

ANALISIS KAPASITAS PENDINGINAN RUANG OPERASI MENGGUNAKAN METODE PERHITUNGAN MUNDUR BERDASARKAN STANDAR *AIR CHANGES PER HOUR* (ACH) PADA PERMENKES NOMOR 40 TAHUN 2022

Yudi Wahyudin¹, Susilawati^{1*}, Anita Septiani¹, Ade Suryatman Margana¹

¹ Jurusan Teknik Refrigerasi dan Tata Udara, Program Studi Sarjana Terapan Teknik Pendingin dan Tata Udara, Politeknik Negeri Bandung

Email korespondensi: susilawati@polban.ac.id

Abstrak. Sistem tata udara ruang operasi wajib memenuhi standar minimal 25 *Air Changes per Hour* (ACH) sesuai Permenkes No. 40 Tahun 2022 demi menjaga sterilitas dan mengendalikan infeksi. Namun, penetapan laju aliran udara konstan berbasis ACH ini mengubah paradigma desain beban pendinginan secara fundamental. Penelitian ini mengevaluasi kecukupan termal standar 25 ACH dalam menangani beban pendinginan dinamis menggunakan metode perhitungan mundur (*reverse calculation*). Studi kasus dilakukan pada model ruang operasi standar bervolume 120 m³ dengan total disipasi panas internal peralatan medis sebesar 7,0 kW. Hasil analisis psikometrik menunjukkan bahwa kapasitas penyerapan panas sensibel maksimum ruangan (RSHmaks) mencapai 13,23 kW, yang secara signifikan melampaui estimasi beban panas aktual puncak ruangan sebesar 8,66 kW. Hal ini menghasilkan surplus kapasitas termal sensibel sebesar 4,57 kW dan beban ruang hanya memanfaatkan 65% kapasitas yang tersedia. Disimpulkan bahwa regulasi 25 ACH menyediakan kelebihan keamanan termal (*thermal safety margin*) yang sangat andal, sehingga kapasitas sistem pendingin dipastikan mampu mengantisipasi fluktuasi beban panas tinggi dari peralatan medis modern

Kata Kunci: HVAC, Ruang Operasi, Perhitungan Mundur, ACH.

Abstract. Operating room air conditioning systems, in accordance with Minister of Health Regulation No. 40 of 2022, must use a standard of 25 *Air Changes per Hour* (ACH) to maintain sterility. This study evaluates whether this standard is sufficient to handle the cooling load. Through a case study on a standard operating room (120 m³), a comparative analysis was conducted between the maximum cooling capacity that can be provided by the 25 ACH airflow and the real heat load (from occupants, lighting, and 7.0 kW medical equipment). The results show that the maximum sensible heat absorption capacity of the room (13.2 kW) exceeds the estimated peak real heat load (8.66 kW). This resulted in a sensible thermal capacity surplus of 4.57 kW, while the room load utilized only 65% of the available capacity. In conclusion, the 25 ACH regulation provides a highly reliable thermal safety margin, ensuring that the cooling system capacity is fully capable of handling high heat load fluctuations from modern medical equipment.

Keywords: HVAC, Operating Room, Reverse Calculation, ACH.

*Penulis Korespondensi

Diterima : 20 Juli 2026 Disetujui : 10 Agustus 2026

Dipublikasikan : 30 September 2026

1. Pendahuluan

Sistem Tata Udara (*Heating, Ventilation, and Air Conditioning* - HVAC) pada area kritis seperti ruang operasi memiliki peran vital yang melampaui kenyamanan termal konvensional. (Sadrizadeh *et al.*, 2021; D'Alicandro & Mauro, 2023; D'Alicandro

& Mauro, 2022). Sistem ini berperan dalam pengendalian kontaminan udara dan mendukung upaya pencegahan infeksi pada ruang operasi (Romano *et al.*, 2020; Colella *et al.*, 2022; Montuori *et al.*, 2024). Guna memastikan keandalan tersebut, Kementerian Kesehatan RI mengeluarkan Peraturan Menteri Kesehatan No. 40 yang menetapkan laud pertukaran udara

minimum sebesar 25 kali per jam (25 ACH) untuk *cleanroom* rumah sakit (Kementerian Kesehatan Republik Indonesia, 2022; Suwiherawan *et al.*, 2021; Sabillah *et al.*, 2025).

Pada metode perancangan HVAC konvensional, laju aliran udara merupakan variabel keluaran (*output*) yang dihitung secara bertahap dari akumulasi beban pendinginan detail (Suwiherawan *et al.*, 2021; Sabillah *et al.*, 2025; Fedor *et al.*, 2022). Sebaliknya, adanya regulasi Permenkes No. 40 Tahun 2022 menjadikan laju aliran udara berbasis ACH menjadi titik awal desain atau variabel masukan (*input*) yang bersifat tetap. Perubahan pendekatan ini menimbulkan ketidakpastian teknis, apakah kapasitas pendinginan yang dihasilkan oleh aliran udara konstan sebesar 25 ACH tersebut secara menyeluruh mampu dan cukup untuk mengatasi fluktuasi beban panas aktual (dinamis) di dalam ruang operasi?

Penelitian ini bertujuan untuk menjembatani celah tersebut dengan menerapkan metode perhitungan mundur (*reverse calculation*). Melalui pendekatan

ini, batas aman penyerapan kalor maksimum yang mampu disediakan oleh ruangan akibat pasokan udara 25 ACH akan dievaluasi dan dibandingkan secara langsung terhadap kebutuhan beban pendinginan teoretis aktual pada kondisi beban puncak.

Kajian terdahulu telah mengevaluasi konfigurasi ventilasi, efektivitas pertukaran udara, kualitas udara, kenyamanan termal, serta konsumsi energi pada ruang operasi (Sadrizadeh *et al.*, 2021; Lans *et al.*, 2022; Gormley *et al.*, 2017). Perbedaan mendasar dari penelitian ini adalah penerapan metode perhitungan mundur (*reverse calculation*). Di penelitian lain menjadikan ACH sebagai hasil akhir dari beban ruangan, penelitian ini membalik prosesnya dengan menjadikan standar 25 ACH dari Permenkes No.40 Tahun 2022 sebagai variabel masukan tetap, untuk kemudian mencari batas aman penyerapan kalor maksimum yang bisa disediakan oleh ruangan secara aktual. Perbandingan karya tulis ilmiah sejenis dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Perbandingan Karya Ilmiah Sejenis

Penulis / Tahun	Judul Penelitian Sejenis	Parameter yang Diteliti	Perbedaan Parameter dengan Penelitian Utama
Sabillah <i>et al.</i> , 2025	Perhitungan Daya Panas Dan Kapasitas Daya Pendingin Udara Ruang Operasi Rumah Sakit X Jakarta	Kapasitas AC vs Risiko SSI pada Ruang Operasi	Menggunakan perhitungan beban detail menggunakan pendekatan beban puncak.
Vijaykrishna & Balaji, 2023	Impact of Indoor Temperature and Humidity in IAQ of Health Care Buildings	Pengaruh ACH terhadap kestabilan kelembapan udara (RH).	Berfokus pada kualitas udara dalam ruangan (IAQ) secara umum.
A Khalil et al., 2020	Assessment of thermal comfort in operating rooms using PMV-PPD model	Kenyamanan termal dokter bedah akibat disipasi panas alat medis.	Fokus pada indeks kenyamanan personal (Fanger Model), bukan kapasitas termal ruangan.

2. Metodologi

2.1 Waktu dan Tempat

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Februari hingga Mei 2026 di Ruang Operasi RSAU dr. Salamun, Kota Bandung, Jawa Barat. Denah ruangan dapat dilihat pada Gambar 1.

2.2 Alat dan Bahan

Beberapa instrumen (perangkat bantu) digunakan untuk mendukung proses perhitungan dan analisis, sebagai berikut:

a. *Microsoft Excel*

Perangkat lunak yang digunakan untuk melakukan seluruh perhitungan, tabulasi data, dan proses iterasi pada metode perhitungan mundur.

b. *Software Diagram Psikrometrik (ASHRAE Psychrometric Chart Analysis)* dan Aplikasi berbasis Web

Perangkat Lunak yang dapat memvisualisasikan proses-proses termodinamika, memvalidasi hasil perhitungan, dan memplotkan titik-titik kondisi udara pada diagram Psikrometrik.

Penelitian ini merupakan studi kasus analitis berbasis data desain dan spesifikasi sistem HVAC terpasang pada ruang operasi RSAU dr. Salamun. Penelitian tidak mencakup pengukuran langsung terhadap kondisi termal, aliran udara, partikel, maupun mikrobiologi ruang. Objek studi berupa ruang operasi yang terletak di wilayah Bandung (tropis lembab) dengan volume ruang 120 m³. Tata letak ruang operasi dirancang pada zona interior (interior zone) yang dikelilingi oleh koridor bersih dan koridor kotor terkondisi, dengan parameter desain sebagai berikut:

- Dimensi ruang:
Luas lantai 40 m², tinggi plafon 3 m, volume 120 m³.
- Kondisi Luar (*Outdoor Design Boundary*):
Tdb = 35°C, RH = 70%,
Rasio kelembapan (Wo)=25,55 g/kg.

(Catatan: Digunakan sebagai batas acuan perhitungan beban *pre-cooling* udara segar/*fresh air* pada kondisi puncak wilayah Bandung).

- Kondisi target dalam (*Indoor*):
Tdb = 22°C,
RH = 50%,
Rasio kelembapan (Wr) = 8,21 g/kg,
Tdp = 11,09°C.
- Sirkulasi udara (Permenkes):
Total aliran udara = 25 ACH,
Udara segar (*Fresh Air*) = 5 ACH.
- Konstruksi Bangunan:
Dinding dan atap menggunakan sandwich panel PIR dengan *U-value* 0,45 W/m²·K (ketebalan 50 mm, Acier Steel) yang berbatasan langsung dengan koridor terkondisi, sehingga transmisi kalor selubung (*envelope heat gain*) bersifat minimal.
- Beban Internal:
8 orang (aktivitas ringan),
pencahayaan umum LED 15 W/m²,
dan beban puncak peralatan medis sebesar 7.000 W sesuai pada Tabel 2.

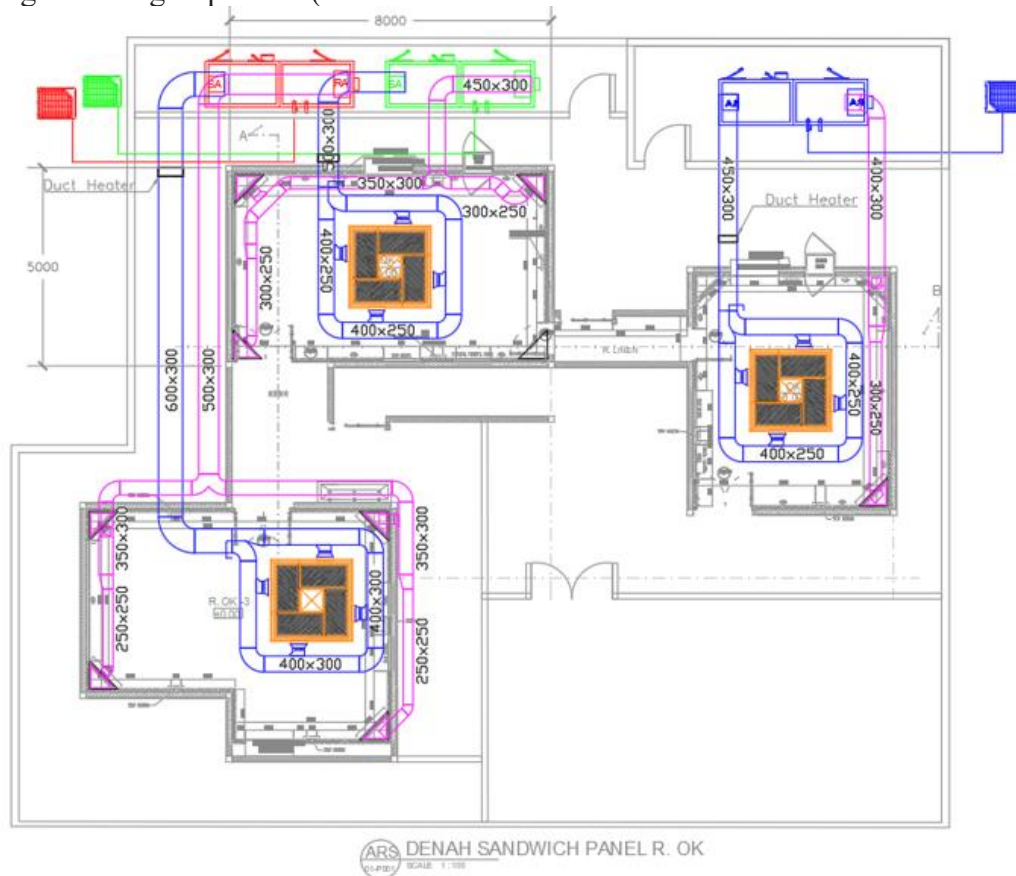
Tabel 2. *Recommended Heat Gain from Typical Medical Equipment (ASHRAE, 2015)*

Equipment	Nameplate, W	Peak, W	Average, W
Anesthesia system	250	177	166
Blanket warmer	500	504	221
Blood pressure meter	180	33	29
Blood warmer	360	204	114
ECG/RESP	1440	54	50
Electrosurgery	1000	147	109
Endoscope	1688	605	596
Harmonical scalpel	230	60	59
Hysteroscopic pump	180	35	34
Laser sonics	1200	256	229
Optical microscope	330	65	63
Pulse oximeter	72	21	20
Stress treadmill	N/A	198	173
Ultrasound system	1800	1063	1050
Vacuum suction	621	337	302
X-ray system	968	534	82
	1725		480
	2070		18

- Sistem Terpasang:
AHU DX 10 HP, Kondisi Desain *Off-Coil* Terendah 9,1°C, Kapasitas *Reheat* 9 kW, *By-Pass Factor* (BF) 0,03.

Parameter temperatur, kelembapan, dan laju pergantian udara ditetapkan berdasarkan regulasi dan persyaratan desain lingkungan ruang operasi (Kementerian

Kesehatan Republik Indonesia, 2022; Suwiherawan *et al.*, 2021; Montuori *et al.*, 2024; Deiana *et al.*, 2022).



Gambar 1. Layout Ruang Operasi RSAU dr. Salamun

2.3 Metode Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan melalui beberapa tahapan yang sistematis, yang digambarkan pada Gambar 2. Proses kalkulasi termodinamika dan psikrometri dibagi menjadi tiga tahapan perhitungan utama:

a. Metode Perhitungan Maju

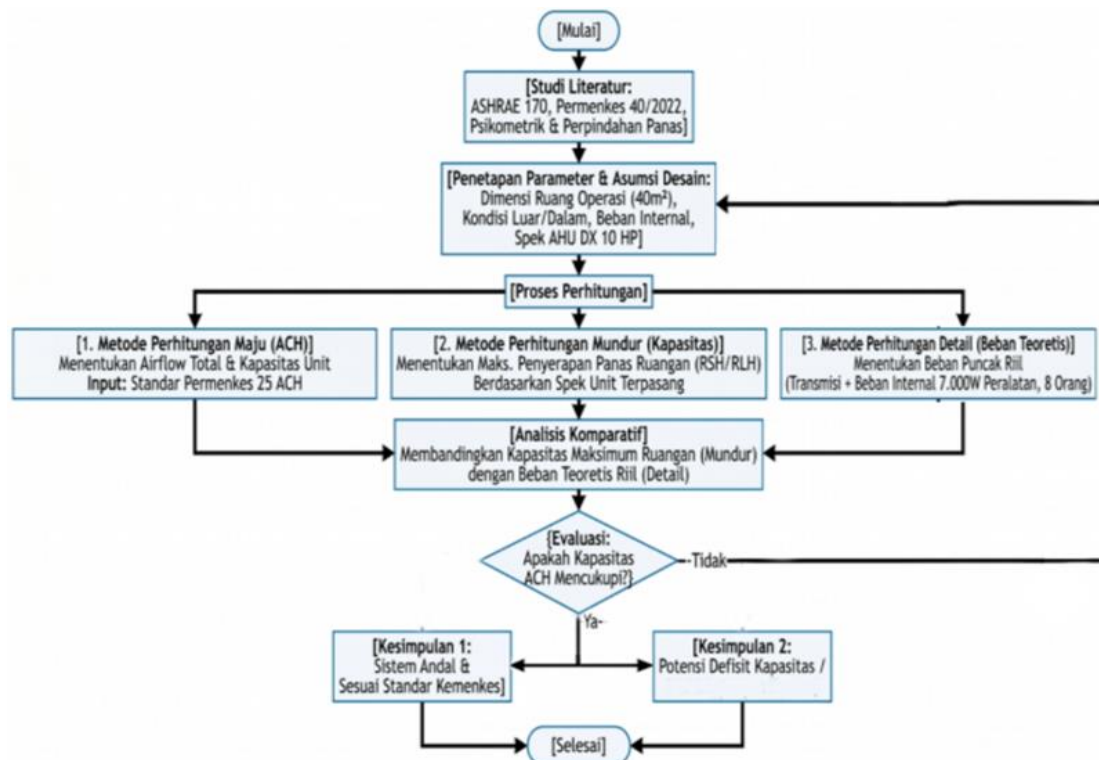
Menghitung total laju sirkulasi udara dan beban total sistem pendingin (*Grand Total Heat/GTH*) berdasarkan volume ruangan dan standar ACH.

b. Metode Perhitungan Mundur

Mengekstrak daya serap kalor maksimum spesifik di dalam ruangan (*Room Sensible Heat/RSH* dan *Room Latent Heat/RLH*) dari performa unit sirkulasi udara yang terpasang.

c. Metode Perhitungan Detail

Menghitung beban termal puncak aktual teoretis yang terjadi di dalam ruangan (transmisi konduksi, disipasi panas internal dari manusia, lampu, dan alat medis (Sabillah *et al.*, 2025; Suwiherawan *et al.*, 2021).



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

2.4 Parameter Pengujian

a. Perhitungan Maju Menggunakan ACH

Metode perhitungan beban pendinginan (*cooling load*) berdasarkan ACH adalah cara cepat untuk menentukan kapasitas pendinginan yang dibutuhkan berdasarkan seringnya udara di dalam ruangan diganti setiap jamnya. Nilai dari ACH dipakai sebagai parameter dari besarnya laju aliran udara yang dibutuhkan terhadap volume ruangan (ASHRAE, 2013) pada Persamaan 1 dan 2.

$$Q = \frac{ACH \times V}{3600} \quad (1)$$

$$ACH = \frac{3600 \times Q_{SUPPLY}}{V} \quad (2)$$

Keterangan: Q = Debit udara (m³/s),
ACH = Pertukaran udara dalam satu jam
V = Volume ruangan (m³)

Setelah diketahui nilai *airflow* total dan juga *airflow* balik (*return*), kemudian menentukan pencampuran udara dengan Persamaan 3 dan 4.

$$T_m = \frac{(Q_f \times T_f) + (Q_r \times T_r)}{(Q_f + Q_r)} \quad (3)$$

$$W_m = \frac{(Q_f \times W_f) + (Q_r \times W_r)}{(Q_f + Q_r)} \quad (4)$$

Keterangan: T_m = Temperatur udara campuran (°C)

W_m = Rasio kelembapan udara campuran (g/kg)

Q_f = Suplai udara *fresh air* (l/s)

Q_r = Suplai udara *return air* (l/s)

T_f = Temperatur udara *fresh air* (°C)

T_r = Temperatur udara *return air* (°C)

W_f = Rasio kelembapan *fresh air* (g/kg)

W_r = Rasio kelembapan *return air* (g/kg)

Hasil kapasitas debit udara ini kemudian digunakan untuk menentukan spesifikasi *Air Handling Unit* (AHU). Beban koil dihitung berdasarkan selisih kondisi antara udara masuk koil (*entering coil*) dan udara keluar koil (*off-coil*) sesuai dengan Persamaan 5-7.

$$GSH = 1,23 \times Q_{total} \times \Delta T_{db} \text{ koil} \quad (5)$$

$$GLH = 3,01 \times Q_{total} \times \Delta W \text{ koil} \quad (6)$$

$$GTH = GSH + GLH \quad (7)$$

Keterangan: GSH = Beban koil sensibel (kW)
 GLH = Beban koil laten (kW)
 GTH = Beban koil total/
 Kapasitas AHU (kW)
 ΔT_{db} = T_{db} masuk – keluar koil (°C)
 ΔW = *Humidity Ratio* masuk – keluar koil (g/kg)
 Q = Debit udara (m³/s)

b. Perhitungan Mundur (Kapasitas Ruangan)

Proses perhitungan dimulai dari parameter yang sudah diketahui dari metode ACH (Total *airflow*, GSH, GLH dan GTH) untuk kemudian memisahkan variabel beban ruangan (RSH & RLH) dengan mengurangi dari beban outside (OSH, OLH dan OTH). Nilai RSH dan RLH merepresentasikan kapasitas termal bersih yang tersedia untuk menangani beban sensibel dan laten di dalam ruang setelah komponen beban udara luar dikurangkan dari kapasitas total koil.

$$OSH = 1,23 \times Q_f \times (T_o - T_r) \quad (8)$$

$$OLH = 3,01 \times Q_f \times (W_o - W_r) \quad (9)$$

$$OTH = OSH + OLH \quad (10)$$

$$RSH \text{ Maksimum} = GSH - OSH \quad (11)$$

$$RLH \text{ Maksimum} = GLH - OLH \quad (12)$$

$$RSHF = RSH / (RSH + RLH) \quad (13)$$

$$ERSH = RSH + (BF \times OSH) \quad (14)$$

$$ERLH = RLH + (BF \times OLH) \quad (15)$$

$$ESHF = ERSF / (ERSH + ERLH) \quad (16)$$

Keterangan: OSH = *Outside Sensible Heat*
 OLH = *Outside Latent Heat*
 OTH = *Outside Total Heat*
 RSH = *Room Sensible Heat*
 RLH = *Room Latent Heat*
 RSHF = *Room Sensible Heat Factor*
 ERSF = *Effective Room sensible Heat*
 ERLH = *Effective Room latent Heat*

ESHF = *Effective Sensible Heat Factor*

BF = *Bypass Factor*

ΔT_{db} = T_{db} luar – T_{db} ruangan (°C)

ΔW = *Humidity Ratio* luar – ruangan (g/kg)

Q = Debit udara (m³/s)

Kondisi *Supply Air* ditentukan melalui analisis grafik psikrometri dengan memanfaatkan nilai *Room Sensible Heat Factor* (RSHF) dan *Effective Room Sensible Heat Factor* (ERSHF). Nilai RSHF digunakan untuk menentukan kemiringan garis proses ruangan (room process line) dari kondisi desain ruangan menuju kondisi udara pasokan. Sementara itu, nilai ERSHF digunakan untuk mengondisikan pengaruh infiltrasi udara luar akibat adanya Bypass Factor (BF) pada koil pendingin. Garis ERSHF ditarik hingga memotong kurva saturasi untuk menentukan titik Apparatus Dew Point (ADP). Titik perpotongan antara garis ERSHF dan Bypass Factor tersebut menetapkan temperatur dan kelembapan spesifik udara *supply* yang dibutuhkan untuk menjaga kondisi termal ruangan.

Persamaan OSH dan OLH yang digunakan mengikuti metodologi perhitungan beban dari *ASHRAE Fundamentals* (ASHRAE, 2013). Konstanta metrik ini adalah standar internasional yang digunakan untuk menentukan kapasitas koil agar mampu menangani beban sensibel sekaligus beban laten secara presisi.

c. Perhitungan Detail (Beban Teoritis)

Metode ini merupakan pendekatan konvensional untuk menentukan beban pendinginan total. Perhitungan dilakukan dengan menjumlahkan semua sumber panas secara rinci, yang meliputi:

- Beban Transmisi: Panas yang merambat melalui dinding, atap, dan lantai.
- Beban Internal: Panas dari penghuni (sensibel dan laten), pencahayaan umum (sensibel), dan total disipasi

panas dari seluruh peralatan medis (sensibel).

Berdasarkan standar *ASHRAE Handbook Fundamentals* (2013), perhitungan beban transmisi melalui dinding/atap menggunakan metode *Cooling Load Temperature Difference* (CLTD) dapat dilihat pada Persamaan 1.

$$Q = U \cdot A \cdot CLTD_{corr} \quad (17)$$

Keterangan: U = Koefisien perpindahan panas keseluruhan ($W/m^2 \cdot K$)
A = Luas permukaan (m^2)
CLTD_{corr} = Perbedaan temperatur yang dikoreksi ($^{\circ}K$)

Namun, beban transmisi pada penelitian ini dihitung menggunakan persamaan perpindahan panas konduksi dengan nilai CLTD_{corr} digantikan dengan ΔT karena dinding ruangan operasi tidak langsung berhubungan dengan udara luar.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Perhitungan Laju Aliran Udara dan Beban Total Sistem (Metode Maju)

Laju aliran sirkulasi udara total dihitung berdasarkan Persamaan 1 untuk nilai sirkulasi udara fasilitas Kesehatan.

a. Airflow Total

$$\begin{aligned} Q_{total} &= (25 \times 120 \text{ m}^3) / 3600 \\ &= 0,833 \text{ m}^3/\text{s} \\ &= 833 \text{ L/s} (\approx 3000 \text{ m}^3/\text{h}) \end{aligned}$$

Sesuai ketentuan minimum 5 ACH untuk pasokan udara luar (*fresh air*) maka diperoleh:

$$\begin{aligned} \text{a. } Q_{fresh \text{ air}} &= 5 \times 120 \text{ m}^3/\text{h} \\ &= 600 \text{ m}^3/\text{h} \\ &(\approx 166,7 \text{ L/s}) \\ \text{b. } Q_{return \text{ air}} &= 3000 - 600 \\ &= 2400 \text{ m}^3/\text{h} \\ &(\approx 666,7 \text{ L/s}) \end{aligned}$$

Berdasarkan pencampuran udara sirkulasi ($Q_{return \text{ air}}$) dan udara luar ($Q_{fresh \text{ air}}$), dengan menggunakan Persamaan 3 dan 4 diperoleh kondisi udara campuran masuk koil (*entering air condition*) dengan temperatur udara kering (T_{db}) = $24,6^{\circ}C$ dan rasio kelembapan (W_m) = $11,68 \text{ g/kg}$.

Dengan menetapkan kondisi udara keluar evaporator (*off-coil*) sebesar $9,1^{\circ}C$ (berada di bawah *dew point* target ruangan untuk menjamin dehumidifikasi), beban koil pendingin total dihitung berdasarkan Persamaan 5-7 sebagai berikut:

a. Beban Koil Sensibel

$$\begin{aligned} (GSH) &= 1,23 \times 833 \text{ L/s} \times (24,6^{\circ}C - 9,1^{\circ}C) \\ &= 15.893 \text{ W} \approx 15,89 \text{ kW} \end{aligned}$$

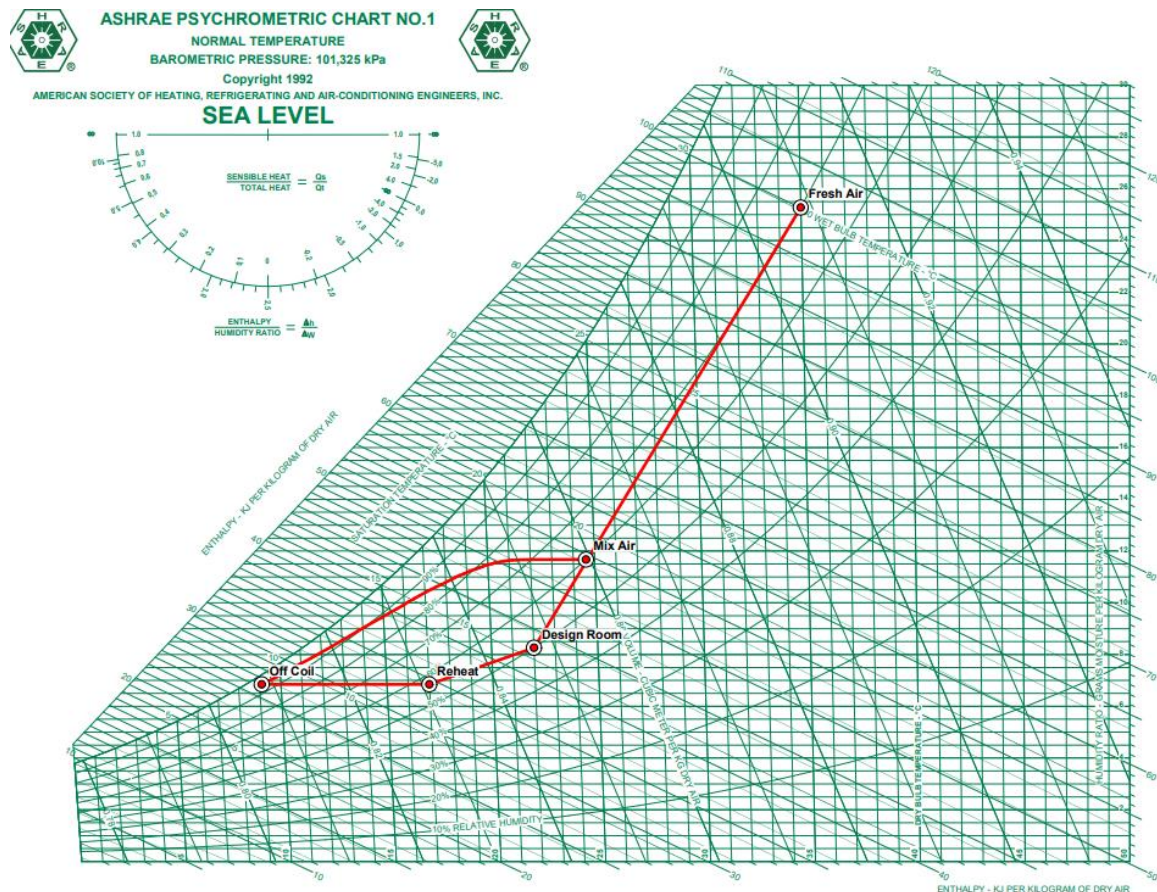
b. Beban Koil Laten

$$\begin{aligned} (GLH) &= 3,01 \times 833 \text{ L/s} \times (11,68 - 6,84 \text{ g/kg}) \\ &= 12.123 \text{ W} \approx 12,12 \text{ kW} \end{aligned}$$

c. Grand Total Heat

$$\begin{aligned} (GTH) &= 15,89 + 12,12 \\ &= 28,01 \text{ kW} \end{aligned}$$

Nilai-nilai yang didapatkan kemudian dimasukkan ke dalam *ASHRAE Psychrometric Chart Analysis*, Proses Psikrometrik dari proses ini dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Proses Psikrometrik

3.2 Penentuan Batas Maksimum Daya Serap Ruang (Metode Perhitungan Mundur)

Kapasitas penyerapan panas bersih ruangan dihitung dengan mengeliminasi beban ventilasi udara luar (*Outside Air Load*) dari total kapasitas beban koil. Beban udara luar ventilasi dihitung melalui perhitungan:

- Airflow (l/s) = Volume Ruang x 5 ACH
 $= 120 \times 5 = 600 \text{ m}^3/\text{h} \approx 166,7 \text{ l/s}$
- OSH = $1,23 \times 166,7 \text{ L/s} \times (35 - 22^\circ\text{C})$
 $= 2.665 \text{ W} \approx 2,67 \text{ kW}$
- OLH = $3,01 \times 166,7 \text{ L/s} \times (25,55 - 8,20)$
 $= 8.701 \text{ W} \approx 8,70 \text{ kW}$
- OTH = OSH + OLH
 $= 2,67 + 8,701$
 $= 11,371 \text{ kW}$

Sehingga kapasitas penyerapan termal maksimum yang disediakan oleh ruangan adalah:

- Kapasitas RSHmaks
 $= \text{GSH} - \text{OSH}$
 $= 15,89 \text{ kW} - 2,67 \text{ kW}$

- $= 13,23 \text{ kW}$
- Kapasitas RLHmaks
 $= \text{GLH} - \text{OLH}$
 $= 12,12 \text{ kW} - 8,70 \text{ kW}$
 $= 3,42 \text{ kW}$
- RSHF
 $= 13,23 / (13,23 + 3,42)$
 $= 0,795$
- Kapasitas ERSH
 $= 13,23 + (0,03 \times 2,665)$
 $= 13,31 \sim 13 \text{ kW}$
- Kapasitas ERLH
 $= 3,42 + (0,03 \times 8,70)$
 $= 3,681 \sim 3,6 \text{ kW}$
- ESHF
 $= 13,3 / (13,3 + 3,7)$
 $= 0,783$

Integrasi *Bypass Factor* (BF=0,03) pada perhitungan ERSH dan ERLH mengonfirmasi keberadaan 3% udara *uncontacted* yang lolos tanpa mengalami pengondisian langsung pada permukaan koil. Nilai ESHF = 0,783 memproyeksikan

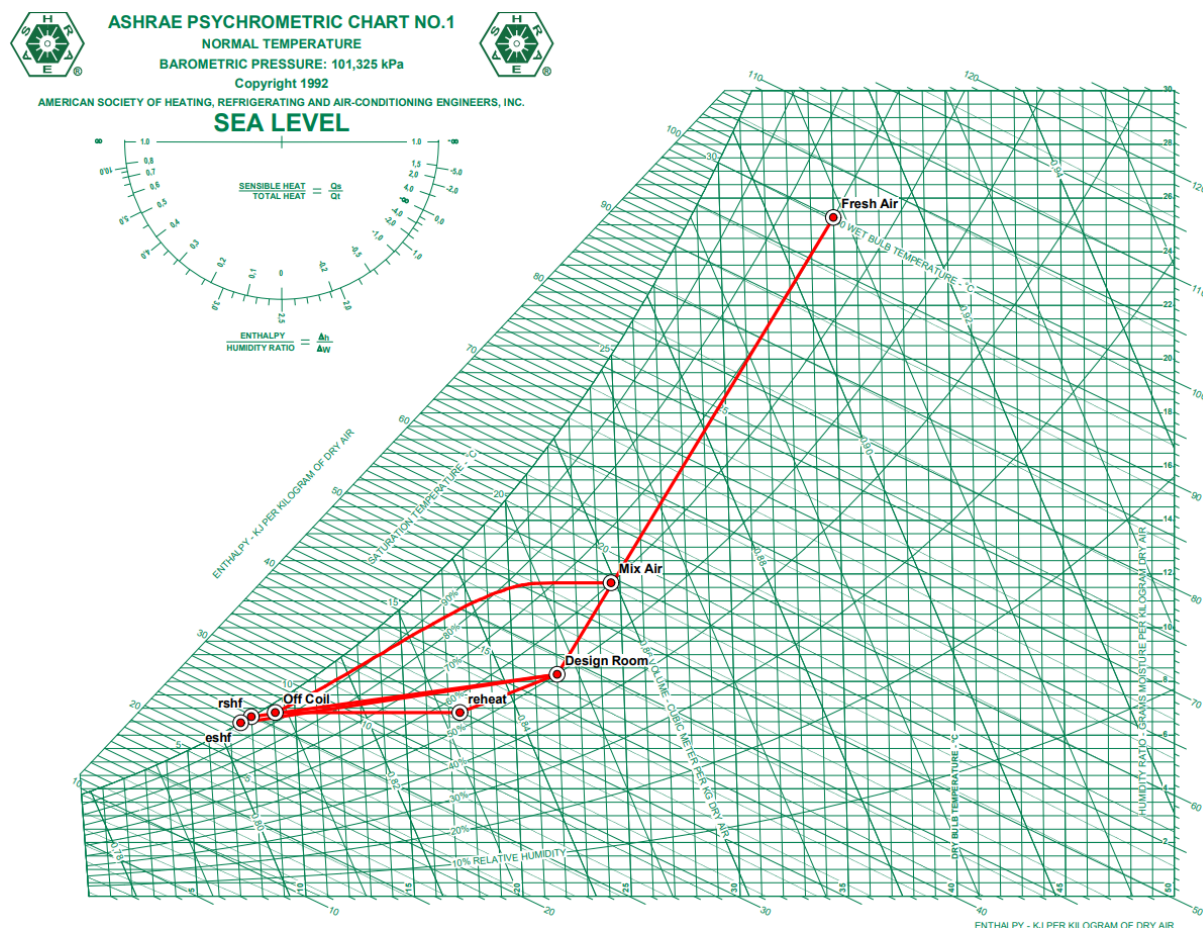
garis proses efektif dari kondisi ruangan (22°C , 50% RH) menuju *Apparatus Dew Point* (ADP). Perpotongan garis ini menghasilkan kondisi temperatur udara keluar koil (*off-coil*) aktual sekaligus udara suplai sebesar $9,1^{\circ}\text{C}$ pada Gambar 4, yang menunjukkan bahwa kapasitas dehumidifikasi koil terpasang dihitung secara akurat sesuai performa termodinamika nyata, bukan pengondisian ideal ($\text{BF}=0$).

Pada kondisi beban sensibel puncak, pemanas ulang diasumsikan tidak beroperasi sehingga temperatur udara suplai sama dengan temperatur udara keluar koil. Pada kondisi beban parsial, pemanas ulang berkapasitas maksimum 9 kW bekerja secara termodulasi untuk menaikkan temperatur udara suplai setelah proses pendinginan dan dehumidifikasi.

$$Q_{\text{total}} = \text{RSH} / (1,23 \times (T_{\text{room}} - T_{\text{supply}}))$$

$$\begin{aligned} &= 13,23 / (1,23 \times (22 - 9,1)) \\ &= 0,833 \text{ m}^3/\text{s} \\ &= 833 \text{ l/s} \sim 3000 \text{ m}^3/\text{h} \end{aligned}$$

Adapun elemen pemanas ulang (*reheat*) sebesar 9 kW diintegrasikan sebagai mekanisme kontrol sekunder (*secondary humidity control loop*) untuk mencegah terjadinya pendinginan berlebih (*overcooling*) saat mempertahankan kelembapan relatif ruang pada target 50% RH. Meskipun *reheat* bertindak sebagai beban energi tambahan (*parasitic energy load*) sebesar 32% terhadap *Grand Total Heat* (GTH = 28 kW), input termal ini merupakan konsekuensi operasional yang wajib dipenuhi demi menjamin kepatuhan parameter mikroklimat ruang operasi sesuai standar Permenkes No. 40 Tahun 2022 dan penggunaannya bergantung pada modulasi sistem kontrol.



Gambar 4. Titik Udara Keluar Koil

3.3 Analisis Beban Termal Aktual Puncak Ruangan (Metode Detail)

Beban aktual puncak yang dihasilkan di dalam ruang operasi bersumber dari perpindahan panas transmisi konduksi material dinding/atap panel PIR serta beban internal:

a. Beban Transmisi ($Q = U \times A \times \Delta T$):

- Beban Atap

$$Q = 0,45 \times 40 \text{ m}^2 \times (32 - 22) ^\circ\text{C} \\ = 180 \text{ W}$$

- Beban Lantai

$$Q = 0,45 \times 40 \text{ m}^2 \times (28 - 22) ^\circ\text{C} \\ = 108 \text{ W}$$

- Beban Dinding

Dinding Barat vs Koridor Kotor

$$Q = 0,45 \times 24 \text{ m}^2 \times (29 - 22) ^\circ\text{C} \\ = 76 \text{ W}$$

Dinding Timur vs Koridor Bersih

$$Q = 0,45 \times 24 \text{ m}^2 \times (26 - 22) ^\circ\text{C} \\ = 43 \text{ W}$$

Dinding Utara vs Koridor Bersih

$$Q = 0,45 \times 15 \text{ m}^2 \times (26 - 22) ^\circ\text{C} \\ = 27 \text{ W}$$

Dinding Selatan vs Koridor Bersih

$$Q = 0,45 \times 15 \text{ m}^2 \times (26 - 22) ^\circ\text{C} \\ = 27 \text{ W}$$

Total beban dinding = 461 Watt

b. Beban Internal Manusia (8 Orang)

Sensibel ($8 \times 75 \text{ W} = 0,60 \text{ kW}$)

Laten ($8 \times 55 \text{ W} = 0,44 \text{ kW}$).

c. Beban Internal Lampu LED

$$15 \text{ W/m}^2 \times 40 \text{ m}^2 = 0,60 \text{ kW} \\ (\text{Sensibel}).$$

d. Beban Peralatan Medis Modern (Beban Puncak): 7,00 kW (Sensibel).

Berdasarkan akumulasi pada Tabel 3, diperoleh kebutuhan riil beban sensibel ruangan (RSH aktual) sebesar 8,66 kW dan beban laten ruangan (RLH aktual) sebesar 0,44 kW.

$$Q_{\text{total}} = \text{RSH} / (1,23 \times (\text{Troom} - \text{Tsupply})) \\ = 8,66 / (1,23 \times (22 - 9,1)) \\ = 545 \text{ l/s} \sim 1965 \text{ m}^3/\text{h}$$

Tabel 3. Rekapitulasi Beban Ruangan

Sumber Beban	Beban Sensibel (kW)	Beban Laten (kW)
1. Transmisi	0,461	
2. Internal – Penghuni	0,60	0,44
3. Internal – Pencahayaan	0,60	
4. Internal – Peralatan Medis	7,00	
TOTAL BEBAN RUANGAN	8,661	0,44

3.4 Analisis Komparatif dan Implikasi Desain

Berdasarkan hasil kalkulasi ketiga metode di atas, dilakukan perbandingan parameter untuk melihat performa margin termal yang disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Komparasi Kapasitas Maksimum Ruangan vs Beban Teoretis Ruangan

Parameter Termal	Kapasitas Maksimum Ruangan (Metode Mundur)	Beban Teoretis Ruangan (Metode Detail)	Selisih (Surplus Kapasitas)
Beban Sensibel / RSH (kW)	13,23	8,66	4,57
Beban Laten / RLH (kW)	3,42	0,44	2,98
Outside Sensible Heat / OSH (kW)	2,67	2,67	0
Outside Latent Heat / OLH (kW)	8,7	8,7	0
Laju Aliran Udara / Airflow (m ³ /h)	3.000	1965	1035
Beban Total Sistem / GTH (kW)	28,00	20,47	7,53

Tabel 4. menunjukkan beberapa poin implikasi teknis yang fundamental:

a. Kecukupan Termal dan Faktor Keamanan

Kebutuhan beban sensibel aktual ruang pada kondisi puncak adalah 8,661 kW, sedangkan pasokan udara konstan dari standar 25 ACH sanggup menyerap panas sensibel hingga 13,23 kW. Hal ini membuktikan adanya surplus kapasitas sensibel sebesar 4,57 kW. Beban sensibel teoretis sebesar 8,66 kW memanfaatkan sekitar 65,5% dari kapasitas sensibel maksimum sebesar 13,23 kW. Dengan demikian, tersedia kapasitas cadangan sebesar 34,5% dari kapasitas maksimum pada kondisi desain yang dianalisis.

b. Karakteristik Beban dan Dominasi Alat Medis

Hasil evaluasi menunjukkan beban panas terbesar di dalam ruang operasi berasal dari disipasi internal peralatan medis yang menyumbang sekitar 81% dari total beban sensibel ruangan (7,00 kW dari total 8,661 kW). Laju aliran udara tinggi dari 25 ACH terbukti krusial untuk mencegah terjadinya akumulasi panas (*heat accumulation*) lokal di sekitar meja operasi (D'Alicandro & Mauro, 2022; Sadrizadeh *et al.*, 2021).

c. Fenomena *Over-Dehumidification* dan Peran *Reheat*

Terdapat selisih kapasitas beban laten yang relatif besar di mana kapasitas dehumidifikasi sistem mampu menyerap hingga 3,42 kW, sedangkan beban laten internal aktual yang dihasilkan hanya 0,44 kW. Kondisi ini menyebabkan ruangan berisiko mengalami pendinginan berlebih (*over-cooling*) sebelum target kelembapan udara ideal (50% RH) terpenuhi (Chien *et al.*, 2020; Sukarno *et al.*, 2021; Chen, 2018). Di sinilah fungsi krusial dari pemanas kembali (*reheat/heater*) terpasang sebesar 9 kW, yaitu bertindak sebagai pengontrol kestabilan suhu pasokan

agar kondisi termal bagi tenaga medis dan pasien tetap terkendali (Deiana *et al.*, 2022; D'Alicandro & Mauro, 2023).

4. Simpulan dan Saran

4.1 Simpulan

Berdasarkan hasil penelitian tersebut dapat disimpulkan bahwa:

a. Kebutuhan kapasitas pendinginan

Perancangan sistem HVAC ruang operasi yang didasarkan pada standar 25 ACH (sesuai Permenkes No. 40 Tahun 2022) menghasilkan kapasitas pendinginan yang mencukupi untuk menangani beban puncak. Dalam studi kasus ini, sistem memiliki kapasitas sensibel sebesar 13,23 kW, sementara aktual kebutuhannya 8,66 kW.

b. Karakteristik Beban Ruangan

Beban panas terbesar di ruang operasi berasal dari internal, khususnya peralatan medis yang berkontribusi sebesar 81% dari total beban sensibel. Meskipun peralatan medis menghasilkan panas yang besar (7.000 Watt), laju aliran udara yang tinggi dari standar 25 ACH secara teoretis memiliki kapasitas yang mencukupi untuk menangani beban sensibel pada kondisi desain temperatur ruang 22°C.

c. Pendekatan 'perhitungan mundur' yang digunakan dalam penelitian ini efektif untuk memetakan batas maksimum kemampuan ruangan dalam menyerap panas. Hasil perbandingan menunjukkan bahwa standar Permenkes (ACH) berhubungan erat dalam memberikan kapasitas beban yang lebih besar daripada kebutuhan pendinginan aktual, sehingga fokus desain selanjutnya dapat diarahkan pada aspek efisiensi energi.

4.2 Saran

Adapun beberapa saran yang dapat diajukan:

Saran untuk perancang sistem HVAC:

- a. Metode 'perhitungan mundur' bisa digunakan sebagai alat validasi standar dalam perancangan HVAC untuk ruang operasi dan fasilitas sejenis yang berbasis ACH. Ini akan memberikan pemahaman yang jelas mengenai kapasitas yang tersedia sejak awal.
- b. Optimalisasi Energi
Meningat tingginya beban ventilasi, perancang harus memprioritaskan pemakaian *Energy Recovery Ventilator* atau *Heat Wheel* pada unit AHU untuk mengurangi konsumsi energi secara signifikan tanpa mengorbankan kualitas udara dalam ruangan.
- c. Sistem Kontrol
Dengan adanya selisih kapasitas yang besar, penggunaan sistem kontrol yang canggih seperti *Variable Speed Drive* pada kompresor dan kipas menjadi krusial untuk menyesuaikan kapasitas pendinginan dengan beban aktual yang seringkali lebih rendah, sehingga dapat meningkatkan efisiensi operasional.

Saran untuk manajemen fasilitas rumah sakit:

- a. Pengadaan Peralatan Medis
Hasil penelitian mengenai kapasitas beban pendingin dapat digunakan sebagai acuan teknis dalam merencanakan pengadaan atau penambahan peralatan medis baru. Manajemen dapat memastikan bahwa total pertukaran panas dari peralatan tidak akan melampaui kapasitas sistem yang ada.
- b. Audit Energi:
Disarankan untuk melakukan audit energi secara periodik guna membandingkan konsumsi energi aktual dengan beban desain. Ini dapat membuka peluang untuk optimalisasi jadwal operasi atau penyesuaian setelan sistem untuk efisiensi yang lebih baik.

Saran untuk penelitian selanjutnya:

- a. Simulasi Dinamis
Penelitian ini dapat dikembangkan lebih lanjut dengan melakukan simulasi temperatur dan energi menggunakan data cuaca tahunan (misalnya file

BMKG) untuk menganalisis kinerja sistem dan konsumsi energi sepanjang tahun pada berbagai kondisi operasional.

b. Validasi Eksperimental:

Sangat disarankan untuk melakukan validasi secara eksperimental dengan mengukur secara langsung laju aliran udara dan beban panas aktual (temperatur permukaan alat, daya listrik) di ruang operasi yang sedang beroperasi untuk membandingkan dan memvalidasi hasil perhitungan teoretis dalam penelitian ini.

Daftar Pustaka

- ASHRAE. (2013). *ASHRAE Handbook—Fundamentals (SI Edition): Chapter 18 - Nonresidential Cooling and Heating Load Calculations*. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
- ASHRAE. (2015). *ASHRAE Handbook—HVAC Applications (SI Edition): Chapter 8 - Health-Care Facilities*. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- Chen, Y. (2018). Study on energy-saving design and operation of hospital purification air conditioning system. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 13(2), 184-190. <https://doi.org/10.1093/ijlct/cty013>
- Chien, T. Y., Liang, C. C., Wu, F. J., Chen, C. T., Pan, T. H., & Wan, G. H. (2020). Comparative analysis of energy consumption, indoor thermal-hygrometric conditions, and air quality for HVAC, LDAC, and RDAC systems used in operating rooms. *Applied Sciences*, 10(11), 3721. <https://doi.org/10.3390/app10113721>
- Colella, Y., Valente, A. S., Rossano, L., Trunfio, T. A., Fiorillo, A., & Improta, G. (2022). A fuzzy inference system for the assessment of indoor air quality in an operating room to prevent surgical site infection. *International Journal of Environmental Research and Public*

- Health*, 19(6), 3533.
<https://doi.org/10.3390/ijerph19063533>
- Deiana, G., Arghittu, A., Dettori, M., Deriu, M. G., Palmieri, A., Azara, A., ... & Masia, M. D. (2022, February). Ten-year evaluation of thermal comfort in operating rooms. *Healthcare* (Vol. 10, No. 2, p. 307). MDPI.
<https://doi.org/10.3390/healthcare10020307>
- D'Alicandro, A. C., & Mauro, A. (2023). Air change per hour and inlet area: Effects on ultrafine particle concentration and thermal comfort in an operating room. *Journal of Aerosol Science*, 171, 106183.
<https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2023.106183>
- D'Alicandro, A. C., & Mauro, A. (2022). Effects of operating room layout and ventilation system on ultrafine particle transport and deposition. *Atmospheric Environment*, 270, 118901.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118901>
- Fedor, L., Nakládalová, M., Štěpánek, L., Holý, O., & Matoušková, I. (2022). EFFECTIVENESS OF ANTI-EPIDEMIC MEASURES ON ENSURING INDOOR AIR QUALITY OF CLEANROOMS IN A TERTIARY CARE HOSPITAL. *Central European Journal of Public Health*, 30(2), 74–78.
<https://doi.org/10.21101/cejph.a7060>
- Gormley, T., Markel, T. A., Jones, H., Greeley, D., Ostojic, J., Clarke, J. H., ... & Wagner, J. (2017). Cost-benefit analysis of different air change rates in an operating room environment. *American journal of infection control*, 45(12), 1318-1323.
<https://doi.org/10.1016/j.ajic.2017.07.024>
- Kementerian Kesehatan Republik Indonesia. (2022). Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 40 Tahun 2022 tentang Persyaratan Teknis Bangunan, Prasarana, dan Peralatan Kesehatan Rumah Sakit. Jakarta: Kementerian Kesehatan RI
- Khalil, A., Mahgoub Bassuoni, M., Elsamadony, M. O., & Raslan, M. (2020). Assessment of thermal comfort in operating rooms using PMV-PPD model. *Journal of Engineering Research*, 4(December), 51-62.
- Lans, J. L. A., Mathijssen, N. M. C., Bode, A., Van Den Dobbelsteen, J. J., Van Der Elst, M., & Luscuere, P. G. (2022). Operating room ventilation systems: recovery degree, cleanliness recovery rate and air change effectiveness in an ultra-clean area. *Journal of Hospital Infection*, 122, 115-125.
<https://doi.org/10.1016/j.jhin.2021.12.018>
- Montuori, P., Russo, I., De Rosa, E., Di Duca, F., De Simone, B., & Triassi, M. (2024). Air Monitoring in Operating Rooms: Results from a Comprehensive Study in the Campania Region. *Atmosphere*, 15(7), 859.
<https://doi.org/10.3390/atmos15070859>
- Romano, F., Milani, S., Gustén, J., & Joppolo, C. M. (2020). Surgical smoke and airborne microbial contamination in operating theatres: influence of ventilation and surgical phases. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(15), 5395.
<https://doi.org/10.3390/ijerph17155395>
- Sabillah, A., Hugeng, H., & Setyaningsih, E. (2025). Perhitungan Daya Panas Dan Kapasitas Daya Pendingin Udara Ruang Operasi Rumah Sakit X Jakarta. *Innovative: Journal Of Social Science Research*, 5(4), 9790-9805.
<https://doi.org/10.31004/innovative.v5i4.20878>
- Sadrizadeh, S., Aganovic, A., Bogdan, A., Wang, C., Afshari, A., Hartmann, A., ... & Cao, G. (2021). A systematic review of operating room ventilation. *Journal of Building*

Engineering, 40, 102693.
<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102693>

Sukarno, R., Putra, N., Hakim, I. I., Rachman, F. F., & Mahlia, T. M. I. (2021). Multi-stage heat-pipe heat exchanger for improving energy efficiency of the HVAC system in a hospital operating room. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 16(2), 259-267.
<https://doi.org/10.1093/ijlct/ctaa048>

Suwiherawan, I. G. N. K., Arjana, I. G. D., & Partha, C. G. I. (2021). Perencanaan Sistem Tata Udara Ruang Operasi Di Rumah Sakit Ibu Dan Anak Puri Bunda Tabanan Bali. *Jurnal SPEKTRUM*, 8(1), 292.

Vijaykrishna, G., & Balaji, G. (2023). Impact of Indoor Temperature and Humidity in IAQ of Health Care Buildings. *Civil Engineering and Architecture*, 11(3), 1273–1279.
<https://doi.org/10.13189/cea.2023.110313>