

Izvantjelesna membranska oksigenacija u kardiokirurškoj jedinici intenzivnog liječenja

Extracorporeal membrane oxygenation in cardiac intensive care unit

Mihaela Stanec

Klinički bolnički centar Zagreb „Rebro“, Klinika za anesteziologiju, reanimatologiju i intenzivno liječenje, Odjel za anesteziju i intenzivno liječenje kardiokirurških bolesnika, Kišpatićeva 12, 10000 Zagreb, Hrvatska

University Hospital Centre Zagreb „Rebro“, Clinic for Anaesthesiology, Reanimatology and Intensive Care, Department for Anesthesiology and Intensive Care for Cardiac patients, Kišpatićeva 12, 10000 Zagreb, Croatia

Received August 21st 2012

Accepted November 11th 2012

Sažetak:

Periferna kanilacija put je za povezivanje stroja za izvantjelesnu oksigenaciju s cirkulacijskim sustavom bolesnika, i to kako bi se uspostavila potpuna ili djelomična izvantjelesna potpora. Iako se većina kardiovaskularnih kirurških zahvata izvodi uporabom centralne kanilacije, danas postoje postupci u kojima je u uporabi periferna kanilacija kroz bedrene, zdjelične, aksilarne, potključne i vratne krvne žile. Periferna kanilacija danas je u uporabi za liječenje hemodinamski nestabilnih bolesnika, a posebice je zanimljivo područje uporabe za ECMO i ECLS liječenje. U članku se opisuje liječenje bolesnika kod kojih je postavljena indikacija za uporabu ECMO/ECLS sustava, s posebnim osvrtom na uporabu sigurnosnih mjera u liječenju bolesnika te na uporabu recentnih spoznaja iz znanosti o sigurnosti bolesnika i metodama zdravstvene njega, s posebnim osvrtom na osobne rezultate uporabe navedenih metoda/postupaka.

Ključne riječi: kardiopulmonarni *bypass* • kanile • kanilacija • zdravstvena njega

Kratki naslov: Izvantjelesna membranska oksigenacija i intenzivno liječenje

Abstract:

Peripheral cannulation is a way to connect machines for in vitro oxygenation of the circulatory system of the patient, and to establish a complete or partial cardiopulmonary support. Although the majority of cardiovascular surgical procedures are performed using central cannulation, today there are procedures in which the use of peripheral cannulation through the femoral, iliac, axillary, subclavian and jugular veins is mandatory. Peripheral cannulation today is in use for the treatment of hemodynamically unstable patients, and is particularly interesting for the usage in ECMO and ECLS treatment. The article describes the treatment of patients in whom is established the indication for the use of ECMO / ECLS system, with special emphasis on the use of safety measures in the treatment of patients, and the use of recent findings from the science of patient safety and methods of health care, with an emphasis on personal results.

Keywords: Cardiopulmonary bypass • cannulas • cannulation • health care

Running head: Extracorporeal membrane oxygenation and intensive care

Autor za korespondenciju/Corresponding author:

Mihaela Stanec

University Hospital Centre Zagreb „Rebro“, Clinic for Anaesthesiology, Reanimatology and Intensive Care, Department for Anesthesiology and Intensive Care for Cardiac patients, Kišpatićeva 12, 10000 Zagreb, Croatia

Tel: 385-1-23 67 066; 2367 077

Fax: 385-1-23 67 080

E-mail: mstanec53@gmail.com

Uvod-ECMO/ECLS

U svojim počecima pojam izvantjelesna membranska oksigenacija [*extracorporeal membrane oxygenation-ECMO*] bio je korišten za opisivanje tehnološkog sustava tzv. dugotrajne izvantjelesne potpore, i to radi poboljšanja oksigenacije. Tijekom vremena u definiciju su uvedeni i pojmovi izvantjelesnog uklanjanja ugljičnog dioksida te i poslijeperacijska potpora bolesnika nakon kardiokirurških zahvata.

Zbog višenamjenskih indikacija za uporabu ECMO sustava, za detaljan opis ECMO tehnologije u znanstvenu literaturu uveden je i termin izvantjelesne potpore života [*ECLS-extracorporeal life support*].

Razlike između ECMO sustava i sustava konvencionalne izvantjelesne cirkulacije:

- 1] Za uporabu ECMO sustava dovoljna je kanilacija [uvođenje venske i arterijske kanile] u vratno krvožilje, za što se upotrebljava lokalna anestezija. Uporaba konvencionalne kardiopulmonalne cirkulacije zahtijeva uvođenje kanila u velike krvne žile prsišta [aorta, velike vene], za što je potrebna opća anestezija te kirurško otvaranje prsišta.
- 2] Konvencionalna kardiopulmonalna cirkulacija u uporabi je za kratkotrajnu potporu organizmu [sati], a ECMO sustav za dugotrajnu potporu organizmu [3-10 dana].
- 3] Osnovna svrha ECMO sustava omogućavanje je oporavka/poboljšanja funkcije pluća i srca, a konvencionalna izvantjelesna cirkulacija služi za potporu organizma [srce, pluća] tijekom kardiokirurških operacijskih zahvata.

Povijest

U svibnju 1953. godine Gibbon je prvi put upotrijebio mašinu/tehnologiju za izvantjelesnu cirkulaciju, i to za kardiokiruršku operaciju na otvorenom srcu [1]. Tijekom 1954. godine, Lillehei je osmislio tzv. „cross-cirkulacijsku“ metodu. Uporabom ove metode/tehnologije učinjeni su kardiokirurški zahvati za liječenje prirođenih srčanih grešaka [2]. 1955. godine Kirklin i suradnici s Mayo klinike unaprijedili su originalnu Gibbonovu metodu/tehnologiju te je njezinom uporabom učinjen prvi kardiokirurški zahvat radi liječenjaatrijskog septalnog defekta [3]. Rashkind i suradnici 1965. godine prvi su uporabili „bubble“ oksigenator u liječene novorođenčadi koja je umirala od zatajenja respiratornih organa [4]. Dorson i suradnici 1969. godine prvi put opisuju uporabu „membranskog“ oksigenatora u tehnologiji izvantjelesne cirkulacije, i to kod dojenčadi [5]. Baffes i suradnici 1970. godine opisuju prvo korištenje izvantjelesne membranske oksigenacije u dojenčadi s prirođenim srčanim manama, koja je bila podvrgnuta kardiokirurškim operacijskim zahvatima [6]. Tijekom 1975. godine, Bartlett i suradnici prvi su uspješno uporabili sustav ECMO u novorođenčadi s poremećajima sustava za disanje [7].

Indikacije – ECMO/ECLS

Klinička su stanja u kojih postoji indikacija za uporabu ECMO/ECLS-a: postkardiotomijsko zatajenje srca, akutna egzacerbacija kroničnog zatajenja srca, izolirano zatajenje srca koje je refrakternost na konvencionalnu terapiju [inotropi], akutno zatajenje srca kod infarkta miokarda, akutno cirkulacijsko zatajenje pri aritmijama, kardijalni arest tijekom kardiopulmonalne reanimacije [CPR].

Vrijednosti su hemodinamskih parametara koje predstavljaju indikaciju za uporabu sustava ECMO:

Sistolički tlak <80 mm Hg; srednji arterijski tlak <60 mm Hg; plućni okluzivni kapilarni tlak [PCWP] > 20 mm Hg; srčani indeks < 2.0 L/min m²; sistemska vaskularna rezistencija [SVR] >2100 dynes-sec/cm.

U neonatalnoj dobi dvije su glavne indikacije za uporabu ECMO/ECLS-a, i to:

- 1] dijagnoze povezane s primarnom plućnom hipertenzijom u novorođenčeta [primary pulmonary hyperten-

sion of the newborn-PPHN), uključujući idiopatskom PPHN, sindrom aspiracije mekonija, respiratorni distres-sindrom, streptokokne sepse B skupine, i asfiksija;

- 2] kongenitalna dijafragmalna hernija [Congenital diaphragmatic hernia-CDH].

Kriteriji su izbora za uporabu ECMO/ECLS-a u novorođenčadi:

- 1] Gestacijska dob od 34 ili više tjedana;
- 2] Porođajna težina 2000 grama ili više;3]
- 3] Nema veće koagulopatija ili nekontrolirana krvarenja;
- 4] Nepostojanje većeg intrakranijskog krvarenja [1. stupanj intrakranijskog krvarenja];
- 5] Mehanička ventilacija koja je potrebna za 10-14 dana ili manje;
- 6] Reverzibilna ozljeda pluća;
- 7] Nepostojanje smrtonosne malformacije;
- 8] Nepostojanje komplicirane srčane malformacije;
- 9] Nezadovoljavajuće djelovanje konvencionalne medicinske terapije.

Nepostojanje navedenih kriterija relativna je kontraindikacija za uporabu ECMO/ECLS-a.

Indikacijski su kriteriji za uporabu ECMO-a kada dijete dosegne maksimalnu ventilacijsku potporu od 100% kisika [frakcija inspiracijskog kisika [FiO₂] vrijednosti 1], kada vršni inspiracijski tlak [peak inspiratory pressures - PIP] ima vrijednost od 35 cm vode. Kriteriji uključuju alveolarni-arterijski gradijent, oksigenacijski indeks te akutno pogoršanje.

Alveolarni-arterijski [Aa] gradijent od 600-624 mm Hg za 4-12 sati na morskoj razini izračunava se kako slijedi [gdje je 47 = parcijalni tlak vodene pare]:

- (Aa) (difuzni kapacitet [D] od O₂ jednak je atmosferskom tlaku - 47 - (PaC₂ + PaO₂)) / FiO₂

Oksigenacijski indeks [OI] veći od 40 u tri od pet postduktalnih određivanja plina dobivenih za 30-60 minuta izračunava se kako slijedi [gdje je MAP srednji tlak disanja]:

- OI = (MAP x FiO₂ x 100) / PaO₂
- PaO₂ = 35-50 mm Hg za 2-12 sati

Akutno pogoršanje izračunava se kako slijedi:

- PaO₂ od 30-40 mm Hg ili manje za 2 sata
- pH 7,25 ili manje za 2 sata
- tvrdokorna hipotenzija

Apsolutne indikacije za uporabu pedijatrijskog ECMO/ECLS sustava:

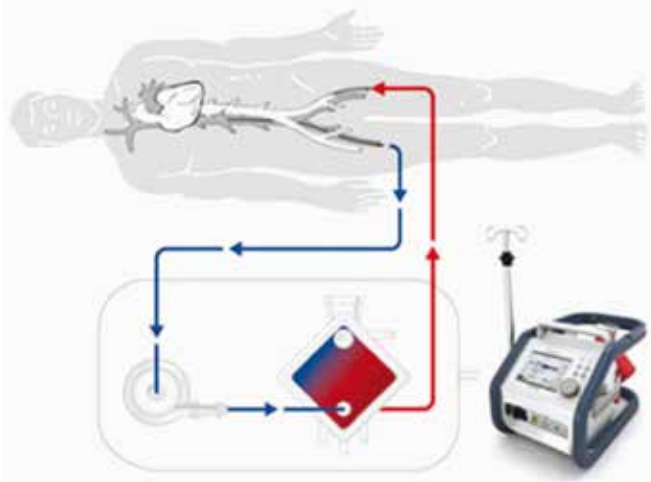
- 1] Niski minutni volumen koji je uzrokovan desnostranom, lijevostranom ili biventrikularnom nezadovoljavajućom funkcijom poslije kardiokirurškog zahvata zbog prirodne srčane greške;
- 2] Plućna vazoreaktivna kriza poslije kardiokirurškog liječenja prirodne srčane greške, a koja uzrokuje tešku hipoksemiju, niske vrijednosti srčanog izlaza, ili oboje;
- 3] Rijetko, kao potpora do izvršenja kardiokirurške operacije, i to u bolesnika sa završnim stadijima oštećenja organa koji uzrokuju nastanak malog minutnog volumena, koji je uzrokovan postojanjem prirodne bolesti srca;
- 4] Vrijeme potrebno za čekanje do transplantacije srca;

- 5] Sredstvo potpore do oporavka u bolesnika koji imaju prolaznu kardiomiopatiju, i to poslije zatajenja bubrega, miokarditisa, i opekline.

Danas se indikacije za uporaba ECMO/ECLS-a sustava stalno proširuju [8, 9, 10]. Recentno su verificirane indikacije:

- 1] Najčešća je indikacija za uporabu ECMO/ECLS-a u odraslih, novorođenčadi i nedonoščadi kada konvencionalne metode liječenja [strojna ventilacija, inducirana respiracijska alkalozna, uporaba surfaktanta, inhalacija dušikova oksida, visokofrekventna oscilirajuća ventilacija - kada je uporabom ECMO/ECLS-a potrebno umanjiti negativne učinke strojne ventilacije s visokim tlakom i FiO_2] ne daju zadovoljavajuće rezultate;
- 2] u bolesnika s teškom respiracijskom slabošću (bilo koje etiologije), u kojih uvriježena/konvencionalna terapija ne daje zadovoljavajuće rezultate;
- 3] kod bolesnika u kojih se predviđa transplantacija pluća (za bolju optimizaciju respiracijskih parametara neposredno prije operacije), te u bolesnika s transplantiranim plućima i teškom poslijeoperacijskom hipoksijom zbog disfunkcije presatka (alograf), a koja se ne popravlja s pomoću strojne ventilacije;
- 4] kod bolesnika s akutnim respiracijskim distresnim sindromom (ARDS);
- 5] kod bolesnika koji su hipoksemični unatoč uporabi maksimalne konvencionalne respiracijske potpore;
- 6] kod bolesnika koji su u reverzibilnom kardiogenom šoku.
- 7] kod bolesnika s teškim stupnjem poremećaja disanja koji su dulje na umjetnoj ventilaciji osnovna je funkcija ECMO-a smanjenje stupnja potpore respiratora/ventilatora te istodobno produljenje vremena za mogući oporavak plućnog parenhima od osnovne bolesti ili od poremećaja plućnog parenhima koji je nastao dugotrajnom uporabom umjetne ventilacije.

Schema ekstrakorporalne membranske oksigenacije prikazana je na slici [Slika 1].



SLIKA [1] Ekstrakorporalna membranska oksigenacija [Extracorporeal membrane oxygenation ECMO].

Kontraindikacije–ECMO/ECLS

Nepostojanje navedenih kriterija relativna je kontraindikacija za uporabu ECMO/ECLS-a. Potrebno je napomenuti da, osim nepostojanja opisanih kriterija izbora za ECMO, kod pedijatrijskih bolesnika kriteriji moraju sadržavati procjenu općeg stanja bolesnika kao i institucionalno iskustvo u uporabi ECMO-a.

Apsolutne su kontraindikacije za uporabu ECMO-a:

- 1] Ireverzibilno zatajenje cirkulacije s višeorzanskim zatajenjem nespojivim sa životom;
- 2] Tijek bolesti bez realne mogućnosti preživljenja ili zadovoljavajućeg stupnja kvalitete života u slučaju preživljenja;
- 3] Znatna komorbiditet [malignitet, poremećaji hemostaze].

Oprema-ECMO

Uređaj za izvantjelesnu membransku oksigenaciju [ECMO] sastoji se pumpe za krv s tzv. *Raceway* cijevima, venskog rezervoara, membranskog oksigenatora i izmjenjivača topline.

Čimbenici su sustava izvantjelesne membranske oksigenacije (ECMO): pumpa za krv najčešće je jednostavna valjkasta puma ili je, pak, izrađena kao centrifugalna pumpa. Valjak pumpe uzrokuje malim obim hemolize i se za koristi za neonatalne ECMO sustave. Venski rezervoar također je dio neonatalnog ECMO-a. Oksigenator je odgovoran za izmjenu kisika i ugljičnog dioksida i najvažniji je čimbenik za uspješno obavljanje dugotrajnoga ECMO-a. Danas postoje tri vrste sustava umjetne ventilacije/umjetna pluća, i to: balonski, membranski te sustav vlakana. U izmjenjivaču topline krv se zagrijava tzv. mehanizmom protustruje. Krv je zagrijava toplom vodom koja se nalazi u sustavu metalnih cijevi.

Sigurnosni uređaji i monitori

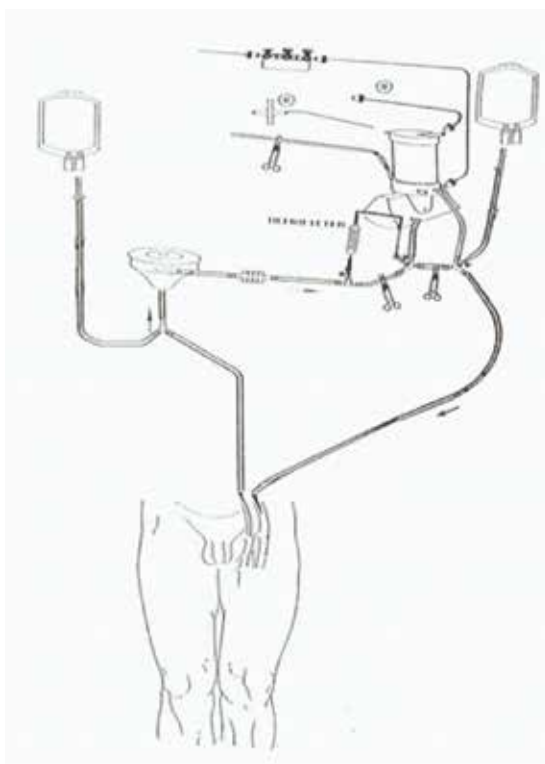
Zračni detektori prepoznaju mikroskopske mjehuriće zraka u arterijaliziranoj krvi i automatski isključuju krvnu pumpu. Filteri u arterijskoj liniji koji se nalaze između izmjenjivača topline i arterijske kanile pročišćavaju krv od mjehurića zraka, tromba i embolusa. Monitori čija je svrha mjerenje tlaka nalaze se ispred i iza oksigenatora, a osnovna im je funkcija bilježenje naglih porasta krvnog tlaka unutar sustava cijevi. Preventivna funkcija monitora posebno je važna jer tlak naglo raste u slučajevima akutne okluzije u sustavu cijevi. Monitori koji bilježe kontinuirano zasićenje kisikom i temperaturu krvi također su preventivni čimbenici za normalnu funkciju ECMO-a.

Metode rada - ECMO

Dvije su osnovne metode rada ECMO-a, i to:

- Ad 1]** Venovenozni bypass [V-V] provodi se kod izoliranog respiratornog zatajenja;
- Ad 2]** Venarterijski bypass [V-A] koristi se kod združenog kardijalnog i respiratornog zatajenje - ECLS.

Shema ekstrakorporalne membranske oksigenacije [periferna kanilacija] prikazana je na slici [Slika 2].



SLIKA [2] Ekstrakorporalna membranska oksigenacija [Extracorporeal membrane oxygenation; ECMO].

Sastavnice sustava izvantjelesne membranske oksigenacije [ECMO] potrebno je premazati svježom krvlju. Potrebno je točno izračunati acidobaznu ravnotežu i tlakove plinske analize krvi za tzv. "priming" [čimbenici za početno punjenje sustava].

Osnovni čimbenici početnog punjenja ECMO-a i razlike u odnosu na konvencionalni sustav prikazani su u tablici [Tablica 1].

U daljnjem tekstu opisuju se razlike između veno-arterijskog ECMO-a i veno-venoznog ECMO-a.

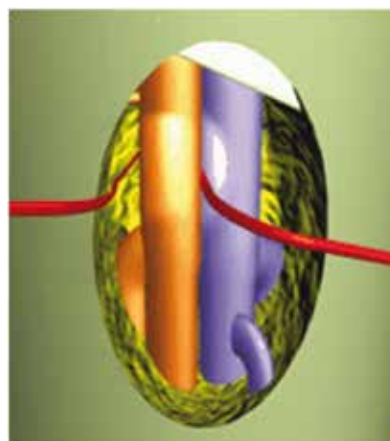
TABLICA 1.

| Podatak | ECMO | Konvencionalna mašina |
|--------------------------------|--|---|
| Punjenje | 420 ml, kristaloidno | 2100 ml, krvno |
| Slaganje i raspremanje | brzo i jednostavno | malo sporije |
| Kontaktna površina krvi | mala | velika |
| Vrsta mašine | Dječji sistem i oksigenator, centrifugalna pumpa | Odrasli sistem i oksigenator, Roler-pumpa |
| Prostor | zauzima malo prostora | zauzima mnogo prostora |
| Heparin i ACT | 1000 I.E u punjenje i 100 I.E/kg ACT>200 | 10 000I.E u punjenje i 300I.E/kg ACT>480 |

Veno-arterijski bypass

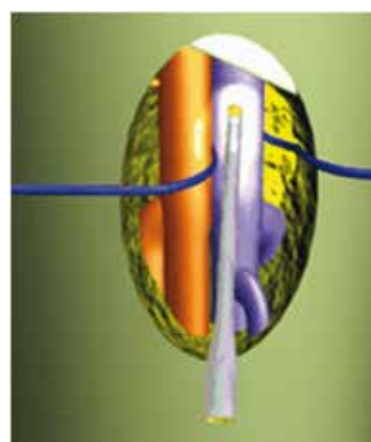
Standardni ECMO postupak koji je u uporabi kod većine bolesnika na neonatalnim odjelima intenzivne skrbi jest veno-arterijski bypass. U ovome sustavu kanila se uvodi kroz desnu jugularnu venu u desni atrij. Krv je izlivena u venski spremnik koji se nalazi ispod razine srca. Krv se aktivno pumpa uporabom „roller“ pumpe kroz oksigenator, gdje se vrši izmjena plinova. Nadalje, krv se zagrijava, u izmjenjivaču topline, na razinu tjelesne temperature. Zatim se krv vraća u bolesnikovo tijelo kroz kanilu koja je postavljena kroz desnu karotidnu arteriju u luk aorte. Uporabom heparina uspostavlja se sistemska antikoagulacijska terapija u tijeku cijelog sustava, a u uporabi je kontinuirani monitoring s praćenjem vrijednosti aktivnog vremena zgrušavanja [ACT], koji je potrebno održavati u vrijednostima od 180-240 sekunda.

Anatomsko područje uvriježeno za prikazivanje mjesta kanilacije prikazano je na slici [Slika 3].



SLIKA [3] Za potrebe preponske/periferne kanilacije uvriježeno je da se prikazuju krvne žile u području preponske regije [arterija i vena femoralis], u koje se uvode kanile.

Optimalno mjesto za uvođenje kanila nalazi se između ingvinalnog ligamenta i duboke femoralne vene [kanile se uvode u zajedničku femoralnu arteriju i venu, kako je prikazano na slici [Slika 4].



SLIKA [4] Optimalna mjesta za uvođenje arterijske i venske kanile.

Veno-venozni bypass

Kanila s dvostrukim lumenom, koja je uvedena kroz desnu jugularnu venu, nalazi se u desnom atriju. Nesaturirana krv odlazi iz desnog atrija kroz vanjski lumen, a oksigenirana krv vraća se u krvotok kroz unutarnji lumen kanile i usmjerena je prema trikuspidalnoj valvuli.

Razlike između veno-arterijskog i veno-venoznog sustava ECMO prikazane su u tablici [Tablica 2].

TABLICA 2.

| Veno-arterijski ECMO | Veno-venozni ECMO |
|---|---|
| Visoke vrijednosti PaO ₂ | Niske vrijednosti PaO ₂ |
| Niske vrijednosti perfuzije | Visoke vrijednosti perfuzije |
| Zaobilazi se plućna cirkulacija | Održan je protok krvi kroz plućnu cirkulaciju |
| Smanjenje plućnih arterijskih tlakova | Povećanje miješanog-venskog PO ₂ |
| Srčana potpora koja poboljšava sustavnu cirkulaciju | Nema srčane potpore za poboljšanje sustavne cirkulacije |
| Potrebna je arterijska kanilacija | Potrebna je samo venska kanilacija |

U bolesnika sa srčanim ili respiratornim zatajenjem koji su bili podvrgnuti kardijalnom operacijskom zahvatu postoji indikacija za transtorakalnu kanilaciju [desni atrij - luk aorte], i to kao alternativa za kanilaciju vrata. Transtorakalna kanilacija omogućuje dekompresiju lijevog srca kroz kanilu koja je smještena u lijevom atriju. To je posebice važno u bolesnika s primarnim zatajenjem lijevog srca.

Postoje dva osnovna tipa kanilacije, to:

- 1] Centralna (transtorakalna) kanilacija [izvodi se za potrebe ECMO/ECLS, i to pri otvorenom medijastinumu, te u primarnom zahvatu implantacije mehaničke cirkulacijske potpore];
- 2] Periferna kanilacija: izvodi se perkutanom tehnikom (Seldinger) insercije ili kirurškom eksploracijom i zamčavanjem krvnih žila te postavljanjem kanila u velike arterije perifernog arterijskog sustava. Kod odraslih bolesnika najčešće se kao mjesto postavljanja „outflow“ kanile (arterijska linija) koristi femoralna arterija (lijevo), zdjelična arterija, te aksilarna arterija. Promjer „outflow“ kanile varira u rasponu 8-20 Fr (najčešće 17). U slučaju kirurškog postavljanja „outflow“ kanile, s ciljem prevencije ishemije distalnog segmenta ekstremiteta moguće je postavljanje ogranka „outflow“ kanile na distalni segment arterije femoralis (promjer 10 Fr). Kao alternativni model kirurškog postavljanja „outflow“ kanile postoji metoda kanilacije aksilarne arterije uporabom dakronskog grafta promjera 8 mm (T-L anastomoza). „Inflow“ kanila (venska linija) postavlja se na desnu femoralnu venu. Promjer „inflow“ kanile u rasponu je 18-26 Fr (najčešće 19 Fr). „Inflow“ kanila fiksira se izvana (koža) kako bi se po potrebi mogla osigurati njezina mobilnost.

Plućni sustav - ECMO

Za oporavak plućne funkcije ECMO je u privremenoj uporabi. U klasičnom korištenju neonatalnog ECMO-a, karakteristična je postavka izmjenjivača FiO₂ od 21-30%, vršno inspiracijski tlak [PIP] od 15 do 25 cm H₂O, izdisajni tlak [PEEP] od 3-5 cm H₂O, i povremena mehanička ventilaciju [IMV] od 10 do 20 udisaja u minuti. U nekim centrima, visina PEEP iznosi od 12 do 14 cm vode kako bi se prevenirao nastanak atelektaza. Higijena pluća zahtijeva uporabu čestih promjena položaja bolesnika te aspiraciju endotrahealnog sadržaja.

Kardiovaskularni sustav - ECMO

Za oporavak kardiovaskularnog sustava potrebno je održavati sistemsku perfuziju i intravaskularni volumen. Stanje volumena može se ocijeniti klinički znakovima, i to volumenom urina i fizikalnim znakovima perfuzije koji se dobivaju mjerenjem središnjeg venskog tlaka i središnjeg arterijskog krvnog tlaka. Srčani izlaz (*output*) poboljšava se uporabom inotropnih lijekova. Ehokardiografija indicirana je u svrhu isključivanja postojanja kompleksnih urođenih srčanih grešaka kod kojih je potrebno učiniti hitni kardiokirurški zahvat te ECMO nije metoda izbora za liječenje.

Središnji živčani sustav - ECMO

Komplikacije uzrokovane bolestima središnjeg živčanog sustava najozbiljnije su i u izravnoj su vezi sa stupnjem hipoksije i acidoze. Potrebno je izbjegavati uporabu lijekova koji uzrokuju paralizu crijeva te kontinuirano bilježiti neurološki status bolesnika. Prije uporabe ECMO-a u novorođenčadi potrebno je učiniti ultrazvučni pregled glave. Kod bolesnika s velikim epileptičnim napadajima tijekom ECMO terapije potrebno je uključiti agresivnu medikamentoznu terapiju (phenobarbiton).

Bubrežni sustav - ECMO

Tijekom prvih 24-48 sati uporabe ECMO-a često dolazi do oligurije i akutne tubularne nekroze koje su povezane s kapilarnom curenjem i smanjenjem intravaskularnog volumena, jer ECMO aktivira nastanak akutne upalne reakcije. U diuretičkoj fazi, koja počinje poslije 48 sata uporabe, opisani simptomi postupno nestaju. Ako oligurija traje dulje od 48-72 sati, potrebna je uporaba diuretika, i to za smanjenje edema. Ako se zatajenje bubrežne funkcije ne popravlja, u liječenje je potrebno uvesti metode hemofiltracije ili hemodijalizu.

Hematološki sustav - ECMO

Radi zadovoljavajućeg dotoka kisika u tkiva, potrebno je održavati zadovoljavajuće vrijednost hemoglobina, i to u vrijednostima od 12-15 g / dl., za što je potrebna uporaba koncentrata trombocita [RBC; pRBCs]. Zbog potrošnje trombocita tijekom ECMO-a potrebna je uporaba transfuzija trombocita radi održavanja vrijednosti trombocita iznad 100.000 / MCL. Aktivirano vrijeme zgrušavanja [ACT] treba održavati na vrijednostima od 180 do 240 sekunda kako bi se spriječio nastanak komplikacija krvarenja.

Kontrola infekcije - ECMO

Prisutnost infekcije potrebno je kontrolirati najmanje jedanput na tjedan, i to analizom uzoraka krvi iz *bypassa*.

Tekućine, elektroliti i nutricionizam - ECMO

Kod bolesnika koji su na dugotrajnom liječenju s ECMO sustavom potrebno je minuciozno praćenje vrijednosti/količine tekućine i elektrolita. Kod bolesnika je potrebno uvesti hiperalimentarnu ishranu. Tjelesna težina bolesnika povećava se u prva tri dana na ECMO-u, i to zbog zadržavanja tekućine u tijelu.

Mehaničke komplikacije - ECMO

Stvaranje ugrušaka u cirkulacijskom krugu ECMO-a najčešća je mehanička komplikacija [19%]. Veliki ugrušci velikog volumena mogu uzrokovati greške na oksigenatoru, nastanak potrošne koagulopatije, plućne ili sustavne embolije. Još donedavno, heparinom obloženi ECMO sustavi korišteni su za smanjenje učestalosti ovih komplikacija. Uvođenje kanile u jugularnu venu može uzrokovati njezino oštećenje te posljedično može i medijastinalno krvarenje. Uvođenje kanile kroz karotidnu arteriju može uzrokovati oštećenje intime arterije te uzrokovati disekciju luka aorte. Prisutnost zraka u cirkulacijskom krugu ECMO-a može se manifestirati u nekoliko malih mjehurića te uzrokuje premještanje venske kanile, ali može biti uvelike prisutan te uzrokovati i masivnu zračnu emboliju. Greška na oksigenatoru postoji kada je znatno smanjena izmjena kisika i ugljičnog dioksida ili kada je došlo do nastanka potrošne koagulopatije. U takvim stanjima potrebno je hitno zamijeniti membranski oksigenator. Tijekom ECMO-a može nastati pukotina u cijevnome sustavu. Ova je komplikacija danas opsolenta, posebice od uvođenja tzv. Tygon-cijevi. Kvar na pumpi može biti uzrokovan nezadovoljavajućim venskim povratkom u organizam. Greška na grijaču može uzrokovati hipotermiju. Kvar na cijelom cirkulacijskom ECMO-u, uključujući izvor kisika i miješalice, uzrokuje kvar na monitorima i sustavima zaštite. U slučaju kvara cijelog cirkulacijskog kruga odmah je potrebno postaviti stezaljkuna vensku liniju, otvoriti most/premosnicu i postaviti stezaljku na arterijsku liniju te odvojiti ECMO od bolesnika. Bolesnik je ovisan o potpornoj ventilaciji te je odmah potrebno uključiti 100%-ni kisik [FiO₂] ili postaviti plinske vrijednosti bolesnika na vrijednosti prije početka liječenja s ECMO sustavom.

Medicinske komplikacije - ECMO

Neurološke komplikacije uključuju toničko-kliničke grčeve. Intrakranijalno krvarenje i ishemija mogu biti uzrokovane podvezivanjem karotidne arterije, sustavne heparinizacije, trombocitopenije, koagulopatije ili sistoličke hipertenzije. Hemoragijske komplikacije uključuju krvarenja i znatno smanjenje broja trombocita. Zbog sustavne heparinizacije katkad može nastati hemoliza, potrošna koagulopatija, krvarenje na mjestu kirurškog reza, na mjestu uvođenja kanile ili na mjestu prethodnog invaziv-

nog dijagnostičkog postupka, kao i intratorakalno, abdominalno ili retroperitonealno krvarenje. Smanjenje broja trombocita nastaje zbog smanjene proizvodnje, povećane potrošnje, sekvestracije ili razrjeđivanja. Srčane komplikacije uključuju poremećaj istisnog kapaciteta miokarda, koji se definira kao skraćenje/pad rada lijeve klijetke za 25% pri početku ECMO-a, a vraća se na normalne vrijednosti nakon 48 sati ECMO-a. Nadalje, hipertenzija je opasna komplikacija zbog rizika od nastanka krvarenja i moždanog udara. Srčana aritmija može se pojaviti kao posljedica hipoksije i neravnoteže elektrolita. Opisana je i pojava tamponade perikarda.

Komplikacije mogu nastati u pojavi infekcije i sepse, jer cirkulacijski ECMO krug predstavlja veliko intravaskularno strano tijelo, a učestala manipulacija dijelovima sustava povećava rizik od nastanka sepse.

Metaboličke su komplikacije:

- acidoza ili alkalozia;
- hiperkalijemija ili hipokalijemija;
- hipernatremija ili hiponatrijemija;
- hiperkalcemija ili hipokalcemija;
- hiperglikemija ili hipoglikemija.

Liječenje uporabom ECMO-a može izmijeniti koncentraciju lijekova u serumu zbog povećana volumena u potrebnoj raspodjeli lijeka.

Akutna kardiorespiracijska dekompenzacija može nastati zbog:

- tamponada perikarda [iz krvi ili zraka];
- tenzionog pneumotoraksa ili hemotoraksa;
- respiratorne greške;
- ishemije miokarda;
- elektrolitne neravnoteže;
- masivnog krvarenja;
- neželjenih učinaka lijekova;
- tvrdokorne sepse.

Odvikavanje/probno razdoblje bez ECMO-a

Postupak odvajanja od ECMO-a počinje kada nastaje zadovoljavajuća kardiopulmonalna funkcija, izostanak znakova upale, poboljšanje RTG nalaza pluća, sniženja vrijednosti povišenih plućnih tlakova, oporavak izmjene plinova u plućima.

Sniženje protoka kroz ECMO ovisi o laboratorijskim vrijednostima čimbenika miješane venske krvi.

Kriteriji su za odvajanje bolesnika od ECMO-a:

- 1] sposobnost očuvanja saturacije venske krvi iznad 65%, arterijske iznad 90% pri protoku ECMO-a od 1,5l/min, te ventilator s FiO₂ ispod 80% i PEEP niži od 7mm Hg.
- 2] Neki kliničari prakticiraju [osobito u slučaju V-A sustava], potpuni prekid rada ECMO-a tijekom 15-30 min. za evaluaciju stanja bolesnika. U slučaju ponovne potrebe uključuju ECMO na 2-3 sata te ponavljaju postupak. Pri V-V sustavu isključuje se oksigenacija preko membrane, dok se protok ostavlja u zadanome vremenu. Kad se ECMO napokon prekine, vade se kanile iz vena.

Kod bolesnika kod kojih je glavna dijagnoza prije početka terapije sustavom ECMO bila uzrokovana respiracijskim poremećajem [zatajenje dišnog sustava], probno razdoblje bez ECMO-a nastaje:

- 1] bolesnik pokazuje prikladnu izmjenu plinova uz zadovoljavajuće ventilacijske čimbenike;
- 2] bolesnik tolerira brzinu protoka pumpe od 10-20 mL / kg / min. uz minimum 200 ml / min. Postoje znatna individualna odstupanja u odvikavanju, kao i u duljini potrebnog liječenja prije postavljanja indikacije za početak probnog razdoblja.

Mortalitet i morbiditet - ECMO

Prema objavljenim statističkim rezultatima recentnih studija, stopa smrtnosti bolesnika liječenih s ECMO sustavom nije se promijenila tijekom proteklog desetljeća. Prediktori povećane stope smrtnosti za bolesnike koji su liječeni sustavom ECMO jesu:

- Bolesnici s primarnom dijagnozom kongenitalne dijafragmalne hernija (congenital diaphragmatic hernia-CDH) i totalnog anomalnog utoka plućnih vena (total anomalous pulmonary venous returns TAPVR) imaju stopu smrtnosti od 50%;
- Oko 50% smrtnih ishoda nastaje kada se pojavi komplikacija teškog krvarenja;
- Stopa smrtnosti visoka je u dojenčadi porođajne težine manje od 2000 g.

Kod djece koja su liječena uporabom ECMO-a, verificirane su veće stope opetovane hospitalizacije. Kod tih bolesnika povećana je stopa liječenja s uporabom kisika, i to 28 dana poslije završetka liječenja sustavom ECMO, a povećana je i incidencija nastanka bronhalne astme.

U djece koja su bila liječena uporabom ECMO-a katkad se mogu pojaviti smetnje u peroralnoj ishrani. Prema podacima randomiziranih studija, ova pojava verificirana je u oko 30% bolesnika. Somatski rast u djece koja su bila liječena ECMO-om nije poremećen. Nastanak epilepsije opisan je učestalošću do 2%.

Senzoneuralni poremećaji - ECMO

Stopa senzoneuralnih poremećaja u djece koja su bila liječena uporabom ECMO-a prosječne je vrijednosti od 6% [raspon 2-18%]; zastoj u razvoju opisuje se incidencijom od 9% [raspon, 0-21%]. Patološki moždano slušni-evocirani potencijali [BAER] s blagim do umjerenim elevacijama bilježe se u 25% djece poslije liječenja uporabom ECMO-a. Opisane promjene spontano nestaju. Gubitak sluha do prve godine starosti zabilježen je u 9% [raspon, 4-21%] djece nakon terapije ECMO-om.

Tijekom liječenja ECMO-om ne preporučuju se rutinski oftalmološki pregledi zato što do danas nisu zabilježeni slučajevi pojave retinopatije. U rijetkim slučajevima, u novorođenčadi s porođajnom težinom manjom od 2 kg u kojoj je upotrijebljen ECMO, oftalmološki pregled potrebno je učiniti prije otpusta djeteta s bolničkog liječenja. Naime u takve djece nedavne studije opisuju mogućnost nastanka kortikalnog oštećenja vida s tendencijom totalnog oporavka tijekom vremena.

Psihosocijalni morbiditet - ECMO

Psihosocijalni morbiditet uključuje češće socijalne probleme, teškoće u učenju u školskoj dobi i više stope u nastanku poremećaja deficita pozornosti u djece koja su bila liječena sustavom ECMO. Treba napomenuti da je liječenje uporabom ECMO-a za članove obitelji dramatičan i vrlo invazivan postupak; mogu se osjećati izolirano ako nema i drugih bolesnika kod kojih je u uporabi ECMO u istoj instituciji. Kada dijete navrší godinu dana, razina stresa majke djeteta koje se liječi ECMO-om jednaka je razini stresa članova obitelji u kojoj je dijete rođeno prije termina porođaja. Do pete godine djetetova života razina stresa majke i članova obitelji ne razlikuje se od one u obiteljima u kojima dijete nije liječeno uporabom ECMO-a.

Neurorazvojni poremećaji - ECMO

Neuralni poremećaji zabilježeni su u rasponu od blage hipotonije do spastične kvadripareze. Glass i suradnici u recentnoj studiji usporedili su rezultate neuralnih razvojnih poremećaja kod 103 novorođenčeta koja su bila liječena uporabom ECMO-a i 37 novorođenčadi koja nisu bila liječena uporabom ECMO-a, i to u djece od pet godina [11]; pojedinačno nije zabilježeno odstupanje u vrijednostima koje bi potvrdilo povećanje stope poremećaja kvocijenta inteligencije i verbalnih poremećaja u djece koja su liječena ECMO-om. Kada su uspoređivani rezultati kao grupne vrijednosti, postoji znatno povećanje mogućnosti nastanka invalidnosti u djece koja su liječena uporabom ECMO-a [96 vs 115].

Lijekovi ECMO

Kod bolesnika koji se liječe uporabom ECMO-a, tijekom kirurškog zahvata treba upotrijebiti aminokapričku kiselinu, i to zbog smanjenja krvarenja. Kod bolesnika na ECMO-u u svrhe sedacije potrebno je uporabiti minimalne doze fentanila, midazolama, ili morfija. Doze inotropnih lijekova [dopamin, dobutamin, epinefrin] uvriježeno se mogu smanjiti kod bolesnika koji se nalaze na ECMO-u. Treba ordinirati diuretike kao što furosemid (Lasix) i klorotiazid (Diuril radi uklanjanja viška tekućine iz tkiva. Nastanu li krvarenja u gastroenterološkom sustavu, treba ordinirati antacide i H2 antagoniste. Pri pojavi epileptičkih grčeva u terapiju treba uvesti fenobarbiton. Kada postoji indikacija za uporabu antibiotika, uvode se preparati ampicilina i cefotaksima. Doziranje antibiotika treba modificirati ovisno o patogenosti uzročnika infekcije i osjetljivosti bolesnikova organizma na administrirani antibiotik. Treba napomenuti da, što dulje traje terapija ECMO-om, veća je mogućnost nastanka komplikacija.

Zdravstvena njega / sestrinska skrb bolesnika i ECMO/ECLS

Sigurnosne mjere koje provodi medicinska sestra-tehničar kod bolesnika na terapiji ECMO/ECLS-om jesu:

- 1] **Njega bolesnika** – redovitom i potpunom njegom bolesnika medicinska sestra -tehničar dobiva cjelokupnu sliku o bolesniku - opservacija / procjena potreba;

- 2] **Monitoring** - bolesnik je spojen na invazivni monitoring [HR, EKG, RR, CVT, PAP, Swan–Ganz kateter], saturacija [SpO₂], tjelesna temperatura, satna diureza;
- 3] **Korekcija nalaza** - redovita kontrola nalaza (arterijski i miješani venski) u dogovoru s liječnikom određuje vrijednost ACT-a.
- 4] **EKG** - bilježi svaku promjenu u EKG-u;
- 5] **ECMO sustav** - praćenje zadanog protokola, nužno je provjeriti položaj kanila da ne bi došlo do „knikanja“ te redovito opservirati mjesto kanilacije [krvarenje, infekcija];
- 6] **Mehanička ventilacija** - toaleta traheobronhalnog stabla, kontrola zadanih parametara [alarmi], respiracijskih parametara;
- 7] **Lijekovi** - svi lijekovi trebaju biti provjereni, jasno obilježeni prije davanja, pravilno uskladišteni; stalna provjera doziranja lijekova, brzine infuzije, mjesta davanja - puta primjene, vremena davanja;
- 8] **Dokumentacija** - sve što radimo, radimo timski, posebnosti se bilježe u listu bolesnika, dokumentira se pismeno u primopredaju te predaje usmeno;
- 9] **Procjena jakosti boli** - VAS ljestvica;
- 10] **Enteralna prehrana** - peroralna ili uporabom sonde, naziv dijete ili pripravka, količina kalorija i vode;
- 11] **Periferija i koža** - boja, vlažnost, temperatura i prokrvljenost, kapilarno punjenje, kirurška rana, ozljede, hematomi, dekubitus, edemi;
- 12] **Položaj kanila** - osigurati položaj kanila bez ikakve napetosti, kanile su fiksirane u tijeku sredine noge;
- 13] **Praćenje ulaznog mjesta kanile** - mjesto insercije, stanje kože, sterilni prevoj pokriven prozirnom pokrivkom radi kontinuirane inspekcije mjesta insercije [ostavlja mjesto vidljivim], provjera znakova upale, infekcije i krvarenja;
- 14] **Pomak kanile** - bitno je zabilježiti vanjsku dužinu kanile kako bi se eventualni pomak mogao na vrijeme ispraviti, stoga je nužno izvijestiti liječnika o svakoj promjeni položaja;
- 15] **Praćenje cijelog sustava** - duž cijelog sustava, kruga, prate se konekcije te je li bilo svijanja - „knikanja“ cijevi; važno je zabilježiti postojanje mjehurića zraka u sustavu i pojavu ugrušaka, i u cijevima, i u oksigenatoru;
- 16] **Praćenje lokalnog statusa ekstremiteta** - provjeravati postoje li znakovi venske tromboze, arterijske ishemijske, sindroma mišićnih odjeljaka [Compartment sindrom], kontinuirano mjeriti i bilježiti opseg noge [bilateralna usporedba zabilježenih vrijednosti].

Kontinuiranom procjenom bolesnikova općeg stanja i prikupljanjem i bilježenjem podataka, medicinska sestra-tehničar ima uvid u opće i specifično stanje bolesnika te je apsolutno samostalna u provođenju zdravstvene njege u skladu sa svim pravilima struke.

Metoda

U članku se opisuju sve potrebne radnje/metode/postupci iz znanosti o zdravstvenoj njezi, utemeljeni na recentnim i znanstveno verificiranim podacima iz svjetske literature te

prikupljeni osobnim iskustvom. Osobno iskustvo utemeljeno je na uporabi najnovijih načela zdravstvene njege o sigurnosti bolesnika, i to od studenog 2008. godine do travnja 2012. godine na 33 bolesnika.

Rezultati

U tijeku 41-og mjeseca [od studenoga 2008 do travnja 2012.] metode/postupci zdravstvene njege bili su u uporabi na 33 bolesnika u čijem je tijeku liječenja postavljena indikacija za uporabu ECMO-a.

Demografski podaci:

Od 33 bolesnika 28 bolesnika bilo je starije od 18. godina.

Od 33 bolesnika 5 bolesnika bilo je mlađe od 18. godina.

Ishodi liječenja:

Opća vrijednost uspješnosti ECMO metode:

Od 33 bolesnika 11 ih je u cijelosti izliječeno [11/33-(42,2%); 3 mlađe od 18 godina].

Specifični ishod:

Preživjeli: [n=11 (30,3%), 4 u postupku transplantacije; 7 u fazi oporavka od liječenja ECMO sustavom [1 bolesnik je kandidat za transplantaciju];

Umrli: 22 [66,6%].

Napomena: Od mjeseca veljače do mjeseca travnja 2012. godine dva bolesnika bila su u režimu produljenje uporabe ECMO-a [postreanimacijski-ishod - umrli].

Zaključak

Kompetencije medicinske sestre - tehničara kod bolesnika koji se liječe uporabom ECMO/ECLS-a uporaba je najnovijih metoda/postupaka zdravstvene njege radi sprečavanja svih neželjenih komplikacija. Potrebna je trajna edukacija, prihvaćanje i razumijevanje novih znanja o metodama i postupcima zdravstvene njege, ali istodobno i svih tehnoloških poboljšanja i noviteta u liječenju bolesnika koji su na ECMO/ECLS-u. Za poboljšanje ishoda liječenja i osobnog rada potrebna je minuciozna tehnika bilježenja rezultata osobnog rada prema smjernicama koje su opisane u članku, ali i stalna nadgradnja. Ovaj članak služi kao vodilja za daljnju nadgradnju znanja iz znanosti o sestinstvu radi povećanja stupnja sigurnosti bolesnika.

Literatura

- [1] Von Segesser LK, Killer I, Jenni R, Lutz U, Turina M. Improved distal circulatory support for repair of descending thoracic aortic aneurysms. *Ann Thorac Surg* 1993;56: 1373–1380.
- [2] Schachner T, Nagiller J, Zimmer A, Laufer G, Bonatti J. Technical problems and complications of axillary artery cannulation. *Eur J Cardiothorac Surg* 2005;27:634–637.
- [3] Von Segesser LK, Jegger D, Mucciolo G, Tozzi P, Mucciolo A, Delay D, Mallabiabarrena I, Horisberger J. The smartcanela™: a new tool for remote access in limited access cardiac surgery. *Heart Surg Forum* 2005;8:E241–E245.
- [4] Von Segesser LK. Cardiopulmonary support and extracorporeal membrane oxygenation for cardiac assist. *Ann Thorac Surg* 1999;68:672–677.
- [5] Von Segesser LK, Westaby S, Pomar J, Loisanche D, Groscurth P, Turina M. Less invasive aortic valve surgery: rationale and technique. *Eur J Cardiothorac Surg* 1999;15: 781–785.

- [6] Bonatti J, Schachner T, Bonaros N, Laufer G. A new exposure technique for the circumflex coronary artery system in robotic totally endoscopic coronary artery bypass grafting. *Interact CardioVasc Thorac Surg* 2006;5:279–281.
- [7] Tevaeearai HT, Mueller XM, Jegger D, Ruchat P, Von Segesser LK. Venous drainage with a single peripheral bicaval cannula for less invasive atrial septal defect repair. *Ann Thorac Surg* 2001;72:1772–1773.
- [8] Jegger D, Tevaeearai HT, Horisberger J, Mueller XM, Boone Y, Pierrel N, Seigneul I, Von Segesser LK. Augmented venous return for minimally invasive open heart surgery with selective caval cannulation. *Eur J Cardiothorac Surg* 1999;16:312–316.
- [9] Mueller XM, Mallabiabarrena I, Mucciolo G, Von Segesser LK. Optimized venous return with a self-expanding cannula: from computational fluid dynamics to clinical application. *Interact CardioVasc Thorac Surg* 2002;1:23–27.
- [10] Jegger D, Corno AF, Mucciolo A, Mucciolo G, Boone Y, Horisberger J, Seigneul I, Jachertz M, Von Segesser LK. A prototype paediatric venous cannula with shape change in situ. *Perfusion* 2003;18:61–65.
- [11] Mueller XM, Tevaeearai HT, Jegger D, Horisberger J, Mucciolo G, Von Segesser LK. A new expandable venous cannula for minimal access heart surgery. *Ann Thorac Surg* 2002; 74; S1330–1333.
- [12] Jegger D, Chassot PG, Bernath MA, Horisberger J, Gersbach P, Tozzi P, Delay D, Von Segesser LK. A novel technique using echocardiography to evaluate venous cannula performance peri-operatively in CPB cardiac surgery. *Eur J Cardio thorac Surg* 2006;29: 525–529.
- [13] Delay D, Lardi C, Jaussi A, Von Segesser LK. Hepato-atrial anastomosis, 'the other Senning operation' for treatment of Budd-Chiari syndrome. *Swiss Med Wkly* 2005;135: 235–237.
- [14] Corno AF, Horisberger J, Jegger D, Von Segesser LK. Right atrial surgery with unsnared inferior vena cava. *Eur J Cardiothorac Surg* 2004;26:219–220.
- [15] Mejak BL, Stammers A, Rauch E, Vang S, Viessman T. A retrospective study on perfusion incidents and safety devices. *Perfusion* 2000;15:51–61.
- [16] Gates JD, Bichell DP, Rizzo RJ, Couper GS, Donaldson MC. Thigh ischemia complicating femoral vessel cannulation for cardiopulmonary bypass. *Ann Thorac Surg* 1996;61:730–733.
- [17] Jegger J, Horisberger J, Boone Y, Jachertz M, Seigneul I, Augstburger M, Von Segesser LK. In vivo analysis of the Smartcannula® for assisted venous drainage. *Swiss Perfusion* 2003;12:22–25.
- [18] Corno AF. Systemic venous drainage: can we help Newton. *Eur J Cardiothorac Surg* 2007;31:1044–1051.
- [19] Kirsch MEW, Kostantinos Z, Ali F, Vermes E, Bajan G, Loisanse DY. Kinetic assisted venous drainage for orthotopic heart transplantation in patients under mechanical circulatory support: a double-edged sword. *Eur J Cardiothorac Surg* 2008;33:418–423.
- [20] Tevaeearai HT, Mueller M, Jegger D, Ruchat P, Von Segesser LK. Venous drainage with a single peripheral bicaval cannula for less invasive atrial septal defect repair. *Ann Thorac Surg* 2001;72:1772–1773.
- [21] Wenger RK, Bavaria JE, Ratcliffe MB, Bogen D, Edmunds LH Jr. Flow dynamics of peripheral venous catheters during extracorporeal membrane oxygenation with a centrifugal pump. *J Thorac Cardiovasc Surg* 1988;96:478–484.
- [22] Mueller XM, Tevaeearai HT, Horisberger J, Augstburger M, Burki M, Von Segesser LK. Vacuum assisted venous drainage does not increase trauma to blood cells. *Asaio J* 2001;47:651–654.
- [23] Von Segesser LK. Peripheral cannulation for cardiopulmonary bypass. *Multimedia Man Cardiothorac Surg* 2006. doi: 10.1510/mmcts.2005.001610.
- [24] Von Segesser LK. Cardiopulmonary support and extracorporeal membrane oxygenation for cardiac assist. *Ann Thorac Surg* 1999;68:672–677.
- [25] Jegger D, Tevaeearai HT, Mueller XM, Horisberger J, Von Segesser LK. Limitations using the vacuum-assist drainage technique during cardiopulmonary bypass procedures. *J Extra Corpor Technol* 2003;35:207–211.
- [26] Mueller XM, Mallabiabarrena I, Mucciolo G, Von Segesser LK. Optimized venous return with a self-expanding cannula: from computational fluid dynamics to clinical application. *Interact CardioVasc Thorac Surg* 2002;1:23–27.