

## **BAB II**

### **LANDASAN TEORI**

#### **2.1. Dasar Teori**

Menurut *Environmental Protection Agency (EPA) USA*, *Indoor air quality (IAQ)* adalah hasil interaksi antara tempat, suhu, sistem gedung (baik desain asli maupun modifikasi terhadap struktur dan sistem mekanik), teknik konstruksi, sumber kontaminan (material, peralatan gedung, kelembaban, proses, dan aktifitas di dalam gedung serta sumber lain dari luar) dan pekerja [8]. Menurut idham dalam Ruth, kualitas udara dalam ruangan (*Indoor air quality*) adalah salah satu aspek keilmuan yang memfokuskan pada kualitas atau mutu udara dalam suatu ruang yang akan dimasukkan kedalam ruangan atau gedung yang ditempati oleh manusia [9].

Menurut Kementerian Kesehatan RI tahun 2012, ruang operasi adalah suatu unit khusus di rumah sakit yang berfungsi sebagai tempat untuk melakukan tindakan pembedahan secara elektif maupun akut, yang membutuhkan kondisi steril dan kondisi khusus lainnya. Menurut Kementerian Kesehatan RI 2016, sistem ventilasi di ruang operasi harus tersaring dan terkontrol serta terpisah dari sistem ventilasi lain di rumah sakit untuk kepentingan pengendalian dan pencegahan infeksi. Selain itu, sistem ventilasi harus terpisah antara satu ruangan operasi dengan ruangan operasi lainnya [10].

### 2.2.1. Instalasi HVAC

Pola aliran udara ditentukan berdasarkan desain, jenis, dan tata letak ventilasi udara masuk dan keluar.

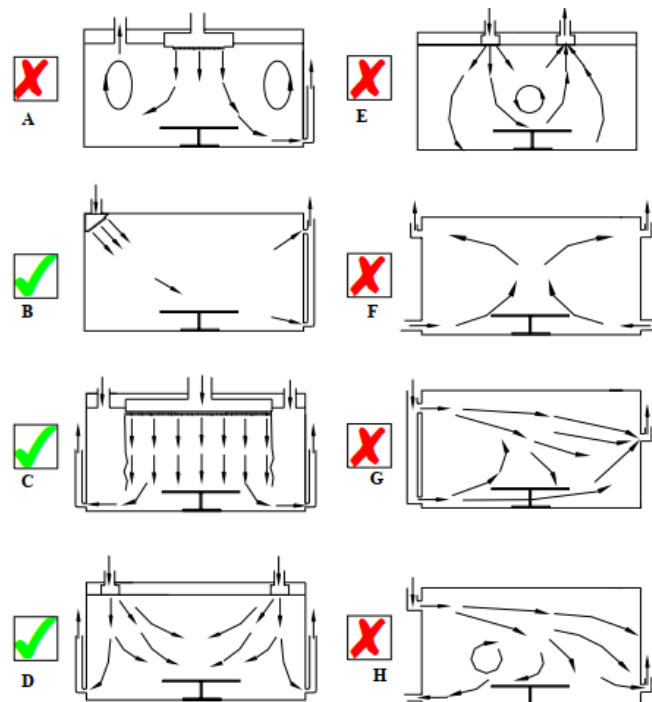
#### a. Ventilasi

Ventilasi berfungsi untuk menyuplai udara bersih dan mengeluarkan udara yang sudah terkontaminasi dengan virus, bakteri, dan mengeluarkan debu. Ventilasi pada ruang operasi berfungsi untuk:

- Menghilangkan gas anestesi, bau yang dikeluarkan selama operasi, yang dapat mengganggu penghuni secara permanen atau sementara,
- Mengurangi konsentrasi bakteri, virus dan debu pada tingkat yang dapat diterima, sehingga udara dalam ruangan memenuhi tingkat aseptik sesuai dengan pedoman kesehatan untuk pasien dan penghuni ruang,
- Memberikan kondisi kerja yang optimal dan nyaman bagi penghuni dan memfasilitasi pekerjaan yang menuntut mereka selama operasi.

HVAC untuk ruang operasi, tidak dianjurkan menggunakan jenis AC konvensional atau jenis AC biasa (seperti AC *split*). Hal ini dikarenakan AC konvensional di desain hanya untuk mengontrol temperatur pada ruangan dan tidak dapat mengontrol kelembaban, tekanan, dan kebersihan [11].

Menurut Kepmenkes RI No 1204/MENKES/SK/X/2004, bahwa pemasangan AC pada ruang operasi minimal tingginya 2 meter dari lantai dan aliran udara bersih yang masuk bergerak dari atas ke bawah [12]. Posisi ventilasi udara keluar (*exhaust*) pada ruang operasi berada di dekat lantai minimal 7,50 cm dari lantai dan disediakan 2 buah *exhaust fan* [12]. Sehingga perlu diperhatikan perancangan dan tata letak dari ventilasi ruang operasi, seperti pada gambar 2.2 tentang ventilasi baik dan buruk berkaitan dengan pola sirkulasi udara yang masuk ke dalam ruang operasi.



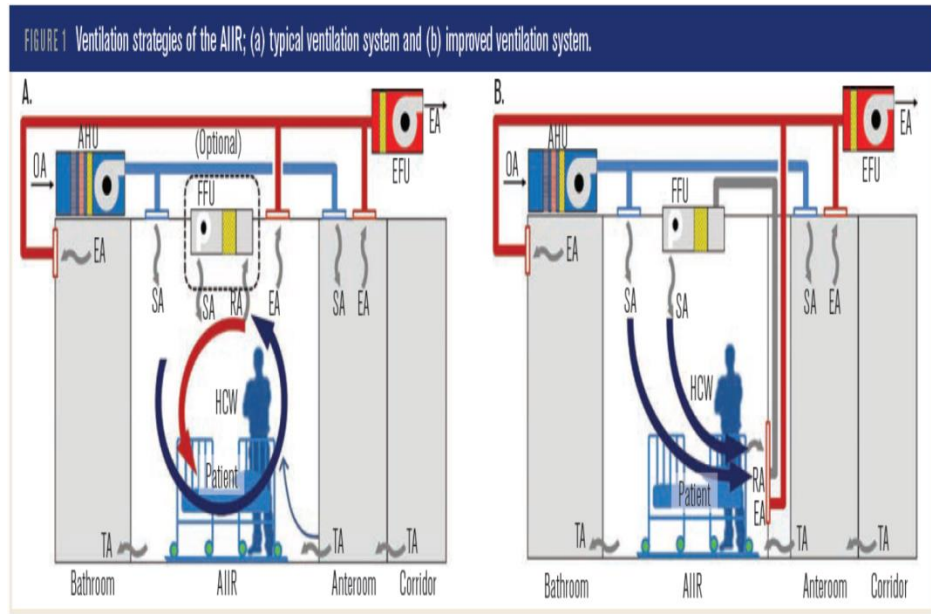
**Gambar 2. 1.** Contoh Ventilasi Baik (Kolom Kiri) dan Buruk (Kolom Kanan) Pola Sirkulasi Udara di Dalam Ruang Operasi <sup>[4]</sup>

Bagian A pada gambar 2.2, untuk kondisi COVID-19 sudah tidak lagi direkomendasikan. Hal ini karena, gambar bagian A, dapat menyebabkan udara terkontaminasi bercampur dengan udara bersih. Sedangkan, untuk gambar bagian F di rekomendasikan untuk kondisi COVID-19. Hal tersebut karena gambar F, mempunyai pola sirkulasi udara yang dapat membawa udara terkontaminasi keluar dari ruangan dan menjaga udara dalam kondisi laminar.

Pada kondisi pandemi (COVID – 19), sistem HVAC perlu dilengkapi dengan [13];

- (a) ***Fresh Air***, dilengkapi dengan Pre Filter (G3/G4 (25 – 35%) atau MERV7) atau dengan Medium filter (F7/F8 (85 – 95%) atau MERV 14/15).
- (b) ***Exhaust Air***, dilengkapi dengan Pre, Medium, dan HEPA Filter di atas ruang operasi (H13/14 (99,97% - 99,997%) atau MERV 20).
- (c) ***Return Air***, dilengkapi dengan HEPA Filter.

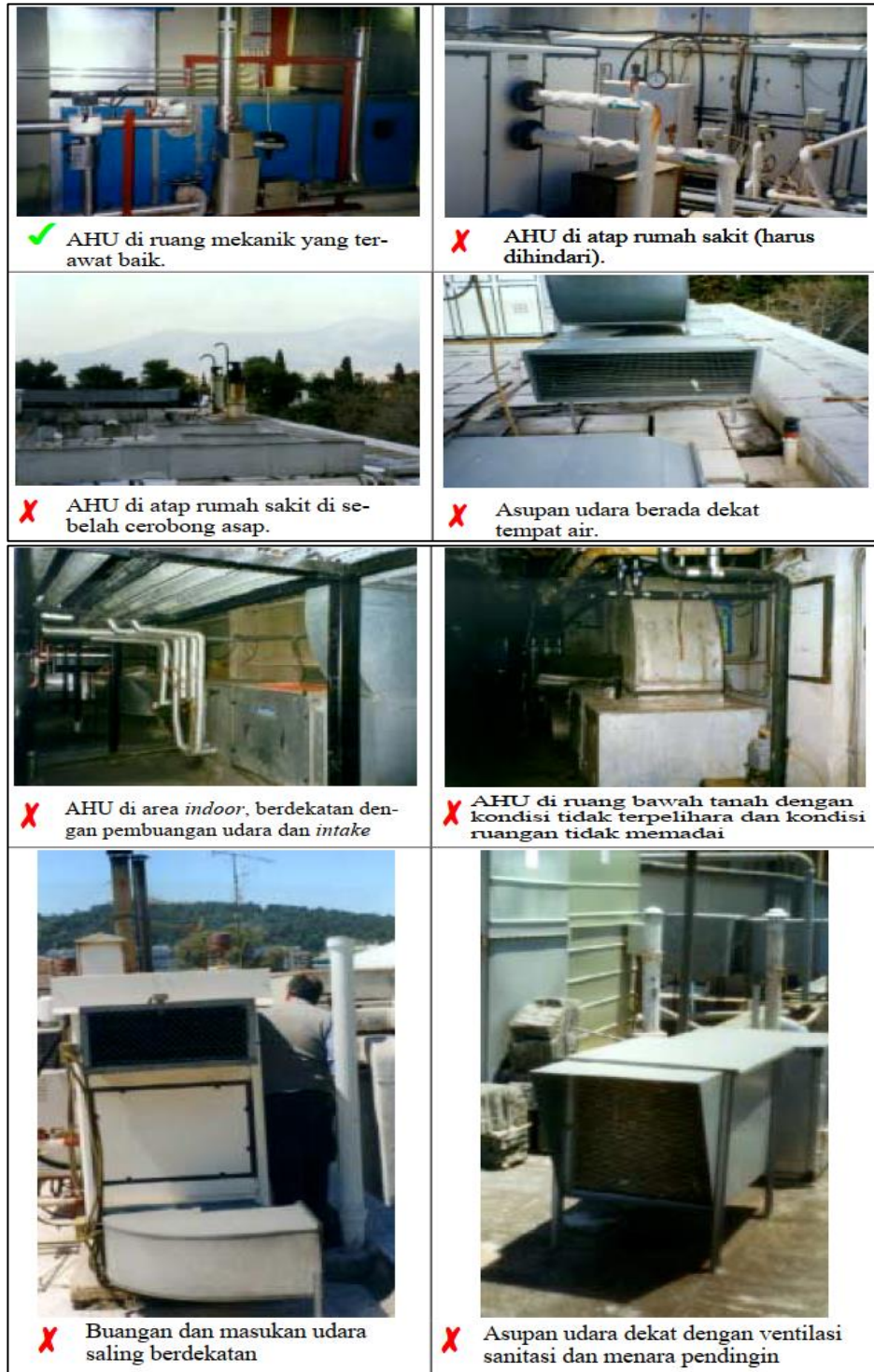
Berikut *improvement* desain untuk ruangan dengan keadaan pandemi.



**Gambar 2. 2.** *Improvement* Desain Ruang Isolasi untuk Pandemi  
(COVID – 19) <sup>[13]</sup>

b. AHU (*Air Handling Unit*)

Dalam sistem HVAC, terdapat sistem tata udara atau AHU. AHU berfungsi menghantar dan mengedarkan udara. AHU untuk ruang operasi, harus diletakkan dekat dengan ruang operasi untuk meminimalkan panjang saluran dalam mendistribusikan udara. Kontaminan udara luar dapat ditransfer ke dalam ruangan, sehingga saluran masuk dan keluar harus ditempatkan dengan benar, untuk meminimalkan kemungkinan pencampuran udara segar dan terkontaminasi. Berikut ilustrasi yang baik dan buruk dalam menempatkan AHU seperti yang ditunjuk pada gambar 2.3.



Gambar 2. 3. Contoh Baik (✓) dan Buruk (✗) Lokasi dari AHU <sup>[4]</sup>

Inlet dari luar harus di tempatkan jauh dari udara buangan atau sumber emisi. Saluran pembuangan udara juga harus ditempatkan minimal 3 meter di atas permukaan tanah dan jauh dari pintu serta jendela.

### 2.2.2. Kadar Gas dan Partikel Debu pada Ruang Operasi

Sumber polutan utama ruangan meliputi fungsi ruangan tersebut, *finishing* terkait kebersihan ruangan, perabotan dan peralatan gedung. Untuk ruang operasi, sumber polutan udara biasanya berasal dari gas anetesi. Anestesi pada umumnya diberikan menggunakan gas atau cairan *votail* yang diuapkan dan dihirup dengan oksigen, udara medis, *nitrous oxide*, atau obat-obatan yang diberikan secara intravena. Gas anestesi dapat memperburuk kesehatan staf medis apabila tidak dikeluarkan. Selain itu, beberapa senyawa aldehida (*formaldehyde* dan *glutaraldehyde*) dan *etilen oksida* yang digunakan untuk disinfektan dan mensterilkan alat operasi bersifat beracun dan menyebabkan iritasi pernapasan. Berikut tabel 2.4 menunjukkan batasan zat kimia pada ruang operasi, menurut Kepmenkes RI No 1204/MENKES/SK/X/2004.

**Tabel 2. 1.** Indeks Kadar Gas dan Bahan Berbahaya dalam Udara Ruang Rumah Sakit <sup>[12]</sup>

No.	Parameter Kimiawi	Rata-rata waktu Pengukuran	Konsentrasi Maksimal sebagai Standar
1	Karbon monoksida (CO)	8 jam	10.000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
2	Karbon dioksida (CO <sub>2</sub> )	8 jam	1 ppm
3	Timbal (Pb)	1 tahun	0,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

No.	Parameter Kimiawi	Rata-rata waktu Pengukuran	Konsentrasi Maksimal sebagai Standar
4	Nitrogen dioksida (NO <sub>2</sub> )	1 jam	200 µg/m <sup>3</sup>
5	Radon (Rn)	--	4 pCi/liter
6	Sufur dioksida (SO <sub>2</sub> )	24 jam	125 µg/m <sup>3</sup>
7	Formaldehida (HCHO)	30 menit	100 g/m <sup>3</sup>
8	Total Senyawa organik yang mudah menguap (TVOC)	--	1 ppm

Karbon monoksida (CO), nitrogen dioksida (NO<sub>2</sub>), dan sulfur dioksida (SO<sub>2</sub>) dapat menyebabkan iritasi mata, iritasi hidung dan iritasi tenggorokan termasuk iritasi selaput lendir. Sumber CO, NO<sub>2</sub>, dan SO<sub>2</sub> dihasilkan dari peralatan pemanasan yang rusak, *printer*, *scanner*, mesin *fax*, dan mesin fotokopi. TVOC dapat menyebabkan sakit kepala, bersin-bersin, pilek, hidung tersumbat, iritasi mata, iritasi hidung, iritasi tenggorokan, iritasi selaput lender, batuk, serak, dan mual. TVOC biasanya dihasilkan dari parfum, karpet, napas manusia, mesin fotokopi, *printer*, pestisida, material bangunan, dan peralatan-peralatan baru [14].

Selain kadar gas, terdapat pula partikel debu yang dapat di temukan pada kandungan udara. Partikel debu atau di sebut sebagai *particulate metter* merupakan campuran partikel debu yang berbentuk cair dan padat. Partikel debu dapat menyebabkan fungsi paru-paru menurun dan bersifat berbahaya jika di hirup manusia. Partikel debu mempunyai beragam ukuran dan yang sering kita temui adalah PM<sub>2.5</sub> (partikel debu ukuran 2,5 mikron atau mirkometer), PM<sub>10</sub> (



berukuran 10 mikron atau micrometer), dan  $PM_{1.0}$  (berukuran 1 mikron atau micrometer).

Menurut Peraturan Pemerintah RI No. 41 tahun 1999 tentang Pengendalian Pencemaran Udara, standar baku mutu untuk  $PM_{2.5}$  yaitu  $65 \mu\text{g}/\text{m}^3$  rata-rata waktu pengukuran 24 jam dan baku mutu untuk  $PM_{10}$  yaitu  $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$  rata-rata waktu pengukuran 24 jam [15]. Menurut standar *World Health Organization* (WHO), batas partikel debu untuk yang berukuran 2.5 mikron (mikrometer) atau yang dikenal dengan istilah  $PM_{2.5}$  yaitu  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  untuk rata-rata pertahun dan  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$  untuk rata-rata 24 jam. Nilai batas dari  $PM_{10}$  yaitu  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  untuk rata-rata pertahun dan  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  untuk rata-rata 24 jam [16].

Gejala-gejala di atas yang disebabkan oleh kadar gas dan partikel debu merupakan gejala-gejala dari SBS (*Sick Building Syndrome*). SBS adalah adalah gejala-gejala yang dirasakan hanya saat berada di dalam gedung. Menurut Kementerian Kesehatan RI edisi tahun 2018 tentang Penyehatan Udara, gejala SBS dikelompokan berdasarkan daerah tubuh atau organ tubuh sebagai berikut [17] :

1. Iritasi selaput lendir, seperti iritasi mata, mata pedih, mata merah, mata berair.
2. Iritasi tenggorokan, seperti sakit menelan, gatal, batuk kering.

3. Gangguan neurotoksik, seperti sakit kepala, lemah/capai, mudah tersinggung, sulit berkonsentrasi.
4. Gangguan paru dan pernapasan, seperti batuk, nafas berbunyi, sesak nafas, rasa berat di dada.
5. Gangguan kulit, seperti kulit kering, kulit gatal.
6. Gangguan saluran cerna, seperti diare.
7. Lain-lain, seperti gangguan perilaku, gangguan saluran kencing, sulit belajar.

*Sick building syndrome* (SBS) dapat dipertimbangkan apabila 20 – 50% pengguna gedung mengalami gejala-gejala di atas [18].

### 2.2.3. Standar pada Ruang Operasi

Standar dalam merawat ruang operasi tetap pada kondisi aseptik, untuk Indonesia standar ruang operasi didasarkan pada Kepmenkes RI No 1204/MENKES/SK/X/2004, tentang persyaratan kesehatan lingkungan rumah sakit.

**Tabel 2. 2.** Kepmenkes RI No 1204/MENKES/SK/X/2004 tentang Ruang Operasi<sup>[12]</sup>

Parameter	Keterangan
Intensitas Cahaya (lux) <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ruang operasi Umum</li> <li>• Meja Operasi</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 300 – 500</li> <li>• 10.000 – 20.000</li> </ul>
suhu ( <sup>0</sup> C)	19 - 24
Kelembaban (%)	45 - 60
Tekanan	Positif

Menurut Peraturan Menteri Kesehatan RI No 24 tahun 2016, ruangan operasi terdiri dari 3 jenis ruangan yaitu ruangan operasi mayor, ruangan operasi umum, dan ruangan operasi minor. Ruang operasi mayor memiliki luas minimal  $50 \text{ m}^2$ , dengan panjang x lebar x tinggi adalah  $7,2\text{m} \times 7\text{m} \times 3\text{m}$ . Ruang operasi umum memiliki luas minimal  $42 \text{ m}^2$  dengan ukuran panjang x lebar x tinggi adalah  $7\text{m} \times 6\text{m} \times 3\text{m}$  [10]. Ruang operasi minor memiliki luas kurang lebih  $36 \text{ m}^2$ , dengan ukuran panjang x lebar x tinggi adalah  $6\text{m} \times 6\text{m} \times 3\text{m}$  [10].

Ruangan operasi mayor atau bedah mayor adalah ruangan untuk pembedahan yang relatif sulit dari pada bedah minor dan membutuhkan waktu lama, serta beresiko terhadap nyawa pasien. Bedah mayor membutuhkan bantuan asisten seperti bedah sesar, mammektomi, bedah otak, dan bedah torak. Ruang operasi minor adalah ruangan yang pembedahannya relative *simple* dan tidak memiliki resiko terhadap nyawa pasien, contohnya seperti pembersian luka, membuka abses superfisial, inokulasi, superfisial neuroktomi dan tenotomi [19].

## **2.2. Tinjauan Pustaka**

Berdasarkan studi-studi sebelumnya yang meneliti tentang banyaknya faktor yang mempengaruhi kualitas udara dalam ruangan operasi, dengan hasil-hasil yang sudah dipublikasikan sebagai berikut.

Sebuah studi menunjukkan bahwa jenis HVAC dapat mempengaruhi aliran udara dalam ruang operasi. Sistem AC sentral menunjukkan tekanan udara yang laminar dan tidak ada kontaminan yang masuk, jika dibandingkan dengan jenis

HVAC *ducted split unit* dan *package unit* yang menyebabkan aliran udara ruang operasi turbulen [5]. Sebuah studi meneliti bahwa sistem AC sentral menunjukkan rasio tingkat polutan jamur di dalam dan di luar ruangan rumah sakit lebih rendah dari pada tipe AC Split, serta rasio tingkatan jamur berada di bawah 0,5, seperti pada tabel.2.1. sebagai berikut.

**Tabel 2. 3.** Rasio Polutan Udara di Dalam dan Luar Gedung dengan Sistem AC yang Berbeda <sup>[20]</sup>

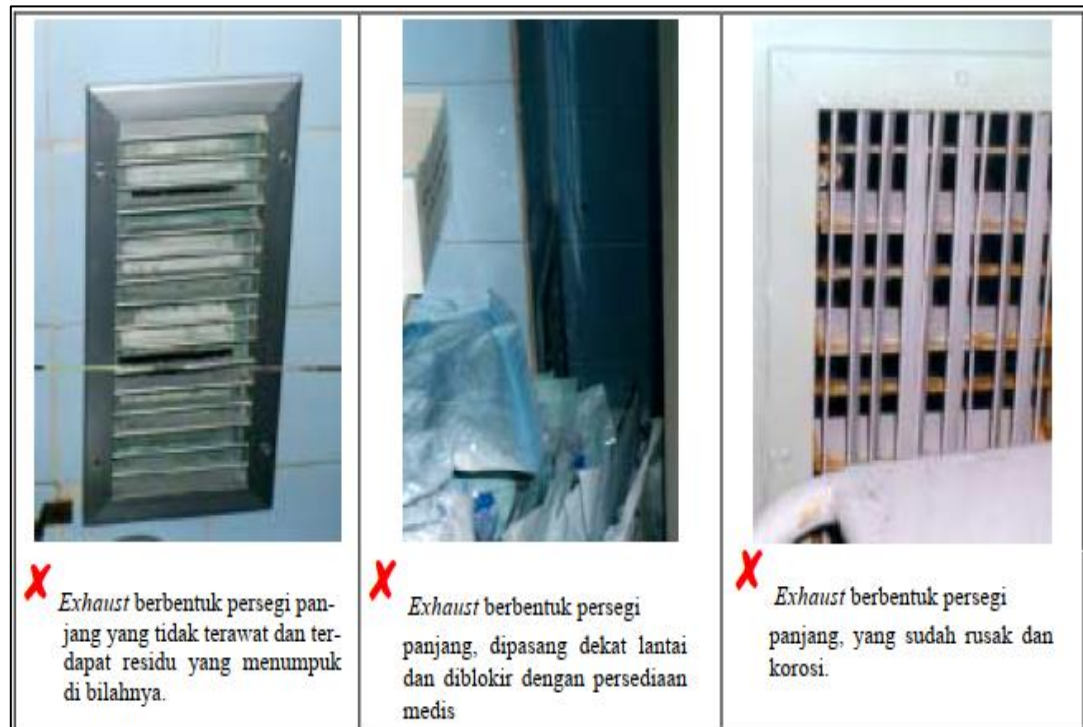
	AHU + FCU	AHU	FCU	<i>Window and signal split type</i>
CO	1,68	1,43	1,75	2,30
PM <sub>2.5</sub>	0,71	0,71	0,75	0,87
PM <sub>10</sub>	0,55	0,58	0,76	0,91
Fungi	0,57	0,69	0,36	1,48

Perancangan sistem HVAC di ruang operasi sangat berpengaruh dalam mengurangi partikel bakteri. Sistem HVAC yang didesain pada atas atap yang berdekatan dengan *exhaust* dapat memberikan aliran udara turbulen dan menyebabkan udara masuk bercampur dengan udara keluar [5]. Sebuah studi menyatakan bahwa sistem HVAC yang dirancang dengan udara laminar lebih baik dalam mengurangi patogen dan partikel dari pada sistem HVAC aliran udara campuran turbulen konvensional. Rancangan sistem HVAC aliran udara laminar (perpindahan turbulensi rendah) telah lama digunakan pada tahun 2000 untuk menciptakan zona bersih di ruang operasi. Aliran udara laminar, akan memberikan waktu pemulihan kurang dari 2 menit karena aliran udaranya terarah. Sedangkan,

aliran udara campuran turbulen membutuhkan pemulihan lebih banyak dari 20 menit [21].

Berdasarkan studi, bahwa ada dua peraturan untuk saluran keluar udara yang ada di ruang operasi. Posisi satunya berada di dekat lantai dengan tujuan menghilangkan berbagai gas anestesi yang dilepaskan di udara. Posisi kedua diletakkan tinggi di dinding untuk menghilangkan bakteri atau mikroorganisme yang terbawa udara. Gambar 2.1 menunjukkan ilustrasi representatif dari berbagai jenis saluran pembuangan udara.





**Gambar 2. 4.** Contoh Buruk (✘) dan Baik (✓) pada Saluran Buangan Udara <sup>[4]</sup>

Selain dipengaruhi desain dan jenis HVAC, kejadian infeksi dipengaruhi oleh sumber infeksi itu sendiri. Sebuah penelitian dari Elena dan Argyro, menunjukkan bahwa sumber infeksi pada ruang operasi berasal dari *anaesthetic compounds (isoflurane and sevoflurane)*, *aromatic compounds*, *formaldehyde and glutaraldehyde*, *other aldehydes*, *oxides*, *alcohols*, dan lainnya. Hal tersebut, ditunjukkan pada tabel 2.2 tentang konsentrasi rata-rata senyawa organik yang mudah menguap di udara dalam ruangan operasi yang diaudit.

**Tabel 2. 4.** Konsentrasi Rata-Rata Senyawa Organik yang Mudah Menguap di Udara dalam Ruang Operasi yang Diaudit <sup>[6]</sup>

<i>Group of compounds</i>	<i>Concentrations (µg/m<sup>3</sup>)</i>		
	<i>Average</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>
<i>Anaesthetic compounds (isoflurane and sevoflurane)</i>	2362	- <sup>a</sup>	9652
<i>Aromatic compounds</i>	239	21	564
<i>Formaldehyde and glutaraldehyde</i>	495	- <sup>a</sup>	1425
<i>Other aldehyde, oxide, alcohols</i>	1920	107	5268
<i>Other</i>	3846	31	41.255
<i>Total votail organic compounds (TVOC)</i>	8862	279	46.904

Konsentrasi rata-rata senyawa anestesi adalah 2362 µg/m<sup>3</sup> (0,3 ppm), dimana parameter yang menentukan antara lain jenis peralatan dan bahan anestesi, prosedur pembersihan ruangan, pengoperasian sistem ventilasi seperti laju aliran udara. Untuk disinfektan konsentrai rata-ratanya adalah 495 µg/m<sup>3</sup>, terdiri dari formaldehida dengan konsentrasi rata-rata adalah 288 µg/m<sup>3</sup> dan konsentrasi rata-rata glutaraldehyda adalah 207 µg/m<sup>3</sup>. Zat lain juga teridentifikasi di udara ruang operasi seperti seyawa aromatic (benzena, toluena, xilena, etilbenzena, dan dimentilbenzena), sebagian besar aldehida, oksida, alkohol, dan alkane. Selain itu, terdapat juga senyawa lain seperti TVOC dengan konsentrasi senyawa mencapai 54% di udara dalam ruangan operasi.

Senyawa kimia seperti gas anestesi dan desinfektan berpengaruh buruk terhadap staf medis, seperti yang ditunjukkan pada penelitian oleh Wawan Supra, yang dijabarkan pada table 2.3 sebagai berikut.

**Tabel 2. 5.** Tabulasi Silang Keluhan Kesehatan Berupa Kulit Kering dan Kulit Gatal Menurut Kualitas Udara Instalasi Kamar Operasi RS Mata Undaan Bulan Desember 2015 <sup>[22]</sup>

Lokasi	Angka Kuman Udara	Mengalami Kulit Kering				Mengalami Kulit Gatal			
		Ya		Tidak		Ya		Tidak	
		n	%	n	%	n	%	n	%
Angka Kuman Udara									
Kamar Operasi 1	Belum memenuhi baku mutu (12 CFU/m <sup>3</sup> )	6	46,2	4	57,1	4	57,1	6	46,2
Kamar Operasi 4	Belum memenuhi baku mutu (16 CFU/m <sup>3</sup> )	7	53,8	3	42,9	3	42,9	7	53,8
Suhu Udara									
Kamar Operasi 1	Memenuhi baku mutu (22,45 °C)	6	46,2	4	57,1	4	57,1	6	46,2
Kamar Operasi 4	Memenuhi baku mutu (23,2 °C)	7	53,8	3	42,9	3	42,9	7	53,8

Percobaan oleh Wawan Supra, menunjukkan bahwa angka kuman udara oleh senyawa kimia dalam ruang operasi belum memenuhi baku mutu Kepmenkes No 1204/Menkes/SK/X/2004 tentang persyaratan kesehatan lingkungan rumah sakit [12].

Selain zat-zat kimia, udara juga mengandung partikel debu seperti PM<sub>2,5</sub>, PM<sub>10</sub>, dan PM<sub>1,0</sub>. Berdasarkan sebuah penelitian, menyatakan bahwa rata-rata konsentrasi PM<sub>2,5</sub>, PM<sub>10</sub>, dan PM<sub>1,0</sub> lebih tinggi dibandingkan dengan di luar ruangan. Penelitian



oleh Radha Goyal ini di lakukan pada ruang kelas di salah satu sekolah di India yang menggunakan ventilasi alami [23].