

Analisis Efisiensi Filter Bacterial Universal Dengan Port Adapter Pada Ventilator GE Carescape R860 Menggunakan Metode Uncertainty

Analysis of the Efficiency of Universal Bacterial Filters with the Adapter Port on the GE Carescape R860 Ventilator Using the Uncertainty Method

Dian Bambang Pramusinto¹, Sri Arttini Dwi Prasetyowati²

^{1,2}) Magister Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Sultan Agung, Indonesia

Jl. Kaligawe Raya No. Km. 4, Terboyo Kulon, Kec. Genuk, Kota Semarang, Jawa Tengah 50112

Alamat korespondensi: dianbambangpramusinto@gmail.com

Abstrak

Frekuensi penggantian filter ventilator GE Carescape R860 yang harus selalu diganti meningkatkan kebutuhan anggaran rumah sakit untuk bahan habis pakai (BHP). Langkah yang dilakukan mengganti filter original dengan filter universal dengan penambahan port sehingga dapat kompatibel pada mesin ventilator. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh penggunaan filter bakteri universal yang dimodifikasi dengan port. Penelitian dilakukan dengan pendekatan kuantitatif menggunakan metode kalibrasi internal dan eksternal serta analisis ketidakpastian. Kalibrasi internal meliputi prosedur *self-check ventilator* menggunakan *System Check*, sedangkan kalibrasi eksternal dilakukan melalui verifikasi independen menggunakan alat *Gas Flow Analyzer*. Parameter yang diuji mencakup tidal volume, minute volume, laju napas, rasio inspirasi-ekspirasi (I:E), tekanan inspirasi puncak (PIP), tekanan jalan napas rata-rata (MAP), tekanan akhir ekspirasi positif (PEEP), waktu inspirasi (Ti), dan fraksi oksigen inspirasi (FiO₂). Analisis ketidakpastian digunakan untuk menilai kelayakan hasil pengukuran. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan filter universal dengan penambahan port tetap menjaga performa ventilator dalam batas toleransi yang ditetapkan dan layak pakai secara teknis. Selain itu, solusi ini mampu menekan biaya pengadaan filter secara signifikan dibandingkan filter original. Kesimpulannya, modifikasi filter universal dengan penambahan port merupakan inovasi efektif dan efisien yang dapat menjadi alternatif penggunaan filter original pada ventilator GE Carescape R860 terutama dalam konteks efisiensi biaya di fasilitas layanan kesehatan.

Kata kunci: Analisis Ketidakpastian, Filter Bakteri Universal, Kalibrasi Ventilator, Port, Filter Original

Abstract

The frequency of replacing GE Carescape R860 ventilator filters, which must always be replaced, increases the hospital's budget for consumables. The step taken is to replace the original filter with a universal filter with an additional port so that it is compatible with the ventilator machine. This study aims to analyze the effect of using modified universal bacterial filters with ports. The study was conducted using a quantitative approach with internal and external calibration methods and uncertainty analysis. Internal calibration included a ventilator self-check procedure using System Check, while external calibration was performed through independent verification using a Gas Flow Analyzer. The parameters tested included tidal volume, minute volume, respiratory rate, inspiration-expiration ratio (I:E), peak inspiratory pressure (PIP), mean airway pressure (MAP), positive end-expiratory pressure (PEEP), inspiration time (Ti), and inspired oxygen fraction (FiO₂). Uncertainty analysis was used to assess the validity of the measurement results. The results of the study showed that the use of a universal filter with the addition of a port maintained the performance of the ventilator within the specified tolerance limits and was technically feasible. In addition, this solution was able to significantly reduce the cost of filter procurement compared to the original filter. In conclusion, the modification of the universal filter with the addition of a port is an effective and efficient innovation.

Keywords: *Uncertainty Analysis, Universal Bacterial Filter, Ventilator Calibration, Port, Original Filter*

Pendahuluan

Kondisi udara yang bersih menunjukkan bahwa kualitas udara dalam suatu lingkungan berada dalam kondisi yang baik (1). Udara berkualitas baik berperan signifikan dalam menjaga kesehatan sistem pernapasan manusia (2). Pada situasi medis tertentu, kelainan yang terjadi pada fungsi pernapasan mengakibatkan pasien kehilangan kemampuan untuk melakukan pertukaran gas oksigen dan karbon dioksida dengan sempurna sehingga memerlukan dukungan dari peralatan medis (3).

Ventilator berperan dalam memberikan bantuan pernapasan melalui penyaluran oksigen ke dalam tubuh pasien sambil mengeluarkan karbon dioksida sebagai tindakan pendukung untuk menyelamatkan nyawa (4). Salah satu komponen penting dalam kinerja ventilator adalah *filter bacterial universal* yang berfungsi menyaring udara masuk ke dalam paru-paru pasien sehingga mencegah masuknya kontaminan seperti bakteri, virus, dan partikel berbahaya lainnya (3).

Ventilator GE Carescape R860 menggunakan satu varian filter inspirasi bawaan yang memerlukan penggantian setiap lima hari untuk mempertahankan kondisi kebersihan alat bagi pasien yang sedang menjalani perawatan maupun pada saat adanya pergantian pasien baru. Selain persyaratan penggantian berkala tersebut, biaya satuan filter original relatif mahal, sehingga mengakibatkan peningkatan pengeluaran rumah sakit untuk bahan habis pakai (BHP). Menghadapi tantangan ini, strategi alternatif dilakukan dengan menggantikan filter original dengan filter universal yang dilengkapi port adapter tambahan kemudian dilakukan pengujian kalibrasi untuk menentukan kelayakan ventilator.

Filter universal memiliki harga lebih murah dan lebih mudah tersedia, namun tidak kompatibel secara langsung dengan ventilator GE Carescape R860 karena perbedaan ukuran dan sambungan. Oleh karena itu, diperlukan modifikasi berupa penambahan *port adapter* untuk memungkinkan pemasangan filter universal pada ventilator tersebut (3). Modifikasi ini berpotensi memberikan solusi ekonomis, namun dapat memengaruhi performa ventilator, seperti volume tidal, tekanan inspirasi, resistensi aliran, maupun akurasi pembacaan sensor.

Filter universal dengan penambahan port ini dapat menjadi salah satu alternatif yang dapat digunakan untuk menggantikan filter original yang relatif lebih mahal dan sulit didapatkan. Pengujian kalibrasi internal dan eksternal alat ventilator untuk menguji keefektifan dan efisiensi dari penambahan port pada filter universal, angka ketidakpastian dan koreksi pada pengujian kalibrasi dan perbandingan penggunaan filter dari segi ekonomis.

Penelitian sebelumnya lebih banyak berfokus

pada fungsi ventilator atau efisiensi filter dalam konteks pencegahan infeksi (2,5), namun belum mengkaji dampak modifikasi filter universal dengan penambahan port terhadap performa ventilator GE Carescape R860. Dengan demikian, terdapat *gap* penelitian berupa kurangnya kajian teknis dan metrologis terhadap penggunaan filter universal yang dimodifikasi pada ventilator tipe tersebut.

Penelitian ini menggunakan beberapa ruang lingkup pengujian yaitu tidal volume, minute volume, breath rate, I:E ratio, PEEP, inspiration time, dan expiration time. Kalibrasi ventilator dilakukan dengan dua cara yaitu kalibrasi mandiri atau internal dan kalibrasi pihak ke dua atau eksternal, kalibrasi mandiri yaitu personal kalibrasi menggunakan alat itu sendiri sedangkan kalibrasi pihak ke dua yaitu menggunakan alat kalibrator *Gas Flow Analyzer* (6).

Evaluasi *conformity assessment* sebaiknya tidak hanya membandingkan nilai rata-rata dengan persyaratan minimum, tetapi juga mempertimbangkan ketidakpastian pengukuran untuk meningkatkan reliabilitas keputusan kelayakan alat (7). Metodologi yang diterapkan dalam penelitian ini menggunakan pendekatan uncertainty untuk evaluasi kalibrasi. Ketidakpastian didefinisikan sebagai indikator yang mengukur reliabilitas dari suatu hasil pengukuran untuk menentukan kualitas hasil pengukuran yang diperoleh. Nilai ketidakpastian melalui proses kalibrasi terhadap instrumen pengukur yang digunakan.

Oleh karena itu, berdasarkan uraian di atas, maka penelitian ini bertujuan untuk menganalisa pengaruh penambahan port adapter dan penggantian filter bakterial universal terhadap kinerja ventilator GE Carescape R860 dan perbandingan biaya BHP yang dibutuhkan antara *filter original* dengan *filter universal*. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi teknis mengenai dampak penggunaan filter universal terhadap performa ventilator, menambah wawasan dan pengetahuan terkait fungsi kerja ventilator, kebutuhan BHP medis, pengujian internal dan eksternal ventilator menggunakan *Gas Flow Analyzer*.

Metode

Penelitian ini merupakan penelitian kuantitatif untuk memperoleh hasil pengukuran tiap-tiap parameter dengan kalibrasi mengacu pada standar SNI IEC 62353:2014, ISO 80601-2-12:2020, ISO/IEC Guide 98-3:2008 (GUM) dan Kemenkes RI HK 02.02/V/5771/2018 dengan parameter terukur yaitu *tidal volume*, *minute volume*, *breath rate*, I:E ratio, PEEP, PIP, *inspiration time*, dan FiO_2 pada ventilator yang telah dimodifikasi dengan penambahan port adapter pada filter universal yang menggantikan filter original ventilator (8–11).

a. Prosedur Kerja

Langkah-langkah pada penelitian ini dijelaskan berikut.

- 1) Persiapan lingkungan.
Kondisi Lingkungan
 - a) Suhu ruang : $25^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$
 - b) Kelembaban : $55 \% \text{ RH} \pm 20\% \text{ RH}$
 - c) Tegangan jala-jala : $220 \text{ V} \pm 10\%$
- 2) Kalibrasi internal meliputi pengecekan *System Check* dan kalibrasi sensor (tekanan, aliran, oksigen, dan *exhalation valve*).
- 3) Instalasi filter, yaitu penggantian filter original dengan filter universal beserta pemasangan port adapter, lalu penyambungan ke *breathing circuit* dan test lung.
- 4) *External verification* dilakukan pengujian fisik dan fungsi, pengujian keselamatan kerja dan kinerja ventilator menggunakan *Gas Flow Analyzer* dengan pengulangan lima kali pada setiap titik ukur. Kalibrasi alat ventilator pada penelitian ini sesuai dengan metode kerja pengujian ventilator MK 069-18.
- 5) Analisis ketidakpastian, berdasarkan metode ISO GUM, mencakup ketidakpastian tipe A, tipe B, ketidakpastian gabungan, dan ketidakpastian bentangan U95.
- 6) Evaluasi kelayakan ventilator, menggunakan batas toleransi $\pm 15\%$, dengan kriteria lulus apabila $\geq 70\%$ titik ukur berada dalam batas toleransi. Komponen penilaian, yaitu hasil pemeriksaan fisik dan fungsi dengan kontribusi 10%, hasil pengujian keselamatan listrik 40%, serta hasil pengukuran atau uji kinerja 50%.

b. Alat dan Bahan

Alat dan bahan utama yang digunakan pada penelitian ini adalah:

- 1) Set ventilator GE *Carescape* R860
Ventilator adalah salah satu jenis alat medis yang membantu atau menggantikan kerja paru-paru dalam proses pernafasan dengan cara memasukkan oksigen ke tubuh dan mengeluarkan karbon dioksida. Alat ventilator yang digunakan pada penelitian ini yaitu Ventilator GE *Carescape* R860 (General Electric Healthcare, USA).



Gambar 1. Ventilator GE Carescape R860

- 2) Filter universal

Filter bakterial yang digunakan berfungsi untuk mencegah infeksi silang antara pasien, alat ventilator dan lingkungan di Ruang ICU. Filter bakteri universal yang digunakan tipe HEPA-grade (efisiensi $\geq 99,97\%$, $0,3 \mu\text{m}$). Filter jenis ini banyak digunakan di rumah sakit dan laboratorium untuk menjaga kualitas udara dan mengurangi risiko infeksi (12).



Gambar 2. Universal Bacterial Filter

- 3) Filter original

Filter ini adalah filter original bawaan/ pabrikan pada ventilator merk GE Type *Carescape* R860. Filter ini khusus didesain untuk ventilator merk GE karena memiliki desain dan diameter lubang yang hanya bisa dipasang pada ventilator merk ini. Berbeda dengan filter inspirasi yang lain yang dapat dipasang pada semua merk ventilator.



Gambar 3. Filter Original GE Carescape R860

- 4) Port Adapter

Port adapter ini adalah port yang ditambahkan sebagai pengganti filter inspirasi original GE. Port ini dipasang sebagai tambahan untuk penggunaan filter bakterial universal yang dipasang. Port ini digunakan karena filter universal memiliki bentuk dan ukuran yang berbeda dengan filter inspirasi original. Port adapter yang digunakan berbahan ABS medical-grade ukuran 22 mm.



Gambar 4. Port Adapter Filter Universal

- 5) Gas Flow Analyzer

Gas Flow Analyzer adalah alat ukur yang digunakan untuk menguji dan memastikan kinerja peralatan medis yang menggunakan gas seperti ventilator, dan alat terapi lainnya dalam kondisi prima dan layak digunakan untuk pelayanan kesehatan. GFA yang digunakan yaitu Gas Flow Analyzer tipe CITREX H3 BB105313 (IMT Analytics, Switzerland).



Gambar 5. Gas Flow Analyzer

6) Electrical Safety Analyzer

Electrical Safety Analyzer adalah alat yang berfungsi untuk memeriksa keamanan listrik pada peralatan baik pada sumber tegangan maupun pada alat medis agar aman digunakan untuk pasien dan operator. Alat ini digunakan untuk menguji dan memastikan kebocoran arus, kontinuitas grounding, polaritas dan tegangan dari alat. Jenis alat yang digunakan yaitu Electrical Safety Analyzer tipe ESA 612 2469047.



Gambar 6. Electrical Safety Analyzer

7) Thermohygrometer

Alat ini digunakan untuk mengukur suhu atau temperature dan kelembapan udara atau humidity secara bersamaan. Alat ini berfungsi untuk mengetahui keadaan lingkungan dimana alat kesehatan disimpan atau saat sedang dipakai. Hal ini penting diketahui agar kondisi lingkungan tetap sesuai standar demi keamanan, kenyamanan dan mutu peralatan khususnya peralatan medis. *Thermohygrometer* yang digunakan tipe 642N A (Lutron, Taiwan).



Gambar 7. Thermohygrometer

Hasil

Hasil pengujian dan analisis dalam penelitian ini mengacu pada Keputusan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor HK 02.02/V/5771/2018.

1. Kalibrasi Internal

a. Pengukuran Kinerja

Prosedur kalibrasi internal dilakukan melalui pengecekan *System Check* dan proses *Calibration* pada *Service Mode*. Tahapan utamanya meliputi: menyiapkan ventilator, mengecek kondisi lingkungan dan keselamatan listrik, serta menyambungkan semua aksesoris ke alat kalibrator sebelum menyalakan unit. Setelah itu dilakukan *System Check* untuk memastikan tidak terdapat kebocoran serta seluruh indikator masuk dalam standar (ditandai warna hijau). Apabila hasil baik, dilanjutkan ke menu *Service Mode* untuk melakukan *internal calibration* pada parameter FCV O₂, FCV Air, dan Exhalation Valve hingga semuanya dinyatakan "Passed". Setelah seluruh proses selesai, ventilator dimatikan dan semua sambungan dilepas.

Tabel 1. Tabel Kalibrasi Internal

System Check Details	
Paw Transducer	✓
Barometric Pressure	✓
Relief Valve	✓
Exhalation Valve	✓
Expiratory Flow sensor	✓
Air Flow Sensor	✓
Oxygen Sensor	✓
O ₂ Flow Sensor	✓
Neonatal Flow Sensor	✓
Resistance	✓
Circuit Measurement	✓
Leak	250 - 700 ml
Compliance	0 - 2 ml/cm/H ₂ O
Resistance	0 - 25 cmH ₂ O/L/s

b. Pemeriksaan Fisik dan Fungsi Alat

Selama pelaksanaan pengujian kalibrasi, kondisi lingkungan dipertahankan pada suhu 23°C dengan tingkat kelembaban 60%, sementara peralatan yang diuji memiliki tingkat resolusi 1 mmHg. Hasil evaluasi terhadap kondisi fisik dan fungsi alat ditampilkan dalam tabel berikut.

Tabel 2. Kondisi Fisik dan Fungsi Kalibrasi Internal

Bagian alat	Hasil Pemeriksaan	
	Fisik	Fungsi
Badan dan permukaan	Baik	Baik
Tombol dan indikator	Baik	Baik
Kabel dan aksesoris	Baik	Baik

Secara keseluruhan kondisi fisik dan fungsi alat dalam keadaan baik dan sedang tidak dalam penggunaan kurang lebih selama 2 jam lamanya.

Parameter ini memberikan bobot 10% dalam perhitungan hasil akhir laporan kalibrasi.

2. External verification

Hasil analisa data *external verification* yang dilakukan oleh PT. Indraloka terhadap alat Ventilator Carescape R860 RS Universitas Sebelas Maret menggunakan metode kalibrasi HK 02.02/V/5771/2018.

a. Pemeriksaan Fisik dan Fungsi Alat

Hasil pemeriksaan fisik dan fungsi alat *external verification* ventilator ditunjukkan sebagai berikut.

Tabel 3. Kondisi Fisik dan Fungsi External verification

Bagian alat	Hasil Pemeriksaan	
	Fisik	Fungsi
Badan dan permukaan	Baik	Baik
Kotak kontak alat	Baik	Baik
Kabel catu utama	Baik	Baik
Sekering pengaman	Baik	Baik
Tombol, saklar, dan control	Baik	Baik
Tampilan dan indikator	Baik	Baik
Baterai/ charger	Baik	Baik
Aksesoris	Baik	Baik

Hasil pengujian menunjukkan bahwa secara fisik dan fungsi alat hasil pemeriksaan dalam keadaan baik.

b. Pemeriksaan Keselamatan Listrik

Hasil uji keselamatan listrik pada alat ventilator sebagai berikut.

Tabel 4. Pengujian Keselamatan Listrik

No	Parameter	Terukur	Toleransi	Satuan
1	Tegangan Catu Daya	218,6	220 ± 10%	V
2	Resistansi Pembumian Protektif	0,108	≤ 0,2	Ω
3	Isolasi Resistansi	OL	≥ 2	MΩ
4	Arus Bocor Pembumian Polaritas Normal	16,6	≤ 500	μA
5	Arus Bocor Pembumian Polaritas Terbalik	18,2	≤ 500	μA
6	Arus Bocor Selungkup Polaritas Normal	2,6	≤ 500	μA
7	Arus Bocor Selungkup Polaritas Normal Tanpa Pembumian	9,8	≤ 500	μA

8	Arus Bocor Selungkup Polaritas Terbalik	2,6	≤ 100	μA
9	Arus Bocor Selungkup Polaritas Terbalik Tanpa Pembumian	9,6	≤ 500	μA

Hasil pengujian keselamatan listrik berkontribusi sebesar 40% dalam penentuan pernyataan kelayakan alat. Data pengujian menunjukkan bahwa seluruh nilai parameter yang diukur berada dalam batas toleransi yang ditetapkan.

c. Pengukuran Kinerja

Setiap parameter pengujian ventilator diukur sebanyak lima kali pengulangan pada setiap titik setting. Berikut disajikan contoh perhitungan ketidakpastian pada parameter tidal volume dengan setting 300 mL. Metode perhitungan yang serupa diterapkan pada setting 400, 500, dan 600 mL serta pada seluruh parameter pengujian.

1) Tidal Volume

Pengujian ventilator parameter tidal volume pada beberapa titik uji yaitu 300, 400, 500 dan 600 mL. Hasil kalibrasi ventilator dengan melanjutkan penghitungan pada U95. Perhitungan ketidakpastian setting di titik 300 mL dijelaskan sebagai berikut:

a) Evaluasi Ketidakpastian Tipe A

(1) Rata-rata (Mean)

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (1)$$

$$= \frac{299,3 + 299,3 + 299,3 + 299,3 + 299,3}{5}$$

$$\bar{x} = 299,30$$

(2) Koreksi

$$\text{Koreksi} = x - \bar{x}$$

$$= 300 - 299,30$$

$$= 0,70$$

(3) Standar deviasi

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{(299,3 - 299,3)^2 + (299,3 - 299,3)^2 + (299,3 - 299,3)^2 + (299,3 - 299,3)^2 + (299,3 - 299,3)^2}{5 - 1}}$$

$$\sigma = 0$$

(4) Standar ketidakpastian tipe A/ *repeatability* (ua)

$$u(\bar{x}) = s(\bar{x}) = \frac{std_{dev}}{\sqrt{n}} \quad (3)$$

$$u(\bar{x}) = \frac{0}{\sqrt{5}} = 0$$

b) Evaluasi Ketidakpastian Tipe B

1) *Calibrator* (u_{b1})

Nilai ketidakpastian diperoleh dari hasil kalibrasi alat sebelumnya dengan no sertifikat IND-01784/08/23:

$$U_{b1} = \frac{U_{std}}{k} \quad (4)$$

$$U_{b1} = \frac{0}{2}$$

$$U_{b1} = 0$$

2) *Readability* (u_{b2})

$$U_{b2} = \frac{1}{2} \frac{Resolusi}{\sqrt{3}} \quad (5)$$

Dengan resolusi merupakan perubahan nilai terkecil dari alat =1 sehingga,

$$u_{b2} = \frac{1}{2 \times \sqrt{3}}$$

$$u_{b2} = 0,2887$$

3) *Drift Standar* (u_{b3})

$$u_{b3} = \frac{\frac{1}{2}x(koreksi\ sertif\ terbaru - koreksi\ sertif\ sebelum)}{\sqrt{3}} \quad (6)$$

$$U_{b3} = \frac{1}{2} \times 0$$

$$U_{b3} = 0$$

Perhitungan pembagi dan nilai u sesuai dengan tabel berikut.

Tabel 5. Tabel Uncertainty Budget

Komponen	Distribusi	U	Pembagi	ui
Pengukuran Berulang	Normal	$\hat{\sigma}$	$\sqrt{n}$	$\frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{n}}$
Sertifikat Standar	Normal	Ustd	k	$\frac{U_{Sertstd}}{k}$
Resolusi	Rect.	Ures	$\sqrt{3}$	$\frac{U_{res}}{\sqrt{3}}$
Drift	Rect.	Udrift	$\sqrt{3}$	$\frac{U_{drift}}{\sqrt{3}}$

Nilai vi merepresentasikan derajat kebebasan yang ditetapkan sebesar 50, sementara nilai c adalah koefisien sensitivitas yang bernilai 1 karena semua parameter dalam formulasi matematis memiliki satuan pengukuran yang sama.

c) Ketidakpastian Gabungan (U_c)

$$U_c = \sqrt{(U_{(xi)}^2 + (U_{(b1)}^2 + (U_{(b2)}^2 + (U_{(b3)}^2) \quad (7)$$

$$U_c = \sqrt{0 + 0 + 0,2887^2 + 0}$$

$$U_c = 0,2887 \text{ bprm}$$

d) Ketidakpastian Bentangan (U)

Factor cakupan untuk V_{eff} sebesar nilai 50 dan CL 95% ditentukan sebesar 2,01, sehingga dengan menggunakan rumus sebagai berikut maka diperoleh:

$$U = k \cdot u_c \quad (8)$$

$$= 2,01 \times 0,2887$$

$$= 0,58$$

e) Menghitung $|C|+|U95|$

$$|C|+|U95| = |0.70| + |0.58| = 1.28$$

f) Menghitung persentase $|C|+|U95|$

$$\% |C|+|U95| = 1.28/300 \times 100 = 0.43$$

b. Minute Volume

Parameter minute volume pada beberapa titik uji yaitu 6;7 dan 7,8 LPM. Prosedur perhitungan ketidakpastian serupa dengan persamaan (1)–(8).

c. Breath Rate

Pengujian ventilator parameter breath rate pada beberapa titik uji yaitu 20, 15, 14 dan 13 brpm. Prosedur perhitungan ketidakpastian sesuai dengan persamaan (1)–(8).

d. I : E Ratio

Pengujian ventilator parameter I:E ratio pada beberapa titik uji yaitu 1:1,5; 1:2; 1:2,5 dan 1:3. Prosedur perhitungan ketidakpastian sesuai dengan persamaan (1)–(8).

e. PEEP

Pengujian ventilator parameter PEEP pada titik uji 5 cmH₂O pada berbagai titik uji setting. Prosedur perhitungan ketidakpastian sesuai dengan persamaan (1)–(8).

f. PIP

Pengujian ventilator parameter PIP pada beberapa titik uji yaitu 21; 25 dan 30 cmH₂O pada berbagai titik uji setting. Prosedur perhitungan ketidakpastian sesuai dengan persamaan (1)–(8).

g. Ti

Pengujian ventilator parameter Ti pada titik uji 1, 1,2 dan 1,55 sec pada berbagai titik uji setting. Prosedur perhitungan ketidakpastian sesuai dengan persamaan (1)–(8).

h. FiO2

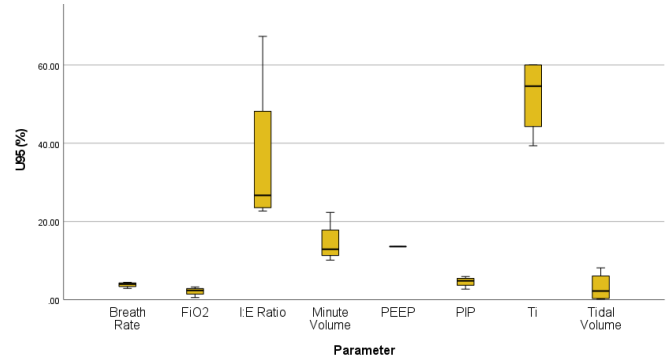
Pengujian ventilator parameter FiO₂ pada titik uji 30, 60, 90 dan 100% pada berbagai titik uji setting. Prosedur perhitungan ketidakpastian sesuai dengan persamaan (1)–(8).

Hasil pengukuran atau uji kinerja memberikan kontribusi 50 % dari pernyataan. Hasil pengujian kinerja menunjukkan bahwa parameter tidal volume, breath rate, PEEP, PIP dan FiO₂ untuk semua titik uji memiliki nilai ketidakpastian bentangan (U95) yang berada dalam batas toleransi $\pm 15\%$. Sementara itu, pada parameter minute volume pada pengukuran kedua, dan seluruh pengukuran pada I:E ratio dan Ti memiliki nilai ketidakpastian $> \pm 15\%$. Berdasarkan perhitungan di atas, nilai U95 atau nilai ketidakpastian di setiap titik parameter menghasilkan nilai seperti pada tabel berikut.

Tabel 6. External verification

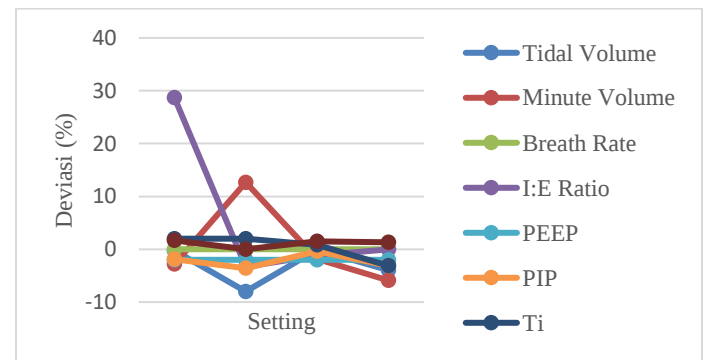
Parameter	Satuan	Setting	Mean*	C*	U95	C + U95	% C + U95
Tidal Volume	mL	300	299.3	0.70	0.58	1.28	0.43
		400	368	32.00	0.58	32.58	8.15
		500	499.57	0.43	0.58	1.01	0.20
		600	576.33	23.67	0.58	24.25	4.04
Minute Volume	LPM	6	5.83	0.17	0.58	0.75	12.50
		7	6.76	-0.76	0.58	1.34	22.33
		7.8	6.87	0.13	0.58	0.71	10.14
		20	7.34	0.46	0.58	1.04	13.33
Breath Rate	brpm	15	15	0.00	0.58	0.58	3.87
		14	14	0.00	0.58	0.58	4.14
		13	13	0.00	0.58	0.58	4.46
I:E Ratio	sec	1 : 1.5	1.93	-0.43	0.58	1.01	67.33
		1 : 3.0	2.9	0.10	0.58	0.68	22.67
		1 : 2.5	2.47	0.03	0.58	0.61	24.40
		1 : 2	2	0.00	0.58	0.58	29.00
PEEP	cmH ₂ O	5	4.9	0.10	0.58	0.68	13.60
		5	4.9	0.10	0.58	0.68	13.60
		5	4.9	0.10	0.58	0.68	13.60
		21	20.6	0.40	0.58	0.98	4.67
PIP	cmH ₂ O	25	24.1	0.90	0.58	1.48	5.92
		25	24.9	0.10	0.58	0.68	2.72
		30	29.07	0.93	0.58	1.51	5.03
Ti	sec	1	1.02	-0.02	0.58	0.60	60.00
		1	1.02	-0.02	0.58	0.60	60.00
		1.2	1.21	-0.01	0.58	0.59	49.17
		1.6	1.55	0.05	0.58	0.63	39.38
		90	91.5	-1.50	0.58	2.08	2.31
FiO ₂	%	100	100	0.00	0.58	0.58	0.58
		60	60.9	-0.90	0.58	1.48	2.47
		30	30.4	-0.40	0.58	0.98	3.27

Visualisasi data dalam bentuk grafik deviasi dan boxplot ketidakpastian (U95) menunjukkan distribusi parameter ventilator terhadap batas toleransi yang ditetapkan. Grafik deviasi menampilkan persentase penyimpangan dari nilai target untuk setiap titik ukur, sedangkan boxplot U95 memberikan gambaran statistik mengenai rentang ketidakpastian pengukuran yang dicapai untuk masing-masing parameter.



Gambar 8. Distribusi Ketidakpastian (U95) Parameter

Gambar 8 menampilkan distribusi nilai ketidakpastian bentangan (U95) yang dinyatakan dalam persentase untuk setiap parameter kinerja ventilator yang dievaluasi. Setiap boxplot merepresentasikan sebaran nilai U95 dari hasil pengukuran berulang pada tiap parameter. Garis horizontal di dalam box menunjukkan nilai median, sementara garis perpanjangan (whisker) menunjukkan rentang minimum dan maksimum nilai ketidakpastian yang diperoleh. Garis horizontal pada sumbu ordinat merepresentasikan batas toleransi teknis $\pm 15\%$. Parameter breath rate, FiO₂, PIP, dan tidal volume menunjukkan nilai U95 yang relatif rendah dengan sebaran sempit. Hal ini menunjukkan stabilitas pengukuran dan ketidakpastian yang masih berada dalam batas toleransi $\pm 15\%$. Parameter minute volume menunjukkan nilai U95 yang mendekati batas toleransi pada sebagian titik ukur, menunjukkan adanya keragaman pengukuran yang lebih signifikan dibanding parameter lain. Sebaliknya, parameter rasio I:E dan waktu inspirasi (Ti) memperlihatkan nilai U95 yang tinggi dengan persebaran yang lebih luas, di mana mayoritas nilainya bahkan melampaui batas toleransi $\pm 15\%$.



Gambar 9. Grafik Deviasi Parameter

Gambar 9 menunjukkan grafik deviasi parameter ventilator terhadap nilai setting pada berbagai titik ukur. Deviasi dinyatakan dalam persen (%) dan dihitung sebagai selisih antara nilai rata-rata hasil pengukuran dengan nilai setting dibagi nilai setting.

Parameter breath rate, FiO₂, PIP, dan tidal volume memperlihatkan nilai deviasi yang relatif kecil dan berada di sekitar nol persen pada seluruh titik ukur. Hal ini menunjukkan bahwa keluaran ventilator untuk parameter-parameter tersebut memiliki akurasi yang baik terhadap nilai setting meskipun menggunakan filter bacterial universal dengan penambahan port adapter. Parameter minute volume menunjukkan deviasi yang lebih bervariasi dibandingkan parameter lainnya, dengan sebagian titik ukur mendekati batas toleransi. Sebaliknya, parameter rasio I:E dan waktu inspirasi (Ti) menunjukkan deviasi yang lebih besar dan sebaran yang lebih lebar.

Hasil pengujian untuk seluruh kriteria kelaikan alat ditunjukkan pada tabel berikut.

Tabel 7. Pengujian Kelaikan Alat

Komponen	Bobot Kontribusi (%)	Bobot	Keterangan
Pemeriksaan Fisik/Fungsi Keselamatan Listrik Uji Kinerja	10	10	Laik
	40	40	Laik
	50	35,94	Laik

Telaah teknis dilaksanakan untuk mengevaluasi status kelayakan alat kesehatan yang telah dikalibrasi. Penetapan status laik pakai diberikan apabila skor atau hasil akhir mencapai atau melampaui nilai 70%, sedangkan status tidak laik pakai ditetapkan apabila skor akhir berada di bawah 70%. Berdasarkan data toleransi, kondisi fisik dan fungsi, kondisi kelistrikan dan pembacaan dari nilai U95 masing-masing parameter.

Oleh karena itu, dapat disimpulkan ventilator Ge Carescape R860 menggunakan filter universal dan penambahan port laik pakai berdasarkan metode HK 02.02/V/5771/2018 dengan skor 85,4 > 70%. Alat yang sudah di uji kalibrasi dengan hasil laik wajib dikalibrasi kembali satu tahun kemudian.

Pembahasan

Penggantian Filter Universal Terhadap Kinerja Ventilator GE Carescape R860

Penggantian filter bacterial universal pada ventilator GE Carescape R860 dapat menurunkan biaya operasional namun harus dikendalikan melalui pemasangan port yang tepat, kalibrasi berkala serta pemantauan performa ventilator. Perbedaan material dan metode manufaktur pada filter bakterial dapat memengaruhi karakteristik aliran dan resistansi sistem, sehingga penggantian filter original dengan filter universal berpotensi menimbulkan deviasi kinerja apabila tidak diikuti dengan proses kalibrasi yang

memadai (13).

Kalibrasi internal dilakukan oleh sistem otomatis ventilator untuk menyamakan pembacaan sensor terhadap aliran dan tekanan sehingga penggantian filter dengan spesifikasi berbeda dapat menyebabkan deviasi kecil pada pembacaan volume tidal, tekanan inspirasi, atau compliance sistem jika tidak dikompensasi oleh sistem internal.

Sementara itu, *external verification* dilakukan dengan alat ukur *gas flow analyzer* untuk mengecek kesesuaian antara output ventilator dan nilai aktual sehingga filter universal dengan port bisa menambah resistensi atau *dead space*, yang dapat memengaruhi pengukuran volume dan tekanan. Namun, ventilator tetap dinyatakan laik pakai jika dilakukan pengujian dengan benar.

Hasil evaluasi penggunaan filter universal dengan penambahan port setelah dilakukan kalibrasi internal dan eksternal sebagai berikut.

Tabel 8. Evaluasi Penggunaan Filter Universal dengan Penambahan Port

Parameter	Hasil	Keterangan
Kalibrasi internal	Lulus	Hasil <i>system check</i> baik
External verification	Lulus	Nilai ketidakpastian masih berada di bawah batas toleransi $\pm 15\%$
Alarm teknis	Normal	Tidak ditemukan <i>false alarm</i> signifikan
Kebocoran (<i>leak</i>)	250 - 700 ml	Masih berada di range toleransi
Efisiensi filtrasi	$\geq 99.97\%$	Berdasarkan spesifikasi filter HEPA-grade
Durasi pemakaian filter	3-5 hari	Setara filter original
Kompatibilitas port	Stabil	Port adaptor presisi dan aman digunakan

Hasil evaluasi menunjukkan bahwa penggunaan filter bacterial universal dengan penambahan port adapter masih memenuhi persyaratan kelayakan teknis dan metrologis ventilator sesuai batas toleransi yang ditetapkan. Pada bagian kalibrasi internal, ventilator dinyatakan lulus ditandai dengan *system check* yang menunjukkan seluruh sensor tekanan, sensor aliran, dan *exhalation valve* berada dalam batas normal. Hal ini menunjukkan bahwa penggantian filter dan port adapter tidak memengaruhi fungsi ventilator. Pada *external verification*, hasil pengukuran menggunakan *Gas Flow Analyzer* menunjukkan bahwa sebagian besar parameter ventilator berada dalam batas toleransi $\pm 15\%$. Beberapa parameter seperti I:E ratio dan waktu inspirasi (Ti) menunjukkan nilai ketidakpastian yang melebihi batas toleransi.

Penelitian ini bersifat validasi terhadap standar

teknis teknis (Keputusan Kementerian Kesehatan HK.02.02/V/5771/2018) bukan sebagai studi komparatif untuk membandingkan performa antara filter original dengan filter universal. Hasil penelitian menunjukkan bahwa filter universal dengan port adapter memenuhi kriteria kelayakan teknis (toleransi $\pm 15\%$, skor kelaikan $> 70\%$), namun tidak membuktikan kesetaraan performa dengan filter original. Validasi dilakukan untuk mengevaluasi apakah filter universal dengan penambahan port adapter tetap memenuhi persyaratan standar internasional yang ditetapkan untuk ventilator medis. Tujuan validasi ini adalah memastikan bahwa parameter kinerja ventilator (tidal volume, peak inspiratory pressure, PEEP, FiO₂, compliance, dan lainnya) masih berada dalam batas toleransi yang ditetapkan ($\pm 15\%$) setelah modifikasi filter. Hasil validasi positif menunjukkan bahwa modifikasi ini aman secara teknis dan dapat diterima sebagai alternatif solusi ekonomis.

Penelitian ini menggunakan batas toleransi teknis $\pm 15\%$ sebagai kriteria kelayakan alat. Batas toleransi klinis ditentukan oleh respons fisiologis pasien dan dapat bersifat lebih ketat, terutama pada pasien dengan gangguan paru berat. Pada pasien dengan ADRS atau asma toleransi klinis lebih ketat. Beberapa parameter menunjukkan ketidakpastian melebihi batas toleransi $\pm 15\%$ khususnya I:E ratio dan inspiratory time (Ti). Waktu inspirasi (Ti) dan rasio I:E yang melebihi toleransi, secara klinis dapat memengaruhi ventilasi alveolar dan sinkronisasi pasien-ventilator. Pada pasien dengan *Acute Respiratory Distress Syndrome* (ARDS), perubahan kecil pada Ti dapat berdampak signifikan terhadap distribusi volume tidal, tekanan alveolar, dan efektivitas ventilasi protektif, sementara pada pasien seperti asma, peningkatan resistansi sistem berpotensi memperburuk asinkroni pasien-ventilator (14,15). Perubahan rasio I:E dapat mengubah waktu inspirasi atau ekspirasi secara tidak proporsional. Jika fase inspirasi terlalu panjang, distribusi volume tidal bisa menjadi tidak merata dan meningkatkan tekanan alveolar. Sebaliknya, jika waktu ekspirasi terlalu pendek, udara tidak sempat keluar sempurna sehingga terjadi *air trapping*. Oleh karena itu, meskipun filter universal dengan port adapter dinyatakan layak secara teknis dan metrologis, penggunaannya pada kelompok pasien rentan memerlukan pemantauan klinis dan alarm yang lebih ketat untuk menjamin keselamatan pasien.

Sementara itu, alarm teknis ventilator berada dalam kondisi normal dan tidak ditemukan *false alarm* yang biasanya muncul bila terjadi kebocoran besar. Nilai kebocoran (leak) berada dalam rentang nilai 250–700 mL yang masih berada dalam toleransi. Secara fisik, pemasangan port adapter meningkatkan kompatibilitas antara filter universal dan konektor ventilator tanpa menimbulkan kebocoran signifikan. Penambahan port adapter berpotensi meningkatkan

resistansi sistem dan *dead space* yang dapat memengaruhi respons alarm ventilator dan sinkronisasi pasien dengan ventilator.

Penggunaan filter dengan efisiensi tinggi seperti HEPA terbukti efektif dalam mencegah partikel mikroorganisme kembali ke sistem ventilator sehingga penggunaan filter universal dapat diterima selama memenuhi kriteria pengujian (16). Perubahan pada konfigurasi alat memerlukan kalibrasi ulang ketidakpastian pengukuran sebagaimana diwajibkan dalam standar mutu laboratorium medis secara berkala (17). Berdasarkan hasil evaluasi tersebut, maka dapat disimpulkan bahwa penggantian filter bacterial terhadap kinerja ventilator GE Carescape R860 layak digunakan.

Perbandingan Biaya Bahan Habis Pakai (BHP)

Tarif merupakan penentuan nilai untuk suatu layanan kesehatan yang ditetapkan dengan mempertimbangkan besaran biaya yang dapat diterima rumah sakit sebagai kompensasi atas pemberian jasa medis kepada pasien (18,19). Dalam perhitungan biaya rumah sakit terdiri dari *fixed cost*, *semi variable cost* dan *variable cost*. Bahan habis pakai termasuk ke dalam *variable cost* atau biaya operasional tidak tetap. Biaya habis pakai alat medis merupakan biaya variabel dalam perhitungan biaya yang dikeluarkan untuk operasional rumah sakit. (20). Peralatan medis yang digunakan yaitu ventilator di unit ICU RS UNS dengan tipe GE CARESCAPE R860 no seri CBRX00626.

Ventilator dalam penggunaannya memerlukan bahan habis pakai (BHP) seperti filter yang harus diganti secara berkala terutama setiap kali digunakan oleh pasien berbeda atau setelah durasi tertentu selama perawatan. Salah satu komponen penting yaitu filter inspirasi original yang berfungsi menjaga kebersihan aliran gas dan mencegah kontaminasi silang serta ketidaksesuaian terhadap standar manufaktur yang dianjurkan.

Berikut perbandingan biaya habis pakai medis filter original dan filter universal dengan penambahan port.

Tabel 9. Perbandingan BHP Filter Original dengan Filter Universal

Aspek	Filter Original (OEM)	Filter Universal + Port Adaptor
Harga per unit	Rp 800.000-1.000.000	Rp 40.000 – 100.000
Umur pakai	5–7 hari	5-7 hari
Biaya port	-	Diluar harga produk
Kompatibilitas sistem	100% sesuai desain pabrik GE	Umumnya kompatibel, tapi tidak OEM
Frekuensi penggantian (30 hari)	$\pm 5-6$ kali	$\pm 5-6$ kali

Estimasi biaya bulanan/pasien	± Rp 1,5 – 2 juta	± Rp 250.000 – Rp 500.000
Biaya tenaga/instalasi	Sama	Sama

Filter original GE Carescape memiliki tarif per unit sekitar Rp 800.000-Rp1.000.000 dengan durabilitas penggunaan berkisar 5–7 hari, yang berarti dalam satu periode bulan membutuhkan penggantian sebanyak 5–6 kali. Hal ini menghasilkan biaya penggunaan filter sekitar Rp 4.800.000–Rp 6.000.000 per ventilator. Sebaliknya, filter universal dengan port adapter hanya memiliki harga Rp 40.000–100.000 per unit dengan durasi pemakaian yang sama, sehingga total biaya per bulan penggunaan filter hanya berkisar Rp 240.000–600.000. Berdasarkan perbandingan tersebut, implementasi filter universal dapat menghasilkan penghematan biaya lebih rendah dibandingkan dengan penggunaan filter original GE Carescape.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian, kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini:

1. Ventilator GE Carescape R860 menggunakan filter universal dan penambahan port dinyatakan Laik Pakai berdasarkan metode HK 02.02/V/5771/2018 untuk pengujian fisik dan fungsi, pengujian kinerja alat dan pemeriksaan keselamatan listrik.
2. Penggantian filter inspirasi dengan filter bakterial universal disertai penambahan port pada ventilator GE Carescape R860 terbukti layak digunakan berdasarkan hasil kalibrasi kinerja alat. Meskipun filter inspirasi original tetap menjadi pilihan utama dalam penanganan pasien dengan kondisi gawat darurat atau kritis, penggunaan filter universal dapat menjadi solusi alternatif yang efektif, khususnya dalam situasi keterbatasan biaya operasional atau pengadaan filter standar yang membutuhkan waktu lama dan biaya tinggi.
3. Penggunaan filter bakterial universal dengan penambahan port menunjukkan efisiensi biaya bahan habis pakai (BHP) yang lebih tinggi dibandingkan penggunaan filter original pada ventilator GE Carescape R860, khususnya jika dihitung dalam rentang waktu penggunaan per bulan. Hal ini disebabkan oleh harga satuan filter universal yang lebih rendah, meskipun frekuensi pengantiannya sedikit lebih tinggi.

Daftar Rujukan

1. Pramudhita A, Hermawan R. Perancangan Sistem Tata Udara Pada Ruang NICU Di Lantai 3 Rumah Sakit “X.” *Jurnal Teknologi Terapan* [Internet]. 2020;6(2):125–35. Available from: <https://doi.org/10.31884/jtt.v6i2.272>

2. Saran S, Gurjar M, Baronía A, Sivapurapu V, Ghosh PS, Raju GM, et al. Heating, ventilation and air conditioning (HVAC) in intensive care unit. Vol. 24, *Critical Care*. BioMed Central Ltd.; 2020.
3. Saran S, Gurjar M, Baronía A, Sivapurapu V, Ghosh PS, Raju GM, et al. Heating, ventilation and air conditioning (HVAC) in intensive care unit. Vol. 24, *Critical Care*. BioMed Central Ltd.; 2020.
4. Iyengar K, Bahl S, Raju Vaishya, Vaish A. Challenges and solutions in meeting up the urgent requirement of ventilators for COVID-19 patients. In: *Diabetes and Metabolic Syndrome: Clinical Research and Reviews*. Elsevier Ltd; 2020. p. 499–501.
5. Dewi FH, Purwoko, Gita Nur Siwi. Heat and Moisture Exchanging Filter pada Pasien COVID-19 yang Menjalani Sectio Caesarea. *Majalah Anestesia & Critical Care*. 2020 Jul 30;38(2):131–41.
6. Muzaki T, Susanto M, Purwiyanti S. Analisa Perbandingan Dua Metode Kalibrasi Mesin Anestesi Ventilator Melalui Pengujian Fungsional dan Kalibrasi. *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*. 2024;12(3):1687–95.
7. Tessarolo F, Nollo G, Benedetti L, Helfer F, Rovati L, Ferrari A, et al. Measuring breathability and bacterial filtration efficiency of face masks in the pandemic context: A round robin study with proficiency testing among non-accredited laboratories. *Measurement (Lond)*. 2022 Feb 15;189.
8. Kemenkes RI. Metode Kerja Pengujian dan Kalibrasi Alat Kesehatan - HK.02.02/V/5771/2018. 2018.
9. ISO/IEC Guide 98-3. GUM - Guide to the expression of Uncertainty in Measurement. 2008.
10. ISO 80601-2-12. Medical electrical equipment - Part 2-12: Particular requirements for basic safety and essential performance of critical care ventilators. 2020.
11. SNI IEC 62353. Medical electrical equipment - Recurrent test and test after repair of medical electrical equipment. 2014.
12. Sya'adah NL, Lutpiatina L, Dewi Dwiyantri R. Effectiveness of HEPA Filters in Reducing Airborne Bacteria in Public Health Laboratory Rooms in Bontang City, Indonesia. *Tropical Health and Medical Research*. 2025;7(2):77–86.
13. Stevina L, Tjampakasari CR. Bacterial Filtration Efficiency. *Journal of Clinical Microbiology and Infectious Diseases*. 2024 Jun 20;4(1):23–8.
14. Jiang G, Ma J, Xu H, Zhu Z, Xie Y, Ji S, et al. Application progress of machine learning in patient-ventilator asynchrony during mechanical ventilation: a systematic review. *Crit Care*. 2025 Dec 1;29(1).

15. Grotberg JC, Reynolds D, Kraft BD. Management of severe acute respiratory distress syndrome: a primer. Vol. 27, Critical Care. BioMed Central Ltd; 2023.
16. Sundaramurthy A, Vaithiyalingam C. Advancements in calibration techniques for ensuring accuracy and reliability of medical devices: A comprehensive report. In: Hybrid and Advanced Technologies. CRC Press; 2025. p. 413–22.
17. Maharani FS, Ridwanna S, Harianto H, Rinaldi SF. Penentuan Taksiran Ketidakpastian (Uncertainty) dengan Metode Top-down dan Korelasinya Terhadap Total Error (TE) pada Parameter Hematologi. *Journal of Indonesian Medical Laboratory and Science (JoIMedLabS)*. 2024 Feb 12;5(1):18–30.
18. aba MUN, Abdul Haris Kuspranoto. Design and Implementation of a Microbacteria Incubator with Fuzzy-PID Control System. *emitor* [Internet]. 2025 Jul. 22 [cited 2026 May 29];25(2):192–8. Available from: <https://journals2.ums.ac.id/emitor/article/view/11576>
19. Rahayu EP, Adrianto R, Subirman. Perhitungan Biaya Satuan (Unit Cost) Pada Instalasi Rawat Jalan Rumah Sakit Bersalin Ria Kencana Pkbi Kota Samarinda. *Jurnal Manajemen Pelayanan Kesehatan* [Internet]. 2022;25(1):36–44. Available from: <https://jurnal.ugm.ac.id/v3/JMPK/article/download/4930/1829/>
20. Hannon DM, Jones T, Conolly J, Judge C, Iqbal T, Shahzad A, et al. Development and assessment of the performance of a shared ventilatory system that uses clinically available components to individualize tidal volumes. *BMC Anesthesiol*. 2023 Dec 1;23(1).