BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Telaah Pustaka

1. End-Tidal O_2

   a. Pengertian end-tidal O_2

   EtO_2 didefinisikan sebagai persentase oksigen dalam gas ekspirasi pada akhir ekspirasi yang diperoleh melalui pemantauan gas pernapasan menggunakan monitor anestesi. Nilai EtO_2 mencerminkan jumlah oksigen yang tersisa di alveoli setelah proses pertukaran gas berlangsung. Parameter ini umumnya dinyatakan dalam bentuk persentase (%) atau tekanan parsial oksigen akhir ekspirasi ($PetO_2$) dan digunakan untuk mengevaluasi status oksigenasi alveolar pasien.

   Dalam praktik anestesi, EtO_2 merupakan salah satu parameter yang digunakan untuk menilai keberhasilan preoksigenasi. Pencapaian nilai EtO_2 ≥90% menunjukkan bahwa proses denitrogenasi paru telah berlangsung secara adekuat sehingga sebagian besar nitrogen dalam paru telah tergantikan oleh oksigen(Sakalauskaitė *et al*., 2019). Kondisi tersebut mencerminkan peningkatan cadangan oksigen alveolar yang optimal dan berperan dalam memperpanjang safe apnea time serta menurunkan risiko terjadinya hipoksemia selama induksi anestesi.

EtO_2 berbeda dengan fraksi oksigen inspirasi (FiO_2) karena FiO_2 menggambarkan konsentrasi oksigen yang diberikan kepada pasien saat inspirasi. Sebaliknya, EtO_2 menggambarkan konsentrasi oksigen yang tersisa pada akhir ekspirasi setelah terjadi pertukaran gas di alveoli. EtO_2 dianggap lebih mampu menggambarkan cadangan oksigen alveolar dibandingkan FiO_2 (Smith, 2021).

Pengukuran EtO_2 dilakukan menggunakan sensor oksigen yang terintegrasi pada ventilator atau monitor anestesi. Pemantauan ini memungkinkan tenaga anestesi memperoleh data secara real-time mengenai kondisi oksigenasi pasien. Informasi tersebut dapat digunakan untuk mengevaluasi efektivitas preoksigenasi serta membantu pemantauan fungsi respirasi selama tindakan anestesi (Nimmagadda *et al*., 2017a).

b. Mekanisme fisiologis EtO_2

Mekanisme fisiologis EtO_2 didasarkan pada prinsip pertukaran gas alveolo-kapiler di paru-paru, di mana oksigen dari udara inspirasi berdifusi melalui membran alveoli ke dalam kapiler darah. Proses ini diatur oleh hukum Fick, yang menyatakan bahwa laju difusi oksigen tergantung pada gradien konsentrasi, luas permukaan alveoli, dan koefisien difusi. Pada akhir ekspirasi, oksigen yang tidak terdifusi akan diekskresikan, sehingga EtO_2 menjadi *proxy* untuk oksigen alveolar (PAO_2). Namun, EtO_2 dipengaruhi oleh faktor seperti ventilasi alveolar, perfusi paru-paru,

dan rasio ventilasi-perfusi (V/Q). Gangguan seperti shunt atau hipoventilasi dapat menurunkan akurasi EtO_2 sebagai indikator oksigenasi arteri (PaO_2) (Hedenstierna & Edmark, 2020). Dalam konteks klinis, EtO_2 membantu mendeteksi hipoksemia dini, terutama selama anestesi atau ventilasi mekanik, dengan mekanisme yang melibatkan pengukuran kontinyu untuk memantau keseimbangan antara inspirasi dan ekspirasi oksigen (Hedenstierna & Edmark, 2022; Nimmagadda *et al*., 2017b)

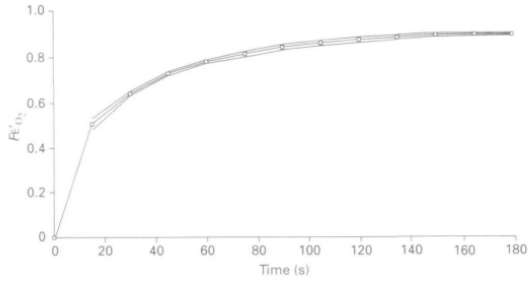
c. Hubungan EtO_2 dengan oksigen alveolar & FRC

EtO_2 memiliki hubungan langsung dengan oksigen alveolar (PAO_2), yang dihitung menggunakan rumus alveolar gas: $PAO_2 = FiO_2 \times (PB - PH_2O) - (PaCO_2 / RQ)$, di mana PB adalah tekanan barometrik, PH_2O adalah tekanan uap air, $PaCO_2$ adalah tekanan karbon dioksida arteri, dan RQ adalah rasio pertukaran respiratori. EtO_2 mendekati PAO_2 pada kondisi normal, namun dapat menyimpang jika ada V/Q *mismatch*. Kapasitas residu fungsional (FRC), yaitu volume udara yang tersisa di paru-paru setelah ekspirasi normal, mempengaruhi hubungan ini karena FRC yang rendah (misalnya pada obesitas atau penyakit paru) dapat mengurangi waktu kontak oksigen di alveoli, sehingga menurunkan EtO_2 meskipun PAO_2 tinggi. Penelitian menunjukkan bahwa peningkatan FRC melalui manuver rekrutmen alveoli dapat meningkatkan EtO_2 dengan memperbaiki difusi oksigen (Mato-Búa

et al., 2024). Dengan demikian, EtO_2 berfungsi sebagai indikator tidak langsung FRC dan oksigen alveolar, membantu dalam diagnosis gangguan pernapasan seperti atelektasis atau edema paru (Smith, 2021).

d. EtO_2 sebagai indikator keberhasilan preoksigenasi

Preoksigenasi adalah proses pemberian oksigen 100% sebelum induksi anestesi untuk meningkatkan cadangan oksigen dan mencegah hipoksemia. EtO_2 digunakan sebagai indikator keberhasilan preoksigenasi karena mencerminkan saturasi oksigen di alveoli dan FRC. Keberhasilan preoksigenasi ditandai oleh EtO_2 yang mencapai ≥90% dalam waktu 3-5 menit, menunjukkan bahwa nitrogen telah digantikan oleh oksigen di ruang udara paru-paru.



Gambar 1. Grafik Peningkatan End-Tidal O2 selama preoksigenasi
Sumber: (Berry & Myles,1994)

Pada pasien dengan FRC rendah, EtO_2 yang tidak mencapai ambang ini menandakan preoksigenasi yang tidak adekuat, meningkatkan risiko desaturasi selama intubasi. Studi terkini menekankan bahwa pemantauan EtO_2 selama preoksigenasi lebih akurat daripada saturasi oksigen nadi (SpO_2) saja, karena EtO_2

memberikan data tentang oksigen alveolar sebelum oksigenasi arteri (Hedenstierna & Edmark, 2015). Namun, pada kondisi seperti shunt signifikan, EtO_2 mungkin tidak sepenuhnya mencerminkan keberhasilan, sehingga perlu dikombinasikan dengan parameter lain (Nimmagadda *et al*., 2017a).

e. Faktor – Faktor yang Mempengaruhi Nilai ETO_2

Nilai End-Tidal Oksigen (EtO_2) dapat berubah karena berbagai faktor yang memengaruhi pertukaran oksigen di paru-paru, sehingga penting untuk memantau dan menyesuaikannya dalam praktik klinis.

1) Teknik preoksigenasi, seperti *deep breathing* yang melibatkan napas dalam maksimal diikuti ekspirasi penuh, dapat meningkatkan EtO_2 lebih cepat dibandingkan tidal volume normal, karena teknik ini memperbesar volume oksigen yang masuk ke alveoli dan menggantikan nitrogen secara efisien (Johnson & Lee, 2022).
2) Usia memainkan peran signifikan, di mana pasien lansia sering memiliki paru-paru kurang elastis dan kapasitas vital yang menurun, sehingga EtO_2 naik lebih lambat dan memerlukan waktu lebih lama untuk mencapai tingkat aman, seperti ≥90%, selama preoksigenasi (Smith *et al*., 2021).
3) Indeks massa tubuh (IMT) tinggi, seperti pada obesitas, menurunkan kapasitas residu fungsional paru-paru akibat

tekanan dari jaringan lemak, membuat EtO_2 lebih rendah meskipun oksigen diberikan penuh, sehingga teknik khusus seperti positive end-expiratory pressure (PEEP) diperlukan untuk membantu membuka alveoli (Williams *et al*., 2024).

4) Kepatuhan pasien terhadap instruksi juga penting; jika pasien tidak bernapas sesuai arahan, misalnya karena agitasi atau nyeri, EtO_2 tidak akan meningkat optimal, terutama pada pasien gelisah atau dengan gangguan kognitif, dan ini dapat dideteksi melalui pemantauan real-time (Thompson & Patel, 2025).
5) Kebocoran masker oksigen dapat mencampur udara ruangan dengan oksigen murni, menurunkan EtO_2 secara drastis, dan pemantauan EtO_2 membantu mendeteksinya untuk perbaikan cepat, seperti menyesuaikan ukuran masker atau memastikan segel yang ketat (Johnson & Lee, 2022).
6) Durasi preoksigenasi yang lebih panjang, biasanya 3-5 menit, memungkinkan EtO_2 mencapai 90% atau lebih dengan menggantikan lebih banyak nitrogen, tapi durasi singkat kurang dari 2 menit dapat membuatnya kurang efektif pada pasien berisiko tinggi, seperti mereka dengan penyakit paru (Garcia *et al*., 2023).

Secara keseluruhan, memahami faktor-faktor ini membantu dokter menyesuaikan preoksigenasi untuk mencegah masalah

oksigenasi dan memastikan keamanan pasien selama prosedur anestesi.

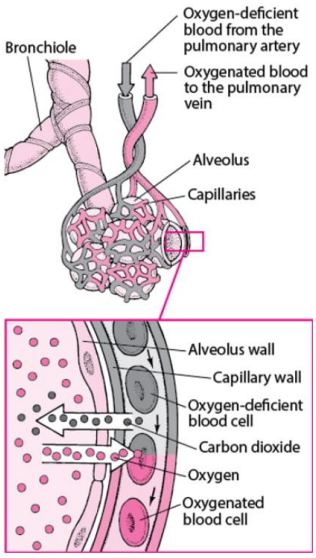
2. Sistem Respirasi dan Fisiologi Oksigenasi

   a. Anatomi dan Fisiologi Respirasi

      Sistem pernapasan adalah rangkaian organ yang bekerja sama untuk menukar gas antara udara di sekitar kita dan darah dalam tubuh, sehingga tubuh bisa mendapatkan oksigen dan membuang karbon dioksida. Anatomi sistem respirasi terbagi menjadi saluran napas atas dan bawah, di mana saluran atas mencakup hidung, rongga hidung, faring, dan laring yang berfungsi sebagai pintu masuk udara serta menyaring partikel asing (Saladin *et al*., 2021). Saluran napas bawah meliputi trakea, bronkus, bronkiolus, dan alveolus sebagai tempat utama pertukaran gas, dengan alveolus yang dikelilingi kapiler darah untuk memfasilitasi difusi oksigen dan karbon dioksida (Hall & Hall, 2021).

      Secara fisiologis, proses respirasi melibatkan ventilasi paru melalui kontraksi diafragma dan otot interkostal untuk menghirup udara, diikuti ekspirasi pasif yang mengeluarkan udara bekas (Sherwood, 2016). Pusat kontrol respirasi di medulla oblongata mengatur ritme napas berdasarkan kadar CO_2 dan pH darah, memastikan keseimbangan asam-basa dalam tubuh (Tortora & Derrickson, 2021).

b. Pertukaran Alveolar



Gambar 2. Mekanisme pertukaran oksigen dalam paru

Sumber: (Delmani, 2018)

Pertukaran gas alveolar terjadi di alveoli paru melalui difusi pasif oksigen dari alveoli ke darah kapiler dan karbon dioksida sebaliknya, tergantung pada gradien tekanan parsial antara udara alveolar dan darah (West, 2018). Proses ini efisien karena membran alveolokapiler tipis dan luas permukaan alveoli yang besar, memungkinkan oksigenasi darah arteri hingga 95-100% pada kondisi normal ((Saladin *et al*., 2021). Faktor seperti penyakit paru atau anestesi dapat mengganggu pertukaran ini, menyebabkan hipoksemia jika difusi terhambat (Sherwood, 2012).

c. Cadangan Oksigen Paru (*Fungsional Residual Capacity*)

Functional Residual Capacity (FRC) adalah volume udara yang tersisa di paru setelah ekspirasi normal, berfungsi sebagai

cadangan oksigen untuk mencegah desaturasi selama apnea singkat (Guyton & Hall, 2021). FRC berkurang selama anestesi umum karena relaksasi otot diafragma dan posisi pasien, meningkatkan risiko hipoksemia pada pasien dengan FRC rendah seperti obesitas (Saladin, 2021). Preoksigenasi penting untuk meningkatkan FRC melalui denitrogenasi, sehingga memperpanjang waktu apnea aman (Sherwood, 2022).

3. Konsep anestesi umum

   a. Definisi anestesi umum

      Anestesi umum adalah kondisi farmakologis reversibel yang diinduksi untuk menghilangkan kesadaran, rasa nyeri, dan reflek selama proseur bedah (Barash et.al., 2021). Kondisi ini melibatkan pemberian obat intravena atau inhalasi yang mempengaruhi system saraf pusat secara keseluruhan (Gropper *et al*., 2020) Anestesi umum berbeda dari anestesi regional karena mencakup seluruh tubuh dan memerlukan ventilasi mekanik selama operasi (J. F. . Butterworth *et al*., 2022).

   b. Tujuan anestesi umum

      Tujuan anestesi umum adalah menciptakan kondisi operasi yang aman dengan menghilangkan kesadaran dan nyeri, serta menjaga homeostasis fisiologi pasien (Stoelting & Miller, 2022). Prosedur ini juga bertujuan untuk mecegah ingatan traumatis dan memungkinkan relaksasi otot total (Barash, et.al., 2021). Selain itu,

anestesi umum mendukung control pernapasan dan sirkulasi selama intervensi invasive (Gropper *et al*., 2024)

c. Tahapan anestesi

Tahapan anestesi umum terdiri dari induksi, yaitu transisi cepat ke keadaan anestesi menggunakan obat seperti propofol; maintenance, yaitu pemeliharaan anestesi selama operasi dengan inhalasi atau infus kontinyu; dan emergence, yaitu pemulihan kesadaran pasca-operasi yang sering melibatkan antagonis opioid atau reversal neuromuscular (Hines & Marschall, 2022). Induksi biasanya berlangsung singkat dan memerlukan pemantauan ketat untuk mencegah apnea. Maintenance melibatkan penyesuaian dosis obat berdasarkan respons pasien, sedangkan emergence fokus pada pengelolaan nyeri dan mual.

d. Efek anestesi umum terhadap pernapasan dan pertukaran gas

Efek anestesi umum terhadap pernapasan dan pertukaran gas meliputi depresi pusat pernapasan, penurunan drive ventilasi, dan gangguan mekanika paru seperti penurunan compliance thoraks, yang mengurangi volume tidal dan frekuensi napas, meningkatkan risiko hipoventilasi, retensi CO_2, serta gangguan pertukaran gas alveolo-kapiler (Lumb & Horn, 2021). Depresi ini disebabkan oleh obat anestesi yang menghambat pusat respirasi di medulla oblongata, sehingga pasien bergantung pada ventilasi mekanisme

selama operasi. Gangguan pertukaran gas dapat diperburuk oleh posisi supine dan relaksan otot.

e. Risiko hipoksia pada fase induksi dan pra-intubasi

Risiko hipoksia pada fase induksi dan pra-intubasi sangat tinggi karena apnea selama induksi yang berlangsung 1-2 menit dan kesulitan intubasi, terutama pada pasien dengan kapasitas residu fungsional rendah, dengan insiden hipoksia mencapai 10-20% tanpa preoxygenation adekuat (Nimmagadda *et al*., 2017; meta-analisis Cochrane, 2020). Hipoksia ini dapat menyebabkan kerusakan otak permanen jika tidak ditangani cepat. Faktor risiko termasuk obesitas dan penyakit paru kronis, yang memerlukan strategi pencegahan seperti ventilasi manual.

4. Preoksigenasi

a. Pengertian preoksigenasi

Preoksigenasi Adalah proses mengganti nitrogen alveolar dengan oksigen murni untuk membangun Cadangan oksigen sebelum induksi anestesi (Gropper *et al*., 2024). Proses ini dilakukan denan pemberian FiO_2 100% menggunakan masker atau sirkuit anestesi (Barash, Cullen, Stoelting, *et al*., 2021). Preoksigenasi bertujuan untuk meminimalkan risiko desaturase selama periode apnea (John. Butterworth *et al*., 2022).

b. Peran preoksigenasi sebelum induksi anestesi

Preoksigenasi berperan dalam meningkatkan saturasi oksigen alveolar sebelum pemberian obat induksi, mempersiapkan pasien untuk transisi ke ventilasi mekanik (Benhamou, 2022). Hal ini mencegah hipoksemia selama intubasi dan memperpanjang *safe apnea time (Miller's Anesthesia, 9th Edition, 2021)*. Peran ini krusial pada pasien dengan risiko tinggi seperti obesitas (Barash, Cullen, & Stoelting, 2021)

c. Tujuan dan Manfaat Preoksigenasi

1) Meningkatkan Cadangan oksigen alveolar

Tujuan preoksigenasi adalah meningkatkan Cadangan oksigen alveolar melalui denitrogenasi, di mana nitrogen digantikan oksigen untuk menyimpan lebih banyak O_2 (John. Butterworth *et al*., 2022) Peningkatan ini memungkinkan pari bertahan selama *apnea* tanpa desaturase (Stoelting & Miller, 2022). Manfaatnya adalah pengurangan insiden hipoksemia intraoperative (Barash, et.al., 2021)

2) Mencegah hipoksemia selama periode *apnea*

Preoksigenasi mencegah hipoksemia dengan memastikan kadar oksigen alveolar tinggi selama *apnea* pra-intubasi (Miller *et al*., 2020). Manfaat ini penting pada pasien dengan FRC rendah, dimana hipoksemia terjadi cepat (Barash, Cullen, & Stoelting, 2021). Dengan preoksigenasi, waktu *apnea* aman

dapat diperpanjang hingga 8-10 menit pada kondisi optimal (John. Butterworth *et al*., 2022)

d. Teknik Preoksigenasi

1) Preoksigenasi dengan Tidal Volume Normal (napas normal)

Teknik tidal volume normal merupakan metode preoksigenasi yang melibatkan pasien bernapas secara spontan dengan volume tidal standar 6-8 mL/kg berat badan sambil menerima oksigen 100%, berbeda dari manuver kapasitas vital yang memerlukan inspirasi maksimal. Prinsip kerjanya didasarkan pada pertukaran gas alveolar bertahap, di mana oksigen menggantikan nitrogen di alveoli dan kapasitas residu fungsional melalui beberapa siklus pernapasan, mengikuti hukum Fick untuk meningkatkan saturasi oksigen alveolar dan EtO_2 sebagai indikatornya (Johnson & Lee, 2022). Prosedur ini dimulai dengan pemasangan masker oksigen ketat, diikuti pemantauan EtO_2 kontinyu hingga mencapai ≥90% dalam 3-5 menit, sering dikombinasikan dengan posisi kepala terangkat untuk mengoptimalkan FRC (Thompson & Patel, 2025).

Keunggulan teknik ini terletak pada kenyamanannya bagi pasien, terutama mereka dengan kapasitas vital rendah, karena menghindari kelelahan dari inspirasi maksimal dan efektif dalam membangun cadangan oksigen stabil, meminimalkan risiko hipoksemia selama intubasi (Garcia *et al*., 2023). Namun,

keterbatasannya muncul pada pasien dengan FRC rendah atau shunt intrapulmoner, di mana proses penggantian nitrogen lebih lambat, sehingga risiko desaturasi tetap ada jika prosedur terlalu singkat, dan kurang ideal untuk situasi darurat dibandingkan teknik lain (Smith *et al*., 2021; Williams *et al*., 2024). Secara keseluruhan, teknik ini praktis dan aman, dengan EtO_2 sebagai alat pemantau utama untuk menyesuaikan aplikasi klinis.

2) Preoksigenasi dengan *Deep Breathing*

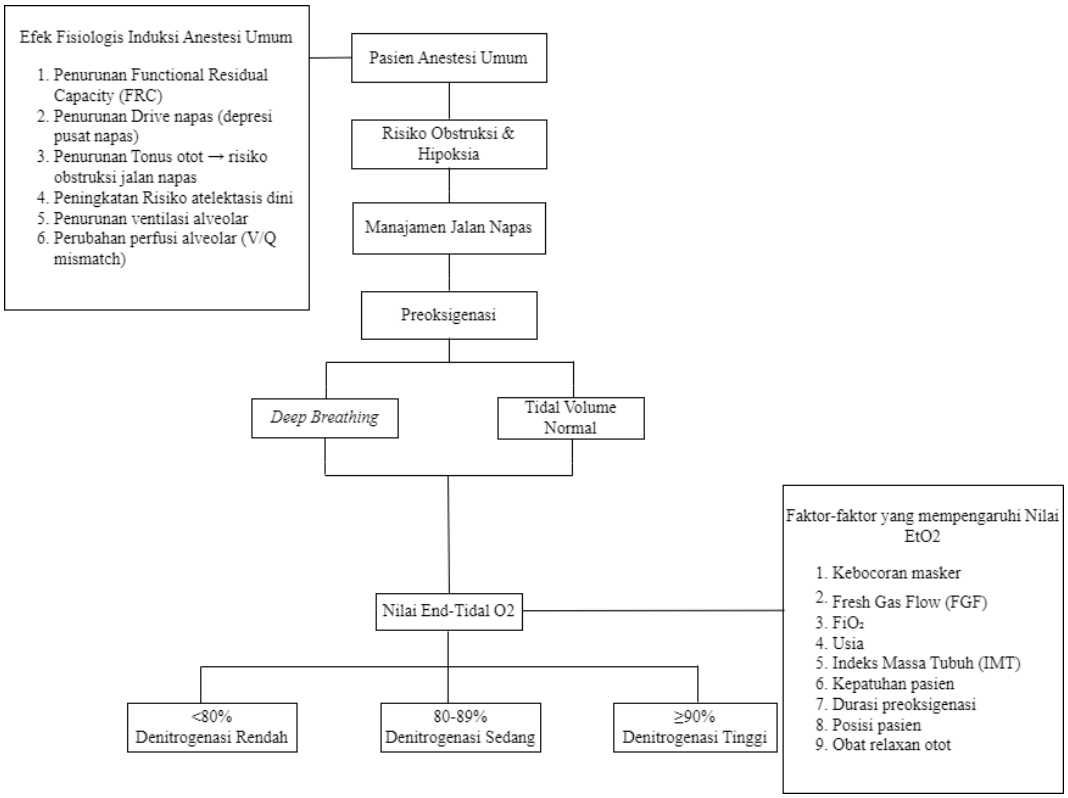
Teknik *deep breathing*, juga dikenal sebagai manuver kapasitas vital, melibatkan pasien melakukan inspirasi maksimal diikuti ekspirasi penuh sambil menerima oksigen 100% untuk menggantikan nitrogen di paru-paru secara cepat. Prinsip kerjanya berbasis pada pertukaran gas alveolar intensif, di mana volume tidal yang diperbesar memungkinkan difusi oksigen yang lebih efisien ke alveoli, meningkatkan saturasi oksigen alveolar dan EtO_2 sebagai indikator keberhasilan, sesuai hukum Fick (Johnson & Lee, 2022). Prosedur ini dilakukan dengan pasien bernapas dalam-dalam melalui masker oksigen ketat selama 1-2 menit, dipantau EtO_2 hingga mencapai ≥90%, sering digunakan pada pasien sehat untuk mempersiapkan intubasi (Thompson & Patel, 2025).

Keunggulan teknik ini adalah kecepatannya dalam membangun cadangan oksigen maksimal, mengurangi risiko

hipoksemia selama apnea, dan efektif pada pasien dengan FRC normal, memberikan waktu apnea yang lebih panjang dibandingkan teknik tidal volume normal (Garcia *et.al*., 2023). Namun, keterbatasannya terlihat pada pasien dengan kapasitas vital rendah, seperti lansia atau mereka dengan penyakit paru, di mana inspirasi maksimal dapat menyebabkan kelelahan, hiperventilasi, atau barotrauma, serta kurang cocok untuk situasi darurat karena memerlukan usaha aktif dari pasien (Smith *et al*., 2021; Williams *et al*., 2024). Secara keseluruhan, teknik *deep breathing* ideal untuk pasien yang mampu, dengan EtO_2 memandu pemantauan untuk memastikan efektivitas.

B. Kerangka Teori

Berdasarkan keseluruhan teori tersebut, maka kerangka teori penelitian ini dapat digambarkan sebagai berikut:



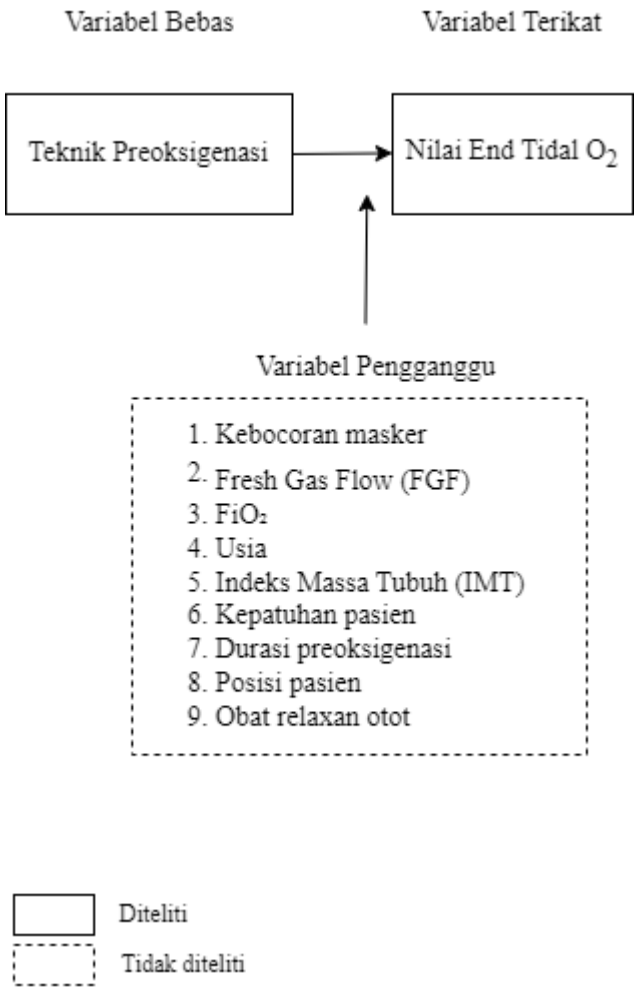
Gambar 3 Kerangka Teori

(Sumber: Stoelting & Miller, 2022; Butterworth *et al*., 2021; Barash *et al*., 2021)

C. Kerangka Konsep

Berdasarkan variabel penelitian yang telah ditetapkan, yaitu teknik preoksigenasi sebagai variabel bebas dan nilai End-Tidal Oksigen (EtO_2) sebagai variabel terikat, maka disusun kerangka konsep untuk menggambarkan hubungan operasional antara kedua variabel tersebut.

Dengan demikian, hubungan antara variabel bebas dan variabel terikat dalam penelitian ini dapat digambarkan dalam kerangka konsep berikut:



Gambar 4. Kerangka Konsep

D. Hipotesis dan Pertanyaan Penelitian

H_0: Tidak terdapat perbedaan nilai End-Tidal O2 antara Teknik preoksigenasi *deep breathing* dan Tidal Volume Normal

H_1: Teknik preoksigenasi *deep breathing* menghasilkan nilai End-Tidal O2 lebih tinggi dibandingkan teknik preoksigenasi tidal volume normal