

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Tinjauan Teori

1. Mean Arterial Pressure (MAP)

a. Pengertian

Mean arterial pressure adalah tekanan arteri rata-rata dalam satu siklus jantung yang terdiri dari fase sistolik dan diastolik. Fase sistolik adalah periode kontraksi ventrikel jantung saat darah dipompa menuju aorta dan seluruh sistem arteri. Sedangkan fase diastolik adalah periode relaksasi ventrikel pada saat jantung mengisi Kembali darah dari atrium. *MAP* berfungsi untuk mengalirkan darah ke seluruh jaringan tubuh agar tetap berfungsi sebagaimana mestinya (Demers, Daliah and Affiliations, 2023). Selain tekanan darah, frekuensi nadi dan saturasi oksigen merupakan parameter fisiologis yang berhubungan dengan nilai *MAP*. Frekuensi nadi mencerminkan aktivitas jantung dalam mempertahankan curah jantung (*cardiac output*), yang merupakan hasil perkalian antara *heart rate* dan *stroke volume*. Karena *cardiac output* merupakan salah satu determinan utama *MAP*, perubahan frekuensi nadi dapat memengaruhi nilai *MAP* melalui perubahan curah jantung (Demers, Daliah and Affiliations, 2023). Rumus umum untuk menentukan nilai *MAP* Adalah :

$$MAP = DP + 1/3(SP - DP) \text{ or } MAP = DP + 1/3(PP)$$

DP Adalah tekanan darah diastolik, SP Adalah tekanan sistolik, dan PP adalah nadi. Rumus ini dianggap lebih mudah digunakan dalam berbagai situasi klinis karena memungkinkan estimasi *MAP* secara cepat.

b. Determinan

MAP dipengaruhi oleh curah jantung (*Cardiac Output/CO*) dan resistensi vascular sistemik (*systemic vascular resistance/SVR*).

1) *Curah Jantung (Cardiac Output/CO)*

CO mencerminkan volume darah yang dipompa oleh ventrikel kiri setiap menit. *CO* dipengaruhi oleh frekuensi jantung (*heart rate*), volume sekuncup (*stroke volume*), *preload*, *afterload*, dan kontraktilitas otot jantung (*myocardium*). Peningkatan curah jantung melalui peningkatan *preload* maupun stimulasi *inotropic* akan meningkatkan perfusi organ, termasuk otak, dan berkontribusi dalam mempertahankan *MAP* yang adekuat. Sebaliknya, penurunan curah jantung akibat kondisi seperti hipovolemia, dehidrasi, disfungsi jantung, atau peningkatan *afterload* yang berlebihan dapat menyebabkan penurunan *MAP* dan gangguan perfusi organ (Demers, Daliah and Affiliations, 2023).

2) *Resistensi Vascular Sistemik (Systemic Vascular Resistance/SVR)*

SVR adalah tingkat hambatan yang ditimbulkan oleh seluruh sistem arteri terhadap aliran darah yang dipompa oleh jantung dan ditentukan oleh diameter arteriol, tonus otot polos vascular, kekakuan dinding pembuluh darah, panjang pembuluh darah, serta viskositas darah (Persichini, *et al.*, 2022) . Peningkatan SVR melalui vasokonstriksi perifer akan meningkatkan tekanan arteri, sehingga *MAP* meningkat. Sebaliknya, vasodilatasi menurunkan SVR dan dapat menurunkan *MAP* jika tidak diimbangi peningkatan *CO* (Demers, Daliah and Affiliations, 2023).

c. *MAP* Dalam Kraniotomi

MAP menjadi parameter hemodinamik penting karena secara langsung memengaruhi aliran darah ke organ vital melalui tekanan perfusi, termasuk *Cerebral Perfusion Pressure (CPP)* yang merupakan perbedaan antara *MAP* dan *Intracranial Pressure (ICP)* dalam satuan mmHg ($CPP = MAP - ICP$). Sebagai gradien tekanan yang mendorong pengiriman oksigen ke jaringan serebral, *CPP* normal secara umum berada pada kisaran 60–80 mmHg dalam keadaan fisiologis, dan nilai ini bergantung pada *MAP* yang cukup untuk mengatasi tekanan intrakranial agar perfusi serebral terpenuhi secara adekuat (Cardim, *et al.*, 2024)

Pada kraniotomi, gangguan autoregulasi serebral sering terjadi akibat efek anestesi dan perubahan kondisi intrakranial pasien, sehingga perfusi otak menjadi lebih bergantung pada *MAP* sistemik. Upaya mempertahankan *MAP* pada rentang yang aman yaitu 70-100 mmHg selama operasi bertujuan untuk menjaga *CPP* tetap mencukupi dan mencegah hipoperfusi atau hiperperfusi otak, yang masing-masing dapat menyebabkan iskemia ataupun edema dan perdarahan intrakranial jika tidak dikontrol dengan tepat. Pemilihan strategi anestesi yang stabil secara hemodinamik, kontrol ventilasi, manajemen cairan, serta penggunaan *vasopressor* atau *vasodilator* merupakan bagian integral dalam menjaga *MAP* dan *CPP* pada pasien yang menjalani kraniotomi untuk mendukung perfusi serebral yang adekuat tanpa memicu komplikasi neurologis tambahan (Bargnes, *et al.*, 2025).

2. Hiperventilasi

a. Pengertian

Hiperventilasi adalah kondisi fisiologis di mana ventilasi paru meningkat secara berlebih sehingga menghasilkan pengeluaran karbon dioksida lebih cepat daripada produksi metaboliknya, yang menyebabkan penurunan (*PaCO₂*) di bawah kisaran fisiologis normal (<35 mmHg) (Hennessey, *et al.*, 2023). Hiperventilasi mekanik melalui peningkatan ventilasi menit (*minute volume*) dengan menambah laju pernapasan atau tidal

volume dapat menurunkan kadar $PaCO_2$ sehingga menyebabkan vasokonstriksi serebral, penurunan CBF , dan ICP (Iavarone, *et al.*, 2024).

b. Mekanisme

Hiperventilasi dalam operasi kraniotomi diawali dengan peningkatan ventilasi menit melalui penambahan laju napas atau volume tidal pada ventilator anestesi. Peningkatan ini menyebabkan eliminasi CO_2 berlangsung lebih cepat daripada produksinya, sehingga $PaCO_2$ turun di bawah batas fisiologis normal. Penurunan $PaCO_2$ selanjutnya memicu terjadinya alkalosis respiratorik akibat berkurangnya konsentrasi ion hidrogen (H^+) dalam darah arteri dan cairan serebrospinal. Perubahan pH ini sangat signifikan bagi sistem serebrovaskular mengingat pH merupakan regulator utama tonus otot polos pada arteri serebral.

Alkalosis pada ruang perivaskular menyebabkan otot polos dinding arteri serebral mengalami kontraksi dan menimbulkan vasokonstriksi. Penyempitan diameter arteri meningkatkan resistensi vaskular serebral dan secara otomatis mengurangi volume darah intrakranial. Penurunan volume tersebut berkontribusi langsung terhadap penurunan ICP , sehingga hiperventilasi menghasilkan efek relaksasi otak yang sering dimanfaatkan selama prosedur kraniotomi, terutama pada pasien dengan edema, massa intrakranial, atau tekanan intrakranial yang

meningkat.

Vasokonstriksi serebral akibat hipokapnia tidak hanya mengurangi volume darah, tetapi juga menurunkan *CBF*. Besarnya penurunan *CBF* sangat bergantung pada derajat penurunan *PaCO₂*. Semakin rendah *PaCO₂*, semakin kuat vasokonstriksi dan semakin besar penurunan perfusi serebral. Meskipun penurunan *CBF* bermanfaat dalam menekan *ICP*, terdapat risiko berkurangnya suplai oksigen dan glukosa ke jaringan otak. Jika hiperventilasi dilakukan secara berlebihan atau berlangsung lama, perfusi yang menurun dapat mencapai tingkat iskemik dan membahayakan fungsi neurologis (Iavarone, *et al.*, 2024).

c. Indikasi

Indikasi paling mendasar dari hiperventilasi adalah penatalaksanaan peningkatan *ICP* akut. Penelitian terbaru tentang hemodinamik serebral menunjukkan bahwa hiperventilasi ringan dalam periode singkat mampu menurunkan *ICP* secara signifikan pada pasien dengan cedera otak akut tanpa secara langsung mengganggu autoregulasi serebral (Cardim, *et al.*, 2024). Efek penurunan *ICP* ini dimediasi melalui mekanisme vasokonstriksi arteri serebral yang mengurangi volume darah intrakranial, sehingga menjadikan strategi ini sebagai opsi ketika terjadi peningkatan *ICP* yang memerlukan intervensi segera, seperti pada edema serebral atau keberadaan massa intrakranial.

Hiperventilasi diindikasikan pada beberapa kondisi neurokritis dan intraoperatif yang memerlukan kontrol *ICP* secara cepat, meliputi :

1) Risiko Herniasi Otak

Hiperventilasi digunakan sebagai intervensi sementara untuk mengurangi volume darah serebral dan memperlambat progresivitas herniasi ketika terdapat tanda-tanda awal seperti anisokor, bradikardia, atau penurunan kesadaran progresif (Mount & Das, 2023).

2) Perdarahan *Subarachnoid (SAH)*

Hiperventilasi diberikan pada kasus *SAH* dengan peningkatan *ICP* atau gangguan autoregulasi, di mana kontrol ketat $PaCO_2$ diperlukan untuk mencegah eksaserbasi vasospasme dan menjaga tekanan perfusi serebral (Oppong, *et al.*, 2021).

3) Ketegangan Otak Intraoperatif

Hiperventilasi diindikasikan saat relaksasi otak tidak adekuat setelah optimasi anestesi awal, khususnya dalam kraniotomi supratentorial dengan edema peritumoral, untuk memperbaiki visualisasi dan akses bedah (Jiang, *et al.*, 2023).

4) Gangguan Autoregulasi Serebral

Guna mencapai stabilisasi sementara dinamika sirkulasi serebral, hiperventilasi digunakan saat respons serebrovaskular terhadap CO_2 (Cardim, *et al.*, 2024).

d. Kontraindikasi

Meskipun efektif menurunkan tekanan intrakranial (*ICP*) dengan cepat, hiperventilasi memiliki beberapa kontraindikasi penting dalam neuro-anestesi akibat potensi memperburuk perfusi serebral atau menimbulkan efek hemodinamik yang merugikan. Kontraindikasi utama meliputi:

1) Hiperfusi Serebral atau *CPP* Rendah

Hiperventilasi dikontraindikasikan pada pasien dengan *CPP* sekitar (<60 mmHg) atau ketidakstabilan hemodinamik, karena vasokonstriksi serebral yang ditimbulkannya dapat menurunkan *CBF* dan memperburuk iskemia jaringan otak (Mount & Das, 2023).

2) Gangguan Autoregulasi Serebral Berat

Kondisi seperti perdarahan *subarachnoid (SAH)* dengan vasospasme, respons serebrovaskular terhadap *CO₂* sering terganggu. Hiperventilasi dapat menyebabkan penurunan *CBF* ekstrem di area vasokonstriksi patologis, sehingga memperparah defisit neurologis (Oppong, *et al.*, 2021).

3) *ICP* Normal

Cedera otak akut tanpa peningkatan *ICP* atau ketika *ICP* telah stabil, hiperventilasi tidak memberikan manfaat apapun dan justru berisiko memperburuk *CPP* (Cardim, *et al.*, 2024).

4) Peningkatan Kebutuhan Metabolik Serebral

Hiperventilasi dikontraindikasikan secara relatif selama fase pembedahan dengan stimulasi metabolik tinggi, karena penurunan $PaCO_2$ dapat menciptakan ketidakseimbangan antara suplai dan kebutuhan oksigen serebral (Iavarone, *et al.*, 2024).

5) Risiko Alkalosis Respiratorik Berat

Pada pasien dengan riwayat epilepsi atau gangguan elektrolit, alkalosis dari hiperventilasi dapat menurunkan ambang kejang dan meningkatkan iritabilitas neuromuscular (Hennessey, *et al.*, 2023).

e. Dampak Fisiologis

Hiperventilasi menimbulkan dampak fisiologis yang signifikan terhadap hemodinamik sistemik dan serebral melalui mekanisme yang melibatkan perubahan $PaCO_2$, aktivitas saraf simpatis, dan respons autoregulasi pembuluh darah. Studi fisiologis pada subjek sehat oleh (Spiesshoefer, *et al.*, 2022) menunjukkan bahwa pola pernapasan yang menginduksi hipokapnia dapat memodulasi aktivitas saraf simpatis dan stabilitas kardiovaskular.

Pada fase hiperventilasi aktif, terjadi supresi sementara aktivitas saraf simpatik otot (*muscle sympathetic nerve activity/MSNA*), yang kemudian diikuti oleh peningkatan signifikan aktivitas simpatis ("*rebound*") selama fase apnea berikutnya.

Pola berulang ini meningkatkan fluktuasi tonus simpatis dan mengurangi variabilitas denyut jantung yang menyebabkan pergeseran regulasi otonom ke arah dominasi simpatis yang berpotensi mengganggu stabilitas tekanan darah dan denyut jantung. Respons sistemik terhadap hiperventilasi tidak hanya berupa perubahan gas darah, tetapi juga melibatkan adaptasi neurokardiovaskular kompleks yang dapat memengaruhi tekanan arteri rata-rata *MAP* dan perfusi organ.

Pada konteks klinis pasien dengan cedera neurologis, penelitian (Cardim, *et al.*, 2024) memberikan gambaran yang lebih spesifik. Intervensi *mild hyperventilation* (target $PaCO_2$ 30–35 mmHg) pada pasien cedera otak akut secara konsisten menurunkan tekanan intrakranial (*ICP*). Namun, respons hemodinamik sistemik berupa *MAP* dan denyut jantung bersifat variabel dan bergantung pada kapasitas kompensasi kardiovaskular individu. Pada pasien dengan kemampuan kardiovaskular yang baik, *MAP* cenderung stabil sehingga penurunan *ICP* langsung meningkatkan tekanan perfusi serebral (*CPP*). Sebaliknya, pada pasien dengan kompensasi yang terbatas, hiperventilasi dapat memicu penurunan *MAP* yang justru mengakibatkan penurunan *CPP* meskipun *ICP* turun.

f. Pengaruh Hiperventilasi Terhadap $PaCO_2/EtCO_2$

Hiperventilasi secara fisiologis memicu peningkatan eliminasi CO_2 dari arteri dan kemudian menurunkan $PaCO_2/EtCO_2$ (Arun Babu, *et al.*, 2024).

1) $PaCO_2$

Tekanan parsial karbon dioksida arteri ($PaCO_2$) adalah parameter gas darah yang menggambarkan jumlah CO_2 dalam arteri. $PaCO_2$ merupakan indikator utama ventilasi alveolar yang mencerminkan keseimbangan antara produksi CO_2 oleh metabolisme jaringan dan eliminasi CO_2 melalui paru (Wang, *et al.*, 2021).

2) $EtCO_2$

End-tidal carbon dioxide ($EtCO_2$) adalah tekanan parsial CO_2 yang diukur pada akhir fase ekspirasi dan dihasilkan dari capnografi, suatu metode non-invasif untuk pemantauan CO_2 . $EtCO_2$ dapat menjadi indikator untuk memperkirakan nilai $PaCO_2$ karena nilai $EtCO_2$ mencerminkan konsentrasi CO_2 alveolar yang umumnya berkorelasi dengan CO_2 darah arteri.

Peningkatan ventilasi alveolar menyebabkan pengurangan $PaCO_2/EtCO_2$ karena CO_2 dibuang lebih cepat dari masuknya ke dalam aliran darah. Penurunan ini dapat memicu perubahan pH darah yang menyebabkan alkalosis

respiratoris, suatu kondisi di mana pH darah meningkat akibat rendahnya kadar CO_2 . Penurunan $PaCO_2$ / $EtCO_2$ juga berhubungan dengan perubahan hemodinamik serebral (Wang, *et al.*, 2021).

g. Pengaruh $PaCO_2$ terhadap CBF

Penurunan $PaCO_2$ (hipokapnia) akibat hiperventilasi dapat mengurangi CBF karena vasokonstriksi arteri serebral. Sebaliknya, Peningkatan $PaCO_2$ (hiperkapnia) dapat meningkatkan CBF karena vasodilatasi arteri serebral. Mekanisme ini terjadi terutama melalui perubahan pH di sekitar endotel pembuluh yang memengaruhi otot polos arteri serebral dan respons endotelial terhadap CO_2 . Reaktivitas CO_2 ini merupakan komponen penting dari autoregulasi sirkulasi serebral yang memungkinkan otak menyesuaikan alirannya sesuai kebutuhan metabolik dan status ventilasi tubuh (Sheriff, *et al.*, 2023).

h. Hubungan CBF dengan ICP

CBF dan ICP saling berkaitan melalui tekanan volume dalam rongga kranial. Menurut prinsip Monro-Kellie, ruang tengkorak adalah ruang tertutup dengan tiga komponen utama otak, darah, dan cairan serebrospinal (CSF). Perubahan volume salah satu komponen ini secara langsung memengaruhi ICP apabila tidak disertai kompensasi oleh komponen lain. Ketika CBF meningkat atau terjadi vasodilatasi arteri serebral, volume darah serebral juga

meningkat yang berpotensi menaikkan *ICP*. Sebaliknya, vasokonstriksi akibat penurunan *PaCO₂* menurunkan *CBF* dan volume darah serebral (Sheriff, *et al.*, 2023).

3. Hubungan Hiperventilasi dengan *MAP*

Hiperventilasi merupakan teknik ventilasi yang sering digunakan pada operasi neurologis seperti kraniotomi untuk menurunkan *ICP* melalui penurunan *PaCO₂* yang menyebabkan vasokonstriksi serebral. Namun, perubahan *PaCO₂* tidak hanya memengaruhi sirkulasi serebral, tetapi juga hemodinamik sistemik, terutama *MAP*, yang secara langsung berpengaruh terhadap *CPP* (Mount and Affiliations, 2023; Cardim, *et al.*, 2024).

Hiperventilasi ringan dapat memengaruhi *MAP* melalui interaksi antara *vasokonstriksi vaskular*, peningkatan *SVR*, serta penurunan *venous return* dan *cardiac output*. Cardim, *et al.*, (2024) melaporkan bahwa hiperventilasi ringan jangka pendek pada pasien cedera otak akut dapat memengaruhi autoregulasi serebral tanpa menyebabkan perubahan drastis pada tekanan darah, meskipun fluktuasi *MAP* tetap termonitoring. Pengaturan ventilasi intraoperatif, khususnya pada pasien kritis dan bedah saraf, harus mempertimbangkan dampaknya terhadap stabilitas hemodinamik, termasuk *MAP* dan tekanan darah arteri (Hennessey, *et al.*, 2023)

Hipokapnia akibat hiperventilasi berpotensi menurunkan *CPP* apabila penurunan *ICP* tidak diimbangi oleh *MAP* yang adekuat,

sekaligus memengaruhi oksigenasi serebral dan parameter hemodinamik secara bersamaan (Iavarone, *et al.*, 2024). Hiperventilasi dapat memengaruhi oksigenasi diotak, yang secara tidak langsung berkaitan dengan perubahan tekanan darah dan *MAP* selama anestesi.

Penelitian Groene, *et al.*, (2025) menegaskan bahwa perubahan ventilasi, baik hiperventilasi maupun hipoventilasi ringan, terbukti memengaruhi suplai oksigen serebral dan regulasi aliran darah otak melalui *reaktivitas vaskular* serta faktor sistemik seperti tekanan darah dan posisi tubuh. Pada kondisi hipoksia dan hiperventilasi juga menunjukkan adanya perubahan hemodinamik yang signifikan, termasuk tekanan darah arteri dan perfusi jaringan (Siry, *et al.*, 2022).

4. Anestesi

Anestesi merupakan suatu keadaan yang diinduksi secara farmakologis untuk menghasilkan hilangnya kesadaran, amnesia, analgesia, imobilitas, serta kontrol terhadap respons otonom tubuh selama tindakan pembedahan. Anestesi modern didefinisikan sebagai kombinasi efek klinis yang memungkinkan pasien tidak merasakan nyeri, tidak mengingat prosedur, serta tetap stabil secara fisiologis selama operasi. Definisi ini mencakup berbagai teknik, mulai dari anestesi umum, regional, hingga intravena, yang pemilihannya didasarkan pada kebutuhan pembedahan dan kondisi pasien. konsep anestesi bertujuan menciptakan lingkungan pembedahan yang aman

dan terkendali dengan menekan respons stres fisiologis serta mempertahankan homeostasis selama prosedur berlangsung.

Pada tindakan kraniotomi, tujuan anestesi memiliki karakteristik yang lebih spesifik dibandingkan pembedahan umum karena berkaitan langsung dengan proteksi otak dan stabilitas hemodinamik. Tujuan utama meliputi menjaga perfusi serebral, mempertahankan tekanan intrakranial (*ICP*) yang rendah, menciptakan *brain relaxation* yang optimal, serta mencegah cedera otak sekunder akibat perubahan tekanan darah dan ventilasi. Kontrol ketat terhadap *MAP*, *CO₂*, dan status volume intravaskuler sangat penting untuk menjaga keseimbangan antara *CBF* dan *CPP* (Rozi, *et al.*, 2024).

a. Teknik Anestesi

Menurut Jiang, *et al.*, (2023) terdapat 3 macam teknik anestesi umum, yaitu :

1) Anestesi Intravena Total (*TIVA*)

Anestesi umum dengan teknik *total intravenous anesthesia* merupakan metode induksi dan pemeliharaan anestesi yang menggunakan obat-obatan intravena secara eksklusif tanpa melibatkan agen inhalasi. Teknik ini menghasilkan keadaan tidak sadar, analgesia, dan imobilitas melalui infus kontinu obat intravena seperti *Propofol* dan *Opioid* sehingga kedalaman anestesi dapat dikontrol secara

stabil selama prosedur kraniotomi. Penggunaan *TIVA* pada pembedahan otak juga bertujuan menjaga Hemodinamik yang lebih stabil dan mengoptimalkan relaksasi otak karena tidak memengaruhi autoregulasi serebral sedinamis agen inhalasi. Teknik ini banyak dipilih pada prosedur bedah saraf karena menghasilkan lingkungan pembedahan yang lebih tenang, memperbaiki kualitas pemulihan, dan mengurangi efek vasodilatasi serebral yang berlebihan.

2) Anestesi Inhalasi

Anestesi umum dengan teknik inhalasi adalah metode pemberian anestesi menggunakan agen volatil seperti *Desflurane* atau *Sevoflurane* melalui jalur pernapasan untuk menghasilkan keadaan *unconsciousness*, analgesia, dan relaksasi otot. Pada pasien kraniotomi, teknik ini bekerja melalui absorpsi alveolar yang cepat sehingga konsentrasi anestesi dapat diatur dengan presisi untuk mempertahankan kedalaman anestesi selama operasi berlangsung. Agen inhalasi memiliki efek vasodilatasi serebral yang dapat meningkatkan aliran darah otak, sehingga penggunaannya harus dikontrol dengan hati-hati pada operasi intrakranial untuk menjaga tekanan intrakranial tetap stabil.

3) Anestesi Imbang

Anestesi seimbang adalah teknik anestesi umum yang mengombinasikan beberapa kelas obat seperti agen intravena, opioid, relaksan otot, dan agen inhalasi dosis rendah untuk mencapai hipnosis, analgesia, dan imobilitas secara simultan dengan efek samping minimal. Pendekatan ini digunakan untuk memanfaatkan kelebihan dari masing-masing obat sambil menurunkan dosis tunggal yang berpotensi menimbulkan instabilitas hemodinamik. Pada prosedur kraniotomi, anestesi seimbang bertujuan mempertahankan tekanan darah, tekanan intrakranial, serta perfusi serebral yang optimal dengan tetap menyediakan kualitas anestesi yang baik. Teknik ini juga mendukung relaksasi otak yang adekuat karena kombinasi obat memungkinkan kontrol kedalaman anestesi secara lebih terukur.

b. Ventilator Anestesi

Ventilator anestesi merupakan perangkat utama yang digunakan untuk memberikan dukungan ventilasi mekanik selama anestesi umum, terutama ketika pasien tidak mampu mempertahankan ventilasi spontan. Dalam praktik anestesi, ventilator anestesi berfungsi untuk menjaga oksigenasi dan ventilasi yang adekuat sepanjang prosedur, sekaligus memungkinkan pengaturan yang presisi terhadap volume tidal, laju napas, tekanan jalan napas, dan konsentrasi gas inhalasi.

Selama anestesi umum, ventilator memberikan pernapasan buatan dengan mekanisme yang dapat disesuaikan berdasarkan kondisi fisiologis pasien, termasuk *compliance* paru, resistensi saluran napas, dan status hemodinamik. Penggunaan ventilator sangat penting terutama pada pasien kritis atau bedah besar, karena anestesi umum menekan drive napas dan mengurangi kemampuan pasien mempertahankan pertukaran gas yang memadai. Ventilator anestesi membantu mempertahankan *partial pressure of oxygen* (PaO_2) dan *Partial Pressure of Carbon Dioxide* ($PaCO_2$) dalam rentang normal (35-45 mmHg), sehingga mencegah hipoksemia dan hiperkapnia yang dapat memperburuk kondisi sistemik maupun neurologis.

Manajemen ventilator intraoperatif menekankan strategi ventilasi protektif untuk mencegah cedera paru akibat ventilasi mekanik. Pendekatan ini meliputi penggunaan tidal volume rendah, tekanan rendah, dan *Positive End-Expiratory Pressure* (PEEP) moderat guna mencegah *overdistension alveolar* serta mengurangi risiko *ventilator-induced lung injury*. Pengaturan ventilasi ini terbukti dapat mengurangi komplikasi pulmonal pascaoperatif tanpa mengorbankan oksigenasi maupun stabilitas hemodinamik selama operasi.

Ventilator anestesi memungkinkan penggunaan berbagai mode ventilasi seperti *volume-controlled ventilation* (VCV) dan

pressure-controlled ventilation (PCV). Pada bedah besar atau pasien dengan gangguan paru, mode *PCV* sering dipilih karena dapat memberikan tekanan jalan napas yang lebih terkontrol dan meningkatkan distribusi ventilasi. Sementara itu, mode *VCV* memungkinkan konsistensi volume tidal yang penting untuk stabilitas pertukaran gas.

Teknik ventilasi selama anestesi umum berperan penting dalam mengatur kadar gas darah terutama $PaCO_2$, yang memiliki pengaruh langsung terhadap fisiologi serebral dan stabilitas hemodinamik. Pengaturan ventilasi intraoperatif ditentukan oleh kondisi pasien, jenis pembedahan, dan target fisiologis yang ingin dicapai. Dalam praktik anestesi, terdapat tiga pengaturan utama yaitu hiperventilasi, normoventilasi, dan hipoventilasi, yang semuanya menggunakan prinsip dasar kontrol laju napas dan volume tidal melalui ventilator anestesi (Hennessey, *et al.*, 2023).

5. Kraniotomi

a. Pengertian

Kraniotomi adalah tindakan bedah saraf di mana sebagian tulang tengkorak (*bone flap*) diangkat sementara untuk menyediakan akses langsung ke rongga intrakranial sehingga dokter bedah dapat melakukan tindakan diagnostik atau terapeutik. Pada praktik elektif maupun emergensi, *bone flap* yang dilepas biasanya dikembalikan ke posisi awal setelah prosedur selesai

(Munakomi and De Jesus, 2025).

b. Indikasi

Kraniotomi merupakan prosedur bedah saraf yang dilakukan dengan membuka sebagian tulang tengkorak untuk memperoleh akses langsung ke struktur intrakranial. Tindakan ini memiliki rentang indikasi yang luas, tergantung pada kondisi patologis yang memengaruhi otak, *meninges*, maupun pembuluh darah intrakranial.

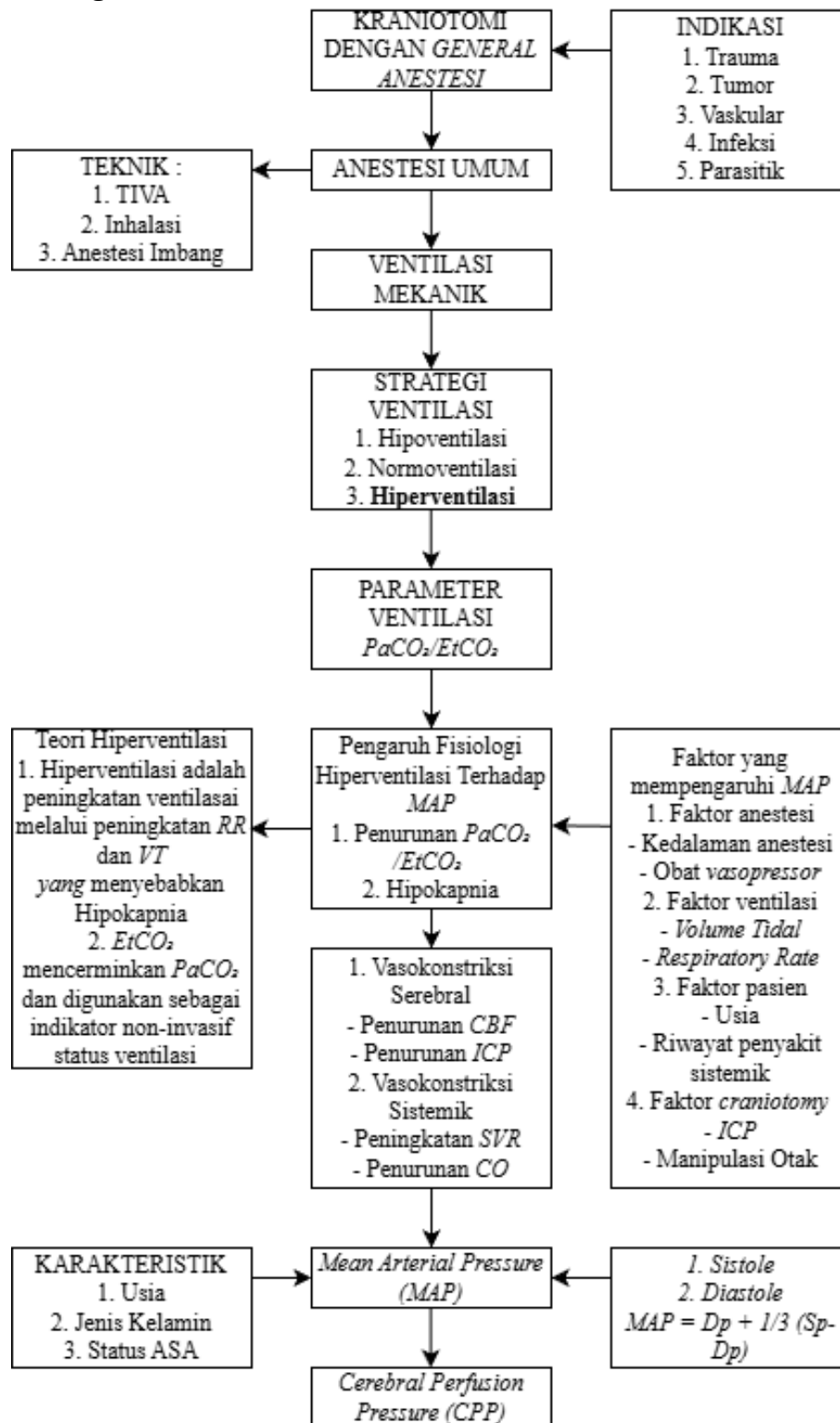
Menurut Munakomi dan De Jesus (2023), ada beberapa indikasi dilakukannya kraniotomi, meliputi :

- 1) Trauma: Hematoma ekstradural akut (*epidural*), hematoma subdural akut, kontusi otak, fraktur tengkorak depresi, benda asing di intracranial, dan perbaikan kebocoran cairan serebrospinal.
- 2) Tumor: Meningioma, glioma, epidermoide, ependymoma, oligodendroglioma, tumor metastasis, tumor orbital, tumor di sudut serebelopontin, dan lesi sellar/parasellar.
- 3) Vaskular: *ICH*, *middle cerebri artery (MCA)*, *cortical venous thrombosis (CVT)* dengan infark hemoragik, aneurisma serebral, malformasi vascular, dan dekompresi mikrovaskular.
- 4) Infeksi: Abses otak dan empiema subdural.
- 5) Parasitik: Kista hidatid dan *Neurocysticercosis*
- 6) Lain-lain: Epilepsi, bedah fungsional seperti stimulasi otak dalam, dan prosedur nyeri, misalnya *thalamotomy*.

c. Risiko Perubahan Hemodinamik

Prosedur kraniotomi merupakan tindakan bedah yang secara fisiologis memiliki potensi tinggi menimbulkan perubahan hemodinamik. Perubahan ini timbul akibat kombinasi faktor anestesi umum, stimulus pembedahan, dan respons kompensasi dari sistem saraf otonom. Fase-fase kritis seperti induksi anestesi, pemasangan skull-pin, insisi kulit, pembukaan dura, dan emergensi secara konsisten memicu fluktuasi tekanan darah dan denyut jantung akibat stimulus nyeri yang kuat atau perubahan fisiologis mendadak yang mempengaruhi *MAP*. Kontrol hemodinamik yang ketat menjadi tujuan utama dalam manajemen anestesi untuk mencegah peningkatan *ICP*, penurunan *CPP*, maupun risiko iskemia serebral (Osman, *et al.*, 2023).

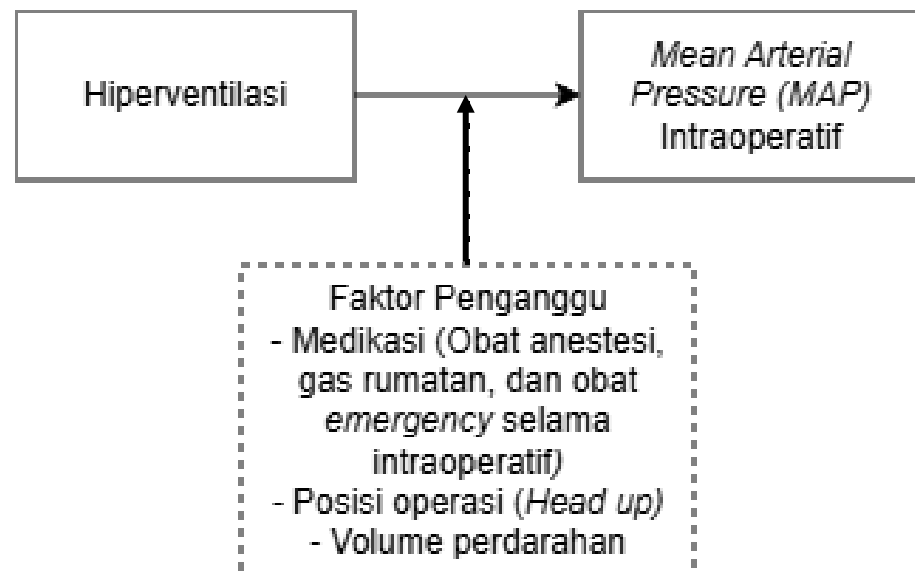
B. Kerangka Teori



Gambar 1. Kerangka Teori

Sumber : Iavarone , *et al.*, (2024); Arun Babu, *et al.*, (2024).

C. Kerangka Konsep



Gambar 2. Kerangka Konsep

D. Hipotesis

Terdapat pengaruh hiperventilasi terhadap *mean arterial pressure (MAP)* intraoperatif pada pasien kraniotomi.