

Perancangan dan Kontrol Mode Operasi Tata Udara Ruang Bedah

Setu Kurnianto Putra*), Esther Kezia Simanjuntak, Wisnu Hendradjit**) & Sutanto Hadisupadmo
Program Studi S1 Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Bandung
setu_kp@students.itb.ac.id)*
*wisnu131@tf.itb.ac.id**))*

Abstrak

Tata udara Ruang Bedah (RB) bekerja pada tiga mode: sanitasi, persiapan, dan operasi. Proses psikrometrik RB dirancang untuk menghasilkan kondisi termal dalam rentang suhu 21 - 28 °C, kelembaban nisbi 55 - 65%, dengan tekanan udara positif 15 Pa relatif terhadap ruangan di sekitarnya. Sistem tata udara meliputi komponen koil pendingin berkapasitas 54 kW, koil pemanas elektrik berkapasitas 12 kW, dan kipas catu untuk laju pergantian udara 25 ACH. Tekanan udara RB diatur oleh mekanisme kerja *dampers* dan kipas pembuangan udara. Bukaan *dampers* dikontrol selaras dengan laju putaran kipas udara dan mode kerja RB.

Sistem refrigerasi bekerja berdasarkan kondisi termal di dalam RB dan mode kerja yang sedang berlangsung. Suhu udara catu ke RB memicu kerja pemanas elektrik. Kinerja kompresor dibatasi oleh tekanan kerja refrigeran dalam siklus refrigerasi. Suatu *interlock* menyelaraskan kontrol kondisi termal RB dengan status bukaan pintu RB serta *dampers* udara untuk menjaga agar tekanan tetap positif.

Perubahan kondisi udara di dalam RB tipikal ini telah disimulasikan untuk meninjau respon transiennya. Simulasi respon transien suhu, nisbah kelembaban, dan kelembaban nisbi udara RB berlangsung pada rentang waktu 250 - 650 dtk, sedangkan transien tekanan udara 28 dtk.

Kata Kunci: tata udara RB, proses psikrometrik, mode operasi, sistem kontrol, simulasi kerja

1 Pendahuluan

1.1 Latar belakang

Sistem pengondisian udara pada ruang bedah (RB) tidak hanya diperlukan untuk memenuhi faktor kenyamanan termal bagi pengguna ruangan, namun juga untuk memenuhi mutu udara ruangan. Mutu udara mencakup tingkat kebersihan, kesegaran, serta kesehatan udara. Pengondisian udara pada RB harus mampu menciptakan lingkungan yang nyaman, bersih, dan sehat, baik untuk tenaga medik maupun pasien. Udara pada RB memerlukan penataan pada beberapa aspek, yaitu suhu, kelembaban, pola aliran, dan tekanan. Selain itu, kandungan kontaminan dan laju generasi partikel di udara juga perlu diperhatikan untuk memenuhi aspek kebersihan udara. Penataan parameter-parameter pengondisian udara tersebut perlu disesuaikan dengan merujuk pada standar atau regulasi yang telah ditetapkan. Di Indonesia, rujukan yang dapat

dijadikan acuan dalam perancangan sistem pengondisian udara RB, yaitu Pedoman Teknis Ruang Operasi Rumah Sakit yang dirilis oleh Kementerian Kesehatan Republik Indonesia pada sub-bab C ayat 1 dan sub-bab D ayat 1.

Agar pengondisian udara tersebut dapat tercapai, tidak hanya diperlukan nilai-nilai parameter kondisi udara yang sudah sesuai dengan standar, tetapi juga diperlukan sistem kontrol agar kondisi udara tersebut dapat terjaga selama proses pengondisian udara berlangsung. Pada sistem tersebut, terdapat pengontrol yang menerima sinyal masukan berupa nilai aktual yang terjadi pada saat tertentu. Nilai aktual tersebut akan disesuaikan dengan nilai yang sudah ditentukan, yaitu *set-point*. Pengontrol menghasilkan sinyal keluaran yang dikirim ke aktuator untuk melakukan suatu aksi tertentu sehingga tercapai kondisi udara yang diinginkan. Pada umumnya, komponen yang dikontrol pada sistem tata udara antara lain kipas, kompresor, katup refrigeran, pemanas elektrik, dan *dampers*. Pengontrolan pada komponen-komponen tersebut akan berdampak langsung pada perubahan parameter kenyamanan termal dan mutu udara yang ada.

1.2 Tujuan

Karena pentingnya menjaga kondisi udara pada RB, maka dilakukan perancangan sistem tata udara dengan menentukan proses dan spesifikasi komponen yang digunakan untuk mengondisikan udara. Juga dirancang sistem kontrol komponen pengondisian udara, agar kondisi udara terancang dapat tercapai. Waktu transien dari perubahan nilai suhu, tingkat kelembaban, dan tekanan udara disimulasikan.

2 Rujukan Dasar

2.1 Prasyarat kondisi udara RB

Ruang bersih adalah ruangan yang dirancang secara khusus dan memiliki sistem pengontrolan suhu, kelembaban, tekanan udara, profil aliran udara, dan kualitas udara [1]. Ruangan yang termasuk dalam ruang bersih adalah ruang bedah (RB), ruangan produksi obat-obatan, serta ruangan perakitan semikonduktor. RB dikelompokkan ke dalam tiga jenis, yaitu RB kelas A (operasi minor),

kelas B (operasi mayor ringan), dan kelas C (operasi mayor). Khusus untuk kelas C, RB harus diperlakukan sebagai ruang bersih dengan menggunakan standar kondisi udara yang ditunjukkan pada **Tabel 1** yang merujuk pada [2].

Tabel 1 Parameter kondisi udara RB kelas C

Parameter	Kondisi yang Disarankan
Suhu bola kering	19-24 °C
Kelembaban nisbi	45-60 %
ACH (<i>air change per hour</i>) minimum	25
Profil aliran udara meninggalkan muka <i>diffuser</i>	Laminar <i>unidirectional</i>
Tekanan udara dibanding ruang sekitarnya	Positif

2.2 Proses Psikrometrik

Pengondisian udara pada RB dapat tercapai apabila menggunakan komponen-komponen pengondisi udara yang memiliki spesifikasi sesuai dengan kebutuhan untuk memenuhi persyaratan yang ditetapkan. Kebutuhan RB akan udara segar yang tinggi menyebabkan perlunya rancangan khusus sistem tata udara RB, untuk mengatasi tingginya tingkat kelembaban udara lingkungan iklim tropik-hangat-lembab seperti umumnya di Indonesia. Pemahaman parameter termal udara melalui kajian psikrometrik digunakan untuk menentukan proses pengondisian udara yang dibutuhkan, sehingga spesifikasi komponen pengondisi udara dapat ditentukan. Pada karta psikrometrik, dapat ditentukan alur proses pengondisian udara sampai masuk ke dalam ruangan yang dikondisikan, dengan melakukan pertimbangan terhadap pembangkitan termal dan kandungan air di dalam ruangan tersebut. Pada karta psikrometrik terdapat protaktor yang menunjukkan kemiringan garis RSHF (*Room Sensible Heat Factor*), yang merupakan perbandingan antara beban kalor sensibel dan gabungan beban kalor sensibel dan beban kalor laten, akibat pembangkitan energi termal di dalam ruangan yang dikondisikan [3].

3 Rancangan Pengondisian Udara pada RB

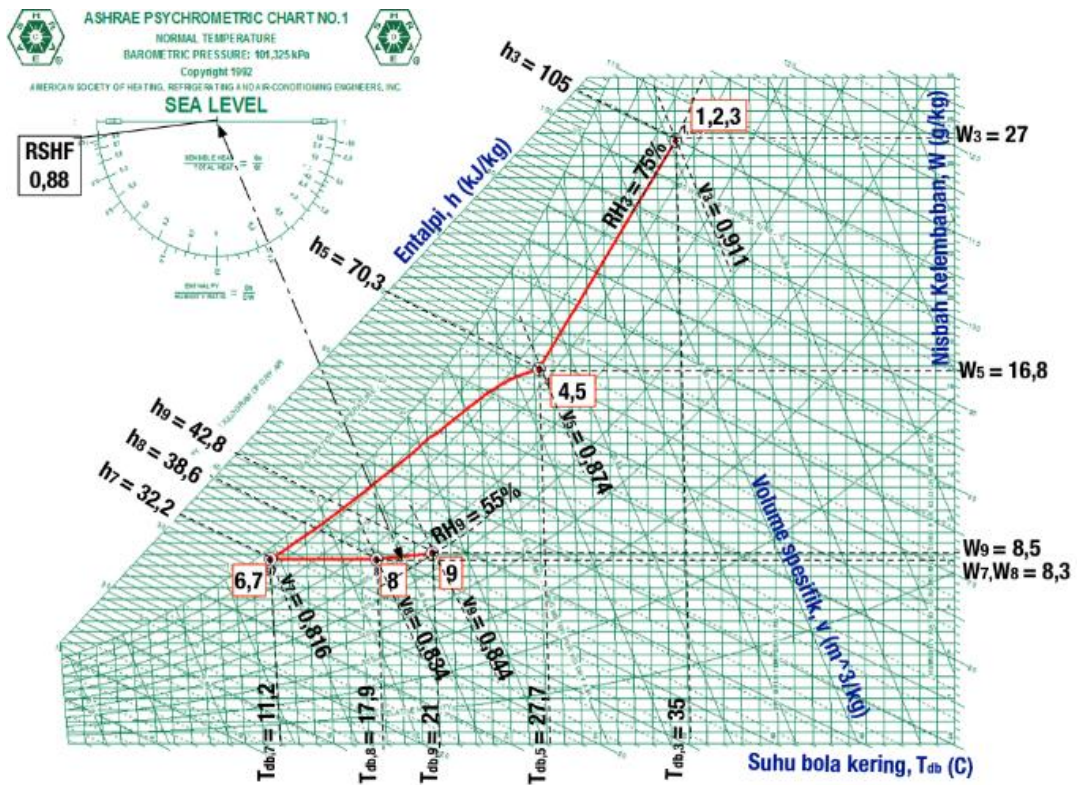
3.1 Proses pengondisian udara pada RB

Proses pengondisian udara pada RB yang dirancang pada karta psikrometrik ditunjukkan pada **Gambar 1**. Agar udara masukan RB dapat dikondisikan, dirancang sistem tata udara RB yang ditunjukkan pada **Gambar 2**. RB memiliki beban termal sensibel sebesar 4 kW dan beban laten

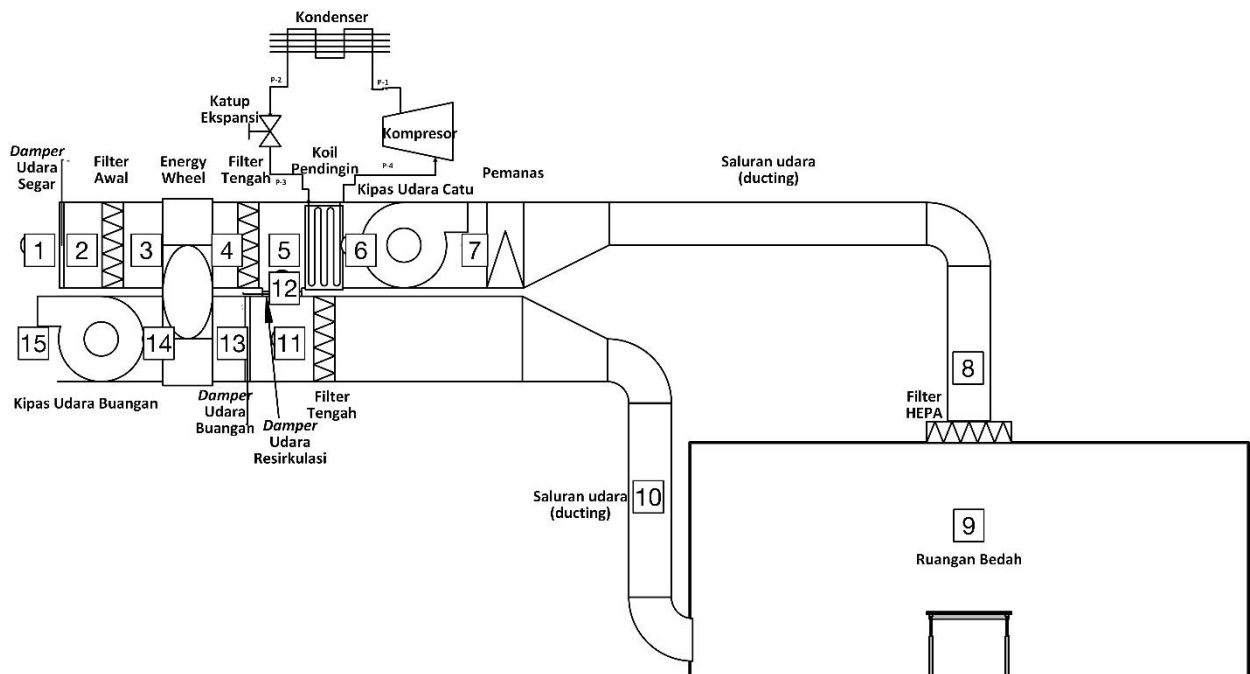
515 Watt [4]. Udara segar pada nomor 1 melewati *damper* udara segar dengan bukaan tertentu dan penapis awal, sehingga kualitas udara menjadi lebih bersih. Selanjutnya, udara melewati *enthalpy wheel* sehingga suhu udara dan nisbah kelembaban udara menurun (titik 4) akibat adanya pertukaran kalor dengan udara buangan yang melewati unit *enthalpy wheel* melalui saluran udara buangan. Setelah melewati *enthalpy wheel*, udara kemudian melewati penapis tengah (titik 5), dan didinginkan oleh unit refrigerasi DX sehingga suhu udara menurun. Agar nisbah kelembaban udara dapat menurun, maka pendinginan sensibel dilakukan terus menerus sehingga suhu udara menjadi lebih rendah dari suhu titik-embunnya. Akibatnya massa air dalam udara tersebut akan berkurang karena proses kondensasi. Udara kemudian dialirkan melewati kipas udara catu dan pemanas elektrik. Suhu udara setelah melewati unit pendingin menjadi terlalu rendah akibat adanya proses kondensasi, sehingga perlu dihangatkan secara sensibel menggunakan pemanas elektrik, agar suhu udara mencapai kondisi rancangan udara catu. Udara catu itu kemudian mengalir ke RB, sedangkan udara dari RB dikeluarkan melalui saluran udara buangan. Udara buangan ditapis menggunakan penapis tengah, lalu melewati *damper* udara buangan. Setelah melewati *damper*, udara buangan yang masih bersuhu lebih rendah dari suhu lingkungan kemudian dialirkan melewati unit *enthalpy wheel*, agar terjadi pertukaran kalor dengan udara segar. Suhu udara buangan akan meningkat dan dialirkan keluar menggunakan kipas pembuangan udara. Perubahan kondisi udara akibat kerja komponen pengondisi udara ditunjukkan pada **Tabel 2**.

Tabel 2 Kondisi udara pada komponen tata udara

Properti udara	Kondisi udara				
	Luar	<i>Enthalpy wheel</i>	Evaporator DX	Catu	Dalam ruangan
T_{db} (°C)	35	27,27	10,76	17,77	21
T_{wb} (°C)	31	23,52	10,67	13,92	15,26
RH (%)	75	74	99	65	55
W (g_{air}/kg_{udara})	104,59	16,8	8,28	8,28	42,75
h (kJ/kg)	27	70,3	31,71	38,87	8,5
v_s (m^3/kg)	0,92	0,87	0,82	0,84	0,844
T_{dp} (°C)	29,88	21,58	10,76	10,67	11,66
ACH					25
Aliran udara					Laminar <i>unidirectional</i>
ΔP_{room} (Pa)					+15



Gambar 1 proses pengondisian udara pada RB [5]



Gambar 2 sistem tata udara pada RB [5]

3.2 Kebutuhan kondisi udara RB pada setiap aktivitas di dalamnya

Sistem tata udara RB tidak hanya diperlukan ketika ruangan tersebut digunakan untuk kegiatan pembedahan, tetapi juga pada saat sebelum dan setelah pembedahan berlangsung. Pada rujukan [5], telah ditentukan kondisi udara pada RB pada setiap kegiatan yang terjadi di dalamnya, sebagai acuan dasar dari sistem kontrol yang dirancang. Kondisi udara tersebut ditunjukkan pada **Tabel 3**.

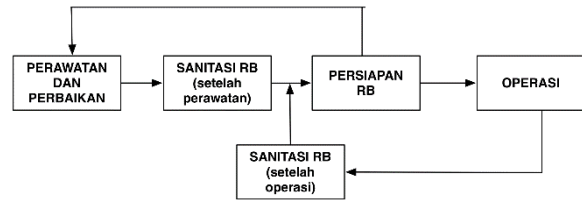
Tabel 3 Kebutuhan kondisi udara pada tiap aktivitas dalam RB [5]

Kondisi termal		Aktivitas		
		Persiapan	Operasi	Sanitasi
Udara catu	T_{db} (°C)	23,5	17,9	27,5
	T_{wb} (°C)	17,25	13,23	22,52
	RH (%)	60,48	65,44	68,83
	W (g _{air} /kg _{udara})	10,24	8,28	15,42
	h (kJ/kg)	49	38,6	63
	v_s (m ³ /kg)	0,854	0,834	0,871
	T_{dp} (°C)	14,4	11,2	19,4
Udara dalam ruangan	T_{db} (°C)	24	21	28
	T_{wb} (°C)	17,78	15,26	22,83
	RH (%)	55	55	65
	W (g _{air} /kg _{udara})	10,2	8,5	15,5
	h (kJ/kg)	50,21	42,75	67,64
	v_s (m ³ /kg)	0,8553	0,844	0,874
	T_{dp} (°C)	14,44	11,66	20,82

4 Rancangan Sistem Kontrol Tata Udara RB

4.1 Mode pengoperasian sistem tata udara

Telah dirancang tiga mode pengoperasian sistem tata udara berdasarkan acuan dasar rancangan, yang telah dijelaskan terdahulu, yaitu mode persiapan, mode operasi, dan mode sanitasi. Mode-mode tersebut mengalami peralihan (transisi) secara berurutan seperti terlihat pada **Gambar 3**, kecuali pada saat terjadi perbaikan atau perawatan. Pada saat sistem mengalami perbaikan atau perawatan, kerja sistem harus dihentikan, serta berlaku beberapa kondisi tertentu sebagai proteksi bagi RB. Agar kondisi termal udara yang tertera pada **Tabel 3** dapat tercapai, maka dirancang kondisi kerja komponen-komponen tata udara seperti ditunjukkan oleh **Tabel 4**.



Gambar 3 peralihan mode pengoperasian sistem tata udara RB [5]

Tabel 4 Kondisi kerja komponen pada tiap mode pengoperasian sistem [5]

Kondisi kerja	Mode		
	Persiapan	Operasi	Sanitasi
Damper udara segar	Buka 32,5%	Buka 100%	Buka 32,5%
Damper udara resirkulasi	Buka 100%	Tutup	Buka 100%
Damper udara buangan	Buka 27,5%	Buka 100%	Buka 27,5%
Kipas udara catu buangan	Cepat		
Kipas udara buangan	Lambat	Cepat	Lambat
Jumlah kompresor aktif	1	2	1
Tekanan udara	20 Pa	20 Pa	20 Pa
Kapasitas pendinginan	21 kW	48 kW	25 kW
Kapasitas pemanasan	12 kW	8 kW	10,3 kW
Laju aliran massa udara	1,15 kg/s	1,24 kg/s	1,2 kg/s

4.2 Analisis respon kondisi udara pada RB

Respon perubahan nilai suhu, kelembaban, dan tekanan udara dalam RB ditinjau dengan cara simulasi model sistem pada relasi matematikal (1), (2), (3), dan (4). Simulasi dilaksanakan menggunakan Matlab dengan fitur Simulink.

$$\rho_a V_{room} c_p \frac{dT_{room}}{dt} = \dot{V}_{sa} \rho_a c_p T_{sa} - \dot{V}_{ex} \rho_a c_p T_{room} + 4U_{wall} A_{wall} (T_{wall} - T_{room}) + U_{ceil} A_{ceil} (T_{ceil} - T_{room}) + U_{flr} A_{flr} (T_{flr} - T_{room}) + \dot{Q}_{load, sens} \quad (1)$$

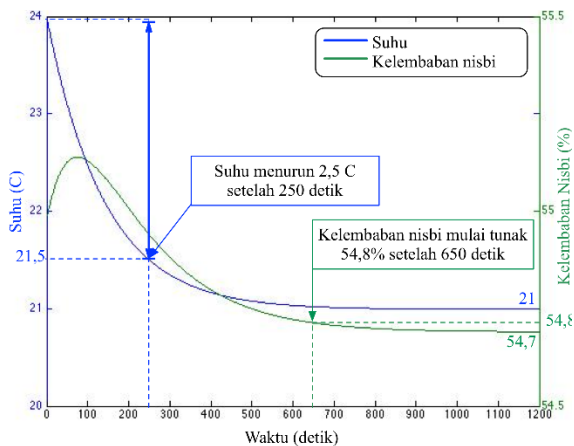
$$\rho_a V_{room} \frac{dW_{room}}{dt} = \dot{V}_{sa} \rho_a W_{sa} - \dot{V}_{ex} \rho_a W_{room} + \dot{W}_{load} \quad (2)$$

$$Cp_{room} \frac{dP_{room}}{dt} = \dot{m}_{sa} - \dot{m}_{door} - \dot{m}_{ex} \quad (3)$$

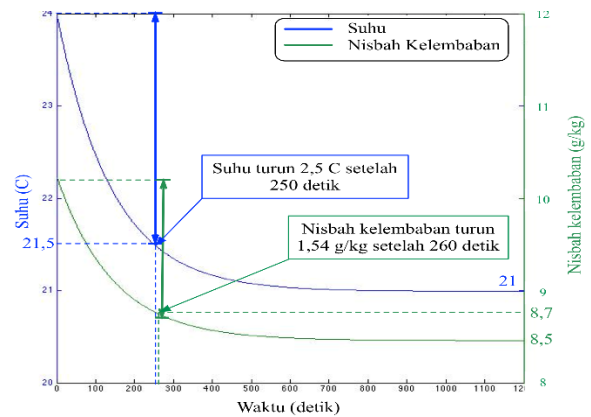
$$\dot{m}_{door} = \frac{P_{room} - P_{adj}}{Z_{door}} \quad (4)$$

Ketika RB akan digunakan untuk kegiatan operasi, maka mode operasi diaktifkan. Mode operasi

diaktifkan setelah mode persiapan, sehingga kondisi termal udara awal sama dengan kondisi mode persiapan, yaitu suhu bola kering $24\text{ }^{\circ}\text{C}$, kelembaban nisbi 55% , dan nisbah kelembaban $10,2\text{ g}_{\text{air}}/\text{kg}_{\text{ud}}$. RB kemudian dicatu dengan udara yang bersuhu $17,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan memiliki nisbah kelembaban $8,3\text{ g}_{\text{air}}/\text{kg}_{\text{ud}}$. Pada simulasi ditunjukkan bahwa respon suhu udara dalam ruangan menurun $2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ setelah 250 detik menjadi $21,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Nisbah kelembaban udara menurun $1,54\text{ g}_{\text{air}}/\text{kg}_{\text{ud}}$ setelah 260 detik menjadi $8,7\text{ g}_{\text{air}}/\text{kg}_{\text{ud}}$. Dibutuhkan waktu selama 650 detik agar nilai kelembaban nisbi dalam ruangan tunak di nilai $54,8\%$. Kondisi termal akhir di ruangan adalah: suhu $21\text{ }^{\circ}\text{C}$, kelembaban nisbi $54,7\%$, dan nisbah kelembaban $8,5\text{ g}_{\text{air}}/\text{kg}_{\text{udara}}$ untuk nisbah kelembaban. *Working Party of Hospital Infection Society* merekomendasikan waktu siap pakai RB dari saat pertama kali diaktifkan adalah 15 mnt (900 dtk). Berdasarkan hasil simulasi, kondisi itu dapat tercapai dan terpenuhi di dalam rentang waktu yang dirokemendasikan. **Gambar 4** menunjukkan respon transien dari suhu dan kelembaban nisbi udara ruangan pada saat mode operasi, sedangkan **Gambar 5** menunjukkan respon transien dari suhu dan nisbah kelembaban.

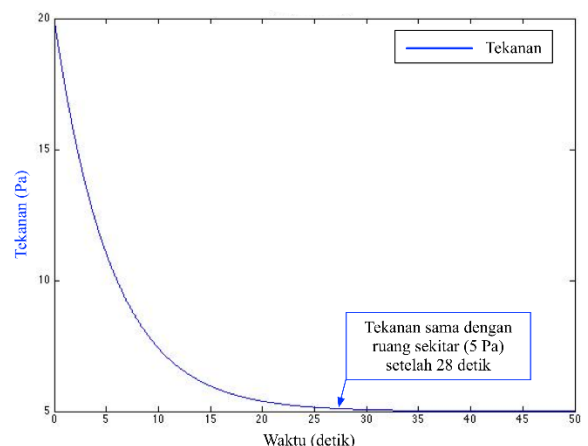


Gambar 4 respon suhu dan kelembaban nisbi RB pada mode operasi [5]



Gambar 5 respon suhu dan nisbah kelembaban RB pada mode operasi [5]

RB dianggap telah memiliki tekanan positif, 15 Pa lebih tinggi dari tekanan di ruangan sekitarnya, di mana ruangan yang bersebelahan dengan RB dianggap bertekanan konstan 5 Pa . Laju massa udara catu yang dialirkan ke dalam ruangan melalui saluran udara masukan dianggap sama dengan laju massa udara yang meninggalkan ruangan melalui saluran buangan sehingga perubahan tekanan RB hanya dipengaruhi udara yang keluar melalui celah pintu. Nilai tahanan pintu yang digunakan merujuk pada rancangan pintu oleh Juniardi dan Pramadhani [4], yaitu $97,65\text{ Pa}\cdot\text{dtk}/\text{kg}$. Melalui simulasi diperoleh bahwa RB perlu waktu 28 dtk untuk menurunkan tekanan udaranya menjadi 5 Pa dari 20 Pa seperti yang ditunjukkan oleh **Gambar 6**.



Gambar 6 respon tekanan dalam RB [5]

5 Pengontrolan Komponen Sistem Tata Udara RB

Kondisi kerja komponen pengondisi udara dikontrolkan berdasarkan mode pengoperasian sistem tata udara yang berlangsung. Terdapat juga

interlock antarpintu RB pada sistem yang dirancang. Pengontrolan komponen sistem berikut sudah disusun dalam diagram tangga, yang telah diuraikan dengan lengkap oleh Simanjuntak dan Putra [5].

5.1 Mode sanitasi

Mode sanitasi diaktifkan setiap setelah sistem mengalami perawatan, dan setiap setelah RB digunakan untuk kegiatan pembedahan. Pada mode ini, tidak terjadi pengontrolan tekanan udara dalam RB. Pengoperasian sistem pada mode ini berdasarkan ketentuan-ketentuan berikut ini:

1. Tombol pengaktifan sistem atau mode sanitasi (S_1) ditekan.
2. Kondisi *damper* berubah seperti berikut:
 - *Damper* udara segar (D_{fa}) terbuka 32,5 %
 - *Damper* udara buangan (D_{ex}) terbuka 27,5 %
3. Pada pengoperasian mode sanitasi setelah perawatan, kipas kondenser (F_{cd}) aktif bersamaan dengan perubahan kondisi *damper*.
4. Setelah mengalami waktu tunda selama 60 dtk, kipas udara catu (F_{sa}) dan kipas udara buangan (F_{ex}) aktif, di mana pada mode ini kipas udara buangan bekerja dengan putaran lambat.
5. Hanya kompresor-1 (K_1) yang aktif. Pada pengoperasian mode sanitasi setelah perawatan, katup solenoid (SV) refrigeran terbuka bersamaan dengan aktifnya kompresor, yaitu 60 dtk setelah aktifnya kipas.
6. Pemanas elektrik nonaktif ketika $T_{sa} > 28,5$ °C.
7. Ketika suhu udara setelah koil pendingin $T_6 > 20,4$ °C dan tekanan rendah refrigeran $P_{ev} > 9,98$ bar, maka kompresor aktif.

5.2 Mode persiapan

Pada mode persiapan, sistem bekerja mengikuti ketentuan-ketentuan berikut ini:

1. Tombol pengaktifan mode persiapan (S_2) ditekan.
2. Udara sanitasi dibuang dengan melakukan perubahan sebagai berikut:
 - *Damper* udara segar terbuka 100 %.
 - *Damper* udara buangan terbuka 100 %.
 - *Damper* udara resirkulasi (D_{re}) tertutup.
 - Setelah waktu tunda 60 dtk, putaran kipas udara buangan menjadi cepat.
3. Setelah tiga menit, kondisi *damper* dan kipas udara buangan berubah kembali seperti pada mode sanitasi.
4. Kompresor-2 (K_2) aktif 60 dtk setelah kondisi pada nomor tiga terpenuhi.
5. Pemanas elektrik nonaktif ketika $T_{sa} > 24,5$ °C
6. Terjadi pengontrolan kompresor yang memenuhi kondisi berikut ini:

- K_2 nonaktif kembali setelah 10 menit bekerja.
- Ketika suhu udara $T_6 > 15,4$ °C dan tekanan rendah refrigeran $p_{ev} > 9,98$ bar, K_1 akan aktif.

7. Terjadi pengontrolan tekanan udara yang memenuhi ketentuan berikut ini:

- Ketika $\Delta p_{room} < 12$ Pa atau salah satu pintu pada RB terbuka, maka *damper* udara buangan tertutup.
- Ketika $\Delta p_{room} > 18$ Pa, maka *damper* resirkulasi terbuka 100 % dan *damper* udara segar hanya terbuka 32,5 %.

Selain pengontrolan mode sanitasi dan mode persiapan, ada kemungkinan untuk mengalihkan sistem ke mode perawatan dan perbaikan atau menonaktifkan sistem. Dibutuhkan urutan tertentu hingga sistem menjadi nonaktif, seperti berikut ini.

1. Pemanas elektrik nonaktif.
2. *Damper* udara segar dan udara buangan menutup.
3. Kipas udara catu dan kipas udara buangan nonaktif.
4. Katup solenoid refrigeran menutup.
5. Terdapat waktu tunda selama tiga menit untuk proses *pump down*, kemudian kompresor nonaktif.
6. Setelah waktu tunda selama 60 dtk, kipas kondenser nonaktif.

5.3 Mode operasi

Mode operasi diaktifkan menjelang dan selama berlangsungnya kegiatan pembedahan, sehingga dibutuhkan pengontrolan sistem seperti berikut ini:

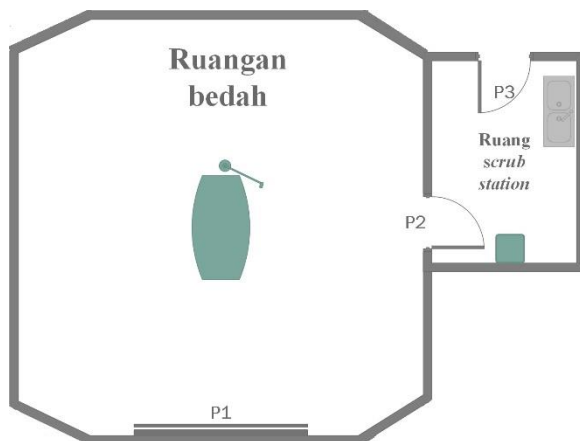
1. Tombol pengaktifan mode operasi (S_3) ditekan.
2. Kondisi *damper* berubah seperti berikut ini:
 - *Damper* udara segar terbuka 100 %.
 - *Damper* udara buangan terbuka 100 %.
 - *Damper* udara resirkulasi tertutup.
3. Setelah 60 dtk, putaran kipas udara buangan menjadi cepat.
4. Kompresor-2 (K_2) aktif 60 dtk setelah kondisi pada nomor tiga terpenuhi.
5. Pemanas elektrik nonaktif ketika $T_{sa} > 18,8$ °C.
6. Ketika suhu udara setelah koil pendingin $T_6 > 11,8$ °C dan tekanan rendah refrigeran $p_{ev} > 9,98$ bar, maka K_1 aktif.
7. Terjadi pengontrolan tekanan udara yang memenuhi ketentuan berikut ini:
 - Ketika $\Delta p_{room} < 12$ Pa atau salah satu pintu pada RB terbuka, maka *damper* udara buangan hanya terbuka 27,5 % dan putaran kipas udara buangan melambat.

- Ketika $\Delta p_{\text{room}} > 18 \text{ Pa}$, maka *damper* udara buangan kembali terbuka 100 % dan putaran kipas udara buangan kembali cepat.

5.4 Sistem *interlock* antarpintu RB

Pengondisian udara RB menyebabkan pintu-pintu yang terletak di ruangan tersebut membutuhkan perlakuan khusus. Tidak boleh terjadi dua pintu yang terbuka secara bersamaan. Ketika terdapat salah satu pintu yang dibuka, maka pintu yang lain harus terkunci. Hal tersebut merupakan upaya antisipasi agar tekanan udara dalam RB tetap positif. Faktor kebersihan udara dalam RB menjadi pertimbangan utama penerapan kondisi tersebut.

Pada RB yang dirancang, terdapat tiga pintu yang terlibat dalam pengondisian sistem *interlock*, yaitu pintu utama RB (P1), pintu *scrub station* (P2), dan pintu koridor kotor (P3). Pintu RB merupakan pintu utama tempat masuk dan keluarnya pasien serta tenaga medis operasi. Pintu *scrub station* menghubungkan antara RB dengan ruang *scrub station*. Sedangkan pintu koridor kotor merupakan pintu yang menghubungkan ruang *scrub station* dengan koridor kotor, di mana pintu tersebut biasanya dilalui oleh petugas kebersihan yang mengeluarkan limbah pasca operasi dari ruang *scrub station*. Lokasi penempatan pintu-pintu tersebut dapat dilihat pada **Gambar 7**.



Gambar 7 penempatan pintu pada RB [5]

6 Kesimpulan

Telah dirancang sistem pengondisian udara ruangan bedah dengan tiga mode pengoperasian: mode sanitasi, mode persiapan, dan mode operasi. Properti udara catu yang dibutuhkan RB pada mode operasi memiliki suhu bola kering sebesar $17,9^\circ\text{C}$ dan kelembaban nisbi 65%. Kondisi termal udara yang menjadi objek

perancangan, yaitu suhu, kelembaban nisbi, aliran, dan tekanan. Suhu udara RB dikondisikan menggunakan pemanas elektrik dengan kapasitas daya 12 kW yang dikontrol berdasarkan perubahan suhu udara catu. Kelembaban nisbi udara dikondisikan menggunakan unit pengondisi udara *direct expansion* dengan menggunakan dua buah kompresor dengan kapasitas daya masing-masing 28 kW. Pengaktifan kompresor tersebut berdasarkan mode kerja, suhu udara setelah melewati koil pendingin, dan tekanan refrigeran setelah melalui evaporator. Aliran udara dikontrol menggunakan *damper* udara catu, *damper* udara buangan, dan *damper* udara resirkulasi yang dapat diubah besar bukaannya, serta kipas udara catu yang memiliki kecepatan putaran konstan dan kipas pembuangan udara yang dapat diubah kecepatan putarannya. Terdapat juga sistem *interlock* antar pintu RB untuk menjaga tekanan udara di dalamnya. Waktu yang diperlukan ruangan untuk mencapai suhu tunak, nisbah kelembaban tunak, dan kelembaban nisbi tunak berdasarkan simulasi model matematik berturut-turut ialah 250 detik, 260 detik, dan 650 detik dan waktu yang diperlukan tekanan udara dalam ruangan untuk mencapai tekanan udara yang sama dengan ruangan di sekitarnya, yaitu 28 detik.

7 Daftar simbol

A	=	luas penampang (m^2)
c_p	=	kapasitas kalor udara (kJ.kg/K)
CP	=	kapasitansi tekanan (mol/Pa)
h	=	entalpi spesifik (kJ/kg)
\dot{m}	=	laju aliran massa (kg/dtk)
P	=	tekanan (Pa)
ρ	=	kerapatan massa (kg/m^3)
\dot{Q}	=	laju aliran kalor (W)
RH	=	kelembaban nisbi (%)
T	=	suhu ($^\circ\text{C}$)
U	=	koefisien transmisi termal (W/m.K)
v	=	volume spesifik (m^3/kg)
V	=	volume (m^3)
\dot{V}	=	laju aliran volumetrik (m^3/dtk)
W	=	nisbah kelembaban ($\text{g}_{\text{air}}/\text{kg}_{\text{ud}}$)
Z	=	tahanan udara (Pa.dtk/kg)

a	=	udara
adj	=	sekitar
ceil	=	langit-langit
db	=	bola kering
dp	=	titik embun
door	=	pada pintu
ev	=	evaporasi
ex	=	udara buangan
flr	=	lantai
load	=	beban
room	=	pada ruangan
sens	=	sensibel
sa	=	udara catu
wall	=	pada dinding
wb	=	bola basah

8 Daftar Pustaka

- [1] ASHRAE, "Clean Spaces," in *HVAC Applications*, Atlanta, ASHRAE, 2011, pp. 18.1-18.22.
- [2] Kementerian Kesehatan Republik Indonesia, *Pedoman Teknis Ruang Operasi Rumah Sakit*, Jakarta, 2012.
- [3] ASHRAE, *Fundamentals*, Atlanta: ASHRAE, Inc, 2009.
- [4] Pramadhani, E.R. dan Juniardi, R. *Perancangan Sistem Tata Udara Ruang Bersih Bertekanan untuk Diterapkan sebagai Ruang Operasi*. Laporan Tugas Akhir, Program Studi Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Bandung, Bandung, 2014.
- [5] Simanjuntak, E.K. dan Putra, S.K. *Perancangan dan Kendali Mode Pengoperasian Sistem Tata Udara Ruangan Bedah*. Laporan Tugas Akhir, Program Studi Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Bandung, Bandung, 2015.

Seminar Nasional Instrumentasi, Kontrol dan Otomasi (SNIKO) 2015
Bandung, Indonesia, 10-11 Desember 2015