

## Manajemen Asam Basa pada *Cardiopulmonary Bypass*

### *Acid-base Management in Cardiopulmonary Bypass*

Sonny Lesmana Surya<sup>✉</sup>, Yudi Hadinata

SM Anestesi Bedah Kardiovaskular, RS Jantung dan Pembuluh Darah Harapan Kita, Jakarta, Indonesia

<sup>✉</sup>Korespondensi: [Sonic.kurosaki@gmail.com](mailto:Sonic.kurosaki@gmail.com)

#### **ABSTRACT**

*Cardiopulmonary bypass (CPB) is a form of extracorporeal circulation which support circulatory and respiratory function, most commonly used during heart or great vessels surgery. During CPB, hypothermic condition is being maintained to minimize oxygen demands and body metabolic rate. Hypothermia can affect the acid-base balance, thus, its management during CPB is needed. There are two methods of acid-base management during CPB:  $\alpha$ -stat and pH-stat. In  $\alpha$ -stat method, the acid-base management is performed by maintaining  $pH_a$  7.4 and  $PaCO_2$  40 mmHg at  $37^\circ C$  without additional exogenous  $CO_2$  to keep constant total  $CO_2$  value. However, in pH-stat method, exogenous  $CO_2$  is given to maintain  $PaCO_2$  40 mmHg and  $pH_a$  7.4 when corrected for the patients' body temperature in vivo. It is still controversial when to apply respective method during CPB. In microcirculation level,  $\alpha$ -stat method was proven to give benefit for brain and lower the incidence of postoperative cerebral dysfunction. Meanwhile, pH-stat method was reported to increase the risk of cerebral emboli, therefore, it was not recommended to be used for patients with high risk of cerebral blood flow impairment. However, it was reported to be beneficial for pediatric heart surgery. Patients' age might determine the time of application of respective method. One of primary indication of pH-stat is cooling phase during deep hypothermic circulatory arrest (DHCA) and  $\alpha$ -stat during selective cerebral perfusion (SCP) and rewarming.*

**Keywords:**  *$\alpha$ -stat; acid-base management; cardiopulmonary bypass; hypothermia; pH-stat*

#### **ABSTRAK**

*Cardiopulmonary bypass (CPB) merupakan alat penunjang fungsi sirkulasi dan pernapasan pasien yang biasa digunakan ketika menjalani pembedahan jantung atau pembuluh darah besar. Selama prosedur CPB, kondisi hipotermia dipertahankan untuk menurunkan kebutuhan oksigen dan laju metabolisme. Kondisi hipotermia akan mempengaruhi keseimbangan asam-basa pada tubuh. Manajemen asam-basa selama prosedur CPB dicapai dengan menggunakan metode  $\alpha$ -stat atau pH-stat. Pada metode  $\alpha$ -stat, manajemen asam-basa dilakukan dengan menjaga  $pH_a$  7.4 dan  $PaCO_2$  40 mmHg pada*

suhu 37°C tanpa penambahan CO<sub>2</sub> oksigen untuk menjaga total CO<sub>2</sub> tetap konstan. Sedangkan, pada metode pH-stat, diberikan CO<sub>2</sub> oksigen untuk menjaga PaCO<sub>2</sub> 40 mmHg dan pH<sub>a</sub> 7.4 secara *in vivo*. Masih banyak perdebatan terkait waktu penerapan masing-masing metode. Pada level mikrosirkulasi, manajemen  $\alpha$ -stat terbukti memberikan keuntungan pada otak dan mengurangi insidensi *postoperative cerebral dysfunction*. Sedangkan, metode pH-stat dilaporkan meningkatkan risiko emboli otak, sehingga tidak disarankan untuk pasien yang memiliki risiko tinggi gangguan aliran darah otak. Namun, terdapat pula laporan yang menyatakan pH-stat bermanfaat pada operasi bedah jantung anak. Berdasarkan hal itu, usia pasien dapat menentukan waktu penggunaan metode  $\alpha$ -stat dan pH-stat. Satu indikasi primer penggunaan pH-stat adalah selama proses pendinginan saat *deep hypothermic circulatory arrest* (DHCA), sedangkan metode  $\alpha$ -stat lebih baik digunakan selama *selective cerebral perfusion* (SCP) dan *rewarming*.

**Kata Kunci:**  $\alpha$ -stat; manajemen asam basa; *cardiopulmonary bypass*; hipotermia; pH-stat

## PENDAHULUAN

*Cardiopulmonary bypass* (CPB) merupakan salah satu bentuk sirkulasi ekstrakorporeal, dimana digunakan mesin yang menggantikan fungsi sirkulasi dan pernapasan bersamaan dengan manajemen suhu untuk memfasilitasi prosedur bedah jantung dan pembuluh darah yang besar.<sup>1</sup> Saat menjalani prosedur CPB, kondisi hipotermia sengaja dipertahankan dengan tujuan menurunkan kebutuhan oksigen dan laju metabolisme. Penurunan kebutuhan oksigen ini akan menghambat pembentukan radikal bebas dan mengurangi apoptosis sel. Selain itu, hipotermia dapat membantu menjaga cadangan fosfat dan mengurangi pelepasan neurotransmitter, yang penting untuk proteksi sistem saraf pusat.<sup>2</sup> Kondisi hipotermia dapat mengganggu keseimbangan asam-basa yang berpengaruh pada aliran darah dalam pembuluh darah serebral. Gangguan aliran darah ini dapat menyebabkan gangguan kognitif pascabedah atau *postoperative cognitive dysfunction* (POCD). Manajemen asam

basa dengan metode yang tepat selama prosedur CPB penting dilakukan untuk mencegah terjadinya komplikasi, terutama apabila prosedur CPB dilakukan dalam durasi yang tidak singkat.<sup>3</sup> Tinjauan pustaka ini bertujuan untuk memberikan informasi tentang waktu dan cara penggunaan metode manajemen asam basa selama CPB.

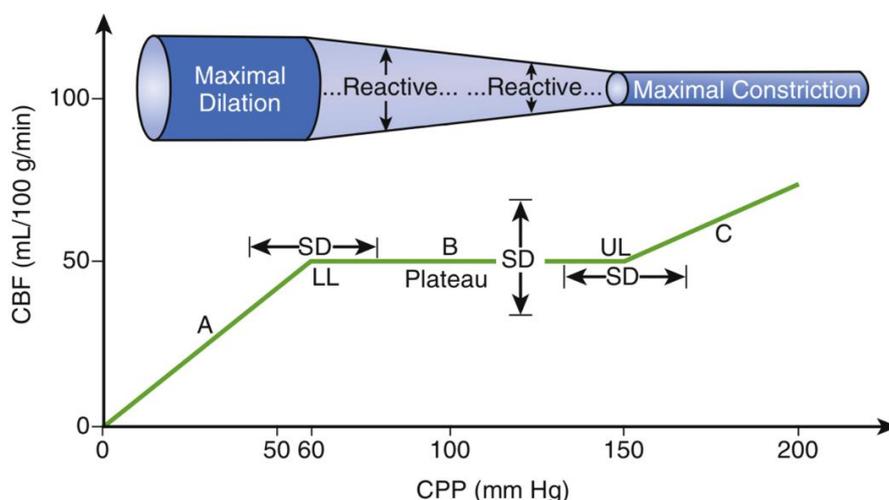
## BAGIAN UTAMA

### Autoregulasi Serebral

Autoregulasi serebral menunjukkan hubungan antara *cerebral blood flow* (CBF) dengan *cerebral perfusion pressure* (CPP). CPP merupakan perbedaan antara *mean arterial pressure* (MAP) dan *intracranial pressure* (ICP) atau *central venous pressure* (CVP). Autoregulasi serebral berperan dalam bagaimana CPP mempengaruhi CBF, yang akan menjaga CBF tetap stabil selama terjadi fluktuasi CPP akibat vasokonstriksi dan vasodilatasi serebral sebagai respons terhadap peningkatan dan penurunan CPP. Kurva autoregulasi serebral terdiri dari bagian plateu, batas bawah, dan batas atas, seperti yang

ditunjukkan pada Gambar 1. Batas bawah menunjukkan level CPP di bawah dimana CBF mengalami penurunan secara linear seiring dengan peningkatan CPP. Sebaliknya, batas atas menunjukkan level CPP di atas dimana CBF mengalami peningkatan secara

linear seiring dengan peningkatan CPP. Plateau menunjukkan rentang CPP antara batas bawah dan atas, dimana CBF bertahan stabil (sekitar 50 ml/100 g/menit). CBF akan tetap stabil bila CPP berada di antara rentang batas bawah dan atas.<sup>4</sup>



Gambar 1. Kurva autoregulasi serebral<sup>4</sup>

### Kondisi Hipotermia

Kesulitan yang ditemui dalam strategi hipotermia pada manusia disebabkan oleh fakta bahwa manusia pada dasarnya bersifat homeotermi, yang memiliki sistem homeostatis yang sangat efektif dalam mempertahankan dan menjaga suhu tubuh relatif konstan pada suhu 37°C walaupun terdapat perubahan suhu lingkungan. Regulasi suhu tubuh manusia ini melibatkan berbagai mekanisme, mulai dari kulit sebagai termoreseptor, pembuluh darah, sistem endokrin, dan tentu sistem saraf pusat yang mengatur pusat suhu tubuh. Kondisi hipotermia pada prosedur CPB bertujuan untuk menjaga organ tubuh. Perubahan suhu dapat menyebabkan perubahan reaksi dari seluruh proses biokimia, terutama reaksi enzimatik. Laju reaksi terhadap perubahan suhu ini digambarkan dengan konsep  $Q_{10}$ , yaitu adanya penambahan atau pengurangan

laju reaksi atau proses metabolik setiap perubahan suhu 10°C. Pada jaringan spesies mamalia, suhu tubuh 25-28°C akan mengganggu homeostasis sel. Proses biofisika, seperti difusi air dan osmosis juga dipengaruhi oleh suhu, dengan perubahan linear 3% per 10°C.<sup>2</sup>

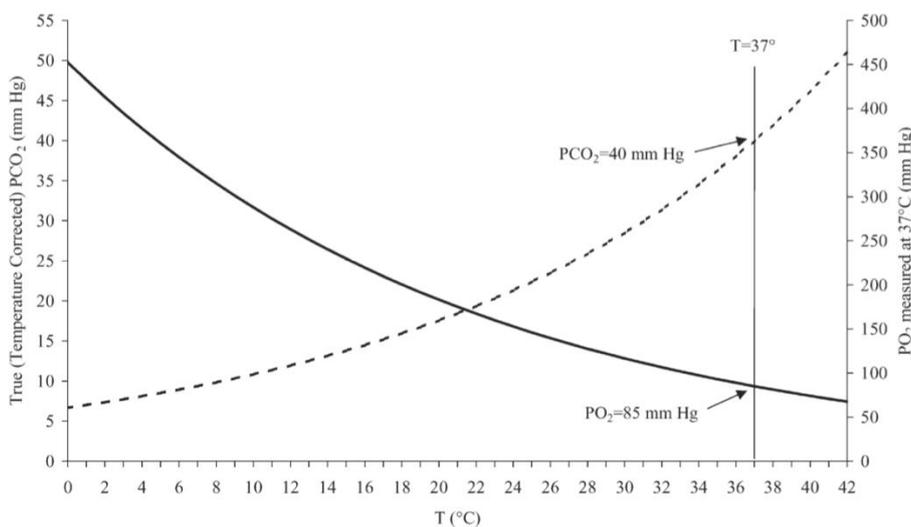
Kondisi hipotermia saat CPB dicapai melalui tiga proses, yaitu fase awal, fase pemeliharaan, dan fase *rewarming*. Pada fase awal strategi hipotermia, suhu tubuh diusahakan mencapai 30-34°C dalam waktu secepat mungkin. Pada fase pemeliharaan, suhu diusahakan tidak berfluktuasi, atau berfluktuasi minimal 0.2-0.5°C. Pada fase *rewarming*, pengembalian suhu ke awal dilakukan secara lambat dan terkontrol, dengan laju 0.2-0.5°C agar tidak terjadi gangguan perfusi otak dan menurunkan kejadian iskemia serebral.<sup>5</sup>

**$\alpha$ -stat dan pH-stat**

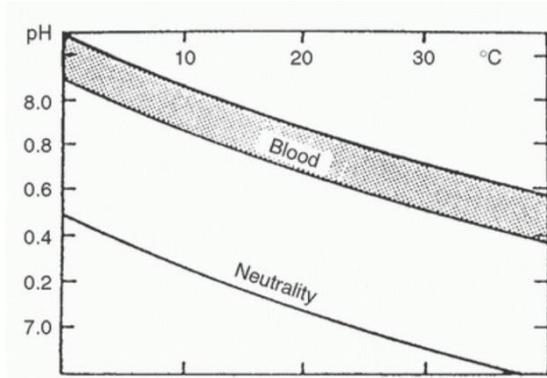
Nilai dari  $PO_2$  dan  $PCO_2$  berhubungan dengan perubahan suhu (Gambar 2). Terdapat hubungan terbalik antara kelarutan gas  $CO_2$  dan suhu tubuh. Hipotermia menyebabkan penurunan laju produksi  $CO_2$ . Seiring dengan penurunan suhu tubuh, tekanan parsial  $CO_2$  ( $PaCO_2$ ) akan menurun (Gambar 2) dan pH arteri ( $pH_a$ ) akan meningkat, menyebabkan kondisi alkalosis respiratorik. pH intrasel terutama ditentukan oleh pH netral ( $pH_N$ ) air (Gambar 3 dan 4). Karena  $pH_N$  akan semakin bersifat basa dengan penurunan suhu tubuh, pH intrasel juga semakin bersifat basa saat kondisi hipotermia.<sup>6</sup>

$\alpha$ -stat merupakan manajemen asam basa tanpa penambahan  $CO_2$  eksogen. Saat terjadi alkalosis intrasel yang disebabkan oleh peningkatan kelarutan  $CO_2$  dan pH darah akibat kondisi hipotermia, gradien pH transmembran normal tetap dipertahankan 0.6, sehingga fungsi optimal berbagai enzim intrasel tetap

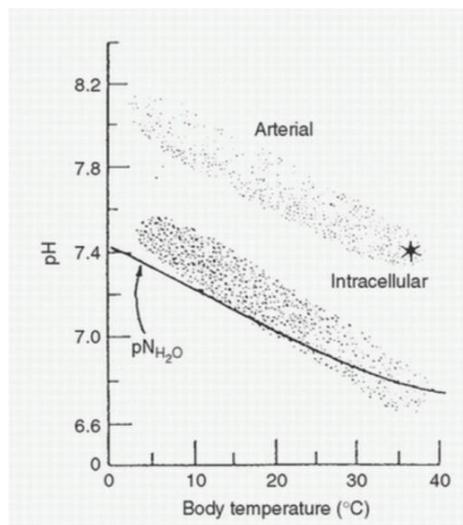
terjaga. Pada manajemen  $\alpha$ -stat, nilai  $pH_a$  bergantung pada suhu tubuh dan mengusahakan gradien pH transmembran yang konstan dengan cara mempertahankan  $PaCO_2$  pada batas fisiologis pasien (biasanya 40 mmHg) dan  $pH_a$  7.4, seperti ketika diukur *in vitro* pada suhu 37°C. Saat CPB, tidak ada penambahan  $CO_2$  eksogen sehingga tidak ada mekanisme kompensasi terhadap peningkatan kelarutan  $CO_2$ .  $CO$  akan mengikuti perubahan disosiasi yang diperantarai perubahan suhu hipotermia, menyebabkan penurunan konsentrasi ion hidrogen (penurunan disosiasi) dan peningkatan pH darah (pergeseran menjadi alkali). Total  $CO_2$  dijaga tetap konstan. Oleh karena itu, hasil  $pH_a$  dan  $PaCO_2$  pada pemeriksaan sampel darah akan berbeda tergantung pada suhu. Sampel darah yang diperiksa pada suhu 37°C akan menghasilkan nilai  $pH_a$  7.4 dan  $PaCO_2$  40 mmHg, sedangkan pada suhu 28°C akan menghasilkan nilai  $pH_a$  7.56 dan  $PaCO_2$  26 mmHg (Gambar 5).<sup>7,8</sup>



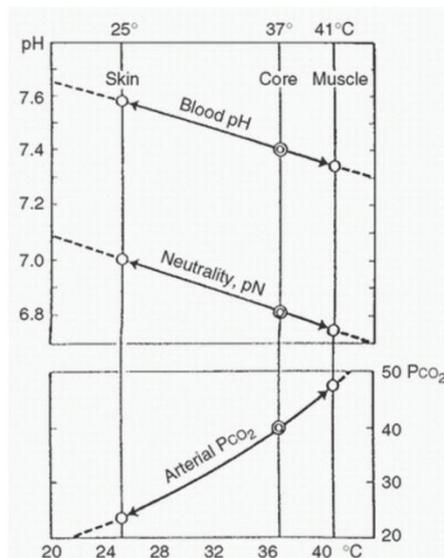
**Gambar 2.** Kurva hubungan suhu dengan  $PO_2$  dan  $PCO_2$ . Garis putus-putus menunjukkan  $PCO_2$  yang sebenarnya (*temperature corrected*) selama perubahan suhu.  $PCO_2$  yang diukur pada suhu 37°C tetap konstan pada 40 mmHg. Garis tegas menunjukkan  $PO_2$  yang diukur pada suhu 37°C selama perubahan suhu tubuh.  $PO_2$  yang sebenarnya (*temperature corrected*) tetap konstan pada 85 mmHg<sup>6</sup>



**Gambar 3.** pH darah pada spesies ektotermia dan pH air netral berdasarkan suhu tubuh<sup>2</sup>



**Gambar 4.** pH arteri dan intrasel dipengaruhi oleh suhu tubuh pada hewan ektotermia<sup>2</sup>



**Gambar 5.** Perubahan pH arteri dan PCO<sub>2</sub> ketika darah dengan suhu 37°C mencapai kulit pada suhu 25°C dan otot yang bekerja pada suhu 41°C<sup>2</sup>

Pada manajemen pH-stat, CO eksogen diberikan untuk menjaga PaCO<sub>2</sub> 40 mmHg dan pH<sub>a</sub> 7.4 dalam keadaan perubahan suhu tubuh pasien secara *in vivo*. Selama manajemen pH-stat, homeostasis ditargetkan pada nilai laboratorium yang dikoreksi berdasarkan suhu tubuh pasien, sehingga sering disebut *temperature corrected management*. Manajemen ini bertujuan untuk menjaga kondisi normokarbia, normoksia, dan pH kurang lebih normal pada suhu tubuh pasien.<sup>7,9</sup> CO eksogen yang diberikan sekitar 3-5%. CO<sub>2</sub> merupakan vasodilator serebral yang poten, dengan peningkatan total PaCO<sub>2</sub> akibat manajemen pH-stat menyebabkan

vasodilatasi serebral. Oleh karena itu, manajemen pH-stat dapat mengganggu aliran darah serebral dan menyebabkan hilangnya autoregulasi serebral. Terdapat beberapa penelitian yang menyatakan bahwa manajemen pH-stat dapat meningkatkan insidensi gangguan kognisi pascabedah atau *postoperative cognitive dysfunction* (POCD) bila durasi CPB melebihi 90 menit, yang disebabkan oleh peningkatan risiko mikroemboli otak akibat vasodilatasi dan gangguan autoregulasi pada otak. Kelebihan dan kekurangan  $\alpha$ -stat dan pH-stat sebagai manajemen asam-basa dijelaskan pada Tabel 1.<sup>5</sup>

**Tabel 1.** Kelebihan dan kekurangan  $\alpha$ -stat dan pH-stat sebagai manajemen asam basa<sup>5</sup>

	Kelebihan	Kekurangan
$\alpha$ -stat	Menjaga autoregulasi otak Menurunkan risiko mikroemboli otak Meningkatkan luaran neurologis Meningkatkan fungsi miokardium	Meningkatkan risiko hipoperfusi serebral
pH-stat	Lebih <i>uniform</i> Menurunkan laju metabolisme organ melalui peningkatan ion hidrogen Menggeser kurva disosiasi HbO <sub>2</sub> ke kanan	Meningkatkan risiko mikroemboli otak Meningkatkan risiko kerusakan jaringan akibat produksi radikal bebas

**Waktu Penggunaan Metode  $\alpha$ -stat dan pH-stat**

Sejauh ini, masih terdapat banyak perdebatan sesuai dengan perbedaan hasil penelitian yang dilakukan, terutama studi hewan. Pada level mikrosirkulasi, beberapa bukti melaporkan bahwa manajemen  $\alpha$ -stat memberikan keuntungan pada otak. Norwood dkk melakukan studi pada otak hewan percobaan anjing dalam keadaan hipotermia, yang menerima perfusi darah anoksik, dan menemukan penurunan derajat kerusakan ketika menerima perfusi darah dengan pH yang lebih tinggi. pH yang lebih rendah akan meningkatkan kerusakan otak. Priestley et al. sebaliknya membandingkan

kondisi neurologi dan histologi pada model hewan percobaan babi yang menjalani *deep hypothermic circulatory arrest* (DHCA). Kelompok pH-stat memberikan hasil neurologi yang lebih baik dengan skor disabilitas fungsional yang lebih rendah daripada kelompok  $\alpha$ -stat. Selain itu, kerusakan jaringan secara histologis juga lebih berat pada kelompok  $\alpha$ -stat.<sup>2</sup>

Nauphal dkk melakukan penelitian untuk membandingkan manajemen  $\alpha$ -stat dan pH-stat dengan kondisi *regional cerebral oxygen saturation* (R<sub>s</sub>O<sub>2</sub>). Selama prosedur CPB dengan hipotermia sedang, R<sub>s</sub>O<sub>2</sub> lebih tinggi selama pH-stat dibandingkan  $\alpha$ -stat,

menunjukkan bahwa  $\alpha$ -stat dapat menjaga keseimbangan *supply-demand* oksigen pada otak secara adekuat.<sup>10</sup> Aziz dkk menyusun kumpulan bukti terbaik tentang manajemen  $\alpha$ -stat dan pH-stat selama prosedur CPB. Terdapat studi yang memberikan hasil inkonklusif, dimana tidak terdapat perbedaan antara kedua kelompok dalam hal perfusi jaringan, berdasarkan hasil parameter oksigenasi jaringan dan konsentrasi laktat yang serupa. Empat studi menyatakan bahwa keuntungan signifikan didapatkan dengan penggunaan metode pH-stat. Namun, salah satu studi menyatakan bahwa pada pasien dewasa dengan risiko tinggi gangguan aliran darah otak, seperti pada pasien usia tua >70 tahun, diabetes, riwayat stroke sebelumnya, dan hipertensi tidak terkontrol, pH-stat dapat meningkatkan tekanan parsial oksigen dan saturasi selama CPB. Tiga studi lainnya merupakan studi pada operasi jantung anak, dimana pasien anak dengan kelainan jantung sianotik yang mendapat manajemen pH-stat menunjukkan penurunan sirkulasi kolateral paru dan kadar laktat. Ketiga studi tersebut menyatakan bahwa metode pH-stat memberikan kondisi neurologis yang lebih baik pada pasien anak yang menjalani pembedahan jantung.<sup>11</sup>

Terdapat tujuh studi yang menyatakan bahwa  $\alpha$ -stat memberikan keuntungan yang lebih banyak. Studi terhadap 70 pasien dewasa yang menjalani *coronary artery bypass graft* (CABG) menunjukkan bahwa gangguan autoregulasi serebral dan insidensi POCD lebih rendah pada kelompok pasien yang menjalani manajemen asam-basa  $\alpha$ -stat. Selain itu, ditemukan pula konsentrasi ion fosfat plasma sebagai akibat dari gangguan metabolik lebih

rendah pada kelompok  $\alpha$ -stat. Berdasarkan penelitian ini, disimpulkan bahwa penggunaan manajemen asam-basa pada pasien yang menjalani *deep hypothermic circulatory arrest* (DHCA) bergantung pada usia pasien, dimana pasien anak lebih menunjukkan hasil yang baik dengan metode pH-stat dan pasien dewasa dengan  $\alpha$ -stat.<sup>11</sup> Pernyataan serupa juga disampaikan pada surat balasan terhadap penelitian yang menyatakan bahwa aliran darah otak pada bayi yang menjalani operasi dengan DHCA lebih baik ketika menggunakan metode pH-stat dalam manajemen asam-basa.<sup>12</sup>

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, pada manajemen pH-stat diberikan CO<sub>2</sub> eksogen, sehingga terjadi peningkatan aliran darah otak yang terkadang dapat melebihi kebutuhan metabolisme otak itu sendiri. Kelebihan perfusi ini dapat menyebabkan emboli otak. Oleh karena itu, pada pasien usia tua dengan risiko tinggi mengalami gangguan aliran darah otak, lebih aman menggunakan metode  $\alpha$ -stat. Sedangkan, pada pasien anak yang menjalani operasi jantung kongenital, manajemen pH-stat memberikan keuntungan karena mampu menciptakan pendinginan otak yang homogen sebelum *circulatory arrest*.<sup>13</sup>

Dalam sebuah uji klinis acak berskala besar, dinyatakan bahwa penggunaan baik  $\alpha$ -stat maupun pH-stat sebagai strategi manajemen asam-basa selama operasi bedah jantung pada bayi dengan DHCA, tidak berhubungan konsisten terhadap luaran perkembangan neurologi bayi. Namun, studi eksperimental dan studi klinis melaporkan pendinginan otak yang homogen dengan pH-stat. Sebaliknya, pH-stat dapat mengganggu autoregulasi serebral dan berpotensi meningkatkan emboli otak. Oleh karena

itu, dalam DHCA, disarankan untuk menerapkan pH-stat saat pendinginan dan  $\alpha$ -stat selama *selective cerebral perfusion* (SCP) dan *rewarming*. Satu indikasi primer penggunaan pH-stat adalah selama proses pendinginan saat DHCA.<sup>7</sup>

### Cara Penerapan Metode $\alpha$ -stat dan pH-stat

*Alpha* ( $\alpha$ ) pada  $\alpha$ -stat mengacu pada rasio rantai histidine sisi imidazole yang tidak terprotonasi (*unprotonated*) terhadap ion  $H^+$ . pKa histidine berubah seiring dengan perubahan suhu, sehingga keadaan protonasi akan relatif konstan terhadap perubahan suhu. Istilah  $\alpha$ -stat ditetapkan atas dasar keadaan protonasi residu histidine yang tetap statis terhadap pergeseran pH pasien akibat perubahan suhu. Saat melakukan manajemen  $\alpha$ -stat selama prosedur CPB, dokter anestesi akan mengatur berdasarkan hasil analisis gas darah (AGD) pada suhu  $37^\circ C$  dan mengusahakan untuk menjaga pH 7.4, dimana pH asli pasien (*in vivo*) akan lebih tinggi. Tidak ada penyesuaian tambahan yang dilakukan terhadap kondisi hipotermia pasien.<sup>14</sup>

pH-stat berbeda dengan  $\alpha$ -stat, dimana suhu tubuh pasien dipertahankan statis 7.4, yang diukur dari suhu inti tubuh pasien. Saat melakukan manajemen pH-stat selama prosedur CPB, dokter anestesi akan mengatur berdasarkan AGD yang telah diperbaiki atau disesuaikan mengikuti suhu tubuh pasien. Dalam keadaan hipotermia, *temperature corrected* diartikan dengan penambahan  $CO_2$  sehingga pH gas darah pasien 7.4, sehingga tercapai pH yang lebih rendah dan  $PCO_2$  yang lebih tinggi. Rasio  $[OH^-]$  terhadap  $[H^+]$  ekstraseluler dan intraseluler juga akan berubah dan total  $CO_2$  akan meningkat. Kondisi ini

akan meningkatkan perfusi ke otak selama keadaan hipotermia.<sup>14</sup>

Pokela et al. menjelaskan prosedur implementasi manajemen  $\alpha$ -stat dan pH-stat pada penelitiannya terhadap model babi. Pada kelompok  $\alpha$ -stat, pH dipertahankan  $7.40 \pm 0.05$  dengan tekanan  $CO_2$  arteri 5.2-5.4 kPa pada suhu yang tidak dikoreksi. Pada kelompok pH-stat, tekanan  $CO_2$  arteri pada suhu yang dikoreksi dipertahankan 5.2-5.4 kPa dengan pH  $7.40 \pm 0.05$ . Pada kedua kelompok, sampel darah untuk AGD diambil setiap 15 menit sekali. Namun, bila tekanan  $CO_2$  arteri tidak optimal, sampel darah diambil setiap 5 menit. Pada kelompok pH-stat,  $CO_2$  diberikan hingga 5%. Sedangkan, pada kelompok  $\alpha$ -stat,  $CO_2$  hanya diberikan saat fase *rewarming*. Pendinginan dilakukan selama 60 menit untuk mencapai suhu  $18^\circ C$  dan dilakukan DHCA selama 75 menit. Selama DHCA, suhu intraserebral dipertahankan  $18^\circ C$  dengan meletakkan *ice packs* pada kepala. Setelah 75 menit DHCA, fase *rewarming* dilakukan. Selama fase pendinginan dan *rewarming*, gradien suhu *heat exchanger-blood* diatur sekitar  $10^\circ C$ , dan selama *rewarming*, suhu *heat exchanger* dapat diatur sekitar  $38^\circ C$  dengan frekuensi yang jarang.<sup>15</sup>

Sakamoto et al. melakukan penelitian terhadap pasien usia  $>1$  tahun dengan penyakit jantung sianotik yang menjalani CPB. Pada pH-stat, digunakan campuran gas 95%  $O_2$  dan 5%  $CO_2$ . CPB dimulai ketika pasien telah didinginkan dengan suhu esophagus dan rektum  $27-28^\circ C$ . Analisis gas darah, elektrolit, glukosa, dan laktat diukur sebelum, selama, dan sesudah prosedur CPB. Sampel darah vena campuran juga dinilai selama CPB.<sup>16</sup>

## RINGKASAN

Manajemen asam basa, yang terdiri dari  $\alpha$ -stat dan pH-stat, akibat kondisi hipotermia pada CPB diperlukan untuk mencegah terjadinya komplikasi akibat gangguan aliran darah, terutama ke otak. Penerapan metode  $\alpha$ -stat dan pH-stat dipengaruhi oleh usia dan risiko gangguan aliran darah serebral pada pasien, dimana  $\alpha$ -stat lebih disarankan pada pasien dewasa yang memiliki risiko gangguan aliran darah serebral, seperti emboli serebral, dan pH-stat pada operasi jantung anak. Selain itu,  $\alpha$ -stat diindikasikan pada saat *selective cerebral perfusion* (SCP) dan fase *rewarming*, sedangkan pH-stat pada saat fase pendinginan.

## DAFTAR PUSTAKA

1. Sarkar M, Prabhu V. Basics of cardiopulmonary bypass. *Indian J Anaesth.* 2017;61(9):760–7.
2. Davis LK, Reed H. *Cardiopulmonary Bypass and Mechanical Support.* 4th ed. Gravlee GP, editor. Wolters Kluwer;
3. Harris B, Andrews PJD, Murray GD, Forbes J, Moseley O. Systematic review of head cooling in adults after traumatic brain injury and stroke. Vol. 16, *Health Technology Assessment.* 2012.
4. Meng L, Flexman A. Central nervous system disease. In: Pardo MC, Miller RD, editors. *Basics of anesthesia.* 7th ed. Philadelphia: Elsevier; 2018. p. 511–3.
5. Hogue CW, Palin CA, Arrowsmith JE. Cardiopulmonary bypass management and neurologic outcomes: An evidence-based appraisal of current practices. Vol. 103, *Anesthesia and Analgesia.* Lippincott Williams and Wilkins; 2006. p. 21–37.
6. Bacher A. Effects of body temperature on blood gases. In: *Applied Physiology in Intensive Care Medicine.* 7th ed. Berlin: Springer; 2009. p. 49–52.
7. Fujii S, Murkin JM. *Hensley's Practical Approach to Cardiothoracic Anesthesia.* 6th ed. Gravlee GP, Shaw AD, Bartels K, editors. Mexico: Wolters Kluwer; 2019.
8. Duebener LF, Hagino I, Sakamoto T, Mime L ben, Stamm C, Zurakowski D, et al. Effects of pH management during deep hypothermic bypass on cerebral microcirculation: Alpha-stat versus pH-stat. *Circulation.* 2002 Sep 24;106(13 SUPPL.).
9. Chaney B, Emmady PD. Blood Gas Temperature Correction [Internet]. StatPearls Publishing. 2020 [cited 2020 Aug 13]. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK557769/>
10. Nauphal M, El-Khatib M, Taha S, Haroun-Bizri S, Alameddine M, Bataka A. Effect of alpha-stat vs. pH-stat strategies on cerebral oximetry during moderate hypothermic cardiopulmonary bypass. *Eur J Anaesth.* 2007;24:15–9.
11. Abdul Aziz KA, Meduoye A. Is pH-stat or alpha-stat the best technique to follow in patients undergoing deep hypothermic circulatory arrest? *Interactive Cardiovascular and Thoracic Surgery.* 2010;10(2):271–82.
12. Jonas RA. Technique of circulatory arrest makes a difference. Vol. 156, *Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery.* Mosby Inc.; 2018. p. 40–1.
13. Grocott HP, Stafford-Smith M, Mora-Mangano CT. *Kaplan's Essentials of Cardiac Anesthesia*

- for Cardiac Surgery. 2nd ed. Kaplan JA, Cronin B, Maus T, editors. Philadelphia: Elsevier; 2018.
14. Liu LL. Basics of Anesthesia. 7th ed. Pardo MC, Miller RD, editors. Philadelphia: Elsevier; 2018.
15. Pokela M, Dahlbacka S, Biancari F, Vainionpää V, Kiviluoma K, Kaakinen T, et al. pH-Stat Versus Alpha-Stat Perfusion Strategy During Experimental Hypothermic Circulatory Arrest: A Microdialysis Study. 2003.
16. Sakamoto T, Kurosawa H, Shin'oka T, Aoki M, Isomatsu Y, Griep RB, et al. The influence of pH strategy on cerebral and collateral circulation during hypothermic cardiopulmonary bypass in cyanotic patients with heart disease: Results of a randomized trial and real-time monitoring. *Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery*. 2004;127(1):12–9.