

## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Hasil Pengambilan Data Awalan Ruang NICU

Data awalan yang digunakan dalam perhitungan beban pendinginan pada ruang NICU Rumah Sakit Universitas Andalas diperoleh melalui kegiatan pengambilan data lapangan yang dilaksanakan selama lima hari, yaitu pada tanggal 15 hingga 19 Oktober 2025. Pengambilan data dilakukan secara kontinyu untuk merepresentasikan kondisi eksisting lingkungan ruangan.

Pengukuran parameter lingkungan dilakukan menggunakan Misol WS2320 *Wireless Weather Station*, yang berfungsi untuk merekam temperatur udara dan kelembapan relatif (*relative humidity*) pada sisi *input* dan *output* sistem HVAC. Data yang diperoleh merupakan nilai temperatur rata-rata, temperatur maksimal dan humidity rata-rata pada setiap harinya selama pengambilan data awalan, sehingga mampu menggambarkan kondisi termal ruang secara stabil dan representatif. Data awalan ini selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam proses perhitungan beban pendinginan sistem HVAC pada ruang NICU. Adapun data awalan tersebut dapat dilihat pada **LAMPIRAN B**.

Dimana:

$$T_{MAX} = 33,1 \text{ } ^\circ\text{C} = 91,58 \text{ } ^\circ\text{F}$$

$$T_{MIN} = 23,8 \text{ } ^\circ\text{C} = 74,84 \text{ } ^\circ\text{F}$$

Berdasarkan data pengukuran kondisi lingkungan *outdoor* selama lima hari, parameter temperatur yang digunakan dalam perhitungan beban pendinginan adalah nilai temperatur tertinggi yang tercatat dalam keseluruhan periode pengambilan data. Pemilihan temperatur maksimum ini dilakukan untuk memastikan bahwa sistem HVAC yang dirancang mampu bekerja secara optimal pada kondisi beban panas paling tinggi yang mungkin terjadi. Dengan menggunakan temperatur paling ekstrem sebagai acuan, kapasitas pendinginan yang dihitung akan mampu mengantisipasi kondisi lingkungan terburuk, sehingga menjamin kestabilan temperatur dan keandalan operasi ruang NICU meskipun terjadi peningkatan temperatur di luar kondisi rata-rata.

## 4.2 Perhitungan Beban Pendinginan

Pada penelitian kali ini terdapat perhitungan yang digunakan yaitu CLTD atau cooling load temperature difference. Perhitungan menggunakan metode CLTD memiliki 2 faktor didalamnya yaitu faktor eksternal dan juga faktor internal.

### 4.2.1 Faktor Eksternal

Berikut untuk perhitungan untuk faktor eksternal pada perhitungan CLTD

#### A. Beban Pendinginan Dinding

Perhitungan faktor eksternal pada metode *Cooling Load Temperature Difference* (CLTD) diawali dengan penentuan beban pendinginan eksterior yang berasal dari dinding, atap, dan kaca. Beban pendinginan tersebut dihitung menggunakan Persamaan 2.1.

Nilai U yang digunakan dalam perhitungan faktor eksternal diperoleh dari tabel pada buku Edward, yang memuat berbagai jenis material dan konstruksi dinding serta atap. Tabel nilai U untuk perhitungan dinding disajikan pada **Lampiran A.1**. Pada penelitian ini, tipe dinding berada di antara Tipe B dan Tipe D pada **Lampiran A.1**, sehingga diperlukan proses interpolasi. Berdasarkan tabel tersebut, dinding yang digunakan memiliki ketebalan 15 cm (6 inchi) dengan material common brick. Hasil interpolasi nilai U ditunjukkan pada **Tabel 4.1**, sehingga diperoleh nilai koefisien perpindahan panas dinding sebesar:

**Tabel 4.1** Interpolasi Nilai U Dinding

Ketebalan (inch)	U-Value (BTU/h·ft <sup>2</sup> ·°F)
4	0,415
6	x
8	0,302

$$U_6 = 0,415 + \frac{2}{4}(0,302 - 0,415)$$

$$U_6 = 0,415 - 0,0565$$

$$U_6 = 0,3585 \text{ BTU/h.ft}^2 \cdot \text{°F}$$

$$U_{\text{dinding}} = 0,3585 \text{ BTU/h.ft}^2 \cdot ^\circ \text{F}$$

Setelah nilai U untuk jenis dan ketebalan dinding yang digunakan diperoleh, langkah selanjutnya adalah menentukan nilai CLTDc untuk dinding yang terpapar sinar matahari. Pada penelitian ini, ruang NICU yang menjadi objek penelitian memiliki dinding yang menghadap arah timur, sehingga menerima paparan radiasi matahari secara langsung. Sementara itu, dinding yang menghadap utara, selatan dan timur merupakan dinding interior yang berbatasan langsung dengan ruangan lainnya. Dalam perhitungan beban pendinginan faktor eksternal, nilai CLTDc harus ditentukan terlebih dahulu menggunakan Persamaan 2.2.

Nilai CLTD diperoleh dari tabel yang terdapat dalam buku Edward [ref], di mana tabel tersebut pada penelitian ini disajikan pada **Lampiran A.2**. Lampiran tersebut telah memuat informasi mengenai arah mata angin, jenis dinding, serta waktu paparan sinar matahari. Pada penelitian ini, penentuan nilai CLTD menggunakan dinding diantara tipe B dan tipe D dengan nilai CLTD yang di ambil yaitu CLTD Maximum pada arah timur, maka diperlukan interpolasi juga yang dapat dilihat pada **Tabel 4.2**, sehingga nilai CLTD atap sebesar:

**Tabel 4.2** Interpolasi Nilai CLTD Dinding

Ketebalan (inch)	Maksimum CLTD dari arah timur
4	27
6	x
8	33

Nilai maksimum CLTD untuk dinding tebal 6 inch ditentukan dengan interpolasi linier karena tidak tersedia langsung pada tabel.

$$CLTD_6 = 27 + \frac{2}{4}(33 - 27)$$

$$CLTD_6 = 27 + 3$$

$$CLTD = 30.$$

LM pada persamaan 2.2 merupakan faktor koreksi yang dipengaruhi oleh garis lintang dan bulan. Nilai *latitude and month* telah disediakan dalam tabel yang

tercantum pada **Lampiran A.3**, yang memuat informasi mengenai garis lintang, bulan, serta arah mata angin. Oleh karena itu, nilai LM dapat ditentukan berdasarkan tabel tersebut. Namun, karena lokasi Rumah Sakit Universitas Andalas berada pada garis lintang  $0.95^\circ$ , sedangkan nilai untuk lintang  $0,95^\circ$  tidak tercantum dalam **Lampiran A.3**, maka diperlukan proses interpolasi untuk memperoleh nilai LM yang sesuai. Adapun Interpolasi nilai LM dapat dilihat pada **Tabel 4.3**.

**Tabel 4.3** Interpolasi Nilai LM

Lattitude	BULAN	W (Barat) dan E (Timur)
Lattitude		W & E
0	Oct	-1
0,95		x
8		-1

Karena nilai  $0,95^\circ$  berada di antara  $0^\circ$  dan  $8^\circ$ , maka digunakan interpolasi linier:

$$LM = LM_1 + \frac{(L-L_1)}{(L_2-L_1)} \times (LM_2 - LM_1)$$

$$LM = -1 + \frac{0,95 - 0}{1 - 0} \times (-1 - (-1))$$

$$LM = -1$$

Setelah nilai LM diperoleh, langkah selanjutnya adalah menentukan nilai  $T_a$ , yaitu temperatur rata-rata udara luar. Nilai  $T_a$  dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$T_a = t_o - \left(\frac{DR}{2}\right)$$

Dimana

$$DR = T_{Max} - T_{Min} = 91,58 - 74,84 = 16,74^\circ F$$

Maka nilai dari  $T_a$  adalah

$$t_a = 75,2 - \left(\frac{16,74}{2}\right) = 66,83 \text{ } ^\circ F$$

Setelah seluruh nilai yang diperlukan pada CLTD<sub>c</sub> diperoleh, langkah selanjutnya adalah melakukan perhitungan CLTD<sub>c</sub>. Proses perhitungan tersebut dilakukan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut.

$$LTDC = CLTD + LM + (78 - tR) + (t_a - 85)$$

$$LTDC = 30 + (-1) + (78 - 75,2) + (66,83 - 85)$$

$$LTDC = 13,63$$

Setelah mendapatkan nilai CLTD<sub>c</sub> untuk setiap jam dan arah mata angin yang diperlukan maka selanjutnya dibutuhkan luas dari dinding. Pada penelitian ini, dinding yang terkena cahaya matahari memiliki ukuran 6 m × 3 m. Untuk perhitungan dalam satuan sistem imperial, ukuran ini dikonversi ke feet dengan faktor konversi 1 m ≈ 3,28084 ft:

Konversi dimensi:

- Panjang dinding: 6 m × 3,28084 = 19,6850 ft
- Tinggi dinding: 3 m × 3,28084 = 9,8425 ft

Berikut merupakan perhitungan luas permukaan dinding

$$A_{dinding} = (P \times T) - A_{kaca}$$

$$A_{dinding} = (19,6850 \times 9,8425) - 84,1468$$

$$A_{dinding} = 109,6035 \text{ } ft^2$$

Setelah didapatkan luas dari dinding sudah dapat dilakukan untuk mencari nilai Q untuk dinding. Berikut ini merupakan perhitungan dan hasil dari nilai Q untuk dinding.

$$Q = U \times A \times CLTD_c$$

$$Q = 0,3585 \times 109,6035 \text{ } ft^2 \times 13,6$$

$$Q = 535,5617 \text{ } BTU/h$$

Nilai yang didapatkan untuk Q Dinding totalnya sebesar 535,5617 BTU/h

## B. Beban Pendinginan Atap

Perhitungan faktor eksternal pada metode Cooling Load Temperature Difference (CLTD) diawali dengan penentuan beban pendinginan eksterior yang

berasal dari atap. Beban pendinginan tersebut dihitung menggunakan Persamaan 2.1.

Nilai U yang digunakan dalam perhitungan faktor eksternal diperoleh dari tabel pada buku Edward, yang memuat berbagai jenis material dan konstruksi atap. Tabel nilai U untuk perhitungan atap disajikan pada **Lampiran A.4**. Pada penelitian ini, tipe atap yang digunakan adalah beton. Berdasarkan tabel tersebut, atap yang digunakan memiliki ketebalan 15 cm (6 in) dengan material *Heavyweight concrete*, nilai koefisien perpindahan panas atap sebesar:

$$U_{\text{atap}} = 0,192 \text{ BTU/h.ft}^2 \cdot ^\circ\text{F}$$

Setelah nilai U untuk jenis dan ketebalan atap diperoleh, selanjutnya adalah menentukan nilai CLTDc untuk atap yang terpapar sinar matahari. Pada penelitian ini, atap ruang NICU menerima paparan radiasi matahari secara langsung. Dalam perhitungan beban pendinginan faktor eksternal, nilai CLTDc harus ditentukan terlebih dahulu menggunakan Persamaan 2.2.

Nilai CLTD diperoleh dari tabel yang terdapat dalam buku Edward, dapat dilihat pada **Lampiran A.4**. Nilai yang diambil adalah nilai CLTD maksimum, sehingga nilai CLTD atap sebesar:

$$CLTD = 45$$

Nilai LM pada persamaan yang sama juga digunakan, mengikuti prosedur interpolasi latitude dan bulan seperti dijelaskan pada **Lampiran A.3**. Oleh karena itu, nilai LM untuk atap sama dengan yang digunakan pada dinding, yaitu:

$$LM = -1$$

Setelah nilai LM diperoleh selanjutnya adalah menentukan nilai Ta, dimana nilai Ta sudah diketahui sebelumnya, yaitu:

$$Ta = 66,83 \text{ } ^\circ\text{F}$$

Selanjutnya, nilai CLTDc untuk atap dihitung dengan persamaan:

$$CLTDc = CLTD + LM + (78 - t_R) + (Ta - 85)$$

$$CLTDc = 45 + (-1) + (78 - 75,2) + (66,83 - 85)$$

$$CLTDc = 28,63$$

Pada penelitian ini, atap ruang NICU memiliki ukuran 10 m × 6 m. Untuk perhitungan dalam satuan sistem imperial, ukuran ini dikonversi ke feet dengan faktor konversi 1 m = 3,28084 ft

- Panjang atap: 10 m × 3,28084 = 32,8084 ft
- Lebar atap: 6 m × 3,28084 = 19,68504 ft

Sehingga, luas atap dapat dihitung sebagai berikut:

$$\text{Luas Atap} = 32,8084 \times 19,68504 = 645,8346 \text{ ft}^2$$

Setelah mendapatkan semua nilai yang diperlukan, langkah terakhir adalah mencari nilai Q untuk beban pendinginan atap:

$$Q_{\text{atap}} = U_{\text{atap}} \times A_{\text{atap}} \times CLTDc$$

$$Q_{\text{atap}} = 0,192 \times 645,8346 \text{ ft}^2 \times 28,63$$

$$Q_{\text{atap}} = 3.550,1273 \text{ BTU/h}$$

Sehingga nilai Q Atap totalnya sebesar 3.550,1273 BTU/h

### C. Beban Pendinginan Kaca

Perhitungan beban pendinginan pada kaca dilakukan dengan mempertimbangkan paparan radiasi matahari yang diterima kaca. Beban pendinginan kaca dihitung menggunakan persamaan 2.3.

Nilai SHGF diperoleh dari data tambahan yang terdapat pada tabel di **Lampiran A.5**. Tabel ini memuat informasi arah mata angin dan bulan dalam satu tahun. Untuk penelitian ini, nilai SHGF perlu dilakukan interpolasi karena derajat latitude lokasi penelitian tidak terdapat langsung pada tabel. Berdasarkan interpolasi. Adapun nilai interpolasi dapat dilihat pada **Tabel 4.4**.

**Tabel 4.4** Interpolasi nilai SHGF

Latitude	East & West
0	236
0.95	X
4	234

$$SHGF = 236 + \frac{0,95 - 0}{4 - 0} \times (234 - 236)$$

$$SHGF = 236 + \frac{0,95}{4} \times (-2)$$

$$SHGF = 236 + 0,2375 \times (-2)$$

$$SHGF = 236 - 0,475$$

$$SHGF = 235,525 \text{ BTU/h} \cdot \text{ft}^2$$

Nilai SC atau *shading coefficient* menunjukkan pengaruh bayangan terhadap kaca. Nilai SC diperoleh dari tabel pada **Lampiran A.6**, dan pada penelitian ini, kaca memiliki penyerap panas berupa kaca film, sehingga digunakan nilai SC sebagai berikut.

$$SC = 0,69$$

Nilai CLF diperoleh dari tabel pada **Lampiran A.7**, dengan tipe kaca M dan arah mata angin timur, karena kaca tersebut terpapar langsung sinar matahari. Nilai CLF yang digunakan adalah sebagai berikut.

$$CLF = 0,65$$

Pada penelitian ini, kaca pada ruang NICU memiliki ukuran 2,95 m × 2,65 m. Untuk perhitungan dalam satuan sistem imperial, ukuran ini dikonversi ke feet dengan faktor konversi 1 m ≈ 3,28084 ft:

Konversi dimensi:

- Panjang kaca: 2,95 m × 3,28084 = 9,6784 ft
- Tinggi kaca: 2,65 m × 3,28084 = 8,6942 ft

Sehingga, luas kaca dapat dihitung sebagai:

$$\text{Luas kaca} = 9,6784 \times 8,6942 = 84,1468 \text{ ft}^2$$

Dengan semua nilai tersedia, beban pendinginan kaca dapat dihitung dengan persamaan:

$$Q_{\text{kaca}} = SHGF \times A \times SC \times CLF$$

$$Q_{\text{kaca}} = 235,53 \times 84,1468 \times 0,69 \times 0,65$$

$$Q_{\text{kaca}} = 8.888,6836 \text{ BTU/h}$$

Sehingga nilai Q kaca totalnya sebesar 8.888,6836 BTU/h

## 4.2.2 Faktor Internal

### A. Beban Pencahayaan

Beban pendinginan yang dihasilkan oleh pencahayaan dalam ruangan dihitung berdasarkan daya lampu yang digunakan, faktor ballast, dan faktor beban pendinginan (CLF) yang menyesuaikan durasi operasional lampu. Perhitungan ini dirujuk sebagai Persamaan 2.4.

Pada BF atau nilai faktor ballast yang digunakan adalah 1.25 dikarenakan jenis lampu yang digunakan pada ruang kelas adalah jenis neon atau *fluorescent lighting* seperti yang dijelaskan pada **Lampiran A.8**. Sedangkan untuk nilai CLF digunakan 1 dikarenakan digunakan selama 24 jam. Selanjutnya adalah mentotalkan jumlah daya yang dihasilkan dari jumlah dan jenis lampu yang digunakan pada ruang kelas. Adapun jumlah nilai Q pencahayaan dapat di lihat pada Tabel 4.5.

**Tabel 4.5** Nilai Q Pencahayaan

Jenis Lampu	n (Jumlah)	Watt lampu	Watt total
TL	6	37	222
PLC	6	18	108

Setelah mendapatkan nilai W maka bisa didapatkan nilai pembebanan untuk pencahayaan.

$$Q = 3,4 \times W \times BF \times CLF$$

$$Q = 3,4 \times 330 \times 1,25 \times 1 = 1.402,5 \text{ BTU /h}$$

Sehingga nilai untuk pembebanan pencahayaan yaitu sebesar 1.402,5 BTU /h

## B. Beban Penghuni

### 1. Beban perawat

Beban pendinginan yang dihasilkan oleh penghuni ruangan terdiri dari dua komponen utama, yaitu beban kalor sensibel dan beban kalor laten. Beban ini berasal dari aktivitas manusia dan perbedaan temperatur tubuh dengan lingkungan. Dimana untuk mencari kalor sensibel menggunakan persamaan 2.5 dan untuk kalor laten dengan persamaan 2.6.

Pada perhitungan beban pendinginan untuk penghuni terdapat beberapa hal yang harus diperhatikan. Hal-hal yang harus diperhatikan adalah kegiatan manusia dan juga tempat manusia beraktivitas. Nilai pada  $Q_s$  dan juga  $Q_l$  dapat ditemukan pada **Lampiran A.9**. Adapun untuk nilai CLF pada perhitungan kali ini yaitu sebesar 1 dikarenakan aktivitas manusia tidak terhenti pada saat malam. Untuk nilai  $Q_s$  pada penelitian kali ini yaitu sebesar 250 Btu/h, sedangkan untuk  $Q_l$  didapatkan nilai 200 BTU/h. Adapun menggunakan tipe office dikarenakan tidak terdapat nilai untuk ruang kelas dan juga aktivitas pada kelas dan office diasumsikan sama. Sehingga nilai dari  $Q$  untuk penghuni yaitu sebesar:

$$Q_{sensibel} = n \times q_s \times CLF$$

$$Q_{sensibel} = 2 \times 250 \times 1 = 500 \text{ BTU/h}$$

$$Q_{laten} = n \times q_l$$

$$Q_{laten} = 2 \times 200 = 400 \text{ BTU h}$$

Sehingga nilai total untuk  $Q$  perawat yaitu sebesar:

$$Q_{perawat} = 500 + 400 = 900 \text{ BTU/h}$$

## 2. Beban bayi

Beban pendinginan dari bayi dihitung berdasarkan jumlah bayi yang berada di dalam ruangan, besarnya beban panas yang dihasilkan tiap bayi, serta faktor pendinginan yang menyesuaikan tingkat aktivitas. Untuk menghitung beban pendinginan menggunakan persamaan 2.4.

Faktor pendinginan (CLF) digunakan untuk menyesuaikan perhitungan berdasarkan aktivitas, dan dalam penelitian ini nilainya **1**, karena aktivitas bayi bersifat kontinu dan tidak berhenti.

Pada perhitungan beban pendinginan untuk bayi terdapat beberapa hal yang harus diperhatikan. Hal-hal yang harus diperhatikan pada bayi rata rata memiliki luas kulit sekitar  $2.5m^2$  maka dikalikan dengan heat production per unit area of skin dapat ditemukan pada **Lampiran A.10**. Adapun untuk nilai CLF pada perhitungan kali ini yaitu sebesar 1 dikarenakan aktifitas tidak terhenti pada saat malam. Dan nilai beban kalor bayi yaitu sebesar:

$$2,5m^2 = 2,6909ft^2$$

$$18.4Btu/h \cdot ft^2 \times 2,6909ft^2 = 49,5125 \text{ Btu/h}$$

Sehingga nilai dari Q untuk seluruh bayi yaitu sebesar:

$$Q = n \times q \times CLF$$

$$Q = 6 \times 49.5125 \text{ Btu/h} \times 1 = 297,0753 \text{ Btu/h}$$

Jadi total jumlah beban pendinginan untuk penghuni adalah

$$Q_{Penghuni} = Q_{perawat} + Q_{bayi}$$

$$Q_{Penghuni} = 900 + 297,0753$$

$$Q_{Penghuni} = 1.197,0753 \text{ BTU/h}$$

### C. Beban Peralatan (*Equipment*)

Beban pendinginan yang dihasilkan oleh peralatan dalam ruangan dihitung berdasarkan daya listrik yang digunakan oleh peralatan tersebut dan faktor beban pendinginan (CLF) yang menyesuaikan durasi operasional peralatan.

Perhitungan ini dirujuk sebagai Persamaan 2.7, di mana total panas yang dihasilkan peralatan dikalikan dengan faktor beban pendinginan. Nilai CLF pada penelitian ini digunakan sebesar 1,0, karena peralatan di ruang NICU beroperasi selama 24 jam penuh. Adapun untuk jenis jenis equipment dan jumlahnya dapat dilihat pada Tabel 4.6.

Tabel 4.6 Nilai Q Peralatan

Nama Peralatan	Jumlah	Beban Listrik per unit (W)	Total Beban (W)
Inkubator	6	100	600
Kulkas Panasonic	1	57	57

Sehingga untuk nilai Q peralatan adalah

$$Q_{equipment} = 3,4 \times 657 \times 1 = 2.233,8 \text{ BTU/h}$$

Jadi Qtotal dari pembebanan pada peralatan adalah sebesar 2.233,98 BTU/h

#### D. Beban Ventilasi

Beban pendinginan yang dihasilkan oleh sistem ventilasi terdiri dari dua komponen utama, yaitu beban kalor sensibel dan beban kalor laten. Beban ini berasal dari masuknya udara luar ke dalam ruangan yang membawa panas dan kelembapan. Nilai beban kalor sensibel ventilasi dihitung menggunakan Persamaan 2.8, sedangkan beban kalor laten ventilasi dihitung menggunakan Persamaan 2.9.

Dimana nilai CFM

$$CFM = \frac{ACH \times Volume\ ruangan\ (ft^3)}{60}$$

Nilai ACH minimum pertukaran udara dengan luar ruangan yaitu 2 yang dapat dilihat pada **Lampiran A.11**, maka nilai CFM sebagai berikut

$$CFM = 2 \times \frac{6356,65}{60} = 211,8880\ ft^3/min$$

Nilai  $\Delta T$  di dapat dari selisih antara temperatur dalam dan luar ruangan, dimana nilai  $\Delta T$  sebagai berikut.

$$\Delta T = T_{luar} - T_{dalam}$$

$$\Delta T = 26,26\ ^\circ C - 24\ ^\circ C$$

$$\Delta T = 79,268\ ^\circ F - 75,2\ ^\circ F$$

$$\Delta T = 4,068\ ^\circ F$$

Maka nilai Q nya adalah sebagai berikut

$$Q_{Sensibel} = 1,1 \times CFM \times \Delta T$$

$$Q_{Sensibel} = 1,1 \times 211,8880\ ft^3/min \times 4,068$$

$$Q_{Sensibel} = 948,1565\ BTU/h$$

Adapun untuk nilai Q laten yaitu

$$Q_{Laten} = 4840 \times (W_0' - W_i') \times CFM$$

Nilai  $W_0$  dan  $W_i$  didapatkan pada tabel psikometri dengan memasukan nilai temperatur luar dan dalam beserta nilai RH. Adapun nilainya terlampir pada **Lampiran A.11**.

$$\begin{aligned} Q_{Laten} &= 4840 \times (0,017 - 0,0093) \times 211,8880\ ft^3/min \\ &= 7.896,6427\ BTU/h \end{aligned}$$

Jadi Q total dari ventilasi ventilasi sebagai berikut

$$Q_{ventilasi} = 948,1565 + 7.896,6427 = 8.844,7992\ BTU/h$$

### 4.2.3 Total Beban Pendinginan

Setelah mendapatkan nilai keseluruhan yang diperlukan, maka total kebutuhan pendinginan ruangan yang diperlukan. Berikut Perhitungan dari total beban pendinginan

$$Q_{total} = Q_{Dinding} + Q_{Atap} + Q_{Kaca} + Q_{Pencahaya} + Q_{penghuni} + Q_{Peralatan} + Q_{Ventilasi}$$

$$Q_{total} = 535,5617 + 3.550,1273 + 8.888,6836 + 1.402,5 + 1.197,0753 + 2.233,8 + 8.844,7992$$

$$Q_{total} = 26.652,5470 \text{ BTU/h}$$

Mengingat adanya kemungkinan perubahan kondisi termal ruangan selama periode operasional, maka beban pendinginan yang diperoleh dari hasil perhitungan selanjutnya dikoreksi dengan penambahan faktor keamanan (*safety factor*) sebesar 10%. Penambahan faktor ini bertujuan untuk mengantisipasi ketidakpastian beban serta memastikan sistem pendingin mampu beroperasi secara andal sesuai dengan kondisi perancangan.

$$Q_{total} = 26.652,5470 \text{ BTU/h} \times 10$$

$$Q_{total} = 29.317,8017 \text{ BTU/h}$$

Sehingga didapatkan untuk perhitungan CLTD nilai kebutuhan pendinginan pada ruang NICU Rumah Sakit Universitas Andalas sebesar 29.317,8017 Btu/h atau setara dengan 3,2575 PK.

## 4.3 Perancangan Sistem HVAC

### 4.3.1 Desain sistem HVAC

Perancangan sistem HVAC pada ruang NICU dilakukan berdasarkan hasil perhitungan beban pendinginan yang telah dibahas pada subbab sebelumnya. Nilai beban pendinginan tersebut menjadi dasar dalam menentukan jenis sistem yang digunakan serta konfigurasi unit pendingin yang sesuai dengan kebutuhan ruang. Berdasarkan pertimbangan teknis dan karakteristik ruang NICU, sistem HVAC yang dirancang menggunakan konfigurasi *split air conditioning* yang terdiri atas unit *indoor* dan unit *outdoor*, dengan unit *indoor* bertipe *ducted air conditioning*.

Seluruh rancangan sistem HVAC kemudian direalisasikan dalam bentuk gambar teknik menggunakan *aplikasi Computer Aided Design (CAD)*. Pemodelan

menggunakan CAD dilakukan untuk menggambarkan secara detail bentuk, dimensi, serta susunan komponen utama sistem HVAC, baik pada unit *indoor* maupun unit *outdoor*. Pada unit *outdoor*, desain mencakup penempatan komponen utama seperti kompresor, kondensor, kipas, dan katup ekspansi yang disusun secara terintegrasi dalam satu kesatuan unit. Sementara itu, pada unit *indoor*, desain menampilkan susunan evaporator dan motor *blower* yang berperan dalam proses pendinginan udara sebelum didistribusikan ke ruang NICU. Adapun gambar teknik unit *outdoor* dapat dilihat pada Lampiran C **Gambar C.2**, sedangkan gambar teknik unit *indoor* dapat dilihat pada Lampiran C **Gambar C.3**.

Selain komponen utama tersebut, sistem HVAC yang dirancang juga dilengkapi dua komponen tambahan yang berperan penting dalam menjaga kualitas udara di ruang NICU, yaitu *UV box control* dan HEPA filter. *UV box control* memanfaatkan radiasi ultraviolet gelombang pendek (UV-C) untuk menonaktifkan serta membunuh mikroorganisme patogen seperti bakteri, virus, dan jamur yang terbawa dalam aliran udara. Penerapan komponen ini membantu meningkatkan proses sterilisasi udara sebelum udara dialirkan ke dalam ruangan NICU. Desain gambar teknik *UV box control* ditunjukkan pada Lampiran C **Gambar C.4**.

HEPA filter (*High-Efficiency Particulate Air*) berfungsi sebagai sistem filtrasi udara berperforma tinggi yang mampu menangkap partikel sangat halus di dalam aliran udara sehingga kualitas udara yang masuk ke ruang NICU tetap terjaga. Penerapan HEPA filter pada sistem HVAC mendukung tercapainya tingkat kebersihan udara sesuai dengan kelas kebersihan ISO 8, sehingga konsentrasi partikel di udara berada dalam batas yang diperbolehkan untuk lingkungan pelayanan kesehatan. Penerapan HEPA filter juga mengikuti rekomendasi standar Permenkes RI No. 40 Tahun 2022 terkait persyaratan kualitas udara pada fasilitas pelayanan kesehatan. Adapun desain gambar teknik HEPA filter ditunjukkan pada Lampiran C **Gambar C.5**.

Seluruh komponen sistem HVAC tersebut, mulai dari unit indoor, unit outdoor, *UV box control*, hingga HEPA filter, kemudian diintegrasikan dan disusun dalam satu rancangan terpadu yang menggambarkan konfigurasi sistem secara menyeluruh di dalam ruang NICU. Gambar teknik keseluruhan sistem HVAC yang terpasang pada ruang NICU tersebut dapat dilihat pada Lampiran C **Gambar C.1**

### 4.3.2 Perancangan Saluran Udara (*Ducting*)

Perancangan sistem ducting atau saluran udara merupakan bagian penting dalam sistem HVAC karena berfungsi sebagai media distribusi udara dari unit pendingin menuju ruang yang dilayani serta mengalirkan kembali udara dari dalam ruang ke unit pengolah udara. Pada ruang *Neonatal Intensive Care Unit* (NICU), sistem ducting harus dirancang secara cermat karena berkaitan langsung dengan kualitas udara, kenyamanan termal, serta keselamatan dan kesehatan pasien. Oleh karena itu, perancangan ducting pada penelitian ini disesuaikan dengan kebutuhan beban pendinginan, pola aliran udara, dan standar operasional ruang NICU.

Sistem ducting yang dirancang terintegrasi dengan unit *indoor* bertipe *ducted air conditioning* dan terdiri atas tiga jalur utama, yaitu saluran udara suplai (*supply air*), saluran udara balik (*return air*), dan saluran udara luar (*fresh air*), serta dilengkapi dengan saluran pembuangan udara (*exhaust air*). Konfigurasi aliran udara pada sistem ini dirancang untuk memastikan terjadinya sirkulasi udara yang terkontrol dan kontinu di dalam ruang NICU, sebagaimana ditunjukkan pada **Gambar 4.3**, sedangkan detail gambar teknik dapat dilihat pada Lampiran C **Gambar C.6**.

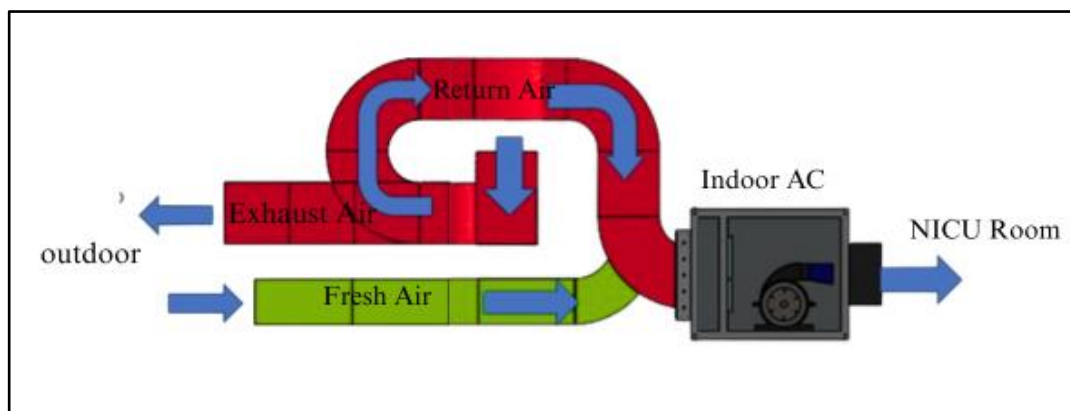
Berdasarkan hasil perancangan sistem HVAC ruang NICU, aliran dan sirkulasi udara disusun mengacu pada skema aliran udara serta ketentuan standar sistem tata udara NICU. Dalam perancangan ini, pertukaran udara segar dari luar ruangan ditetapkan sebesar minimal 2 ACH, sedangkan total pertukaran udara dalam ruang ditetapkan minimal sebesar 6 ACH, sesuai dengan standar yang digunakan.

Udara segar dari luar ruangan dialirkan melalui saluran *fresh air* menuju *unit indoor AC* dengan debit yang disesuaikan agar memenuhi ketentuan minimal 2 ACH. Udara balik dari ruang NICU dialirkan melalui saluran *return air* dan digunakan sebagai bagian dari suplai udara untuk memenuhi ketentuan total pertukaran udara minimal 6 ACH. Dengan konfigurasi tersebut, aliran udara suplai ke ruang NICU berasal dari kombinasi udara segar dan udara resirkulasi sesuai dengan ketentuan standar.

Pengaturan arah dan proporsi aliran udara dilakukan menggunakan *damper* yang dipasang pada jalur aliran udara. *damper* digunakan untuk membelokkan

aliran udara antara jalur *fresh air*, *return air*, dan *exhaust air* sesuai dengan kebutuhan sistem. Melalui pengaturan ini, aliran udara segar dan udara resirkulasi dapat dijaga tetap berada pada nilai minimal yang ditetapkan oleh standar.

Sebagian aliran udara dalam sistem dialirkan keluar sebagai udara buang (*exhaust air*). Pembuangan udara ini dirancang sebagai bagian dari konfigurasi sistem untuk menjaga keseimbangan aliran udara serta mempertahankan arah aliran udara dari ruang NICU menuju area luar. Pola aliran ini digunakan sebagai dasar perancangan tekanan ruang NICU yang lebih tinggi dibandingkan area bersebelahan.

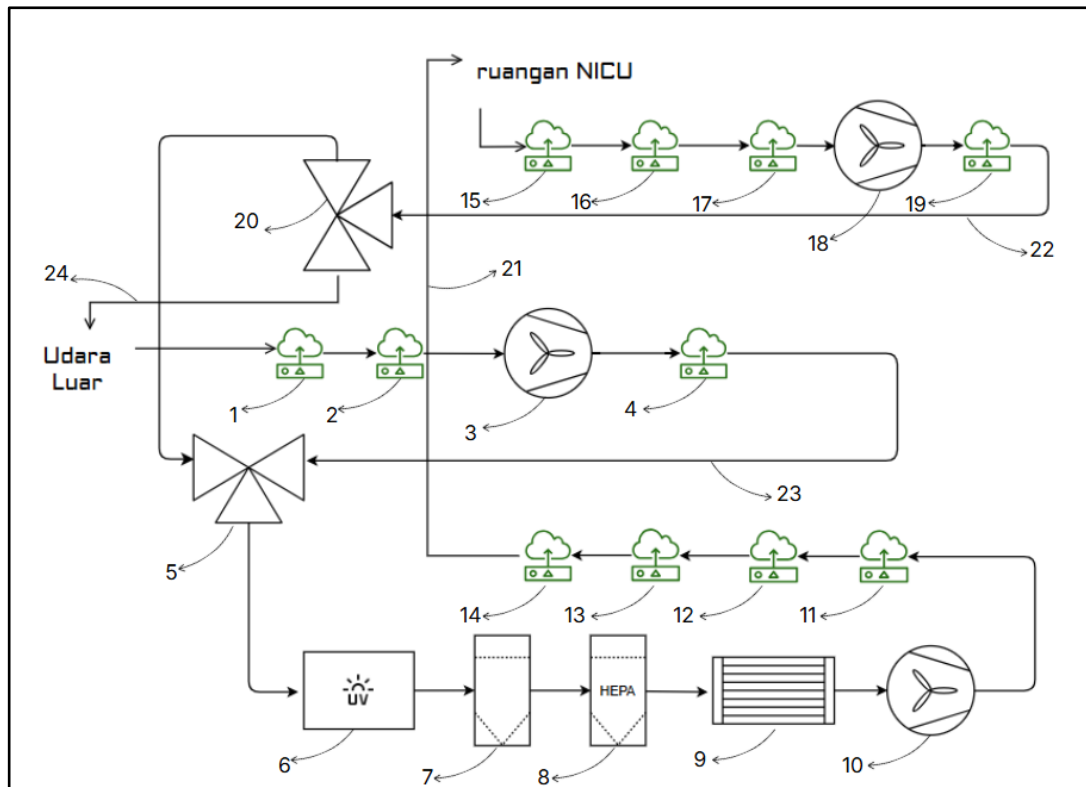


Gambar 4.1 Rancangan Aliran *Ducting*

### 4.3.3 Skema P&ID Sistem

Pada tahap perancangan sistem HVAC, diperlukan suatu skema yang mampu menggambarkan hubungan fungsional antara peralatan utama, jalur aliran fluida, serta instrumen pengukuran dan pengendalian yang digunakan. Skema tersebut disajikan dalam bentuk *Piping and Instrumentation Diagram* (P&ID) yang berfungsi sebagai representasi teknis dari cara kerja sistem HVAC secara menyeluruh.

P&ID digunakan untuk menunjukkan alur distribusi udara dan fluida pendingin, keterkaitan antar komponen seperti *Air Handling Unit* (AHU) dan sistem *ducting*, berikut dengan katup dan instrumen kontrol yang mendukung operasi sistem. Melalui P&ID, proses pengaturan temperatur, tekanan, dan kualitas udara dalam ruangan dapat dipahami secara sistematis, sehingga memudahkan dalam tahap analisis, instalasi, hingga pemeliharaan sistem. Adapun P&ID dapat dilihat pada **Gambar 4.4**.



**Gambar 4.2 P&ID**

Skema P&ID memberikan gambaran mengenai konfigurasi peralatan, jalur aliran fluida, serta instrumen pengukuran dan pengendalian yang digunakan dalam sistem. Setiap simbol dan komponen pada skema tersebut merepresentasikan fungsi tertentu yang saling terintegrasi dalam mendukung proses pengkondisian udara sesuai dengan kebutuhan ruang. Adapun uraian fungsi dan keterangan masing-masing komponen P&ID disajikan secara rinci pada **Tabel 4.7**.

**Tabel 4.7** Penjelasan P&ID

No.	Komponen	Fungsi
1	Sensor Temperatur/Kelembapan Relatif/CO <sub>2</sub> Udara Luar	Mengukur temperatur, kelembapan relatif, dan konsentrasi karbon dioksida pada udara luar sebagai dasar pengendalian kualitas udara masuk.

No.	Komponen	Fungsi
2	Sensor Partikel Udara	Mendeteksi konsentrasi partikel di udara untuk memastikan kualitas udara sesuai standar.
3	<i>Outside Air Fan</i>	Memasukkan udara segar dari luar ke dalam sistem HVAC.
4	Sensor Tekanan	Mengukur tekanan udara pada sistem untuk menjaga kestabilan aliran.
5	<i>3-Way Valve</i>	Mengatur pemindahan jalur aliran udara sesuai kebutuhan operasional sistem.
6	<i>UV Chamber Box</i>	Mensterilkan udara menggunakan paparan sinar ultraviolet.
7	<i>Pre-Filter</i>	Menyaring debu kasar dan partikel berukuran besar sebelum proses filtrasi lanjutan.
8	<i>HEPA Filter</i>	Menyaring partikel halus dengan efisiensi tinggi untuk menjaga sterilitas udara.
9	Kondensor	Berfungsi untuk pemanasan udara sesuai kebutuhan temperatur ruang.
10	<i>Supply Air Fan</i>	Mendorong udara yang telah terkondisi ke dalam ruang NICU.
11	Sensor Temperatur/Kelembapan Relatif (RH)	Mengukur temperatur dan kelembapan relatif udara setelah proses pengolahan.
12	Detektor Asap	Mendeteksi keberadaan asap sebagai bagian dari sistem keselamatan.

No.	Komponen	Fungsi
13	Sensor Partikel Udara	Mengukur kembali konsentrasi partikel pada udara suplai.
14	Sensor CO <sub>2</sub>	Mengukur kadar karbon dioksida untuk memastikan kualitas udara dalam ruang.
15	Detektor Asap	Mendeteksi asap pada jalur udara balik sebagai sistem pengamanan.
16	Sensor CO <sub>2</sub>	Mengukur konsentrasi CO <sub>2</sub> pada udara balik.
17	Sensor Temperatur/Kelembapan Relatif (RH)	Mengukur kondisi termal udara balik dari ruang NICU.
18	<i>Return Air Fan</i>	Menarik udara balik dari ruang NICU menuju sistem HVAC.
19	Sensor Tekanan	Memantau tekanan udara pada jalur return.
20	<i>3-Way Valve</i>	Mengatur pemilihan jalur udara menuju drain atau resirkulasi.
21	<i>Duct Supply Air</i> (255 × 430 mm, insulasi 13 mm, )	Menyalurkan udara terkondisi ke ruang dengan perlindungan termal maksimal.
22	<i>Duct Return Air</i> (300 × 600 mm, insulasi 13 mm)	Menyalurkan udara balik.
23	<i>Duct Fresh Air</i> (720 × 340 mm, insulasi 13 mm, )	Menyalurkan udara segar menuju unit pengolahan udara dengan perlindungan termal.
24	<i>Duct Exhaust Air</i> (380 × 250 mm, insulasi 13 mm)	Menyalurkan sistem HVAC ke lingkungan luar.

#### 4.3.4 Rancang Bangun Struktural

Rancang bangun struktural sistem HVAC pada ruang NICU Rumah Sakit Universitas Andalas mencakup seluruh aspek fisik dari komponen-komponen yang dipilih, dimensi, material, dan konfigurasi pemasangannya. Sistem ini dibangun menggunakan konfigurasi *split air conditioning* dengan unit *indoor* bertipe *ducted air conditioning* yang terhubung langsung dengan sistem ducting sebagai media distribusi udara terkondisi ke seluruh ruang NICU berukuran  $10 \times 6 \times 3$  m.

Unit *indoor* dipasang di atas plafon ruang NICU dan menampung komponen evaporator serta motor *blower* yang berfungsi mendinginkan dan mendistribusikan udara secara merata. Unit *outdoor* ditempatkan pada area dengan sirkulasi udara luar yang baik dan mengintegrasikan kompresor, kondensor, kipas kondensor, serta katup ekspansi dalam satu kesatuan struktur yang kompak. Kedua unit dihubungkan melalui instalasi pipa refrigeran yang terdiri atas pipa gas dan pipa cair, sistem kelistrikan, serta saluran pembuangan kondensat.

Sistem ducting dibangun dengan empat jalur utama yang seluruhnya dilengkapi insulasi setebal 13 mm untuk meminimalkan kehilangan energi termal. Keempat jalur tersebut terdiri atas saluran udara suplai (*supply air*) berukuran  $255 \times 430$  mm, saluran udara balik (*return air*) berukuran  $300 \times 600$  mm, saluran udara segar (*fresh air*) berukuran  $720 \times 340$  mm, dan saluran udara buang (*exhaust air*) berukuran  $380 \times 250$  mm. Konfigurasi ini dirancang untuk memastikan sirkulasi udara yang terkontrol dan kontinu di dalam ruang NICU.

Selain komponen utama tersebut, sistem juga dilengkapi *UV box control* yang secara fisik dipasang pada jalur aliran udara dengan lampu UV-C yang diorientasikan tegak lurus terhadap arah aliran udara agar paparan radiasi dapat menjangkau seluruh penampang aliran secara efektif. Sistem filtrasi bertingkat dibangun secara seri dengan *pre-filter* pada tahap awal untuk menyaring partikel kasar, dilanjutkan dengan HEPA filter (*High-Efficiency Particulate Air*) untuk menangkap partikel halus hingga 0,3 mikron. Seluruh komponen sistem, mulai dari unit *indoor*, unit *outdoor*, *UV box control*, hingga HEPA filter, diintegrasikan dalam satu rancangan terpadu yang digambarkan secara detail menggunakan aplikasi *Computer Aided Design (CAD)* sebagaimana ditunjukkan pada **Lampiran C**.

#### 4.3.5 Rancang Bangun Fungsional

Rancang bangun fungsional menggambarkan cara kerja dan interaksi antar komponen sistem HVAC dalam menjalankan fungsinya sebagai sistem pengkondisian udara ruang NICU. Secara fungsional, sistem ini bekerja dalam satu siklus terintegrasi yang melibatkan proses pendinginan, pengendalian kelembapan, sterilisasi, filtrasi, dan distribusi udara secara berkesinambungan.

Fungsi pendinginan dijalankan melalui siklus refrigerasi kompresi uap yang melibatkan kompresor, kondensor, katup ekspansi, dan evaporator dengan kapasitas pendinginan sebesar 3,2575 PK yang diperoleh dari hasil perhitungan beban pendinginan menggunakan metode *Cooling Load Temperature Difference* (CLTD). Udara yang melewati evaporator mengalami penurunan temperatur secara simultan dengan proses dehumidifikasi, sehingga kondisi termal ruang NICU dapat dipertahankan pada rentang 22–26°C dengan kelembapan relatif 40–60% RH sesuai standar Permenkes RI No. 40 Tahun 2022 dan ASHRAE-170. Kondensat yang dihasilkan dari proses dehumidifikasi dialirkan keluar sistem melalui saluran pembuangan yang telah dipasang.

Secara fungsional, udara segar dari luar ruangan dialirkan melalui jalur *fresh air* dengan laju pertukaran minimal 2 ACH, sedangkan udara balik dari ruang NICU dialirkan melalui jalur *return air* untuk diproses kembali sehingga total pertukaran udara dalam ruang mencapai minimal 6 ACH. *Damper* yang dipasang pada setiap jalur berfungsi mengatur proporsi udara segar dan udara resirkulasi sesuai kebutuhan operasional. Sebelum udara memasuki koil pendingin, *UV box control* menonaktifkan mikroorganisme patogen seperti bakteri, virus, dan jamur melalui paparan radiasi UV-C, sekaligus mencegah pertumbuhan *biofilm* pada permukaan koil evaporator. Udara kemudian melewati *pre-filter* dan HEPA filter secara berurutan sehingga kualitas udara yang masuk ke ruang NICU memenuhi standar kebersihan ISO 8. Dengan keterpaduan seluruh fungsi tersebut, sistem HVAC yang dirancang mampu menciptakan lingkungan udara yang terkontrol, steril, dan memenuhi seluruh persyaratan standar ruang NICU yang berlaku.

## 4.4 Implementasi Sistem HVAC

Tahap implementasi sistem HVAC dilakukan berdasarkan hasil perancangan yang telah disusun pada subbab sebelumnya, meliputi desain sistem, perhitungan kapasitas, skema ducting, dan P&ID. Implementasi ini bertujuan untuk merealisasikan rancangan ke dalam bentuk sistem yang berfungsi secara optimal sesuai dengan kebutuhan ruang.

### 4.4.1 Instalasi Peralatan Utama Sistem HVAC

Instalasi peralatan utama sistem HVAC meliputi pemasangan unit *indoor* dan *outdoor* AC beserta komponen pendukung lainnya yang dilakukan sesuai spesifikasi teknis pabrikan dan standar instalasi HVAC yang berlaku untuk menjamin kinerja sistem berjalan optimal, aman, dan efisien.

Unit *indoor* menggunakan tipe *ducted air conditioning* yang terhubung dengan sistem ducting sebagai media distribusi udara terkondisi ke dalam ruangan sehingga penyebaran temperatur dan kualitas udara dapat berlangsung secara merata sesuai kebutuhan desain ruang. Sementara itu, unit *outdoor* dipasang pada area yang memiliki sirkulasi udara luar yang baik guna mendukung proses pelepasan panas pada kondensor serta memudahkan proses perawatan.

Kedua unit dihubungkan melalui instalasi pipa refrigeran yang terdiri dari pipa gas dan pipa cair, sistem kelistrikan, serta saluran pembuangan kondensat yang dipasang sesuai prosedur instalasi standar untuk menjaga performa sistem pendinginan tetap optimal. Adapun dokumentasi pemasangan unit *indoor*, unit *outdoor*, serta penyambungan antar unit sistem HVAC ditunjukkan pada **Lampiran E.1**.

### 4.4.2 Instalasi Sistem Ducting dan Perpipaan

Sistem ducting dan perpipaan dipasang sesuai dengan desain yang telah direncanakan, baik dari segi dimensi, jenis material, kelas tekanan, maupun sistem insulasi yang digunakan. Proses instalasi dilakukan untuk memastikan distribusi udara dan aliran fluida pada sistem HVAC dapat berlangsung secara efisien serta memenuhi kebutuhan pengkondisian udara pada ruang yang dilayani.

Pemasangan ducting dilakukan mengikuti tata letak desain dengan menggunakan ducting berbahan foam yang telah dilengkapi insulator secara

langsung (*pre-insulated duct*). Penggunaan ducting tipe ini bertujuan untuk mengurangi kehilangan panas, mencegah terjadinya kondensasi pada permukaan duct, serta meningkatkan efisiensi instalasi karena tidak memerlukan tambahan lapisan insulasi eksternal. Instalasi duct udara suplai, return, dan udara luar dilakukan dengan memperhatikan kedekatan sambungan guna meminimalkan kebocoran udara selama sistem beroperasi.

Sementara itu, instalasi perpipaan meliputi pemasangan pipa *chilled water* dan pipa drain yang dipasang dengan kemiringan tertentu serta dilengkapi sistem penyangga sesuai standar instalasi. Pemasangan ini bertujuan untuk menjamin kelancaran aliran fluida, mencegah genangan air kondensat, serta menjaga keandalan operasi sistem HVAC secara keseluruhan. Adapun dokumentasi pemasangan sistem ducting berbahan foam berinsulasi, jalur distribusi udara suplai dan return, serta instalasi perpipaan *chilled water* dan pipa drain yang telah terpasang di lapangan ditunjukkan pada **Lampiran E.2**.

#### **4.4.3 Instalasi Instrumen dan Sistem Kontrol**

Tahap instalasi instrumen dan sistem kontrol mencakup pemasangan berbagai perangkat pengukuran dan pengendalian yang berfungsi untuk memonitor serta mengatur kinerja sistem HVAC secara otomatis. Instrumen yang dipasang meliputi sensor temperatur, kelembapan relatif, tekanan, konsentrasi CO<sub>2</sub>, serta sensor partikel udara yang ditempatkan sesuai dengan skema *Piping and Instrumentation Diagram* (P&ID) yang telah dirancang sebelumnya.

Pemasangan instrumen juga meliputi instalasi panel box yang berisi rangkaian elektrikal sebagai pusat distribusi dan pengendalian sistem. Panel box berfungsi sebagai media integrasi antara sensor, aktuator, dan sistem kontrol sehingga seluruh komponen HVAC dapat bekerja secara terkoordinasi. Sensor dipasang pada titik pengukuran sesuai rancangan untuk memastikan data kondisi udara dapat terbaca secara akurat.

Selanjutnya, seluruh sensor dihubungkan ke sistem *Internet of Things* (IoT) melalui modul komunikasi yang memungkinkan proses pemantauan kondisi ruang dilakukan secara real-time. Integrasi sensor dengan sistem IoT bertujuan untuk mempermudah proses monitoring, pencatatan data operasional, serta pengendalian sistem HVAC secara jarak jauh melalui perangkat monitoring terpusat.

Katup kontrol dan sistem pengendali terpusat dipasang untuk memungkinkan sistem HVAC beroperasi secara otomatis dan responsif terhadap perubahan kondisi lingkungan ruang. Integrasi antara instrumen pengukuran, sistem kontrol, dan *platform* IoT. Adapun dokumentasi pemasangan panel box rangkaian elektrikal, instalasi sensor, serta proses integrasi sensor dengan sistem IoT ditunjukkan pada **Lampiran E.3**.

#### **4.5 Pengujian Sistem HVAC**

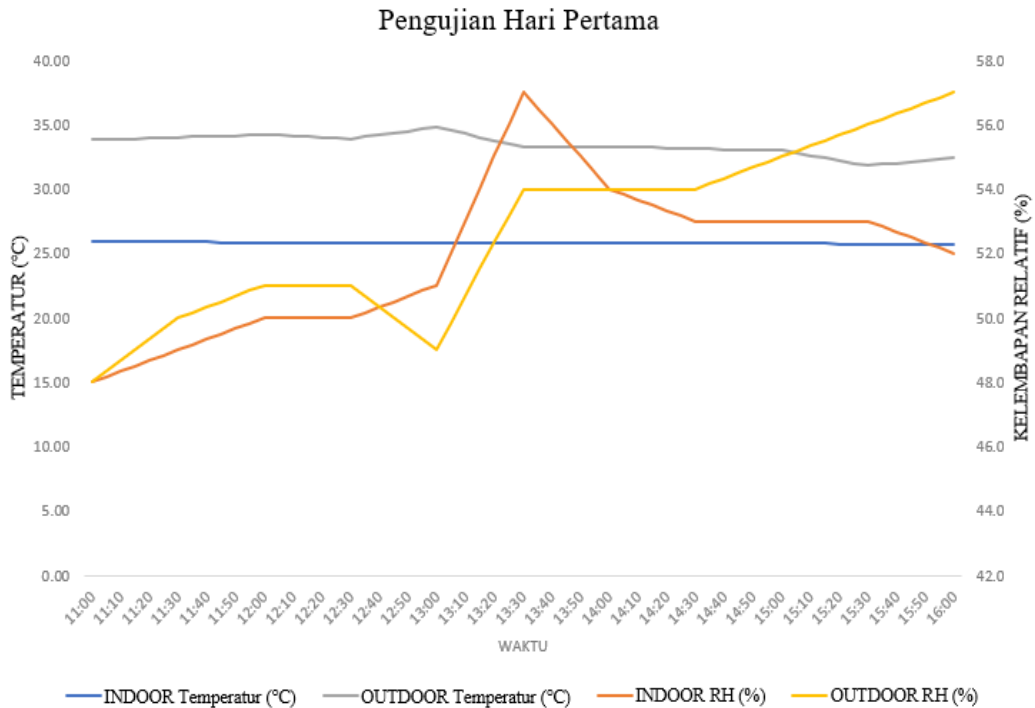
Pengujian sistem HVAC dilakukan untuk memverifikasi kinerja alat yang telah diimplementasikan pada ruang *Neonatal Intensive Care Unit* (NICU) Rumah Sakit Universitas Andalas. Pengujian dilaksanakan selama dua hari, yaitu pada tanggal 3 Maret 2026 dan 4 Maret 2026, mulai pukul 11.00 WIB hingga 16.00 WIB dengan interval pencatatan setiap 5 menit sehingga diperoleh 11 titik data per hari. Parameter yang diukur meliputi temperatur udara ( $^{\circ}\text{C}$ ) dan kelembapan relatif (%) pada sisi *outdoor* dan *indoor*. Hasil pengujian kemudian dibandingkan dengan standar lingkungan ruang NICU berdasarkan Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 40 Tahun 2022, di mana temperatur ruangan harus berada pada rentang  $22\text{--}26^{\circ}\text{C}$  dan kelembapan relatif pada rentang 40–60%.

##### **4.5.1 Pengujian Hari Pertama (3 Maret 2026)**

Pada hari pertama pengujian, temperatur *outdoor* tercatat berfluktuasi cukup tinggi, dengan nilai terendah  $31,8^{\circ}\text{C}$  pada pukul 15.30 WIB dan nilai tertinggi  $34,8^{\circ}\text{C}$  pada pukul 13.00 WIB, dengan rata-rata sebesar  $33,40^{\circ}\text{C}$ . Tingginya temperatur *outdoor* mencerminkan beban termal lingkungan yang besar yang harus dikompensasi oleh sistem HVAC. Meskipun demikian, temperatur *indoor* terpantau sangat stabil sepanjang periode pengujian, berkisar antara  $25,7^{\circ}\text{C}$  hingga  $25,9^{\circ}\text{C}$  dengan nilai rata-rata  $25,8^{\circ}\text{C}$ . Seluruh nilai temperatur *indoor* berada dalam rentang standar  $22\text{--}26^{\circ}\text{C}$ , hal ini sesuai dengan rancangan awal.

Dari sisi kelembapan relatif, nilai RH *outdoor* pada hari pertama berkisar antara 48% hingga 57%. Kelembapan *indoor* terpantau berada pada rentang 48% hingga 57% dengan rata-rata 52,18%, di mana nilai tertinggi terjadi pada pukul 13.30 WIB bertepatan dengan puncak kelembapan *outdoor*. Secara keseluruhan, seluruh nilai RH *indoor* pada hari pertama berada dalam rentang standar 40–60%.

Adapun grafik Perbandingan Temperatur dan RH *Outdoor* dengan *Indoor* Hari Pertama dapat dilihat pada **Gambar 4.5**.



**Gambar 4.3** Grafik Perbandingan Temperatur dan RH *Outdoor* dengan *Indoor* Hari Pertama (3 Maret 2026)

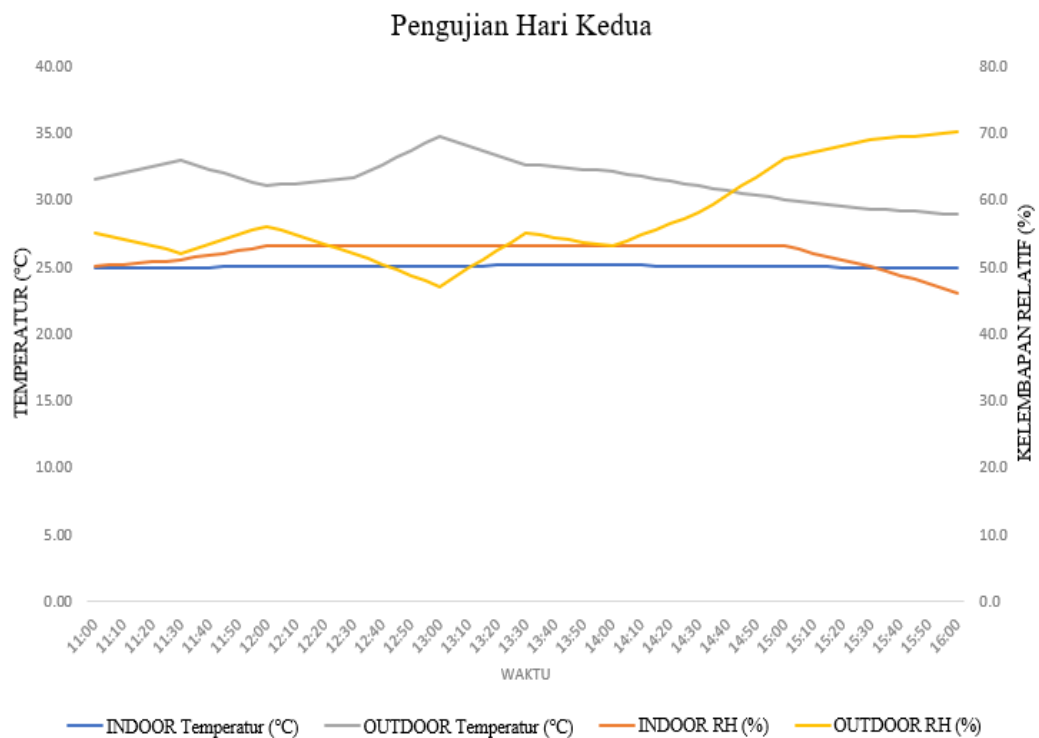
Perlu dicatat bahwa temperatur *indoor* pada hari pertama pengujian berkisar antara 25,7°C hingga 25,9°C, yang berarti sistem beroperasi sangat mendekati batas atas rentang standar yang ditetapkan, yaitu 26°C. Kondisi ini terjadi bertepatan dengan temperatur *outdoor* yang tinggi, mencapai rata-rata 33,40°C. Meskipun nilai tersebut masih berada dalam batas yang diizinkan, kedekatan dengan batas atas ini perlu mendapat perhatian khusus. Apabila sistem telah beroperasi dalam jangka waktu yang lebih panjang, terdapat potensi terjadinya penurunan performa sistem secara bertahap akibat beberapa faktor, di antaranya akumulasi beban termal, penurunan efisiensi komponen seperti koil evaporator akibat *fouling*, maupun peningkatan beban pendinginan dari faktor-faktor yang tidak diperhitungkan dalam kondisi pengujian awal. Selain itu, akumulasi kotoran dan debu pada saluran udara (*ducting*) seiring waktu operasi dapat menyebabkan peningkatan hambatan aliran udara (*pressure drop*) sehingga laju aliran udara suplai ke ruangan berkurang dan kapasitas pendinginan efektif sistem menurun. Kondisi-kondisi tersebut secara

kumulatif dapat mendorong temperatur *indoor* mendekati atau bahkan melampaui batas atas standar 26°C. Oleh karena itu, disarankan agar dilakukan pemantauan berkala terhadap performa sistem, terutama pada kondisi cuaca panas ekstrem, serta perawatan rutin pada komponen filtrasi, koil pendingin, dan pembersihan saluran ducting secara periodik untuk memastikan kapasitas pendinginan sistem tetap terjaga secara optimal dalam jangka panjang.

#### 4.5.2 Pengujian Hari Kedua (4 Maret 2026)

Pada hari kedua, kondisi *outdoor* menunjukkan temperatur yang sedikit lebih rendah dibandingkan hari pertama, dengan rentang 28,9 °C hingga 34,7 °C dan rata-rata sebesar 31,51 °C. Penurunan temperatur *outdoor* pada sore hari mengindikasikan adanya perubahan kondisi cuaca. Temperatur *indoor* tetap terjaga dengan sangat stabil, berkisar antara 24,9 °C hingga 25,1 °C dengan rata-rata 24,97 °C, menunjukkan konsistensi kinerja sistem yang bahkan lebih baik dibandingkan hari pertama. Seluruh nilai temperatur *indoor* pada hari kedua berada dalam rentang standar 22–26 °C dan tidak pernah melampaui batas yang ditentukan.

Kelembapan *outdoor* pada hari kedua menunjukkan variasi yang lebih besar, naik signifikan hingga mencapai 70% pada pukul 16.00 WIB yang mengindikasikan kondisi cuaca mendung atau hujan pada sore hari. Kelembapan *indoor* umumnya terjaga pada rentang 46% hingga 53%, namun terdapat satu titik pada pukul 13.30 WIB yang mencapai 63%, bertepatan dengan lonjakan RH *outdoor* secara bersamaan. Kondisi ini bersifat sementara dan terjadi karena sistem memerlukan waktu respons dalam mengkompensasi perubahan beban laten yang mendadak dari lingkungan luar. Rata-rata RH *indoor* hari kedua sebesar 51,45%, yang secara keseluruhan masih berada dalam batas toleransi standar 40–60%. Adapun grafik Perbandingan Temperatur dan RH *Outdoor* dengan *Indoor* hari kedua dapat dilihat pada **Gambar 4.6**.



**Gambar 4.4** Grafik Perbandingan Temperatur dan RH Outdoor dengan Indoor Hari Kedua (4 Maret 2026)

### 4.5.3 Perbandingan Sebelum dan Sesudah Sistem Terimplementasi

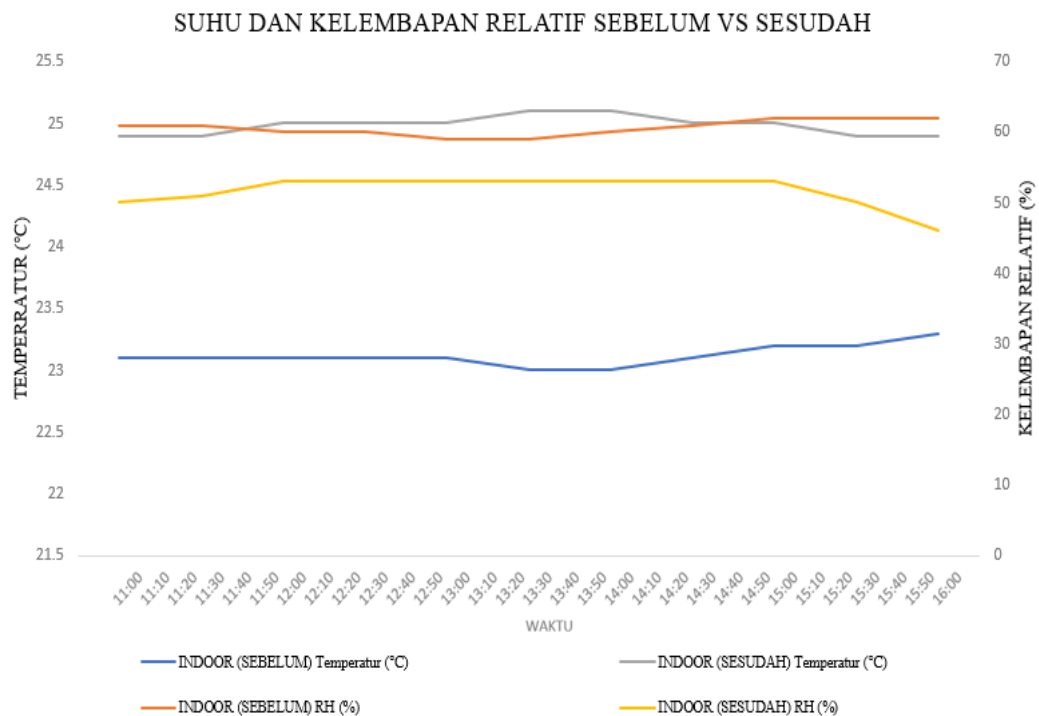
Perbandingan kondisi termal *indoor* ruang NICU dilakukan untuk mengevaluasi sejauh mana implementasi sistem HVAC yang dirancang mampu meningkatkan kualitas pengkondisian udara dibandingkan kondisi sebelumnya. Perlu dicatat bahwa sebelum sistem HVAC diimplementasikan, ruang NICU telah terpasang unit AC konvensional yang beroperasi secara aktif, sehingga perbandingan ini bukan merupakan perbandingan antara kondisi berpendingin dan tanpa pendingin, melainkan antara dua sistem pengkondisian udara yang berbeda dalam hal desain, kapasitas, dan tingkat kendali lingkungannya.

Berdasarkan data pengukuran temperatur, kondisi *indoor* dengan AC eksisting menunjukkan nilai yang berada pada rentang 23,0 °C hingga 23,3 °C dengan rata-rata 23,1 °C sepanjang periode pengamatan. Kondisi ini terbilang stabil namun berada di batas bawah rentang zona nyaman termal yang dipersyaratkan untuk ruang NICU, mengindikasikan bahwa kapasitas pendinginan AC eksisting cenderung berlebih sehingga menghasilkan temperatur yang terlalu rendah dan

kurang optimal bagi kondisi neonatal. Setelah sistem HVAC yang dirancang beroperasi, temperatur *indoor* meningkat secara konsisten ke rentang 24,9 °C hingga 25,1 °C dengan rata-rata 25,0 °C. Peningkatan rata-rata sebesar 1,9 °C ini membawa kondisi ruangan lebih mendekati nilai tengah zona standar Permenkes RI No. 40 Tahun 2022, yakni pada rentang 22–26 °C, sehingga kondisi termal ruangan menjadi lebih optimal bagi pasien neonatal.

Selain peningkatan nilai temperatur, stabilitas kondisi termal sesudah implementasi sistem juga mengalami perbaikan yang signifikan. Fluktuasi suhu *indoor* sesudah sistem HVAC aktif hanya sebesar  $\pm 0,1$  °C, jauh lebih kecil dibandingkan kondisi dengan AC eksisting yang mencapai  $\pm 0,3$  °C. Hal ini mengindikasikan bahwa sistem HVAC yang dirancang mampu mempertahankan kondisi termal ruangan secara lebih konsisten dan merata sepanjang periode pengukuran, yang sangat penting dalam konteks ruang perawatan intensif neonatal yang membutuhkan kestabilan lingkungan tinggi.

Pada aspek kelembapan relatif, nilai RH *indoor* dengan AC eksisting berada pada rentang 46% hingga 53% dengan rata-rata 52,0%. Nilai ini meskipun masih berada dalam batas standar 40–60%, namun cenderung mendekati batas bawah zona nyaman, terutama pada periode sore hari di mana RH sempat turun hingga 46% pada pukul 16.00 WIB, mengindikasikan kemampuan pengendalian kelembapan AC eksisting yang belum optimal. Setelah sistem HVAC yang dirancang diaktifkan, RH *indoor* meningkat ke rentang 53% hingga 62% dengan rata-rata 59,1%, sehingga terjadi kenaikan sebesar 7,1 poin persentase. Peningkatan ini menempatkan kondisi kelembapan ruangan pada zona yang lebih optimal dan mendekati nilai tengah rentang standar yang dipersyaratkan, sehingga turut mendukung kenyamanan dan keamanan lingkungan perawatan bagi pasien.



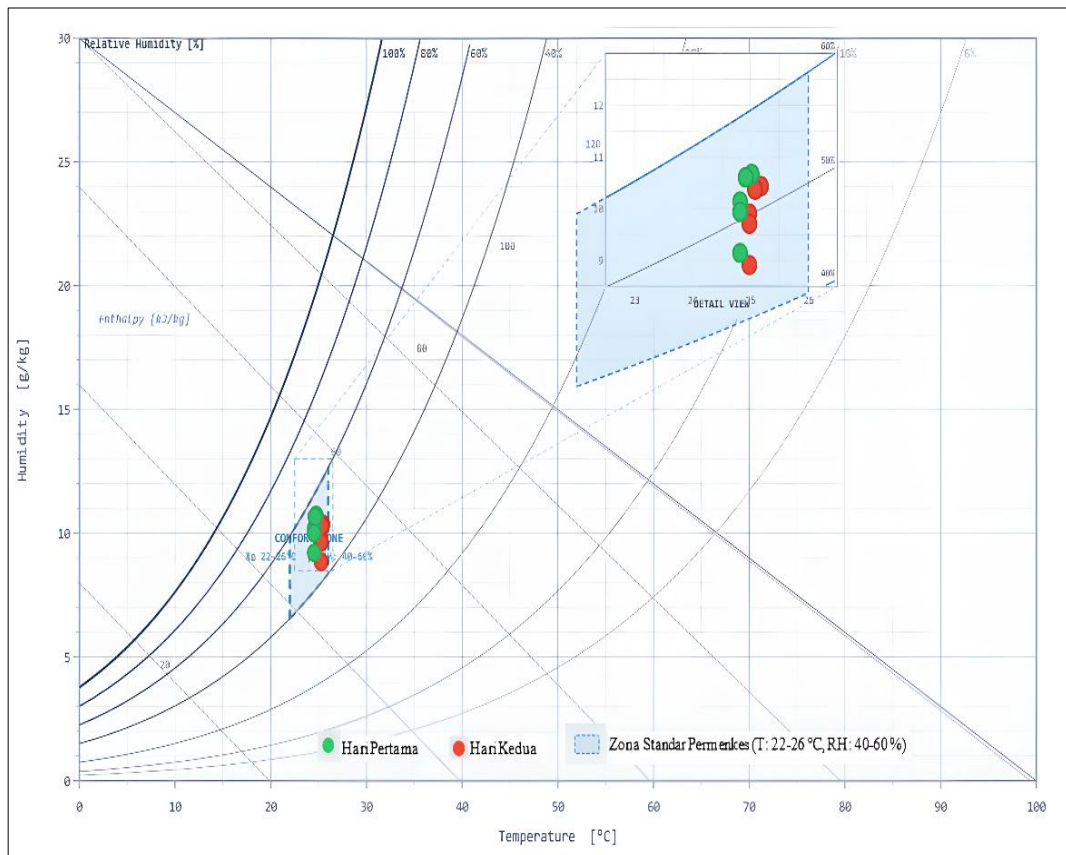
**Gambar 4.5** Grafik Suhu dan Kelembapan Relatif Sebelum VS Sesudah Sistem Terimplementasi

Secara keseluruhan, perbandingan data sebelum dan sesudah implementasi menunjukkan bahwa sistem HVAC yang dirancang memberikan peningkatan kinerja yang nyata dibandingkan AC eksisting, baik dari sisi temperatur maupun kelembapan relatif *indoor* ruang NICU. Temperatur ruangan meningkat menuju zona optimal standar Permenkes RI No. 40 Tahun 2022, kelembapan relatif bertambah dan terdistribusi lebih merata, serta fluktuasi kondisi termal berkurang secara signifikan, membuktikan bahwa sistem HVAC yang diimplementasikan lebih efektif dalam menciptakan lingkungan *indoor* yang stabil dan sesuai persyaratan teknis ruang NICU. Adapun perbandingan temperatur dan kelembapan relatif *indoor* sebelum dan sesudah implementasi sistem HVAC dapat dilihat pada **Gambar 4.7**.

#### 4.5.4 Kesesuaian Hasil Pengujian dengan Permenkes RI No. 40 Tahun 2022

Berdasarkan hasil pengujian selama dua hari, sistem HVAC yang dirancang dan diimplementasikan pada ruang NICU Rumah Sakit Universitas Andalas terbukti mampu menjaga kondisi lingkungan ruangan sesuai dengan standar yang

ditetapkan oleh Permenkes RI No. 40 Tahun 2022. Adapun hasil plot antara temperatur dan kelembapan ruangan NICU dapat dilihat **Gambar 4.8**.



**Gambar 4.6** Grafik Kelembapan Udara Ruang NICU

Dapat dilihat pada grafik kondisi udara *indoor* ruang NICU yang diukur selama dua hari pengujian. Berdasarkan hasil plotting tersebut, dapat diamati bahwa seluruh titik pengukuran hari pertama (hijau) maupun hari kedua (merah) terplot sepenuhnya di dalam area zona standar yang diarsir biru pada grafik, yakni Zona Standar Permenkes RI No. 40 Tahun 2022 dengan batasan temperatur 22–26 °C dan kelembapan relatif 40–60%. Tidak ditemukan satu pun titik pengukuran yang berada di luar, melewati, maupun menyentuh batas zona standar tersebut pada kedua hari pengujian. Secara teknis, seluruh titik data terkonsentrasi pada rentang *dry-bulb temperature* 23–26 °C dengan *humidity ratio* berkisar antara 9–13 g/kg, yang apabila diproyeksikan terhadap garis kontur RH pada grafik psikrometrik, menghasilkan nilai kelembapan relatif dalam rentang 48–57%. Rentang entalpi yang terbaca dari posisi titik-titik data terhadap garis kontur entalpi pada grafik berada pada kisaran 55–65 kJ/kg, mengindikasikan bahwa total kandungan energi

termal udara ruangan terjaga pada level yang terkendali selama pengujian berlangsung.

Kerapatan sebaran titik data yang terlihat pada grafik, khususnya pada *detail view* di sudut kanan atas yang memperbesar area zona standar Permenkes, menunjukkan bahwa fluktuasi kondisi udara ruangan selama pengujian sangat kecil dan tidak signifikan. Hal ini mencerminkan kemampuan sistem HVAC dalam menjaga keseimbangan antara beban pendinginan sensibel (*sensible cooling load*) untuk mengendalikan temperatur dan beban pendinginan laten (*latent cooling load*) untuk mengendalikan kandungan uap air secara simultan dan berkelanjutan. Konsistensi posisi titik operasi (*operating point*) sistem yang tergambar pada grafik psikrometrik ini secara langsung membuktikan bahwa kapasitas sistem sebesar 3,2575 PK yang dihitung menggunakan metode *Cooling Load Temperature Difference* (CLTD) telah sesuai dengan kebutuhan aktual ruangan, dan sistem HVAC yang diimplementasikan pada ruang NICU Rumah Sakit Universitas Andalas telah berhasil memenuhi seluruh persyaratan teknis lingkungan yang ditetapkan oleh Permenkes RI No. 40 Tahun 2022 secara stabil, konsisten, dan andal sepanjang periode pengujian.

#### 4.6 *Coefficient of Performance* (COP) Sistem HVAC

Analisis *Coefficient of Performance* (COP) dilakukan untuk mengevaluasi kinerja sistem HVAC yang telah diimplementasikan pada ruang NICU Rumah Sakit Universitas Andalas. Pengambilan data COP dilakukan pada hari yang sama dengan pengujian kondisi lingkungan, yaitu pada tanggal 3 Maret 2026 dan 4 Maret 2026, mulai pukul 11.00 WIB hingga 16.00 WIB dengan interval pengukuran setiap 5 menit. Sebagai acuan penilaian kinerja sistem, nilai COP minimal yang digunakan dalam pengujian ini adalah sebesar 2,5 sesuai dengan teori yang telah dijelaskan pada tinjauan pustaka. Dengan demikian, apabila sistem HVAC memiliki nilai COP di atas 2,5, maka sistem tersebut dapat dikatakan memiliki performa pendinginan yang baik dan bekerja secara optimal dalam memanfaatkan energi yang digunakan

Untuk mengilustrasikan prosedur perhitungan COP secara sistematis, berikut disajikan contoh perhitungan menggunakan data pengukuran pada hari pertama pukul 11.00 WIB. Pada waktu tersebut, kondisi termal tercatat dengan temperatur *outdoor* 33,8 °C dan RH *outdoor* 48 %, serta temperatur *indoor* 26,3 °C

dengan RH *indoor* 50%. Hasil pengukuran menggunakan tang meter menunjukkan tegangan  $V = 220 \text{ V}$ , arus kompresor  $I = 19,4 \text{ A}$ , dan faktor daya  $\cos \varphi = 0,85$ , sedangkan laju aliran massa udara yang melewati evaporator terukur sebesar  $\dot{m} = 0,705 \text{ kg/s}$ . Berdasarkan tabel psikometrik, diperoleh nilai entalpi udara masuk (*outdoor*)  $h_{in} = 74,923 \text{ kJ/kg}$  dan entalpi udara keluar (*indoor*)  $h_{out} = 52,688 \text{ kJ/kg}$ . Dengan data tersebut, perhitungan COP dilakukan dalam tiga langkah sebagai berikut.

Menghitung daya input kompresor ( $W_{in}$ ) dengan Persamaan (2.14):

$$W_{in} = V \times I \times \cos \varphi$$

$$W_{in} = 220 \times 19,4 \times 0,85$$

$$W_{in} = 4.268 \text{ W} = 4,268 \text{ kW}$$

Menghitung laju perpindahan kalor evaporator ( $QL$ ) dengan Persamaan (2.15):

$$QL = \dot{m}(h_{in} - h_{out})$$

$$QL = 0,705 \times (74,923 - 52,688)$$

$$QL = 0,705 \times 22,235$$

$$QL = 15,676 \text{ kJ/s} = 15,676 \text{ kW}$$

Menghitung COP sistem dengan Persamaan (2.13):

$$COP_R = \frac{QL}{W_{in}}$$

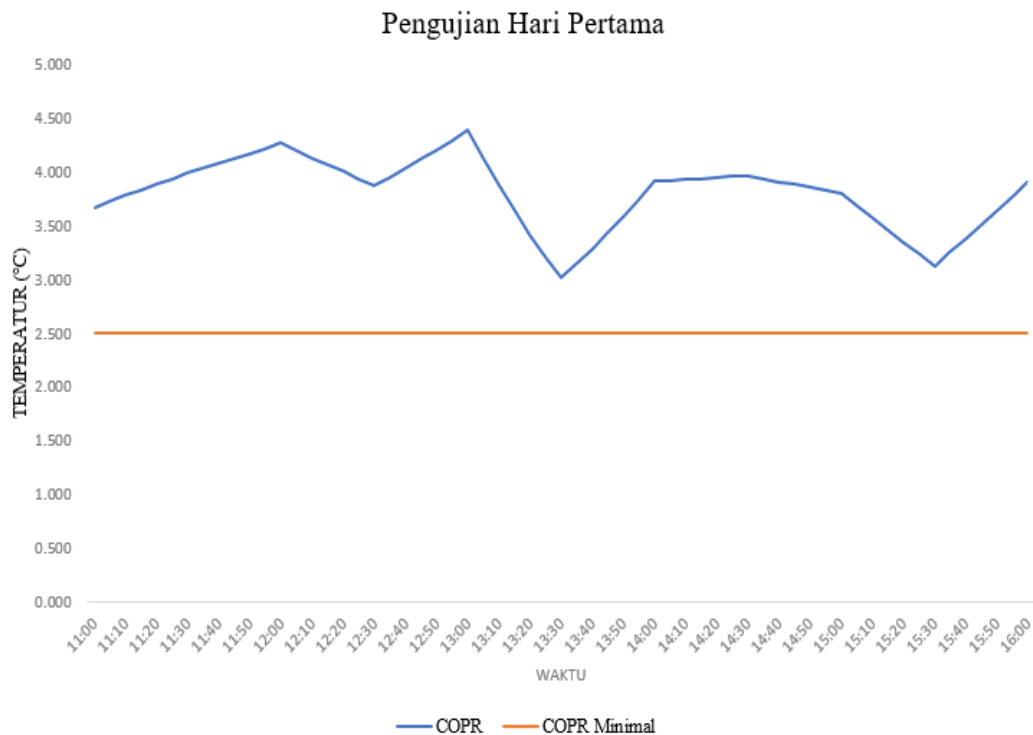
$$COP_R = \frac{15,676 \text{ kW}}{4,268 \text{ kW}}$$

$$COP_R = 3,678$$

Nilai COP yang diperoleh pada pukul 11.00 WIB sebesar 4,5408 tersebut selanjutnya dibandingkan dengan nilai COP minimal 2,5 sebagaimana ditetapkan oleh SNI 6390:2011. Hasil perbandingan menunjukkan bahwa nilai COP aktual melampaui batas minimal sebesar 2,0408 poin, sehingga sistem dinyatakan beroperasi dengan tingkat Kinerja sistem yang baik pada titik pengukuran tersebut. Prosedur perhitungan yang sama kemudian diterapkan pada seluruh titik data pengukuran hari pertama maupun hari kedua, dengan hasil yang disajikan secara lengkap pada subbab berikut.

#### 4.6.1 Hasil COP Hari Pertama (3 Maret 2026)

Pada hari pertama, nilai COP sistem berfluktuasi sepanjang periode pengujian dengan rentang antara 3,546 hingga 5,159. Nilai COP terendah terjadi pada pukul 13.30 WIB sebesar 3,5468, yang bertepatan dengan kondisi temperatur *outdoor* paling tinggi pada hari tersebut, yaitu 34,8 °C. Hal ini sesuai dengan prinsip termodinamika yang dikemukakan oleh Cengel dan Boles bahwa semakin tinggi temperatur kondensasi akibat kenaikan temperatur lingkungan luar, maka kerja kompresi yang dibutuhkan semakin besar sehingga nilai COP cenderung menurun. Nilai COP tertinggi tercatat pada pukul 13.00 WIB sebesar 5,1591, sedangkan rata-rata COP hari pertama sebesar 4,5497. Adapun perbandingan nilai COP aktual sistem terhadap nilai COP minimal selama pengujian hari pertama dapat dilihat pada **Gambar 4.9**.

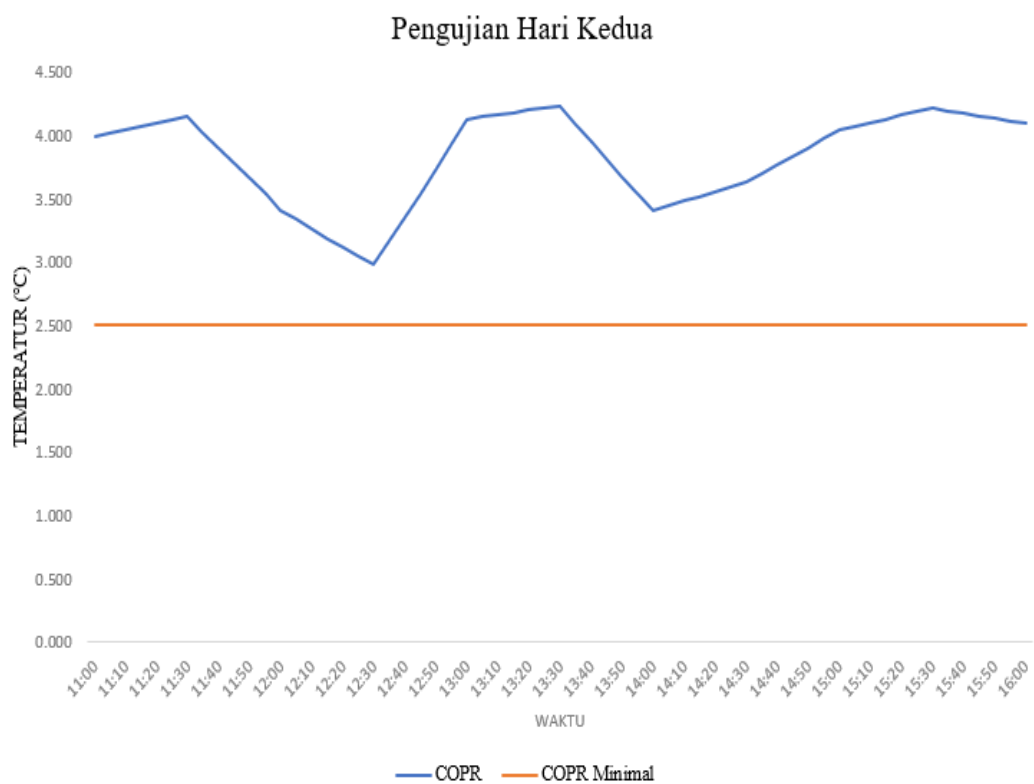


**Gambar 4.7** Nilai COP Sistem HVAC Hari Pertama (3 Maret 2026)

Berdasarkan grafik tersebut, seluruh nilai COP aktual pada hari pertama berada di atas garis COP minimal 2,5 pada setiap titik pengukuran. Bahkan pada titik terendah sekalipun, nilai COP sebesar 3,5468 masih melampaui batas minimal sebesar 1,0468 poin, sehingga sistem dinyatakan beroperasi dengan Kinerja sistem yang baik dan memadai sepanjang hari pertama pengujian.

#### 4.6.2 Hasil COP Hari Kedua (4 Maret 2026)

Pada hari kedua, nilai COP sistem berada pada rentang antara 3,5115 hingga 4,9852. Nilai COP terendah terjadi pada pukul 12.30 WIB sebesar 3,5115, sementara nilai tertinggi tercatat pada pukul 13.30 WIB sebesar 4,9852. Rata-rata COP hari kedua sebesar 4,6130, lebih tinggi dibandingkan hari pertama, yang selaras dengan kondisi temperatur *outdoor* hari kedua yang secara rata-rata lebih rendah sehingga kinerja sistem meningkat. Adapun perbandingan nilai COP aktual sistem terhadap nilai COP minimal selama pengujian hari kedua dapat dilihat pada **Gambar 4.10**.



**Gambar 4.8** Nilai COP Sistem Hari Kedua (4 Maret 2026)

Sebagaimana terlihat pada grafik tersebut, seluruh nilai COP aktual pada hari kedua juga berada di atas garis COP minimal 2,5 di sepanjang periode pengujian. Titik terendah sebesar 3,5115 masih melampaui nilai minimal, sehingga sistem dinyatakan beroperasi dengan Kinerja sistem yang baik pada hari kedua pengujian.

### 4.6.3 Analisis Keseluruhan Kinerja COP

Berdasarkan hasil pengujian COP selama dua hari, rata-rata COP keseluruhan sistem berada pada nilai 4,5814, jauh di atas nilai COP minimal 2,5 sebagaimana telah dijelaskan pada tinjauan pustaka. Fluktuasi nilai COP yang terjadi pada kedua hari pengujian terutama dipengaruhi oleh variasi temperatur *outdoor*, di mana kenaikan temperatur lingkungan berkorelasi dengan penurunan nilai COP sesuai dengan teori yang telah diuraikan sebelumnya. Meskipun terdapat fluktuasi tersebut, tidak ada satu pun titik pengukuran pada kedua hari yang menunjukkan nilai COP di bawah batas minimal 2,5, sehingga sistem secara konsisten beroperasi dalam kondisi Kinerja sistem yang baik selama seluruh periode pengujian. Hasil ini menunjukkan bahwa perancangan sistem HVAC pada ruang NICU Rumah Sakit Universitas Andalas telah berhasil baik dari sisi pemenuhan standar lingkungan sesuai Permenkes RI No. 40 Tahun 2022 maupun dari sisi efisiensi energi sistem pendingin.

