

Perancangan Sistem Tata Udara Dan Simulasi Pola Aliran Udara Di Ruang Operasi Pada Rumah Sakit Menggunakan Program Flovent 8.2

Budihardjo^[1], R. Haryo Wibhisono^[2]

Departemen Teknik Mesin Universitas Indonesia

[1] Staff Pengajar, Departemen Teknik Mesin Universitas Indonesia Kampus UI Depok 16424, Indonesia.

[2] Mahasiswa, Departemen Teknik Mesin Universitas Indonesia Kampus UI Depok 16424, Indonesia.

E-mail:

bbutje@gmail.com

haryo.wibhisono@gmail.com

Abstrak

Ruang Operasi merupakan ruangan yang harus berada dalam kondisi steril, hal ini dikarenakan pada proses operasi pasien rentan untuk terinfeksi kuman-kuman yang berada di udara. Telah dilakukan pengambilan data pada ruang operasi di sebuah rumah sakit di Jakarta. Dari data yang diperoleh, masih terdapat beberapa parameter yang belum memenuhi standar, seperti kelembaban, dan jumlah partikel yang terdapat di dalam ruangan. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mendisain ulang sistem tata udara di ruang operasi dengan berbasis standar ASHRAE, dan Menteri Kesehatan. Hasil dari disain ulang sistem tata udara ini kemudian akan disimulasikan dengan program FloVENT 8.2, dan akan dibandingkan hasilnya dengan hasil simulasi keadaan aktual ruang operasi. Dari hasil simulasi dapat terlihat perbedaan pola aliran udara antara ruang operasi dengan keadaan aktual dan ruang operasi hasil perancangan. Perbedaan pola aliran udara ini terletak pada aliran turbulensi pada ruang operasi dengan keadaan aktual yang hanya mempunyai dua bagian pembuangan. Pada ruang operasi hasil perancangan baru terlihat bahwa aliran udara di sekitar meja operasi laminar, dan membuat partikel langsung terhisap ke bagian pembuangan udara.

Kata kunci : FloVENT 8.2, Kualitas Udara, Partikel Aerosol, Pola Aliran Udara, Ruang Operasi, Sistem tata udara.

1. Pendahuluan

Ruang operasi merupakan salah satu ruangan di rumah sakit yang harus dalam kondisi steril, dan mengikuti standar cleanroom pada ISO 14644. Terdapat beberapa tingkatan kelas pada standar ISO 14644, tingkatan ini tergantung dari jumlah partikel yang terdapat pada ruangan tersebut. Semakin sedikit jumlah partikelnya, maka semakin steril ruangan tersebut. Untuk menjaga jumlah partikel, diperlukan adanya distribusi aliran udara yang diatur sedemikian rupa sehingga aliran udara tersebut dapat menyapu partikel-partikel berukuran kecil ke arah pembuangan udara, sehingga udara yang terdapat di atas meja operasi menjadi steril.

Arah distribusi udara ini tergantung pada penempatan dan spesifikasi dari perlengkapan mesin pendingin yang digunakan. Perancangan ruang operasi harus sesuai dengan standar ASHRAE dan standar dari Menteri Kesehatan. Hal ini dikarenakan kondisi-kondisi aliran udara yang berada dalam ruang operasi akan mempengaruhi persebaran partikel yang berada dalam ruang operasi.

Oleh karena itu pada penelitian ini dilakukan perancangan ulang sistem tata udara pada ruang operasi menggunakan standar-standar yang berlaku. Setelah itu dilakukan simulasi untuk melihat pola aliran udara serta parameter-parameter kondisi udara di ruang operasi dan membandingkannya dengan hasil simulasi

pada keadaan aktual. Proses simulasi ini menggunakan program FloVENT versi 8.2.

2. Dasar Teori

Kontaminasi udara merupakan keadaan dimana udara mengandung partikel-partikel mikroorganisme yang berasal dari udara di lingkungan sekitarnya. Partikel-partikel ini dapat disebabkan oleh kegiatan yang dilakukan oleh manusia di dalamnya, dari peralatan-peralatan yang terdapat di ruangan, maupun dari udara luar ruangan yang masuk ke dalam ruangan. Mikroorganisme ini terdapat dalam partikel-partikel di udara, sehingga dapat terhisap ke dalam saluran pernafasan dan dapat menimbulkan penyakit.

Kontaminasi udara dalam suatu ruangan dapat dipengaruhi faktor-faktor seperti laju aliran udara yang kecil, ruangan yang dipadati oleh orang, serta kegiatan dari orang yang berada dalam ruangan tersebut. Mikroorganisme yang berukuran kecil ini dapat menempel pada pakaian yang kita gunakan, bahkan dapat juga berada di sekitar tubuh kita.

Tabel 1. Standar ISO jumlah partikel dalam ruangan.

Classification numbers (N)	Maximum concentration limits (particles/m ³ of air) for particles equal to and larger than the considered sizes shown below					
	0.1 µm	0.2 µm	0.3 µm	0.5 µm	1 µm	5.0 µm
ISO Class 1	10	2				
ISO Class 2	100	24	10	4		
ISO Class 3	1000	237	102	35	8	
ISO Class 4	10 000	2370	1020	352	83	
ISO Class 5	100 000	23 700	10 200	3520	832	29
ISO Class 6	1 000 000	237 000	102 000	35 200	8320	293
ISO Class 7				352 000	83 200	2930
ISO Class 8				3 520 000	832 000	29 300
ISO Class 9				35 200 000	8 320 000	293 000

Ruang operasi (operating room) adalah sebuah unit ruangan khusus di rumah sakit yang berfungsi sebagai tempat untuk melakukan tindakan pembedahan yang dilengkapi oleh peralatan medik, dan membutuhkan kondisi steril serta kondisi khusus lainnya. Ruang operasi merupakan kategori ruang bersih (cleanroom) yang harus sesuai dengan standar yang berlaku,

standar tersebut misalnya US Federal Standard 209D, dan ISO 14644 Part, oleh karena itu jumlah partikel dalam ruang operasi harus dikendalikan agar tidak melebihi batas maksimum jumlah partikel yang ditentukan.[8]

Ruang operasi didalam rumah sakit memiliki beberapa persyaratan terkait kondisi yang harus dipenuhi dalam ruangan tersebut. Sesuai Keputusan Menteri Kesehatan Republik Indonesia No: 1204/Menkes/SK/X/2004 tentang Persyaratan Kesehatan Lingkungan Rumah Sakit, Standard ISO 14644, dan standar ASHRAE 170 – 2008 tentang Ventilation, ruang operasi memiliki beberapa parameter, yaitu :

1. Temperatur di dalam ruangan operasi harus mencapai 19°C sampai 24°C.[9]
2. Kelembaban relatif udara harus dijaga antara 45% sampai 60%.[9]
3. Tekanan udara harus positif dan memiliki perbedaan tekanan udara dengan bagian ruangan sesama cleanroom sebesar 10 Pa, dan perbedaan tekanan udara dengan bagian ruangan selain cleanroom sebesar 15 Pa.[4]
4. Memiliki pertukaran udara sebesar 20 ACH (Air Changer per Hour) yang disesuaikan dengan volume ruangan operasi.[10]
5. Jumlah bakteri 10 CFU/m³. [9]
6. Kecepatan aliran udara di atas meja operasi yaitu 0.46 ± 0.1 m/s.[8]

3. Metode Ilmiah

Pengukuran dilakukan sebagai langkah awal dalam melakukan perancangan sistem tata udara. Pengukuran ini digunakan untuk mengambil data awal yang digunakan sebagai latar belakang dalam melakukan perancangan. Selain itu pengukuran juga dilakukan untuk mengambil data-data yang diperlukan dalam melakukan perancangan. Pengukuran dilakukan pada ruang operasi sebuah rumah sakit yang berada di Jakarta, yang dilaksanakan pada bulan Oktober 2015.

Dalam melakukan simulasi aliran udara di dalam rumah sakit, digunakan software FloVENT versi 8.2. FloVENT merupakan software untuk permodelan aliran udara yang didisain untuk mensimulasikan aliran udara, perpindahan panas, dan kadar kontaminasi di dalam ruangan atau bangunan. Proses simulasi tersebut dapat digunakan dalam tahapan awal perancangan bangunan ataupun dalam pengembangan rancangan suatu bangunan untuk mengobservasi efek dari perubahan disain yang berpengaruh kepada pola sifat udara.

K-Epsilon merupakan salah satu bentuk permodelan aliran fluida yang memiliki dua persamaan transport yang terdiri dari variable energi kinetik turbulent, dan dissipasi turbulent. Distribusi dari energi kinetik (k) pada permodelan turbulen k-epsilon didapat dari solusi persamaan transport dengan k sebagai variabel dependen.

Persamaan transport dari energi kinetik adalah sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u k) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v k) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w k) = \\ \frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial z}\right) + \\ \mu_t \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right\} - C_{\mu} \rho \frac{k^{1.5}}{L} + \\ \beta g \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial t}{\partial y} \end{aligned} \quad (1)$$

Persamaan transport dari ϵ adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u \epsilon) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v \epsilon) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w \epsilon) = \\ \frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma_{\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\Gamma_{\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\Gamma_{\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial z}\right) + \\ C1 \frac{\epsilon}{k} \mu_t \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right\} - \\ C2 \rho \frac{\epsilon^2}{k} + C3 \beta g \frac{\epsilon}{k} \Gamma_{\epsilon} \frac{\partial t}{\partial y} \end{aligned} \quad (2)$$

4. Hasil dan Analisis



Gambar 1. Denah ruang operasi

Ruang operasi terletak pada lantai dasar gedung bertingkat dua di sebuah rumah sakit di Jakarta. Ukuran dari ruang operasi adalah 6.8m x 7m dan memiliki tinggi ruangan operasi dari lantai hingga ke ceiling adalah 3 meter. Tinggi dari ceilingnya hingga ke lantai atasnya adalah setinggi 1m, sehingga memungkinkan untuk digunakan sebagai jalur ducting.

Beban pendingin berasal dari setiap komponen yang menghasilkan panas yang berada di dalam ruangan. Pada ruangan operasi yang diteliti, beban pendingin berasal dari dinding, okupansi, pencahayaan, dan peralatan medis yang menghasilkan panas. Beban pendingin diperlukan untuk mengetahui total panas yang ada dalam ruangan, sehingga dapat diketahui jumlah aliran udara yang dibutuhkan dalam ruangan operasi.

• Perhitungan Beban Pendingin dari Dinding

Pada ruangan operasi yang diteliti, terdapat satu bagian dinding yang terkena paparan sinar matahari. Besarnya beban pendingin yang berasal dari gedung tergantung dari struktur yang menyusun lapisan dinding, dan arah mata anginnya.

$$q = U \times A \times CLTD_{cor} \quad (3)$$

Dimana :

q = besar beban pendingin pada dinding

U = koefisien perpindahan panas

CLTD_{cor} = Cooling Load Temperature Difference

$$CLTD_{cor} = (CLTD + LM) \times K + (78 - T_i) + (T_o - 85) \quad (4)$$

Dimana :

LM = Latitude Month

K = colour adjusment factor

T_i = Suhu dalam ruangan

T_o = Suhu di luar ruangan

Berdasarkan hasil perhitungan, salah satu bagian dinding pada ruang operasi yang diteliti yang menghadap ke arah barat laut mempunyai total beban pendingin yang diterima oleh ruang operasi sebesar 1893 BTU/hr. Nilai ini didapat dengan mengambil nilai CLTD yang paling tinggi, atau dalam keadaan siang hari ketika cahaya matahari menyorot dinding ruang operasi.

- Beban Pendingin dari Okupansi

Ruang operasi yang diteliti merupakan ruangan operasi jenis mayor yang terdiri hingga delapan orang dalam ruangan operasi, ditambah satu pasien yang dibedah. Penentuan okupansi pada ruang operasi mengikuti keputusan Direktorat Bina Pelayanan Penunjang Medik dan Sarana Kesehatan.

$$Q_s = 3.412 \times CLF \times \text{Sensible heat gain} \quad (5)$$

Tabel 2. Beban pendingin dari okupansi

Okupansi	Q_s (W)	Q_L (W)	CLF	Total Q_s (BTU/hr)
Dokter operator	250	200	0.78	612.69
Asisten operator1	250	200	0.78	612.69
Asisten operator2	250	200	0.78	612.69
Instrumentator	250	200	0.78	612.69
Perawat sekuler	250	200	0.78	612.69
Dokter anestesi	250	200	0.78	612.69
Residen Anestesi	250	200	0.78	612.69
Penata anestesi	250	200	0.78	612.69
Pasien bedah	225	105	0.78	551.421

Dari hasil perhitungan pada tabel di atas, total dari q sensible adalah sebesar 5452.94 BTU/hr dan untuk total dari q latent pada

ruangan adalah sebesar 1705 BTU/hr. Jumlah ini disesuaikan dengan cooling load factor untuk penggunaan ruangan selama delapan jam[14], mengikuti rata-rata lamanya waktu penggunaan ruang operasi.

- Beban Pendingin Peralatan Medis

Tabel 3. Beban pendingin peralatan medis

Nama Alat	Jumlah	Beban Pendingin
Mesin anestesi	1	400.4165
lampu operasi	2	1131.12
Monitor	1	158.3568
Monitor alat vital	1	124.4232
Film viewer	1	271.4688
Electrosurgery	1	332.5493
Mesin suction	1	762.3749
Endoscope	1	1368.655
Total		4549.365

Pada perhitungan beban pendingin, diasumsikan keadaan disaat semua alat operasi menyala, sehingga masing-masing beban pendingin dari peralatan dihitung totalnya. Panas yang dihasilkan dari peralatan merupakan kalor sensible, dan total dari beban pendingin peralatan pada ruang operasi adalah sebesar 4549.365 BTU/hr.

- Beban Pendingin Pencahayaannya

Pencayaan dalam ruangan menggunakan lampu TL yang berjumlah 16 ruas, masing-masing ruas terdiri dari 2 lampu, sehingga total lampu yang digunakan adalah berjumlah 32 lampu. Lampu TL yang berada dalam ruang operasi menggunakan lampu dengan daya sebesar 40 watt. Dan diasumsikan dalam ruangan operasi semua lampu sedang menyala.

$$Q_{sen} = 3.41 \times q \text{ lamp} \times F_u \times F_s \times CLF(6)$$

Dimana :

$q \text{ lamp}$ = total dari daya lampu ada ruangan

F_u = faktor lampu yang digunakan

F_s = Ballas allowance

$$\begin{aligned} Q_{sen} &= 3.41 \times 1280 \times 1 \times 1.2 \times 0.87 \\ &= 4196 \text{ BTU/hr} \end{aligned}$$

- Total Beban Pendingin Keseluruhan

Tabel 4. Total beban pendingin ruangan

No	Bagian	Sensible (BTU/hr)	Latent (BTU/hr)
1	Okupansi	5452.94	1705
2	Equipment	4549.36	-
3	Lightning	4196.04	-
4	Wall	1893	-
Total		16090.35	1705

Beban pendingin yang berada di dalam ruangan akan mempengaruhi jumlah laju aliran udara yang diperlukan di dalam ruangan operasi. Dalam menghitung kebutuhan volume aliran udara dalam ruang operasi melalui beban pendingin digunakan persamaan sebagai berikut :

$$Q_{sen} = 1.1 \times CFM \times (t_o - t_i) \quad (7)$$

Dimana :

Q_{sen} = Sensible heat gain (BTU/hr)

CFM = besarnya volume aliran udara (ft³/minute)

t_i = Suhu udara dalam ruangan

t_o = Suhu udara di luar ruangan

Kondisi suhu udara luar yang dimasukan ke dalam perhitungan adalah suhu sesuai dengan SNI-6390, yaitu sebesar 33°C DB dan 27°C WB. Sedangkan untuk penentuan kondisi udara di dalam ruangan, diatur sesuai dengan batas-batas temperatur dan kelembaban yang ditentukan oleh menteri kesehatan. Oleh karena itu pada kondisi dalam ruangan temperatur yang digunakan adalah sebesar 22°C DB, dan kelembaban sebesar 50%.

$$CFM_{Sen} = 16090.35 / (1.1 \times (33-25)) \\ = 1625.28 \text{ ft}^3/\text{minute}$$

$$Q_{lat} = 0.69 \times CFM \times (Grain_i - Grain_o) \quad (8)$$

Nilai grain didapat dari tabel psychometric dengan keadaan RH udara luar sebesar 65% dan udara di dalam ruangan dengan RH sebesar 55%, dan suhu dari suplai udara sebesar 21°C. Laju aliran udara berdasarkan beban termal laten didapatkan sebagai berikut :

$$CFM_{lat} = (1705 \text{ BTU/hr}) / (0.69 \times (66-54)) \\ = 205.91 \text{ ft}^3/\text{minute}$$

Dari total laju aliran udara yang dibutuhkan pada beban termal sensible dan beban termal latent, maka didapat total laju aliran udara yang dibutuhkan oleh ruangan operasi yaitu sebesar 1831.206 ft³/minute.

Laju aliran udara yang dibutuhkan dalam ruang operasi minimal harus sesuai dengan standar pertukaran udara setiap jamnya, atau ACH (Air Changes per Hour). Untuk ruangan oprasi, standar ACH yang harus dicapai yaitu 20 ACH menurut standar ASHRAE 170. Ruangan operasi yang diteliti memiliki ukuran ruangan 6.8x7x2.8 meter.

$$\text{Airflow} = \text{ACH} \times \text{Volume ruangan} \quad (9)$$

Dimana :

Airflow = Jumlah volume aliran udara (m³/hr)

ACH = Air Changes per Hour

$$\begin{aligned} \text{Airflow} &= 20(1/\text{hr}) \times (7\text{m} \times 6.8\text{m} \times 3\text{m}) \\ \text{Airflow} &= 2856 \text{ m}^3/\text{hr} \\ &= 1681 \text{ ft}^3/\text{minute} \end{aligned}$$

Dari hasil perhitungan kebutuhan laju aliran udara pada standar ACH, didapatkan laju aliran udara di bagian suplai minimal sebesar 2856 m³/hr atau sebesar 1681 CFM. Besarnya aliran udara ini memungkinkan untuk terjadinya 20 kali pertukaran udara dalam ruangan operasi sehingga udara kotor dapat digantikan dengan udara baru dari suplai unit.

Besarnya suplai udara yang berdasarkan beban pendingin telah mencapai standar dari ACH ruangan. Sehingga dalam perancangan

sistem tata udara pada ruang operasi digunakan aliran udara yang berasal dari beban pendingin, yaitu sebesar 1831,206 CFM.

Dalam menentukan proses yang terjadi dalam ruang operasi, diperlukan penentuan titik-titik pada diagram psikometrik dari kondisi udara pada setiap bagian. Penentuan titik ini berdasarkan data kondisi disain sistem tata udara yang telah disesuaikan dengan standar yang berlaku.

$$T_{mix} = \frac{(T_o \times CFM_o) + (T_r \times CFM_r)}{(CFM_o + CFM_r)} \quad (10)$$

Dimana :

T_{mix} = Temperature campuran dari udara luar dan udara dari dalam ruangan

T_o = Temperature udara luar

T_r = Temperature dari dalam ruangan

CFM_o = Volume aliran udara luar

CFM_r = Volume aliran udara dari dalam ruangan

Outdoor Air Heat

$$q_{sensible\ out} = CFM_o \times (T_o - T_{mix}) \times (1 - BF) \times 1.08 \quad (11)$$

$$q_{latent\ out} = CFM_o \times (Grain_o - Grain_{mix}) \times (1 - BF) \times 0.68 \quad (12)$$

Grand Sensible Heat Factor

$$GSHF = TSH / (TSH + TLH) \quad (13)$$

Dimana :

TSH = Total Sensible Heat

TLH = Total Latent Heat

Temperatur yang melewati cooling coil dapat dicari menggunakan bypass factor yang besarnya adalah 0.1 untuk ruangan operasi. Titik dari temperatur ini terletak diantara titik temperatur mixing air dan temperatur ADP.

Temperatur Leaving Air

$$BF = \frac{(T_{LA} - T_{ADP})}{(T_{mix} - T_{ADP})} \quad (14)$$

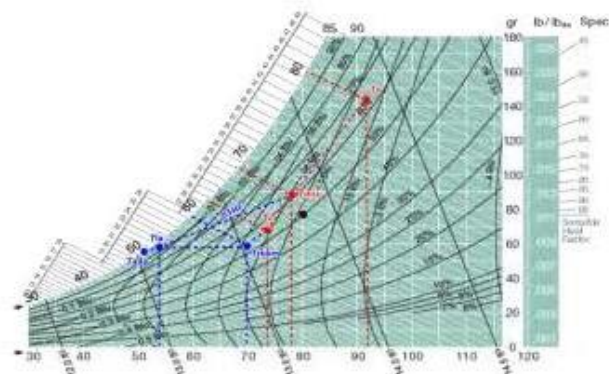
Dimana :

BF = Bypass factor

T_{LA} = Temperature keluar dari coil

T_{ADP} = Temperatur pada Aparatus Dew Point

Setelah didapatkan nilai dari GSHF, maka titik-titik kondisi udara dalam ruang operasi dapat ditentukan melalui diagram psikometrik. Penentuan titik ini dimulai dari temperatur outdoor, lalu ke temperatur campuran antara outdoor dan return air. Setelah itu melalui GSHF didapat titik ADP yang diambil dari titik campuran udara.



Gambar 2. Diagram Psikometrik Ruang Operasi

Pada Grafik psikometrik pada ruang operasi, temperatur udara pada saat keluar dari coil sangat rendah, sehingga membutuhkan pemanas untuk menaikkan suhu agar sesuai dengan suhu yang diinginkan dalam ruangan. Oleh karena itu diperlukan menghitung besarnya daya pemanas yang dibutuhkan untuk menaikkan temperatur udara keluar dari coil.

Daya Pemanas

$$q_{heater} = 1.08 \times CFM_{supply} \times (T_{room} - T_{LA}) \quad (15)$$

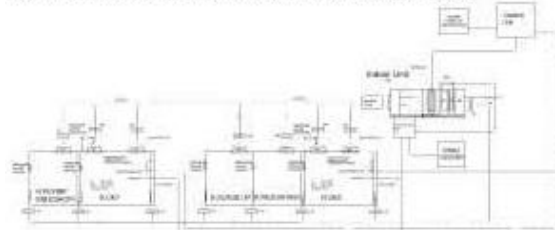
$$q_{heater} = 1.08 \times 1831 \times (71.6\text{ F} - 53.8\text{ F})$$

$$= 35221\text{ BTU/hr}$$

$$= 10.32\text{ Kw}$$

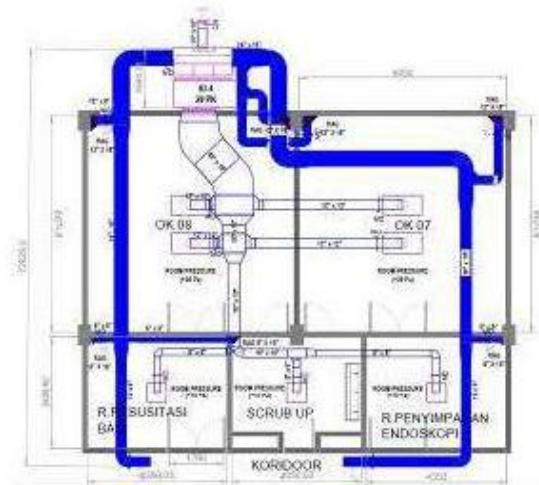
Diagram skematik merupakan diagram yang menunjukkan alur dari proses sistem tata udara pada ruang operasi. Pada ruang Operasi yang diteliti, ruang operasi

menggunakan sistem pendingin berupa split duct, yaitu mesin pendingin yang memiliki indoor dan outdoor unit dan suplai udara dari indoor unit dilakukan menggunakan ducting untuk sampai ke diffuser atau HEPA filter pada ruangan yang dituju.



Gambar 3. Skematik diagram ruang operasi

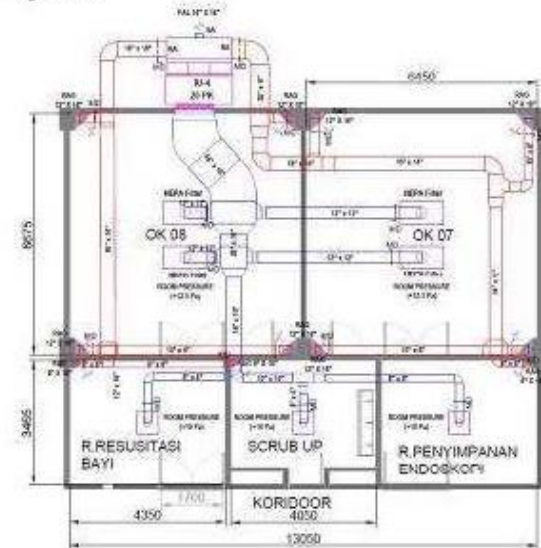
Pada ruang operasi kondisi aktual, jumlah *return air grill* di ruangan berjumlah dua buah dan terletak di bagian pojok ruangan. Sistem *ducting* terdiri dari *suplai duct* dan *return duct*. Dari suplai unit udara dialirkan menuju dua ruangan operasi, dan tiga ruangan persiapan operasi



Gambar 4. Denah *ducting* ruang operasi *existing*

Dalam perancangan sistem tata udara yang baru, ukuran setiap ducting disesuaikan dengan kapasitas aliran udara yang melewati masing-masing ducting, agar *pressure drop*, dan *noise* yang ditimbulkan dari ducting tidak terlalu besar. Pada rancangan sistem tata udara yang baru juga, RAG ditambah menjadi empat buah, yaitu pada setiap sudut dari ruang operasi. Hal ini dilakukan supaya partikel-partikel di udara

yang berukuran kecil dapat tersapu oleh aliran udara dari HEPA dan masuk ke setiap RAG yang berada di setiap sudut ruang operasi.



Gambar 5. Denah *ducting* ruang operasi usulan disain.

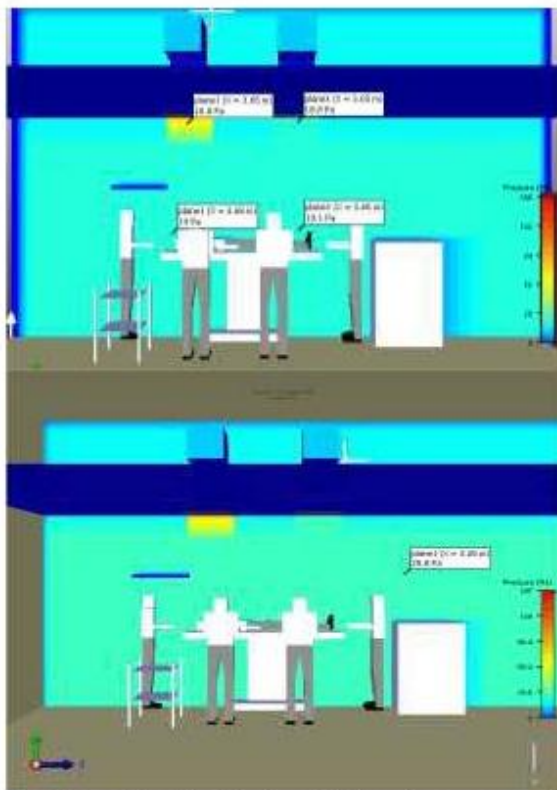
Pada gambar rancangan ducting di atas, ducting yang berwarna biru adalah ducting bagian suplai udara, dan ducting yang berwarna merah adalah bagian pembuangan udara.

Pressure drop disebabkan karena gesekan udara yang terjadi ketika udara melewati saluran ducting, dan ketika aliran udara melewati saringan udara, baik itu saringan udara yang berada di dalam *indoor unit* ataupun pada HEPA yang berada dalam ruangan. Pada ruang operasi yang diteliti, suplai udara dari *indoor unit* digunakan untuk dua ruangan operasi beserta 3 ruangan persiapan operasi, maka *pressure drop* yang dihitung adalah *pressure drop* total dari ruangan-ruangan tersebut.

Tabel 7. Total *Pressure Drop* ruang operasi.

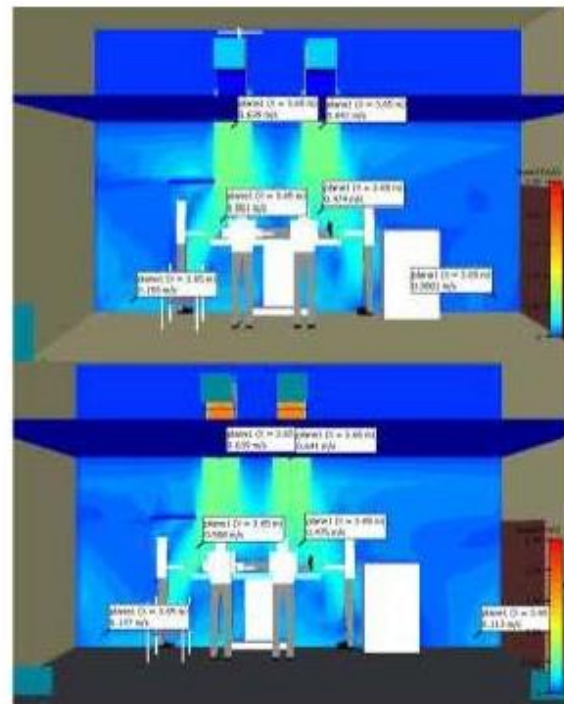
No.	Nama	Jumlah ΔP (Pa)
1	MERV 7	2 60
2	Jalur Ducting	2 134
3	MERV 14	4 298.48
4	Cooling Coil	1 29.8

temperatur udara keluar dari HEPA filter adalah sebesar 21.3°C , dan sampai ke badan pasien pada suhu 21.8°C . Pada kondisi suhu disekitar tim bedah, suhunya sekitar 23°C .



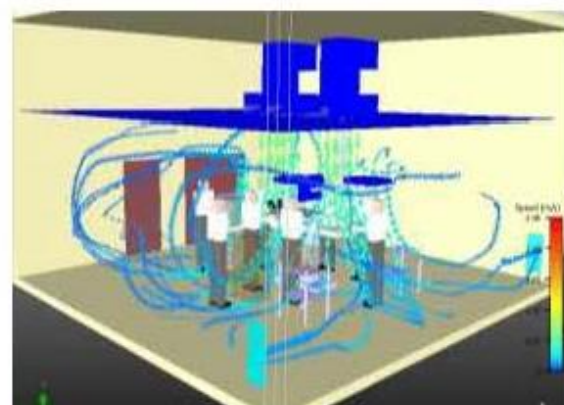
Gambar 7. Hasil simulasi tekanan pada kondisi aktual (atas) dan kondisi usulan disain (bawah).

Tekanan pada ruang operasi disain baru sudah sesuai standar, yaitu 25Pa dengan tekanan koridor yang diasumsikan sebesar 0Pa. Tekanan ini diperlukan agar tidak ada udara dari luar ruang operasi yang masuk ke dalam ruang operasi. Sedangkan tekanan pada kondisi aktual adalah sebesar 19 Pa, tekanan ini masih kurang dibandingkan tekanan yang dibutuhkan oleh ruang operasi.



Gambar 8. Hasil simulasi kecepatan udara pada kondisi aktual (atas) dan kondisi usulan disain (bawah).

Pada hasil simulasi kecepatan aliran udara, kecepatan udara yang berada di atas meja operasi sudah sesuai dengan standar menteri kesehatan, yaitu sebesar 0.46 ± 0.1 m/s. Kecepatan aliran udara yang besar di atas meja operasi diperlukan agar tidak ada partikel yang masuk ke dalam area meja operasi, dikarenakan kecepatan aliran udara akan membentuk suatu air curtain yang mengeluarkan partikel yang terdapat pada area operasi, dan melindungi agar tidak ada kontaminasi partikel yang masuk ke dalam area meja operasi.



5	Return Air Grill	14	350
Total		672.28	

Dalam melakukan simulasi pola aliran udara pada ruang operasi, besaran-besaran yang menjadi input dalam program simulasi adalah sebagai berikut:

Tabel 8. Parameter *input simulasi* kondisi udara

Disain	Parameter	Nilai Input	Keterangan
Aktual	Temperatur	19 °C	
	Volume Flow Rate Supply	1150 ft ³ /min	2 HEPA filter
	Volume Flow Rate Exhaust	890 ft ³ /min	2 RAG
Desain	Temperatur	21°C	
	Volume Flow Rate Supply I	915 ft ³ /min	2 HEPA filter
	Volume Flow Rate Exhaust I	350 ft ³ /min	4 RAG

Tabel 9. Parameter *input simulasi* jumlah partikel

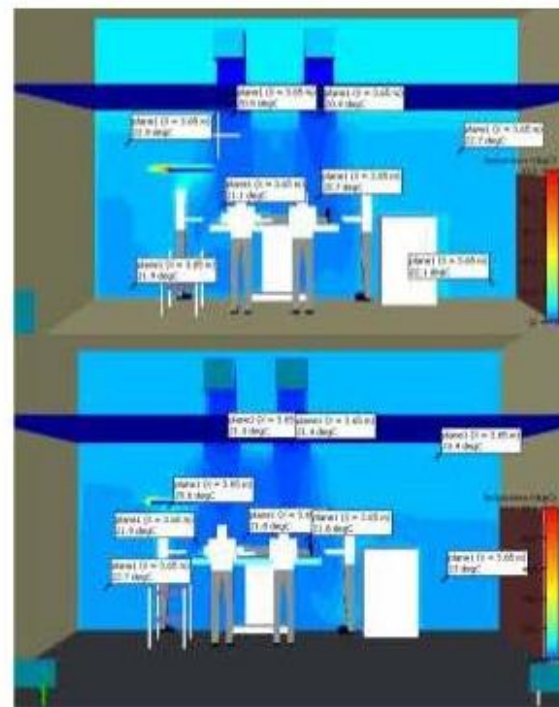
	Partikel (µm)	Jumlah partikel (partikel/m ³)	Jumlah partikel (ppm)
Aktual	0.3	280000	4000
	0.5	29051	1900
	1	6256	3274
Desain	0.3	10200	144
	0.5	3520	230
	1	832	435

Parameter yang *diinput* pada simulasi ruang operasi terbagi menjadi dua jenis, yaitu parameter kondisi udara yang terdiri dari suhu, dan volume aliran udara, serta parameter jumlah partikel. Penentuan parameter kondisi udara ditentukan berdasarkan data aktual yang diambil dari sebuah rumah sakit di Jakarta, dan dari standar kondisi udara pada rumah sakit menurut Kementerian Kesehatan. Jumlah partikel juga penentuannya berdasarkan keadaan aktual jumlah parameter yang terukur, dan untuk rancangan disain, diambil jumlah parameter dari standar ISO 14644 kelas 5.

Selain dari input kedua jenis parameter di atas, terdapat beberapa inputan lainnya seperti efisiensi pada HEPA yang besarnya disesuaikan dengan MERV 14

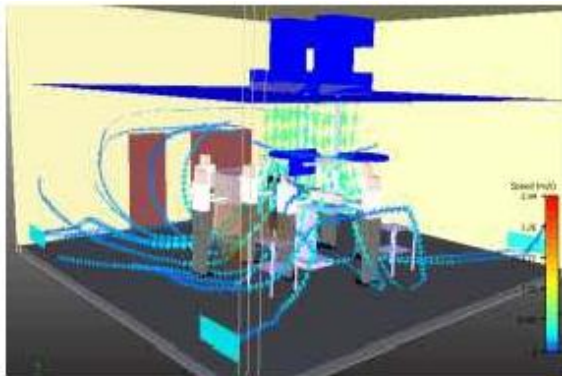
pada standar ASHRAE 52.2, *loss coefficient* pada HEPA yang nilainya disesuaikan dengan laju aliran udara yang masuk melewati resistansi yaitu HEPA *filter*.

Pada permodelan simulasi kondisi ruang operasi aktual, bentuk dan ukurannya disesuaikan dengan bentuk dari ruang operasi yang diteliti. Selain itu peletakan dari setiap alat dan jumlah okupansi disesuaikan kondisi ruang operasi yang diteliti.



Gambar 6. Hasil simulasi temperatur pada kondisi aktual (atas) dan kondisi usulan disain (bawah).

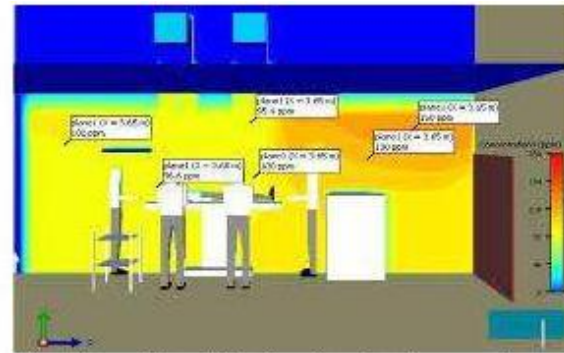
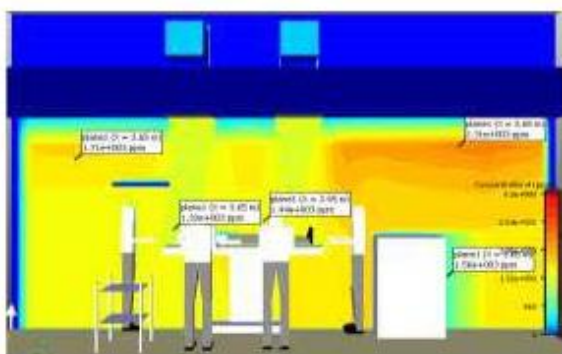
Dari hasil persebaran temperatur terlihat bahwa kondisi aktual rumah sakit suhunya yaitu 20°C ketika keluar dari HEPA filter. Namun pada tempat-tempat lainnya suhu mulai naik hingga sekitar 20°C di atas tubuh pasien yang sedang dioperasi. Pada peralatan-peralatan di ruangan operasi, dapat terlihat bahwa suhu disekitarnya naik. Hal ini dikarenakan setiap alat pada ruang operasi yang menggunakan listrik akan menghasilkan panas yang nantinya akan menyebar pada ruangan operasi. Pada ruang operasi hasil rancangan disain baru,



Gambar 9. Hasil simulasi pola aliran udara pada kondisi aktual (atas) dan kondisi usulan disain (bawah).

Pada hasil penyebaran partikel dengan tampak isometri, dapat terlihat bahwa pola persebaran partikel hampir sama dengan pola pergerakan aliran udara dalam ruang operasi. Dikarenakan sumber partikel di atur keluar dari peralatan pada ruang operasi, maka partikel berkumpul semua pada sisi kanan ruang operasi. Dan lama kelamaan partikel tersebut akan mengikuti arah aliran udara menuju bagian RAG untuk dibuang ataupun disaring kembali menggunakan *MERV filter*.

Pada tampak isometri persebaran kecepatan aliran udara di ruang operasi dengan disain baru, udara bergerak secara laminar di atas meja operasi. Selain itu udara yang telah melewati meja operasi bergerak ke arah bagian pembuangan yang berada di setiap sudut ruangan, sehingga tidak terbentuk aliran turbulen pada ruang operasi.



Gambar 10. Hasil simulasi persebaran partikel 1mikron pada kondisi aktual (atas) dan kondisi usulan disain (bawah).

Dari hasil simulasi dapat terlihat bahwa partikel berkumpul di bagian sisi dekat pintu masuk. Hal ini dikarenakan pada sisi tersebut tidak terdapat RAG, sehingga partikel berkumpul disana bersama dengan kondisi aliran udara yang turbulen. Penumpukan partikel pada sisi ini lama kelamaan akan menyebar mengikuti pergerakan aliran udara, sehingga menimbulkan resiko partikel-partikel tersebut menuju ke atas meja operasi. Pada hasil simulasi juga dapat terlihat partikel-partikel berkumpul di bagian atas ruang operasi, dikarenakan massa jenis dari partikel-partikel tersebut kecil dan akan mengikuti kemana aliran udara bergerak.

Pada kondisi disain baru hasil perancangan, dapat terlihat bahwa partikel-partikel tidak berkumpul terlalu banyak pada bagian pojok ruangan dibandingkan dengan disain aktual. Hal ini dikarenakan terdapat pembuangan udara pada setiap pojok ruangan yang membuat partikel langsung terhisap tanpa berkumpul terlebih dahulu pada aliran turbulensi. Jumlah partikel di atas meja operasi juga sangat sedikit jika dibandingkan dengan daerah lainnya, hal ini dikarenakan aliran udara yang berasal dari HEPA filter melindungi area meja operasi dari partikel-partikel yang bersumber dari peralatan-peralatan operasi yang berada dalam ruangan.

5. Kesimpulan

Berdasarkan analisis hasil dari perancangan dan perbandingan simulasi antara keadaan aktual dan disain baru yang dirancang, keadaan ruang operasi yang dirancang telah sesuai dengan standar yang berlaku, baik standar ASHRAE 170, standar kementerian kesehatan, dan ISO 14644.

Dari simulasi hasil perancangan terlihat bahwa peletakan RAG pada setiap sudut dengan total volume aliran udara yang sama, akan mengurangi turbulensi aliran udara dalam ruang operasi, dan partikel-partikel yang ada dalam ruang operasi akan terbawa oleh aliran udara ke bagian RAG, sehingga tidak ada partikel yang berkumpul pada ruang operasi.

6. Daftar pustaka

- [1] Hardin, Jeff. 2013. *HVAC Design Manual for Hospitals and Clinics Chapter 1*. Atlanta: ASHRAE.Inc.
- [2] Awbi, Hazim. 2005. *Ventilation of Buildings*. London: Spon Press.
- [3] ASHRAE. 2011. *ASHRAE Handbook HVAC Application (SI)*. Atlanta: ASHRAE.Inc.
- [4] Whyte. 2001. *Cleanroom Technology Fundamentals of Design, Testing and Operation*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- [5] Wei Sun, P.E. 2009. *Cleanroom and HVAC Design*. Presentasi disajikan dalam Seminar ASHRAE, Indonesia, 29 Oktober.
- [6] ISO 14644-1, 1999: *Cleanrooms and associated controlled environments-- Part 1: Classification of air cleanliness*.
- [7] Federal Standard 209 E, 1992 : *Federal Standard Airborne Particulate Cleanliness in Clean Rooms and Clean Zones*.
- [8] Direktorat Bina Pelayanan Penunjang Medik Dan Sarana Kesehatan. 2012. *Pedoman Teknis Bangunan Rumah Sakit Ruang Operasi*. Jakarta: Kementerian Kesehatan RI.
- [9] Menteri Kesehatan Republik Indonesia. 2004. *Keputusan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 1204/MENKES/SK/X/2004 Tentang Persyaratan Kesehatan Lingkungan Rumah Sakit*. Menteri Kesehatan Republik Indonesia.
- [10] ASHRAE Standard 170-2008
- [11] ASHRAE Standard 52.2-2015
- [12] Mentor Graphics. 2009. *FloVENT User Guide Software Version 8.2*. Oregon: Mentor Graphics.
- [13] MCQuiston, Faye. 1992. *Cooling and Heating Load Calculation Manual*. Atlanta: ASHRAE.Inc.
- [14] Kavanaugh, Stephen P. 2005. *HVAC Simplified*. Atlanta: ASHRAE.Inc.
- [15] Carrier. *Carrier Handbook Chapter 1 Load Estimating*.
- [16] Badan Standarisasi Nasional. 2011. SNI-6390: *Konservasi Energi Sistem Tata Udara Bangunan Gedung*.