVAC, penggunaan pembersih udara, penggunaan <i>humidifier</i> saat musim dingin	28
Gedung kantor dan tiga tempat pertemuan sosial (bar/restoran, klub malam, tempat pernikahan)	Meningkatkan tingkat sirkulasi udara, meningkatkan peringkat filter <i>Minimum Efficiency Reporting Value (MERV)</i> , meningkatkan fraksi udara luar, dan menerapkan radiasi UVC dan filtrasi dalam ruangan	29

Berdasarkan hasil studi literatur (Tabel 1), langkah pencegahan penyebaran lewat udara oleh SARS-CoV-2 dengan memanfaatkan sistem HVAC dapat dilakukan dengan menyediakan ventilasi yang adekuat (suplai udara segar dari luar, kurangi sirkulasi udara kembali), melengkapi sistem ventilasi dengan komponen kontrol infeksi *airborne* mis, *local exhaust*, filter udara efisiensi tinggi, modifikasi penempatan tempat tidur pasien berdasarkan letak AHU (*Air Handling Unit*), mengatur pergerakan udara antara ruangan dengan

kebersihan tingkat tinggi, sedang, dan rendah tidak bercampur, kontrol suhu, *relative humidity (RH)*, arah dan distribusi aliran udara, mengatur tekanan udara di tiap ruangan, menghindari *re-circulation* udara, menyediakan alat pembersih dan desinfeksi udara (UVGI atau GUV, dengan sistem “*upper-room*” atau dipasang pada sistem ventilasi atau AC), melakukan desinfeksi/pembersihan rutin sistem ventilasi, menggunakan filter udara (MERV  $\geq$  13) atau HEPA filter, melakukan, pemeriksaan dan pembersihan rutin sistem HVAC, peningkatan

aliran atau sirkulasi udara, meningkatkan fraksi udara luar, serta menerapkan radiasi UVC dan filtrasi dalam ruangan.

Cotman dalam studinya untuk mengetahui peran HVAC dalam mencegah kontaminasi SARS-CoV-2 melakukan simulasi pelepasan SARS-CoV-2 di sebuah gedung perkantoran bertingkat dan tiga tempat pertemuan sosial (bar/restoran, klub malam, tempat pernikahan) menggunakan model bangunan multi-zona yang tercampur dengan baik yang serupa dengan yang digunakan oleh Wells-Riley, serta melakukan variasi pengaturan sistem HVAC seperti tingkat sirkulasi udara, peringkat filter MERV, fraksi udara luar, dan melakukan simulasi proteksi sinar UV. Hasil penelitian Cotman menunjukkan bahwa di semua jenis bangunan, meningkatkan sirkulasi udara mengurangi infeksi simulasi dan efeknya terlihat bahkan dengan tingkat emisi aerosol yang rendah. Namun, manfaat meningkatkan fraksi udara luar dan peringkat efisiensi filter paling besar ketika emisi aerosol tinggi. Filtrasi UVC meningkatkan kinerja sistem HVAC biasa. Filtrasi di lingkungan kantor juga mengurangi infeksi secara keseluruhan tetapi bekerja lebih baik ketika ditempatkan di setiap ruangan.<sup>29</sup>

Li et al. (2020) yang melakukan studi pada salah satu rumah sakit rujukan untuk COVID-19 di Cina yang menerapkan pengaturan sistem HVAC di rumah sakit berdasarkan GB50849-2014 “*Code for design of infectious diseases hospital*” yang merupakan standar nasional rancangan rumah sakit untuk penyakit menular di Cina.<sup>25</sup> Sampel diambil satu jam setelah pembersihan permukaan kontak dan lantai yang dilakukan rutin dua kali sehari serta desinfeksi udara dengan *plasma air sterilizer* yang rutin dilakukan empat kali sehari. Total 90 sampel permukaan yang diambil dari 30 lokasi di dalam dan di luar ruang isolasi serta 135 sampel udara dari 45 lokasi. Kecuali dua sampel dari bagian dalam masker seorang pasien kritis COVID-19 dengan hasil positif swab orofaringeal, semua hasil lain sampel permukaan dan sampel udara terbukti negatif dari RNA SARS-CoV-2.<sup>21</sup> Hal ini menunjukkan bahwa prosedur desinfeksi yang dilakukan oleh rumah sakit ini berhasil meniadakan SARS-CoV-2 infeksius dari udara dan permukaan sekitar pasien COVID-19 di ruang isolasi. Metode yang digunakan adalah pembersihan dengan *sodium dichloroisocyanurate* (NaDCC) untuk area permukaan (500 mg/l) dan lantai (1000 mg/l), dan *plasma air sterilizer* untuk desinfeksi udara. *Sodium dichloroisocyanurats* (NaDCC) banyak dikenal sebagai metode desinfeksi air kolam renang dan air minum dalam

kondisi darurat, juga luas digunakan untuk desinfeksi area permukaan dan instrumen kesehatan, juga telah terbukti mampu menonaktifkan virus-virus lain seperti *bacteriophage Phi6* (Ebola surrogate) dan HIV.<sup>25,30</sup> Sementara *plasma air sterilizer* adalah kombinasi dari tindakan sterilisasi seperti plasma, filtrasi, dan medan elektrostatis, yang inti dari fungsinya adalah reaktor plasma, yang menghancurkan membran sel bakteri di bawah aksi medan listrik yang kuat dan secara efektif membunuh mikroorganisme dan aerosol, memiliki keunggulan efisiensi tinggi dalam sterilisasi, penguraian tinggi, konsumsi energi rendah, dan masa pakai yang lama, dapat dioperasikan saat ada orang di sekitar dan tidak terpengaruh oleh pergerakan orang.<sup>31</sup>

Li et al. (2020) juga merekomendasikan langkah-langkah pencegahan seperti penerapan sistem “*three zones and two channels*” di area bangsal dan manajemen pembuangan APD atau sampah medis yang tepat.<sup>25</sup> Peneliti tidak menguraikan lebih lanjut alasan mereka merekomendasikan langkah pencegahan tersebut, namun dapat diambil kesimpulan bahwa sistem “*three zones and two channels*” (zona bersih, zona buffer, zona kontaminasi, jalur dokter, dan jalur pasien) bertujuan agar tidak terjadi kontaminasi dari daerah terkontaminasi (misal bangsal pasien) ke daerah bersih (ruang tunggu pengunjung, area makan, dll), dan meminimalisir area di mana tenaga kesehatan dan pasien berpapasan (selain bangsal, ICU, serta ruang isolasi).

Pengaturan untuk mencegah kontaminasi dari zona terkontaminasi ke zona bersih juga disarankan oleh Hayashi et al. dalam rangkuman mereka tentang upaya melawan COVID-19 sehubungan dengan musim panas di Jepang.<sup>21</sup> Namun, kontaminasi yang dimaksud di sini adalah perpindahan udara yang mengandung polutan atau kontaminan dari tempat dengan kebersihan rendah ke tempat dengan tingkat kebersihan tinggi. Menurut Hayashi et al. (2020) hal ini dapat dilakukan dengan mengatur tekanan per ruangan agar menyesuaikan dengan kebutuhan dan kondisi penghuni ruangan tersebut.<sup>21</sup> Panduan yang diikuti oleh Hayashi et al. (2020) adalah dari *HVAC Design Manual for Hospitals and Clinics of ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers meeting)*, di mana disarankan mengatur tekanan berbeda agar udara bergerak dari ruangan bertekanan positif ke ruangan bertekanan negatif. Ruangan bertekanan positif adalah ruangan-ruangan yang tergolong “bersih” dan ruangan bertekanan negatif adalah ruangan terkontaminasi,

misalnya ruang isolasi pasien terkonfirmasi COVID-19 atau penyakit menular lain yang dapat menular lewat aerosol.<sup>21</sup> Morawska (2020) dan Li et al. (2020) pun setuju dan menyarankan pemberian tekanan negatif pada ruang isolasi.<sup>22,25</sup>

Udara mengalir menjauh dari area atau ruangan dengan tekanan positif (*pressurized*), sedangkan udara mengalir ke area dengan tekanan negatif (*depressurized*). Semua ruangan diatur pada tekanan negatif untuk mencegah mikroorganisme yang terbawa udara di dalam ruangan memasuki lorong dan koridor. Pada fasilitas perawatan kesehatan besar dengan sistem HVAC sentral, jendela tertutup membantu memastikan pengoperasian sistem yang efisien, terutama yang berkaitan dengan pembuatan dan pemeliharaan perbedaan tekanan. Menyegele jendela mencegah masuknya spora jamur lebih lanjut ke dalam unit dari udara luar.<sup>32</sup>

Kendati demikian, banyak penulis dan peneliti yang menyarankan membuka jendela dan pintu sebagai bentuk ventilasi alami agar mendapat udara segar seperti yang disarankan oleh Hayashi et al. (2020), Morawska (2020), Aghalari et al. (2020), Nembhard et al. (2020), Trancossi et al. (2021), dan Azuma et al. (2020).<sup>21-24,27-28</sup> Alasan utama ventilasi alami diperlukan adalah untuk meningkatkan laju ventilasi dan pertukaran udara suatu ruangan atau gedung. Azuma et al. (2020) memaparkan dalam artikel mereka bahwa tiga faktor penting yang berujung pada pembentukan *cluster* COVID-19 adalah 3C: *closed space with poor ventilation* atau ruangan tertutup dengan ventilasi buruk, *crowded spaces with many people* atau tempat penuh sesak dengan banyak orang, dan *close contact* atau kontak dekat.<sup>28</sup> Ruangan tertutup tanpa adanya pasokan udara segar sama sekali merupakan salah satu faktor penyebaran mikroorganisme secara aerosol. Pertukaran udara segar dengan ventilasi alami memberikan akses untuk udara dari luar ke dalam ruangan dan meningkatkan dilusi udara di dalam ruangan dan semua partikel yang melayang-layang di antaranya, mencegah peningkatan konsentrasi partikel-partikel kontaminan di udara. Ventilasi alami dapat berfungsi sebagai penyedia udara segar pada tempat-tempat publik besar dan terhitung sebagai metode yang terjangkau karena yang perlu dilakukan hanya membuka pintu dan jendela. Berhubungan dengan tekanan udara, pada tempat-tempat seperti rumah sakit dimana pasien terinfeksi berada dengan mengatur tekanan positif pada daerah bersih seperti lorong dan tekanan negatif pada daerah terkontaminasi seperti ruang isolasi, agar udara bergerak menjauhi ruangan bertekanan

positif menuju ruangan bertekanan negatif, sehingga polutan atau mikroorganisme apa pun yang masuk dari luar atau mikroorganisme dari pasien sendiri tidak memasuki area bersih dan menyebabkan kontaminasi.<sup>21-24,27,28</sup>

Tentu saja permasalahan lain seperti masuknya udara yang mengandung partikel-partikel berukuran besar seperti *Particulate Matter* (PM) 2.5 atau lebih besar juga patut diperhitungkan, karena dapat berperan sebagai pembawa SARS-CoV-2 di udara dan menjadikannya aerosol.<sup>33</sup> Permasalahan ini kemudian membawa kita kepada solusi yang lebih baik, yaitu peningkatan laju ventilasi dengan memanfaatkan ventilasi mekanik. Hampir semua artikel yang diulas dalam penulisan ini menekankan akan pentingnya laju ventilasi dalam pencegahan penularan SARS-CoV-2 di lingkungan dalam ruangan. Kohanski et al. (2020), Hayashi et al. (2020), Morawska L. (2020), Nembhard et al. (2020), Cotman (2021), dan Azuma et al. (2020) menyarankan bahwa mengatur sistem HVAC agar laju ventilasi udara meningkat adalah cara terbaik menjaga suplai udara bersih dan mencegah menumpuknya partikel virus di udara.<sup>20-22, 24,28,29</sup>

Kohanski et al (2020) menerangkan pentingnya meningkatkan laju ventilasi di rumah sakit, di mana prosedur atau tindakan yang menghasilkan aerosol (mis, bronkoskopi, *Cardiopulmonary Resuscitation* (CPR), ekstubasi dan intubasi, penggunaan nebulizer, dll) banyak dilakukan. Ruangan klinis berbasis rumah sakit memerlukan minimal 6 kali pertukaran udara per jam, dan ruang operasi minimal 15 kali per jam, dengan minimal 3 kali pertukaran udara diantaranya adalah dengan udara dari luar, sedangkan menurut ASHRAE fasilitas kesehatan rawat jalan harus memiliki sekitar 2 kali pertukaran udara per jam.<sup>20</sup> Hayashi et al. (2020) menyebutkan bahwa suspensi partikel di udara merupakan faktor penting dalam penularan aerosol.<sup>21</sup> Menurut mereka, karena droplet berukuran besar bisa menginfeksi orang lain dalam jarak 1-2 meter, adalah hampir tidak mungkin mengontrol penularan jarak dekat dengan sistem HVAC. Namun, yang mungkin dilakukan adalah menyediakan ventilasi terkontrol ke ruang berpenghuni dengan meningkatkan pertukaran udara per jam. Karena konsentrasi partikel dalam ruangan berbanding terbalik dengan laju pertukaran udara, konsentrasi partikel dalam ruangan akan menurun dengan meningkatnya laju pertukaran udara.<sup>21,29</sup> Menurut Hayashi et al. (2020), pada ruangan atau gedung yang seringkali tertutup untuk menjaga suhu ruangan tetap dalam

kondisi nyaman (seperti gedung perkantoran, sekolah, museum, teater bioskop, restoran, tempat karaoke, *club*, *live house*, gym, rumah dan fasilitas lansia), mengamankan laju pertukaran udara dan pasokan udara segar dari luar dengan ventilasi mekanik penting dilakukan.<sup>21</sup> Nembhard et al. (2020) memberikan contoh sistem HVAC di ruang kelas, di mana udara digerakkan empat kali per jam saat sistem berjalan. Dengan asumsi bahwa setengah dari udara terbut adalah udara segar, maka konsentrasi kontaminan udara dapat dikurangi menjadi setengah dalam waktu 15 menit.<sup>24</sup>

Morawska (2020) menjelaskan bahwa walaupun *re-circulation* atau sirkulasi udara ulang merupakan cara untuk menghemat energi, tetapi selama epidemi, termasuk COVID-19, udara tidak boleh disirkulasi kembali karena dapat mengangkut kontaminan udara dari satu ruangan ke ruangan lain yang terhubung ke sistem yang sama dan berpotensi meningkatkan risiko penularan.<sup>22</sup> Bagi AHU sentral, resirkulasi udara harus dihindari, dan jika memungkinkan mengoperasikan sistem dengan 100% udara luar. Hal ini dapat dilakukan dengan menutup damper resirkulasi dan membuka damper udara luar ruangan. Pada ruangan dengan sistem desentralisasi, harus dipastikan bahwa sistem mengakomodasi ventilasi dengan udara luar dan harus selalu digunakan. Sistem lain seperti *split air-conditioning unit* yang tidak mengakomodasi ventilasi dengan udara luar jika memungkinkan harus dimatikan agar mencegah penyebaran virus antar penghuni ruangan. Jika memang diperlukan demi kepentingan pendinginan ruangan, maka sistem tambahan yang mencakup udara luar ruangan seperti membuka jendela secara berkala perlu diterapkan; yang kemudian membawa kita kembali kepada mengapa ventilasi alami patut dipertimbangkan.<sup>22</sup>

Borro et al. (2020) memberikan argumen yang sedikit berbeda. Pada studi mereka, dibuat model peran sistem HVAC dalam penyebaran aerosol yang dihasilkan saat batuk dalam lingkungan tertutup dengan menggunakan *Computational Fluid Dynamics* (CFD), simulasi dilakukan dalam 2 kasus berbeda. Kasus pertama terdiri dari ruang tunggu gawat darurat berukuran 65 m<sup>2</sup>, suhu udara 26°C, dan RH 50%, dengan tiga skenario berbeda, masing-masing adalah tanpa sistem HVAC, sistem HVAC dengan laju aliran udara nominal, dan sistem HVAC dengan laju aliran udara dua kali lebih banyak. Terdapat 4 saluran udara masuk dan 4 saluran udara keluar. Simulasi menyertakan pasangan 6 orang anak (satu anak penyebar, suhu

31°C) dan 6 orang dewasa duduk berlawanan arah dengan jarak 1,70 m satu sama lain. Kasus kedua terdiri dari bangsal anak dengan dua orang anak (suhu badan 31°C) dan salah satunya adalah penyebar, suhu udara 26°C, dan RH 50%, jarak tempat tidur kedua pasien 1,90 m. Terdapat 2 skenario berbeda untuk kasus kedua, skenario pertama dengan keadaan biasa dan skenario kedua dengan penambahan *Local Exhaust Ventilation* (LEV) yang diletakkan tepat di atas pasien penyebar.<sup>26</sup>

Hasil kasus pertama menunjukkan bahwa dengan tidak adanya aliran udara HVAC, udara terkontaminasi dari batuk subjek penyebar hanya mencapai anak di depannya dalam interval waktu 60 detik. Sedangkan, dengan sistem HVAC yang meningkatkan intensitas aliran udara semakin rendah konsentrasi yang memengaruhi anak di depan subjek penyebar dengan persentase pengurangan -99,6%. Namun demikian, peningkatan laju aliran udara HVAC menyebabkan dispersi yang lebih besar dari udara yang terkontaminasi jauh dari subjek penyebar. Selanjutnya, dalam kasus 2 dengan interval waktu 60 detik, kecepatan perambatan udara dan droplet yang terkontaminasi berkurang secara signifikan karena adanya sistem LEV, sehingga udara yang terkontaminasi dan droplet nya terangkut dan dikeluarkan dari ruangan, sehingga menghalangi penyebaran lebih lanjut dan kontaminasi pasien lain.<sup>26</sup> Penggunaan *local exhaust* juga disarankan oleh Trancossi et al. (2021).<sup>27</sup> Perlu digarisbawahi bahwa analisis dengan CFD tidak bisa digeneralisasikan karena bergantung pada banyak faktor lain seperti tata letak ruangan, posisi saluran masuk dan keluar HVAC, posisi orang di dalam ruangan, dan dinamika aktivitas fisik mereka. Namun, CFD tetap bisa digunakan untuk memprediksi risiko infeksi virus di tempat tertutup dengan pengaturan proyek yang disesuaikan dengan setiap ruangan tertentu.

Kohanski et al. (2020) menyarankan untuk mengatur posisi pasien dalam ruangan berdasarkan letak AHU, sehingga dapat memaksimalkan pergerakan partikel udara menjauhi penyedia layanan kesehatan.<sup>20</sup> Kohanski et al. (2020), Hayashi et al. (2020), Morawska (2020), Aghalari et al. (2021), dan Nembhard et al. (2020) setuju bahwa penggunaan filter udara efisiensi tinggi dan pembersih udara atau *air purifier*, khususnya filter udara, berperan penting dalam pencegahan penyebaran SARS-CoV-2.<sup>20-24</sup> Filter dinilai berdasarkan *minimum efficiency reporting value* (MERV), nilai yang menggambarkan tingkat efisiensi filter menyaring udara, dan MERV 13 ke

atas dinilai efisien dalam menangkap virus airborne. Filter yang sering disebut adalah filter HEPA, dengan MERV 16 dan secara teori dapat menyaring setidaknya 99,7% debu, jamur, bakteri, dan partikel airborne apa pun dengan ukuran sampai 0,3  $\mu\text{m}$ . Sistem HVAC sentral biasanya sudah dilengkapi dengan filter, dan dalam kondisi di mana filter tidak ada, pemasangan filter atau *portable air purifier* bisa dilakukan. Dalam situasi di mana resirkulasi udara tidak bisa 100% ditiadakan, Morawska (2020) dan Azuma et al. (2020) merekomendasikan filtrasi dan desinfeksi udara agar risiko infeksi aerosol berkurang, dan perawatan berkala diperlukan untuk menjaga efektivitasnya.<sup>22,28</sup> Kohanski et al. (2020) menulis bahwa pengetahuan akan zona HVAC, seperti ruangan non klinik mana yang terhubung dengan aliran udara dari ruang klinik, dapat membantu bagaimana pendekatan terbaik dan mengoptimalkan filtrasi dan mengurangi risiko sirkulasi aerosol infeksius dalam sistem HVAC.<sup>20</sup> Hayashi et al. (2020) menyarankan agar secara berkala memeriksa *differential pressure* filter dan mengganti filter lebih cepat dari biasanya, sehingga debu yang terkumpul tidak akan melewati filter dan memasuki ruangan.<sup>21</sup>

Selain filter udara, upaya untuk membersihkan udara dengan sinar UV juga bisa dilakukan. Cotman et al. (2021), Hayashi et al. (2020), Morawska (2020), Trancossi et al. (2021), dan Azuma et al. (2020) menyarankan penggunaan UVGI atau GUV<sup>21,22,27-29</sup> yang intinya adalah untuk mengubah sifat asam nukleat dan protein mikroorganisme, dan menghancurkan kemampuan replikasi sehingga mikroorganisme menjadi tidak infeksius. *Upper-room* UVGI dan *in-duct* UVGI adalah contoh aplikasi utama dari desinfeksi udara dengan UVGI. *Upper-room* UVGI menggunakan sinar UV-C pada panjang gelombang mendekati 254 nm untuk membuat bidang iradiasi di atas kepala penghuni ruangan yang mendisinfeksi bakteri dan virus aerosol yang tersuspensi di udara. Karena sinar UV-C berbahaya bagi manusia, sistem ini menggunakan kisi-kisi atau pelindung yang mengaburkan sinar UV dari penglihatan sehingga penghuni ruangan tetap aman.<sup>34</sup> Sedangkan *in-duct* UVGI yang dipasang langsung di sistem HVAC dirancang agar udara yang melewati sistem HVAC didesinfeksi sebelum disirkulasi kembali atau dibuang.<sup>28</sup> *Ultraviolet Germicidal Irradiation* (UVGI) bisa menjadi alternatif pilihan lain jika resirkulasi udara tidak dapat dihindari sepenuhnya demi penghematan energi.

Suhu dan kelembapan relatif (RH) juga dinilai sebagai faktor yang memengaruhi penyebaran dan kelangsungan hidup SARS-CoV-2 di lingkungan. Hayashi et al. (2020) mengusulkan suhu 17-28°C dan RH 40%-70% sebagai suhu dan kelembapan ideal, sesuai yang direkomendasikan dalam *Act on Maintenance of Sanitation in Buildings*.<sup>21</sup> Namun, Hayashi et al. (2020) menekankan jika memungkinkan RH harus dijaga tetap berada di rentang 40%-60%. Suhu dan RH harus selalu dijaga terutama pada tempat-tempat ramai di mana penghuninya menghabiskan banyak waktu di sana seperti gedung perkantoran, sekolah, teater, restoran, dan sebagainya.<sup>21</sup> Sebaliknya, Nembhard et al. (2020) menyarankan suhu 68-74°C atau 20-23°C saat musim dingin dan 75-80°C atau sekitar 24-26,5°C saat musim panas jika sistem pendingin atau pemanas digunakan, sesuai rekomendasi dari ASHRAE.<sup>24</sup> Soal RH Nembhard et al. (2020) setuju dengan Hayashi et al. (2020) dan menyarankan RH dijaga pada kisaran 40%-60%.<sup>24</sup> Morawska (2020) juga menyarankan agar suhu dan RH harus selalu dikontrol, namun tidak memberikan rentang angka.<sup>22</sup> Sedangkan Azuma et al. (2020) menyarankan penggunaan *humidifier* atau pelembap udara saat musim dingin.<sup>28</sup> Hal ini mungkin dikarenakan udara musim dingin yang kering memungkinkan virus bertahan di udara dalam waktu lama karena ukurannya yang kecil.<sup>24</sup>

Hayashi et al. (2020) dan Nembhard et al. (2020) menekankan agar sistem ventilasi harus selalu dinyalakan saat ada orang yang menempati suatu ruangan atau gedung. Bahkan menurut Hayashi et al. (2020) sistem HVAC harus beroperasi 24 jam.<sup>22,24</sup> Bila penggunaan sistem HVAC selama 24 jam tidak memungkinkan, pengatur waktu dapat digunakan atau jika dihidupkan dan dimatikan secara manual maka disarankan untuk menyalakan sistem HVAC beberapa jam sebelum ruangan biasa ditempati dan dimatikan beberapa jam setelah penghuni terakhir meninggalkan ruangan.<sup>21</sup> Sedangkan Azuma et al. (2020) menyarankan agar jumlah orang yang menempati suatu ruangan di saat bersamaan dikurangi atau membatasi durasi seseorang tinggal dalam suatu ruangan untuk mengamankan laju ventilasi yang cukup untuk semua orang.<sup>28</sup>

Selain kebijakan terkait sistem HVAC, sebagai tambahan para penulis juga menyarankan agar tetap mengambil langkah pencegahan umum. Kohanski et al. (2020) menyarankan penggunaan APD seperti *face shield* dan masker N95 terutama untuk petugas kesehatan di rumah sakit yang sering melakukan prosedur yang menghasilkan aerosol.<sup>20</sup> Hayashi et al. (2020) menyarankan melakukan

*social distancing* dan selalu mencuci tangan.<sup>21</sup> Morawska (2020) menyarankan *social/physical distancing*, penggunaan APD, dan jika tinggal bersama harus memisahkan orang yang sakit dari penghuni rumah yang sehat.<sup>25</sup> Aghalari et al. (2021) menyarankan *physical distancing* dan menjaga kebersihan pribadi.<sup>22</sup> Li et al (2020) menyarankan untuk menjaga kebersihan tangan, penggunaan APD, menerapkan manajemen pembuangan APD atau sampah medis yang tepat, hindari berkerumun di tempat umum dan menggunakan kendaraan umum, melakukan *physical distancing*, serta menggunakan masker dan pelindung mata.<sup>25</sup> Trancossi et al. (2021) menyarankan untuk selalu mencuci tangan untuk menghindari penularan lewat kontak langsung dengan permukaan terkontaminasi.<sup>27</sup>

## Simpulan

Kontaminasi SARS-CoV-2 dalam ruangan dan transmisi SARS-CoV-2 secara aerosol dapat terjadi. Pencegahan kontaminasi SARS-CoV-2 dengan memanfaatkan sistem HVAC dapat dilakukan dengan mengatur laju ventilasi dan pertukaran udara per jam, suhu dan kelembapan relatif, menghindari resirkulasi udara, meningkatkan pasokan udara segar, serta menggunakan filter udara.

## Daftar Pustaka

1. Yan Y, Shin WI, Pang YX, Meng Y, Lai J, You C, et al. The first 75 days of novel coronavirus (SARS-CoV-2) outbreak: recent advances, prevention, and treatment. *Int J Environ Res Public Health*. 2020;17(7):2323.
2. Shoaib MH, Ahmed FR, Sikandar M, Yousuf RI, Saleem MT. A journey from SARS-CoV-2 to COVID-19 and beyond: a comprehensive insight of epidemiology, diagnosis, pathogenesis, and overview of the progress into its therapeutic management. *Front Pharmacol*. 2021;12:576448.
3. Hu B, Guo H, Zhou P, Shi ZL. Characteristics of SARS-CoV-2 and COVID-19. *Nat Rev Microbiol*. 2021;19(3):141-54.
4. Zhu N, Zhang D, Wang W, Li X, Yang B, Song J, et al. A novel coronavirus from patients with pneumonia in China, 2019. *N Engl J Med*. 2020;382(8):727-33.
5. Singh R, Kang A, Luo X, Jeyanathan M, Gillgrass A, Afkhami S, et al. COVID-19: current knowledge in clinical features, immunological responses, and vaccine development. *FASEB J*. 2021;35(3):e21409.
6. Anghel L, Popovici CG, Stătescu C, Sascău R, Verdeş M, Ciocan V, et al. Impact of HVAC-systems on the dispersion of infectious aerosols in a cardiac intensive care unit. *Int J Environ Res Public Health*. 2020;17(18):6582.
7. Guo G, Ye L, Pan K, Chen Y, Xing D, Yan K, et al. New insights of emerging SARS-CoV-2: epidemiology, etiology, clinical features, clinical treatment, and prevention. *Front Cell Dev Biol*. 2020;8:410.
8. Birgand G, Peiffer-Smadja N, Fournier S, Kerneis S, Lescure FX, Lucet JC. Assessment of air contamination by SARS-CoV-2 in hospital settings. *JAMA Netw Open*. 2020;3(12):e2033232.
9. WHO Coronavirus (COVID-19) Dashboard | WHO Coronavirus Disease (COVID-19) Dashboard. (n.d.). [cited 2021 Mar 29]. Available from: <https://covid19.who.int/>
10. Wiktorczyk-Kapischke N, Grudlewska-Buda K, Wałęcka-Zacharska E, Kwiecińska-Piróg J, Radtke L, Gospodarek-Komkowska E, et al. SARS-CoV-2 in the environment-non-droplet spreading routes. *Sci Total Environ*. 2021;770:145260.
11. WHO. Roadmap to improve and ensure good indoor ventilation in the context of COVID-19. 2021. [cited 2021 Mar 29]. Available from: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240021280>
12. Chia PY, Coleman KK, Tan YK, Ong SWX, Gum M, Lau SK, et al. Detection of air and surface contamination by SARS-CoV-2 in hospital rooms of infected patients. *Nat Commun*. 2020;11:1-7.
13. Zhou J, Otter JA, Price JR, Cimpeanu C, Garcia DM, Kinross J, et al. Investigating SARS-CoV-2 surface and air contamination in an acute healthcare setting during the peak of the COVID-19 pandemic in London. *Clin Infect Dis*. 2021;73 (1): e1870–7.
14. Guo ZD, Wang ZY, Zhang SF, Li X, Li L, Li C, et al. Aerosol and surface distribution of severe acute respiratory syndrome coronavirus 2 in hospital wards, Wuhan, China, 2020. *Emerg Infect Dis*. 2020;26: 1586-91.
15. Wölfel R, Corman VM, Guggemos W, Seilmaier M, Zange S, Müller MA, et al. Virological assessment of hospitalized patients with COVID-2019. *Nature*. 2020;581: 465-9.
16. Razzini K, Castrica M, Menchetti L, Maggi L, Negroni L, Orfeo N V, et al. SARS-CoV-2 RNA detection in the air and on surfaces in the

- COVID-19 ward of a hospital in Milan, Italy. *Sci Total Environ.* 2020; 742
17. Sharma A, Ahmad Farouk I, Lal SK. COVID-19: a review on the novel coronavirus disease evolution, transmission, detection, control, and prevention. *Viruses.* 2021;13(2):202.
  18. Senatore V, Zarra T, Buonerba A, Choo KH, Hasan SW, Korshin G, et al. Indoor versus outdoor transmission of SARS-COV-2: environmental factors in virus spread and underestimated sources of risk. *EuroMediterr J Environ Integr.* 2021;6(1):30.
  19. Zheng W, Hu J, Wang Z, Li J, Fu Z, Li H, et al. COVID-19 impact on operation and energy consumption of heating, ventilation and air-conditioning (HVAC) systems. *Advances in Applied Energy.* 2021 Aug 25;3: 100040. [cited 2021 Mar 29]. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8166037/>
  20. Kohanski MA, Lo LJ, Waring MS. Review of indoor aerosol generation, transport, and control in the context of COVID-19. *Int Forum Allergy Rhinol.* 2020;10(10):1173-9.
  21. Hayashi M, Yanagi U, Azuma K, Kagi N, Ogata M, Morimoto S, et al. Measures against COVID-19 concerning summer indoor environment in Japan. *Japan Architectural Review.* 2020;10.1002/2475-8876.12183.
  22. Morawska L, Tang JW, Bahnfleth W, Bluysen PM, Boerstra A, Buonanno G, et al. How can airborne transmission of COVID-19 indoors be minimised? *Environment international.* 2020;142:105832.
  23. Aghalari Z, Dahms HU, Sosa-Hernandez JE, Oyervides-Muñoz MA, Parra-Saldívar R. Evaluation of SARS-COV-2 transmission through indoor air in hospitals and prevention methods: a systematic review. *Environ Res.* 2021;195:110841.
  24. Nembhard, MD, Burton DJ, Cohen JM. Ventilation use in nonmedical settings during COVID-19: cleaning protocol, maintenance, and recommendations. *Toxicology and industrial health.* 2020;36(9):644-53.
  25. Li YH, Fan YZ, Jiang L, Wang HB. Aerosol and environmental surface monitoring for SARS-CoV-2 RNA in a designated hospital for severe COVID-19 patients. *Epidemiol Infect.* 2020;148:e154.
  26. Borro L, Mazzei L, Raponi M, Piscitelli P, Miani A, Secinaro A. The role of air conditioning in the diffusion of Sars-CoV-2 in indoor environments: a first computational fluid dynamic model, based on investigations performed at the Vatican State Children's Hospital. *Environ Res.* 2021;193:110343. doi:10.1016/j.envres.2020.110343
  27. Trancossi M, Carli C, Cannistraro G, Pascoa J, Sharma S. Could thermodynamics and heat and mass transfer research produce a fundamental step advance toward and significant reduction of SARS-COV-2 spread? *Int J Heat Mass Transf.* 2021;170:120983.
  28. Azuma K, Yanagi U, Kagi N, Kim H, Ogata M, Hayashi M. Environmental factors involved in SARS-CoV-2 transmission: effect and role of indoor environmental quality in the strategy for COVID-19 infection control. *Environ Health Prev Med.* 2020;25:66.
  29. Cotman ZJ, Bowden MJ, Richter BP, Phelps JH, danDibble CJ. Factors affecting aerosol SARS-CoV-2 transmission via HVAC systems; a modeling study. *PLOS Computational Biology.* 2021. [cited 2021 Mar 29]. Available from: <https://journals.plos.org/ploscompbiol/article?id=10.1371/journal.pcbi.1009474>
  30. Lin Q, Lim JYC, Xue K, Yew PYM, Owh C, Chee PL, et al. Sanitizing agents for virus inactivation and disinfection. *View.* 2020:e16.
  31. Cheng Y, Hu J, Chen H, Wu L, Liao J, Cheng L. Effects of different methods of air disinfection of computed tomography rooms dedicated to COVID-19 cases. *Biomed Res Int.* 2020 Nov 22;2020:5302910.
  32. Air | Background | Environmental Guidelines | Guidelines Library | Infection Control | CDC.(n.d.). [cited 2021 Apr 15]. Available from: <https://www.cdc.gov/infectioncontrol/guidelines/environmental/background/air.html#c3>
  33. Shao L, Ge S, Jones T, Santosh M, Silva LFO, Cao Y, et al. The role of airborne particles and environmental considerations in the transmission of SARS-CoV-2. *Geoscience Frontiers.* 2021:101189.
  34. Beggs CB, Avital EJ. Upper-room ultraviolet air disinfection might help to reduce COVID-19 transmission in buildings: a feasibility study. *PeerJ.* 2020;8:e10196.