

Zelená dialýza: koncept snižování environmentálního dopadu v dialyzační léčbě

MUDr. Vladimír Vojanec¹; MUDr. František Švára, Ph.D.²

¹ B. Braun Avitum CZ

² B. Braun Avitum CZ; Klinika nefrologie 1. LF UK a VFN v Praze

SOUHRN

Hemodialýza patří mezi zdrojově náročné formy chronické zdravotní péče. Vedle klinické účinnosti a bezpečnosti léčby proto nabývá na významu také její environmentální a ekonomická udržitelnost. Významnou část environmentální stopy dialyzační péče představují spotřeba vody a energie, jednorázové materiály, výroba a distribuce dialyzačních koncentrátů, nakládání s odpady a doprava. Koncept zelené dialýzy nespočívá v jednom technologickém řešení, ale v systematické optimalizaci celého provozu – od návrhu a energetického managementu budovy přes přípravu dialyzační vody a distribuci koncentrátů až po organizaci provozu a volbu parametrů léčby. Řada těchto opatření může současně snižovat environmentální stopu, provozní náklady a pracovní zátěž personálu. Podmínkou každé optimalizace však musí být zachování bezpečnosti, kvality a klinické účinnosti dialyzační léčby.

KLÍČOVÁ SLOVA: hemodialýza – dialyzační technologie – dialyzační roztok – hemodiafiltrace – voda – energie – odpady – udržitelnost

Úvod

Poskytování zdravotní péče je obor lidské činnosti s významným environmentálním dopadem. Zdravotní péče je odpovědná za 5,2 % globálních emisí skleníkových plynů (greenhouse gases, GHG).¹ Podíl péče o pacienty s onemocněním ledvin na tomto environmentálním dopadu je disproporcionální, tzn. vyšší, než by odpovídalo počtu léčených pacientů a objemu poskytované péče. Tato disproporce vzniká dominantně při poskytování náhrady funkce ledvin (KRT) dialyzačními metodami.

Hemodialýza a peritoneální dialýza (PD) patří mezi nejnáročnější léčebné metody z hlediska zdrojů, a to kvůli jejich opakujícímu se charakteru, vysoké spotřebě energie a vody, závislosti na jednorázových materiálech a navazující produkci odpadu. Environmentální zátěž nevzniká pouze během samotného ošetření. Zahrnuje rovněž výrobu a distribuci spotřebního materiálu, přípravu dialyzační vody, vytápění a chlazení budov, dopravu pacientů a materiálu a následné nakládání s odpady. Problematika environmentální udržitelnosti proto získává v nefrologii rostoucí význam.^{2,3}

Mezinárodní iniciativa Kidney Disease: Improving Global Outcomes (KDIGO) věnovala v roce 2025 problematice

zelené dialýzy samostatnou konferenci a v následném konsenzu zdůraznila potřebu snižovat environmentální dopad dialyzační péče při současném zachování její dostupnosti, bezpečnosti a kvality.³

Zelenou dialýzu, tzn. realizaci KRT se sníženým environmentálním dopadem, je proto vhodné chápat nikoli jako samostatnou ekologickou aktivitu, ale jako součást moderního řízení kvality dialyzačního provozu. Prakticky lze opatření rozdělit do čtyř vzájemně propojených oblastí: energeticky efektivní infrastruktura, hospodaření s vodou, redukce materiálových toků a odpadu a provozní a klinická optimalizace.

Kvantifikace environmentálního dopadu při poskytování zdravotní péče

Kvantifikace environmentálního dopadu v péči o pacienty s onemocněním ledvin a srovnání jednotlivých léčebných modalit jsou klíčovými východiskem pro vytvoření strategie, kterou je možné tento environmentální dopad redukovat. Environmentální dopad péče o pacienty s chronickým onemocněním ledvin (CKD) je mimo jiné určen současnou epidemiologickou situací a její prognózou. Kvalifikované odhady předpokládají, že CKD v současnosti postihuje 788 mi-

lionů osob⁴ a je třetí nejrychleji rostoucí příčinou mortality⁵. Některou z metod KRT je léčeno téměř 5 milionů osob.⁴

Konkrétní environmentální dopad poskytované léčebné péče lze obecně kvantifikovat analýzou životního cyklu (LCA). Jde o mezinárodně standardizovaný přístup, který hodnotí širokou škálu dopadů na životní prostředí v průběhu celého životního cyklu produktu, procesu nebo služby, přičemž zohledňuje veškeré energetické a materiálové vstupy a výstupy v každé fázi.⁶ Výstupem LCA je vyjádření environmentálního dopadu v tunách ekvivalentu oxidu uhličitého (t CO₂e), a to i v situaci, kdy je v průběhu LCA produkován jiný plyn nebo faktor, který přispívá ke globálnímu oteplování, tzn. má potenciál globálního oteplování (GWP). Toto je sice hlavní, ale nikoli jediná komponenta možného environmentálního dopadu poskytování zdravotní péče. Dalšími dopady mohou být např. znečištění s přímou nebo zprostředkovanou toxicitou pro populaci nebo životní prostředí.

Analýza LCA je nejčastěji realizována pomocí metodického postupu známého pod názvem GHG Protocol, který vznikl koncem 90. let jako společná iniciativa organizací World Resources Institute (WRI) a World Business Council for Sustainable Development (WBCSD). V současnosti slouží jako základ pro korporátní reporting udržitelnosti a je klíčovým nástrojem pro snižování environmentálního dopadu, mj. také ve zdravotnictví. Produkce GHG, resp. celkový environmentální dopad vyjádřený v t CO₂e, se z pohledu této metodiky dělí do tří skupin:

- **Scope 1** (přímé emise, 10–15 %): vytápění plynem, úniky anestetických plynů, palivo pro sanitky;
- **Scope 2** (nepřímé emise z energií, 10–15 %): nakoupená elektřina pro přístroje (výpočetní tomografie, magnetická rezonance, HD monitory), osvětlení a chlazení;
- **Scope 3** (ostatní nepřímé emise, 70–80 %): dodavatelský řetězec, výroba a distribuce léků, distribuce dialyzačních koncentrátů, jednorázové plasty, doprava pacientů.

Je tedy zřejmé, že větší část environmentálního dopadu při poskytování zdravotní péče vzniká *de facto* mimo vlastní zdravotnické zařízení, a to zejména v oblasti výroby zdravotnických prostředků, logistiky a odpadového hospodářství.

Výše uvedené rozdělení je typické pro nemocnice, tzn. poskytovatele zdravotní péče s hospitalizační péčí. Lze odůvodněně předpokládat, že při poskytování ambulantní dialyzační léčby bude tato disproporce ještě výraznější.

Environmentální dopad jednotlivých terapeutických modalit v léčbě CKD vykazuje významné rozdíly, a to jak mezi jednotlivými metodami KRT, tak mezi regiony. Roční emise GHG při léčbě jednoho pacienta pomocí hemodialýzy v dialyzačním středisku se pohybují v rozmezí 3,3–10,2 t CO₂e.^{7,8} Naproti tomu studie z Austrálie uvádí, že emise GHG při léčbě PD jsou výrazně nižší, a to průměrně 1,5–2,7 t CO₂e ročně pro kontinuální ambulantní PD a 2,4–4,5 t CO₂e pro automatizovanou PD.⁹ Tato data potvrzuje model emisí GHG při léčbě PD ve více než 10 zemích, který kvantifikoval produkci GHG na 1,3–1,8 t CO₂e pro kontinuální ambulantní PD a 4,3–5,5 t CO₂e pro automatizovanou PD.

V této studii byla také publikována data popisující produkci GHG v různých regionech při transplantaci léčbě CKD, která nepřekvapivě dosahovala nejnižších hodnot ze všech metod KRT, a to v rozmezí 0,3–2,2 t CO₂e na pacientorok.¹⁰

Komplexní pohled na problematiku environmentálního dopadu KRT poskytuje recentní práce z Kanady.¹¹ Tato studie kvantifikuje environmentální dopad komplexně (tzn. nejen dominantní emise GHG) a srovnává tři hlavní metody KRT za použití identické metodiky, což při použití dat z různých publikací není vždy zaručeno. Pouze s jednou výjimkou má ve všech sledovaných podkategoriích nejvyšší environmentální dopad hemodialýza, významně nižší je environmentální dopad peritoneální dialýzy a nejnižší environmentální dopad má transplantace ledviny.

Výsledky uvedených studií na toto téma jsou vysoce konzistentní. Dosud existuje minimum publikací, které by posuzovaly environmentální dopad domácí hemodialýzy (HHD), lze ale předpokládat, že tato metoda bude vykazovat podobné hodnoty a dopady jako domácí automatizovaná PD.

Energeticky efektivní dialýza

Hemodialýza prováděná v dialyzačním středisku zůstává dominantní metodou KRT ve vyspělých zemích. Transplantace ledviny poskytuje excelentní klinické výsledky a je i preferovanou metodou z pohledu environmentálního dopadu, její dostupnost je ale stále limitována počtem ledvin určených k transplantaci. Zastoupení PD a HHD se mezi jednotlivými zeměmi a regiony významně liší, ve vyspělých zemích ale nejsou dominantními metodami.

Jak je již uvedeno výše, vlastní dialyzační léčba se na environmentálním dopadu KRT podílí minoritně.

Významná část energetické spotřeby, a tím i environmentálního dopadu dialyzačního pracoviště, nesouvisí přímo s dialyzační procedurou, ale s provozem budovy a technologického zázemí. Jde zejména o vytápění, chlazení, větrání, přípravu vody, osvětlení a provoz informačních a dalších technických systémů.

U nových dialyzačních středisek i při rozsáhlejší rekonstrukci je proto vhodné řešit energetickou účinnost již ve fázi projektu. Mezi základní opatření patří kvalitní tepelně-technické vlastnosti budovy, vhodné stínění a orientace objektu, řízené větrání se zpětným získáváním tepla a efektivní zdroj vytápění a chlazení.

Významnou úlohu mají systémy měření a regulace, které umožňují přizpůsobovat provoz budovy skutečnému využití jednotlivých prostor. Dialyzační pracoviště má obvykle dobře předvídatelný denní režim, což vytváří vhodné podmínky pro automatizaci energetického managementu.

Další možností je využití tepelných čerpadel, odpadního tepla technologických zařízení nebo výroba elektrické energie pomocí fotovoltaických systémů. U denních a dvousměnných provozů se může časový profil výroby fotovoltaické elektrárny příznivě překrývat s profilem spotřeby střediska. Reálný ekonomický efekt však vždy závisí na místních podmínkách, velikosti zařízení a charakteru spotřeby.

Při rozhodování o investici by proto neměla být hodnocena pouze pořizovací cena, ale celkové náklady v průběhu životního cyklu technologie.

Voda jako strategická surovina

Vysoká spotřeba vody v průběhu dialyzační léčby je pro léčbu selhání ledvin do značné míry specifická. Zatímco produkce, logistika a odpadové hospodářství jsou z větší části společné i jiným oborům poskytovaní zdravotní péče, spotřeba vody při realizaci dialyzační léčby je environmentálním faktorem, který se v podobné míře v jiných oborech nevyskytuje. Hospodaření s vodou tudíž patří k nejvýznamnějším oblastem zelené dialýzy. Příprava dialyzační vody vyžaduje nejen objem vody použitý pro tvorbu dialyzačního roztoku, ale také vodu spotřebovanou při její úpravě, proplachování a dezinfekci systému. Moderní přehledy proto označují vodní management za jednu z hlavních oblastí, kde lze environmentální dopad hemodialýzy redukovat.²

Snížení spotřeby vody při dialyzační léčbě lze dosáhnout několika způsoby. Významným zdrojem potenciálních úspor je koncentrát reverzní osmózy, tedy voda odváděná při procesu úpravy vody. Podíl této vody se mezi jednotlivými systémy liší podle konstrukce zařízení, kvality a teploty vstupní vody a nastavení systému. Pokud její chemické vlastnosti odpovídají zamýšlenému způsobu použití, lze ji využít pro nepitné účely – například pro splachování WC, úklid nebo zavlažování. Takový systém však vyžaduje samostatnou akumulaci a rozvod a jeho ekonomická smysluplnost musí být posouzena podle skutečného množství získané vody, místních cen vodného a stočného a nákladů na potřebnou infrastrukturu.

Další rezervu může představovat optimalizace provozu reverzní osmózy mimo dobu dialýzy. Moderní zařízení mohou umožňovat automatizované úsporné režimy a programované proplachy. Jejich použití musí vždy respektovat konstrukci systému, doporučení výrobce a hygienické a validační požadavky.

Moderní systémy přípravy dialyzační vody umožňují automatizovanou tepelnou dezinfekci rozvodu permeátu a u některých konfigurací také navazujících částí dialyzační technologie. Tepelná dezinfekce může omezit použití chemických dezinfekčních prostředků, snížit množství chemického odpadu a redukovat riziko reziduální chemické kontaminace. Automatizace současně standardizuje průběh dezinfekčního procesu a snižuje potřebu manuálních zásahů.

Environmentální přínos je však nutné hodnotit společně s energetickou náročností tepelného cyklu. Optimální řešení proto musí vycházet z celkové provozní a hygienické bilance konkrétního systému. Zásadním principem zůstává, že úspory vody nesmí být dosaženo na úkor chemické nebo mikrobiologické kvality vody používané při dialyzační léčbě.

Dialyzační koncentráty a materiálové toky

Významnou část environmentální zátěže dialyzačního provozu představují jednorázové materiály a jejich logistika.

Jednou z oblastí s potenciálem významné redukce materiálových toků je způsob přípravy a distribuce kyselého dialyzačního koncentrátu.

Konvenční systém založený na jednotlivých kanystrech je spojen s výrobou, dopravou, skladováním, manipulací a následnou likvidací velkého množství obalového materiálu. Významným faktorem je rovněž skutečnost, že při distribuci hotového kapalného koncentrátu se přepravuje nejen účinná složka, ale také značné množství vody. To zvyšuje přepravovanou hmotnost a objem, nároky na logistiku a skladování a nepřímou také environmentální stopu dopravy. Alternativu představuje centrální příprava koncentrátu ze suché směsi přímo na dialyzačním pracovišti a jeho následná distribuce k jednotlivým dialyzačním monitorům. V takovém případě je voda potřebná k přípravě koncentrátu přidána až v místě spotřeby, takže v dodavatelském řetězci není nutné přepravovat její značný objem.

Recentní analýza životního cyklu z University Medical Center Utrecht porovnála systém jednorázových kanystrů s centrální distribucí kyselého koncentrátu připravovaného ze suché směsi ve vratných obalech. V podmínkách analyzovaného pracoviště došlo k přibližně 58% snížení uhlíkové stopy související s distribucí koncentrátu. Hlavními faktory byly redukce obalového materiálu a snížení přepravované hmotnosti a objemu.¹²

Výsledek samozřejmě nelze automaticky převést na každé dialyzační centrum. Skutečný přínos závisí na počtu výkonů, použité technologii, dopravních vzdálenostech, systému zásobování, nakládání s odpady a životnosti zařízení. Studie však ukazuje, že způsob přípravy a distribuce koncentrátu může mít měřitelný environmentální význam.

Vedle snížení množství odpadu mohou centrální systémy přinášet i provozní výhody: redukci skladovacích nároků, omezení manipulace s jednotlivými kanystry, snížení interní logistiky a úsporu pracovního času personálu. Z pohledu celého dodavatelského řetězce je významná také skutečnost, že se namísto objemného hotového kapalného koncentrátu přepravuje převážně suchá složka potřebná k jeho přípravě.

Odpadové hospodářství

Hemodialýza vytváří významné množství jednorázového odpadu. Jedním z nejjednodušších opatření proto zůstává důsledná separace jednotlivých kategorií odpadu. Materiál, který podle platných pravidel nemusí být zařazen mezi infekční odpad, by v této kategorii neměl končit pouze z důvodu provozního zjednodušení. Likvidace infekčního zdravotnického odpadu je ekonomicky i environmentálně náročnější než nakládání s běžným odpadem.

Další možností je redukce nadbytečných obalů, preference materiálově úspornějších produktů a větší zohlednění environmentálních parametrů při nákupu zdravotnických prostředků. Vedle ceny, kvality a bezpečnosti se může postupně stát relevantním parametrem také množství použitého materiálu, způsob balení, doprava a možnost recyklace.

Klinická optimalizace: bezpečnost pacienta na prvním místě

Určitý prostor ke snížení spotřeby vody a koncentrátů existuje také při nastavování vlastní dialyzační léčby. Příkladem může být individualizace průtoku dialyzačního roztoku nebo optimalizace parametrů hemodiafiltrace (HDF), zejména krevního průtoku a rychlosti infuze substitučního roztoku.

Environmentální kritérium však nesmí být primárním důvodem pro volbu léčebné strategie. Například volba mezi prediluční a postdiluční HDF musí být především výsledkem klinické indikace, charakteristik cévního přístupu, hemokoncentrace a požadované účinnosti léčby.

Environmentální náročnost má smysl posuzovat až mezi klinicky ekvivalentními a bezpečnými alternativami. Stejný princip lze aplikovat obecně: nejde o to poskytovat co nejméně zdrojově náročnou dialýzu, ale dosáhnout potřebného klinického výsledku s nejnižší rozumně dosažitelnou spotřebou zdrojů.

Tento přístup vedl k definici konceptu tzv. hodnoty udržitelnosti (value of sustainability) v poskytování zdravotní péče,¹³ kterou je možné vyjádřit zlomkem:

$$\text{hodnota udržitelnosti} = \frac{\text{výsledky péče pro pacienta a společnost}}{\text{environmentální, sociální a finanční dopady}}$$

Ekonomika zelené dialýzy

Environmentální opatření bývají někdy vnímána jako dodatečný náklad. V dialyzačním provozu však ekologická a ekonomická efektivita často působí stejným směrem. Voda, energie, jednorázové materiály, doprava, skladování a odpad představují současně environmentální zátěž i provozní náklad.

Při hodnocení investic je proto vhodné rozlišovat pořizovací investiční náklady (capital expenditures, CAPEX), pravidelné provozní náklady (operating expenditures,

OPEX) a celkové náklady na vlastnictví technologie v průběhu její životnosti.

Investice například do úspornější přípravy vody, energetického managementu budovy, fotovoltaiky nebo centrální distribuce koncentrátů by proto neměla být hodnocena pouze podle pořizovací ceny. Do kalkulace je vhodné zahrnout úsporu vody a energie, náklady na servis, spotřební materiál, dopravu, skladování, likvidaci odpadu a v relevantních případech také pracovní čas personálu.

Ne každé ekologické opatření bude ekonomicky výhodné na každém pracovišti. Rozdílná velikost střediska, počet směn, ceny energií a vody nebo místní logistika mohou pořadí priorit výrazně změnit.

Smysluplným prvním krokem je proto jednoduchý provozní audit založený na několika měřitelných ukazatelích: spotřebě vody a elektrické energie na jedno ošetření, množství odpadu na jedno ošetření, spotřebě koncentrátů a provozních nákladech vztažených k počtu výkonů.

Závěr

Koncept snižování environmentálního dopadu náhrady funkce ledvin, tzv. zelená dialýza, není jedním technologickým řešením, ale způsobem systematického řízení dialyzačního provozu. Největší potenciál mají opatření, která současně redukuje spotřebu vody, energie a jednorázových materiálů, snižují množství odpadu a zjednodušují provoz.

Environmentální hledisko přitom nelze oddělit od ekonomiky a kvality péče. Pokud lze stejného klinického výsledku dosáhnout s nižší spotřebou zdrojů, menším množstvím odpadu a nižší provozní zátěží, nejde pouze o ekologickou iniciativu, ale o projev technologicky a ekonomicky vespělého dialyzačního provozu.

Bezpečnost pacienta a kvalita léčby musejí zůstat hlavním kritériem každého rozhodnutí. Při splnění této podmínky může být snižování environmentální stopy dialýzy současně cestou ke zvýšení dlouhodobé efektivity a ekonomické udržitelnosti nefrologické péče.

LITERATURA

- Romanello M, Di Napoli C, Drummond P, et al. The 2022 report of the Lancet Countdown on health and climate change: health at the mercy of fossil fuels. *Lancet* 2022;400:1619–1654.
- Backston KJ, Thompson CJ, Raina M, et al. Green dialysis review: reducing water, energy, and waste. *Hemodial Int* 2025;29:463–471.
- Barracough KA, Berman-Parks N, Jha V, et al. Green dialysis: environmentally sustainable care, growth, and innovation: conclusions from a Kidney Disease: Improving Global Outcomes (KDIGO) Controversies Conference. *Kidney Int* 2026;110:42–60.
- Mark P, Stafford L, Grams M, et al.; GBD 2023 Chronic Kidney Disease Collaborators. Global, regional, and national burden of chronic kidney disease in adults, 1990–2023, and its attributable risk factors: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2023. *Lancet* 2025;406:2461–2482.
- Foreman KJ, Marquez N, Dolgert A, et al. Forecasting life expectancy, years of life lost, and all-cause and cause-specific mortality for 250 causes of death: reference and alternative scenarios for 2016–40 for 195 countries and territories. *Lancet* 2018;392:2052–2090.
- Hauschild MZ, Rosenbaum RK, Olsen SI (eds.). *Life Cycle Assessment: Theory and Practice*. Cham: Springer International Publishing; 2018.
- Connor A, Lillywhite R, Cooke MW. The carbon footprints of home and in-center maintenance hemodialysis in the United Kingdom. *Hemodial Int* 2011;15:39–51.
- Lim AEK, Perkins A, Agar JWM. The carbon footprint of an Australian satellite haemodialysis unit. *Aust Health Rev* 2013;37:369–374.
- McAlister S, Talbot B, Knight J, et al. The carbon footprint of peritoneal dialysis in Australia. *J Am Soc Nephrol* 2024;35:1095–1103.
- Garcia Sanchez JJ, Barracough KA, Cases A, et al. Using chronic kidney disease as a model framework to estimate healthcare-related environmental impact. *Adv Ther* 2025;42:348–361.
- Saleem S, Stigant C, Rajan T, et al. Environmental impacts of kidney replacement therapies: a comparative lifecycle assessment. *Am J Kidney Dis* 2026;87:65–74.e1.
- Tsai CL, Fehintola A, Crooijmans G, et al. Sustainable and accessible hemodialysis: life cycle assessment on central acid delivery system. *BMC Nephrol* 2025;26:619.
- Mortimer F, Isherwood J, Wilkinson A, Vaux E. Sustainability in quality improvement: redefining value. *Future Healthc J* 2018;5:88–93.