

OPIS PRZYPADKU / CASE STUDY

Otrzymano/Submitted: 25.11.2023 • Zaakceptowano/Accepted: 20.02.2024

© Akademia Medycyny

Tomografia Impedancyjna stosowana w optymalizacji wentylacji po zakończeniu terapii ECMO – opis przypadku i przegląd literatury***Impedance Tomography application to optimize ventilation after completing ECMO therapy – case report and literature review***

Jakub Równy¹, Piotr Jakubów^{1,2}, Szymon Kocańda², Grzegorz Juszczak^{2,3}, Weronika Przontka¹, Michał Kopacz⁴, Karolina Niedźwiecka², Aleksander Turczynowicz¹, Julia Kondracka¹, Iwona Dmitruk², Tomasz Hirnle²

¹ Klinika Anestezjologii i Intensywnej Terapii Dzieci i Młodzieży z Pododdziałem Pooperacyjnym i Leczenia bólu, Uniwersytet Medyczny w Białymstoku

² Klinika Kardiologii, Uniwersytet Medyczny w Białymstoku

³ Klinika Anestezjologii i Intensywnej Terapii, Uniwersytet Medyczny w Białymstoku

⁴ Międzyuczelniane Centrum Nowych Technik i Technologii Medycznych, Politechnika Krakowska

Streszczenie

Wstęp. Ocena stanu dynamicznego płuc podczas prowadzenia technik wspomaganie wymiany gazowej np. zastosowania ECMO jest bardzo utrudniona. Elektryczna Tomografia Impedancyjna jest nieinwazyjną metodą obrazowania tkanki płucnej pozwalającą na przyłóżkową, dynamiczną ocenę wentylacji, co odróżnia ją od standardowych metod wizualizacji płuc dających obrazowanie statyczne. **Cel pracy.** Przedstawiamy przypadek 73-letniego pacjenta oddziału Kardiologii, u którego rozwinął się ARDS, a użycie Elektrycznej Tomografii Impedancyjnej (EIT) do oceny wentylacji i do wyznaczenia właściwego PEEP pozwoliło na zakończenie terapii ECMO. **Dyskusja.** Zastosowanie EIT pozwoliło na ilościowe określenie regionalnego zaangażowanie pęcherzyków płucnych w wymianę gazową, jak też uwidocznili regiony nadmiernego rozdęcia oraz zapadnięcia się tkanki płucnej. Dodatkowo możliwe było wyznaczenie optymalnego poziomu PEEP w respiratorze co pozwoliło na prowadzenie wentylacji pacjenta z chorymi płucami bez wspomaganie ECMO. **Wnioski.** Najważniejszym efektem zastosowania pomiarów EIT jest możliwość indywidualnego dopasowania parametrów wentylacji pacjenta. *Anestezjologia i Ratownictwo 2024; 18: 24-31. doi:10.53139/AIR.20241801*

Słowa kluczowe: Tomografia Impedancyjna, ARDS, wentylacja mechaniczna, nadciśnienie płucne

Abstract

Introduction. Lung condition assessment is difficult while performing gas exchange support techniques such as ECMO. Electrical Impedance Tomography is a device for non-invasive, radiation-free lung tissue imaging that allows for a bedside, dynamic ventilation monitoring, which distinguishes it from standard methods of lung tissue visualization that provide static imaging. **Purpose of the study.** The case of a 73-year-old patient admitted to the Cardiac Surgery Department who developed ARDS is presented where the use of Electrical Impedance Tomography (EIT) to assess ventilation and to determine appropriate PEEP level enabled the completion of ECMO therapy. **Discussion.** The use of EIT made it possible to quantificate the regional involvement of the alveoli in gas

exchange, as well as to visualize the excessive inflation regions and the lung tissue collapse. Additionally, it allowed to determine the optimal PEEP level in the ventilator, which allowed for the ventilation of a patient with diseased lungs without ECMO support. **Conclusions.** The most important effect of the EIT measurements application is the ability to individually adjust the patient's ventilation parameters. *Anestezjologia i Ratownictwo 2024; 18: 24-31. doi:10.53139/AIR.20241801*

Keywords: *Impedance Tomography, ARDS, mechanical ventilation, pulmonary hypertension*

Wstęp

Elektryczna Tomografia Impedancyjna (ang. *Electrical Impedance Tomography* - EIT) jest nieinwazyjną metodą obrazowania pozwalającą na przybliżoną ocenę wentylacji płuc bez narażenia na promieniowanie [1]. Teoretyczne podstawy tej techniki wskazują na możliwość ilościowego określenia regionalnego zaangażowania pęcherzyków płucnych w wymianę gazową, jak też uwidocznienie patologii wentylacji mechanicznej w postaci obszarów nadmiernego rozdęcia, czy też zapadnięcia się tkanki płucnej u pacjentów z chorymi płucami [2]. Obrazowanie stanu płuc wynika z proporcjonalnej zależności pomiędzy upowietrznieniem tkanek klatki piersiowej a jej impedancją elektryczną [3] mierzoną zmianami potencjału prądu elektrycznego między szeregiem 32 elektrod umieszczonych na klatce piersiowej pacjenta. Zasada działania opiera się na powtarzającym się cyklu, w którym jedna z elektrod wysyła impuls elektryczny do klatki piersiowej, a pozostałe elektrody mierzą natężenie prądu, który do nich dotarł, następnie kolejna elektroda przejmie rolę nadajnika, a proces ten przebiega ciągle w czasie rzeczywistym, co umożliwia dynamiczny pomiar parametrów. Urządzenie oblicza wahania impedancji prądu krążącego między elektrodami, a zastosowany algorytm, szacuje na podstawie zebranych danych liczbę zrekrutowanych pęcherzyków płucnych oraz podatność tkanki płucnej, co pozwala na ich przedstawienie w postaci dwuwymiarowego obrazowania tomografii klatki piersiowej. Obszary upowietrznione tkanki płucnej charakteryzują się wyższą impedancją niż obszary gorzej wentylowane, zawierające więcej tkanek uwodnionych [1]. Za wartość bazową "0" tomograf przyjmuje przedział całkowicie pozbawiony powietrza. Dużą zaletą urządzeń do EIT jest łatwość instalacji i obsługi, która poziomem trudności nie przewyższa poprawnego wykonania badania elektrokardiograficznego. Elektrody służące do wykonania pomiarów umieszczone są w pasie,

który przyklejany jest poprzecznie na wysokości IV przestrzeni międzyżebrowej, choć pomiaru możemy dokonywać w każdym miejscu klatki piersiowej, uzyskując nieco odmienne rezultaty. Zakres oceny obejmuje poprzeczny przekrój klatki piersiowej do 7,5 cm w górę i w dół od osi pasa elektrod, a wyświetlane wyniki są średnią arytmetyczną z powyższej objętości. Należy pamiętać, że wszelkie urządzenia elektryczne czy elektroniczne, a także przewody zaburzają precyzję dokonywanych pomiarów. Posiadanie przez pacjenta wszczepialnych kardiowerterów-defibrylatorów oraz stymulatorów stanowi przeciwwskazanie do użycia EIT, jako że urządzenia te mogą rozpoznawać prąd wykorzystywany do pomiarów jako zaburzenia czynności elektrycznej serca [1]. Podstawowym przykładem użycia EIT jest wyznaczanie Dodatniego Ciśnienia Końcowo-Wydechowego (Positive End-Expiratory Pressure - PEEP) u pacjentów poddawanych wentylacji mechanicznej. Warto zauważyć, że w porównaniu strategii stosowania wysokich oraz niskich wartości PEEP brak jest wyraźnej przewagi, a dowody przemawiające za każdą z nich są niskiej oraz umiarkowanej pewności [4]. Technika ustalania indywidualnie optymalnego PEEP przedstawia się następująco:

U pacjenta wentylowanego mechanicznie poddanego ciągłemu obrazowaniu EIT programowane są parametry respiratora tak, aby prężność tlenu, dwutlenku węgla oraz pH krwi tętniczej zawierały się w granicach normy. Następnie na respiratorze zostaje ustawiony wysoki PEEP (okolice 20-25 cmH₂O) i zapisywane są uzyskane z tomografu wartości: podatności płuc, procentu zapadniętych oraz rozдутých pęcherzyków płucnych. Kolejnym krokiem jest obniżanie ustawień PEEP o niewielką, stałą wartość i powtarzanie odczytu pomiarów. Ostatni pomiar wyznacza wartość PEEP <5 cmH₂O. Z odczytanych wartości wybierany jest równoważny stan pomiędzy zapadnięciem, a rozдутciem pęcherzyków płucnych i daną wartość PEEP. Tak ustalona wartość PEEP jest zalecana pacjentowi jako optymalna. Następnie rekomenduje się pozostawienie pacjenta, pod

ciągłym monitorowaniem przez 24h w celu dokonania ewentualnych korekt wartości wentylacji., jednak należy odnotować, że przy długim okresie utrzymywania pasa istnieje ryzyko powstania odleżyn, dlatego część autorów proponuje powtórzenie pomiarów jednorazowo po upływie 24 godzin zamiast ciągłego zapisu, kontrolując jednocześnie gazometrię krwi tętniczej, aby uzyskać pewność, że dobrany PEEP jest optymalny.

Cel pracy

Celem pracy jest przedstawienie przypadku skutecznego użycia Elektrycznej Tomografii Impedancyjnej na Oddziale Anestezjologii i Intensywnej Terapii (OAiT) przy Klinice Kardiologii w celu dostosowania parametrów wentylacji mechanicznej podczas eksplantacji wspomagania ECMO (*Extracorporeal Membrane Oxygenation*). Dodatkowo przeanalizowano wskazania innych zastosowań tej metody u pacjentów oddziałów Anestezjologii i Intensywnej Terapii (AiIT)

Opis przypadku

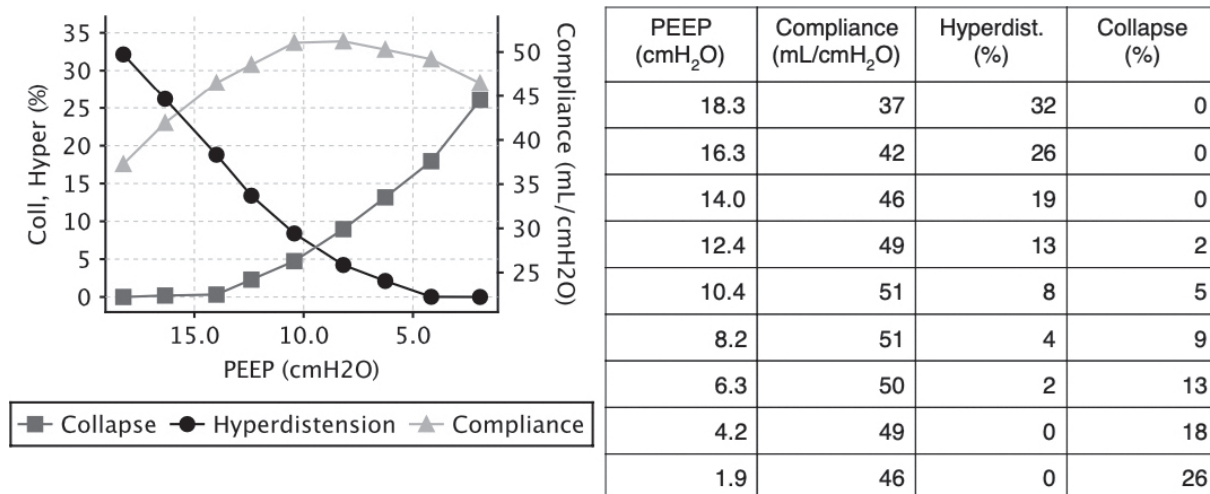
Do Kliniki Kardiologii przyjęto 73-letniego pacjenta ze stwierdzoną chorobą niedokrwienną serca w przebiegu hipercholesterolemii, migotaniem przedsionków oraz tętniakiem aorty wstępującej zakwalifikowanego do operacji tętniaka metodą Bentalla oraz rewaskularyzacji naczyń wieńcowych CABG (*Coronary-Aorta Bypass Graft*) i ablacji żył płucnych. Pacjent cierpiał ponadto na nadciśnienie tętnicze. U pacjenta oceniono ryzyko operacyjne w skali EUROSCORE II jako średnie. Zabieg kardiologiczny przeprowadzono w znieczuleniu ogólnym złożonym z zastosowaniem krążenia pozaustrojowego. W jego trakcie oraz w bezpośrednim okresie pooperacyjnym nie stwierdzono komplikacji. Po początkowej poprawie stanu ogólnego, zakończono wentylację mechaniczną, pacjenta ekstubowano i przekazano na Oddział Kardiologii. W kolejnych dobach wystąpiły objawy nasilonej infekcji ogólnoustrojowej z cechami niewydolności wielonarządowej. Z powodu narastającej hipoksemii pacjenta powtórnie zaintubowano i zastosowano wentylację mechaniczną wymagającą wysokich wartości tlenu w respiratorze. Zlecono antybiotykoterapię szerokowachlarzową, farmakologiczne wsparcie krążenia oraz włączono dializę przyłózkową CVVHDF w trybie Ca-Cl. W kolejnych dobach w badaniu radiologicznym obraz płuc odpo-

wiadał zmianom o typie ARDS (*Acute Respiratory Distress Syndrome*) z ogromnym nasileniem hipoksemii nie reagującej na typowe leczenie w warunkach oddziału AiIT. Wobec malejącej saturacji, pomimo wentylacji 100% tlenem w mieszaninie oddechowej i braku poprawy po zmianach trybu wentylacji, zdecydowano o zastosowaniu natlenienia pacjenta metodą ECMO (*Extra Corporeal Membrane Oxygenation*) żylna-żylna. W ciągu następnych dni kontynuowano leczenie stanu krytycznego w warunkach OIT uzyskując stabilizację stanu ogólnego i poprawę parametrów wentylacji. Po tygodniowym stosowaniu wspomagania ECMO i ustabilizowaniu stanu chorego, zdecydowano o zakończeniu pozaustrojowego natleniania krwi, z zamierzeniem kontynuacji możliwie skutecznej wentylacji dodatnim ciśnieniem. Redukcję wspomagania ECMO przeprowadzono pod kontrolą EIT w warunkach OIT na łóżku chorego, w celu ustalenia adekwatnych parametrów wentylacji mechanicznej, natomiast eksplantacji kaniul dokonano na bloku operacyjnym.

Ocena dynamiki wentylacji płuc EIT podczas redukcji wspomagania ECMO

Podczas procedury eksplantacji ECMO monitorowano: elektrokardiogram, pulsoksymetrię, kaptopometrię, rzut serca metodą ciągłą Deltex (ODM), prowadzono inwazyjny pomiar ciśnienia tętniczego krwi, wykonywano badania gazometrii krwi tętniczej oraz ponadstandardowo dokonano pomiaru zmian impedancji elektrycznej tkanki płucnej przy użyciu EIT. Celem monitorowania zmian rzutu serca stosowano urządzenie Deltex (ODM) dokonujące ciągłego pomiaru przy wykorzystaniu sondy umieszczonej w przełyku. Pozwoliło to na adekwatne, ciągłe monitorowanie zmian hemodynamicznych. Początkowo przepływ tlenu w oksygenatorze ECMO zredukowano do 50%. Nie pogorszyło to stanu pacjenta, wobec czego zabieg kontynuowano, dalej redukując przepływ tlenu. Ustalanie właściwych pacjentowi parametrów wentylacji rozpoczęto od manewru rekrutacji pęcherzyków. W kolejnym kroku przeprowadzono miareczkowanie właściwego poziomu PEEP składające się z 9 kroków przedstawionych na rycinie 1.

Rycina 1 przedstawia tabelę z zawartymi w niej wartościami liczbowymi danych z EIT podczas manewru miareczkowania PEEP. W pierwszej kolumnie tabeli po prawej znajduje się wybrana wartość PEEP, obok wyliczona podatność płuc wyrażona w przyroście



Rycina 1. Tabela oraz wykres danych odczytanych z EIT

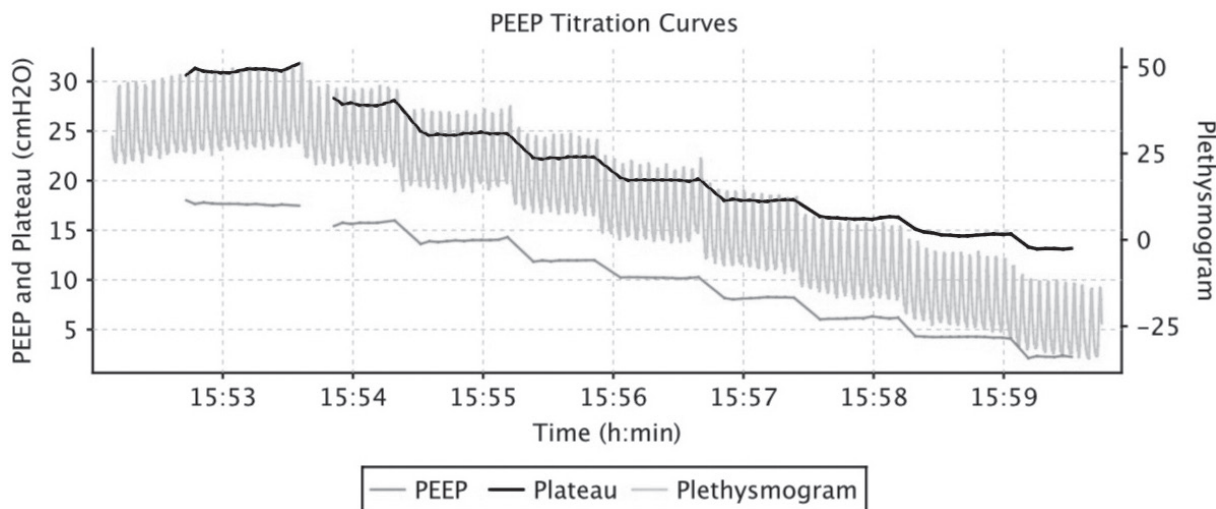
Figure 1. The table and the figure presenting data collected from the EIT

objętości tkanki płucnej na każdy 1 cmH₂O wzrostu ciśnienia (*compliance*). Ponadto wyliczony jest procent nadmiernie rozдутых pęcherzyków płucnych oraz odsetek zapadniętych. Na podstawie tych wartości powstał wykres, po lewej, składający się z trzech krzywych przypisanych każdemu z podanych wyżej parametrów impedancyjnych. Wyliczona optymalna wartość PEEP znajduje się na przecięciu się krzywych rozдутcia i zapadnięcia pęcherzyków płucnych. U badanego pacjenta wyliczona optymalna wartość PEEP wynosiła 10,4 cmH₂O.

Proces miareczkowania PEEP

Początkowo PEEP został ustawiony na 18 cmH₂O a następnie dokonano oceny parametrów krytycznych dla pracy płuc - Rozдутcia i zapadania pęcherzyków płuc oraz podatności. W pierwszym pomiarze wartości przedstawiały się następująco: Hyperdistention – 32%, Collapse – 0%, Compliance – 37 ml/cmH₂O. Następnie powtarzano pomiary zmniejszając stopniowo wartość PEEP jak to widnieje na rycinie 2.

Rycina 2 przedstawia krzywą miareczkowania PEEP w odniesieniu do pletyzmogramu. Na osi rzęd-



Rycina 2. Krzywa miareczkowania poziomu PEEP

Figure 2. The curve presenting PEEP titration process

nych po lewej stronie przedstawiono poszczególne wartości PEEP zmierzone przez EIT, po prawej skale wartości pletyzmograficznych EIT. Na osi odciętych zaznaczony jest przedział czasu, w którym programowana była wartość PEEP.

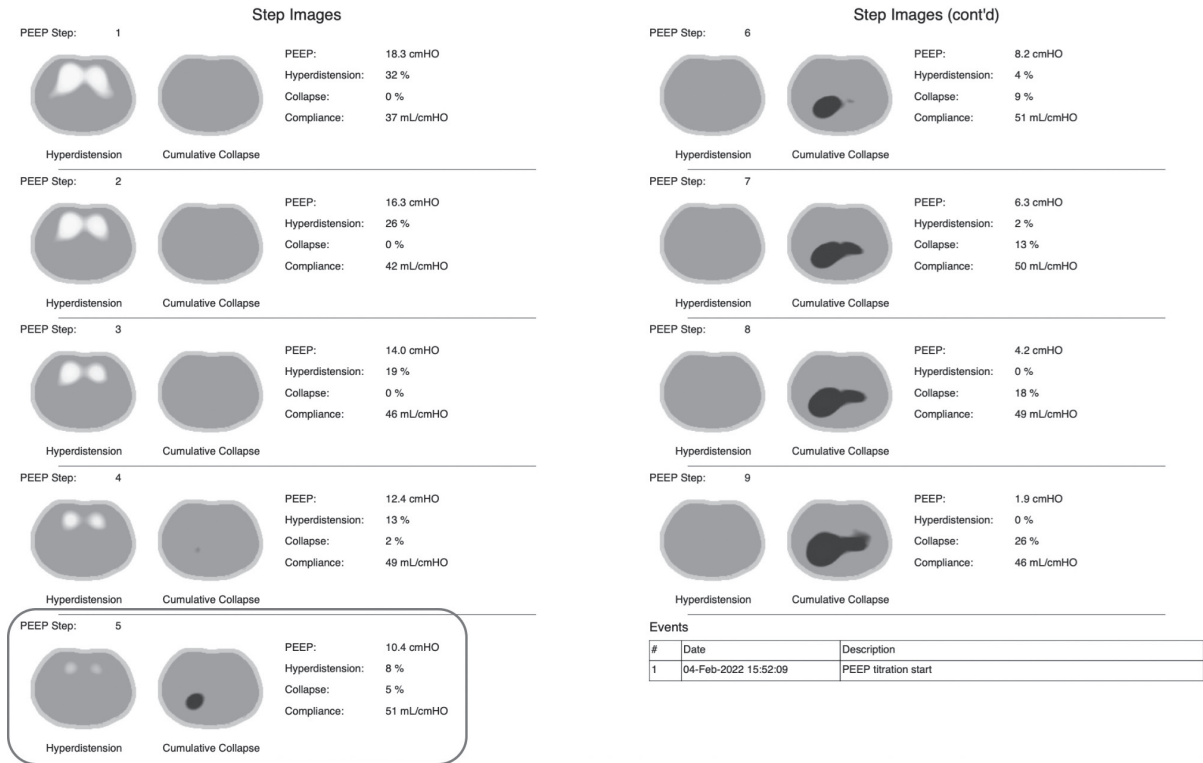
Łączny czas pomiarów wyniósł około 8 min. Za najlepsze warunki wentylacji pacjenta uznano $PEEP = 10,4 \text{ cmH}_2\text{O}$, będący kompromisem pomiędzy rozdęciem, a zapadnięciem tkanki płucnej, przy czym warto zwrócić uwagę, iż obie wartości były w tym miejscu minimalne (rycina 1). Po ustaleniu optymalnej wartości PEEP w ostatnim etapie zabiegu zredukowano rzut ECMO do 0%. Po obserwacji stanu klinicznego oraz przy zachowanym stabilnym stanie pacjenta usunięto kaniule i zaopatrzono rany. Pacjenta pozostawiono pod ciągłym monitorowaniem Tomografii Impedancyjnej na kolejne 24 godziny w celu ewentualnej korekty parametrów wentylacji, jednak taka potrzeba nie zaszła. Należy wspomnieć, że u pacjenta w 2 dobie obecności pasa elektrod w jego miejscu dostrzeżono niewielkie zmiany odleżynowe wymagające jego repozycji. Z przeprowadzonej proce-

dury powstał zapis obrazu dynamiki zmian wentylacji w tkance płucnej przedstawiony na rycinie 3.

Wizualizacje przedstawione na rycinie 3 pokazują rzeczywisty obraz zmian parametrów w przedziale czasu. Na rycinie utrwalone zostały obrazy tomografii impedancyjnej płuc pacjenta z podczas manewru miareczkowania PEEP. Przedstawiono zmiany impedancji mierzone przez urządzenie przy kolejnych poziomach PEEP. Obrazy przedstawiają ilość nadmiernie rozdętej tkanki płucnej oraz procent zapadniętych pęcherzyków płucnych. W ramce zaznaczono najniższe wartości rozdętych jak i zapadniętych pęcherzyków co pozwoliło na wybór pomiaru jako optymalnego PEEP.

Obrazy z lewej strony graficznie przedstawiają ilość nadmiernie rozdętej tkanki płucnej, natomiast obok nich uwidacznia się procent zapadniętych pęcherzyków płucnych. Wizualizacje pokazują rzeczywisty obraz zmian parametrów w przedziale czasu.

Dodatkowym parametrem oceny był zapis wideo z wygenerowanego dynamicznego obrazu wypełnienia płuc powietrzem. Zapis ten monitorował równomierność rozkładu wentylacji w poszczególnych regionach



Rycina 3. Obrazy tkanki płucnej generowane przez EIT podczas ustalania optymalnego PEEP
Figure 3. Lung tissue images displayed on the EIT during PEEP titration process

płuc. Zapis jest przydatny w ocenie wpływu ułożenia pacjenta na rozkład wentylacji. Ponieważ pacjent był ułożony na plecach i nie zmieniano pozycji ułożenia pacjenta, parametr dynamicznego rozkładu wypełnienia płuc w zależności od pozycji nie był analizowany.

Dyskusja / Omówienie przypadku

Zespół Ostrej Niewydolności Oddechowej jest podstawową jednostką leczoną w warunkach OIT, a jego leczenie obarczone jest znaczną śmiertelnością. Literatura podaje różne dane epidemiologiczne, w 2016 z 10% pacjentów Oddziałów Intensywnej Terapii ze stwierdzoną niewydolnością oddechową 1/3 chorych zmarła [5]. Wentylacja mechaniczna daje tym pacjentom czas na regenerację i jest ratunkiem w ciężkiej hipoksemii, a zastosowanie dodatniego Ciśnienia Końcowo-Wydechowego zmniejsza stres tkanki płucnej poddawanej naprzemiennemu zapadaniu i rozprężaniu [5,6]. Wyższe wartości PEEP zazwyczaj poprawiają utlenowanie krwi tętniczej, z drugiej jednak strony wraz z jego wzrostem rośnie energia przekazywana płucom przez respirator co może przyczynić się do uszkodzenia płuc określanego jako VILI (*Ventilator Induced Lung Injury*) [5,7]. Dane z piśmiennictwa wskazują, że wykorzystanie EIT może skrócić czas trwania wentylacji mechanicznej i zapobiec uszkodzeniu płuc w wyniku nadmiernego rozciągnięcia lub niedodmy płuc. Ponadto za pomocą EIT można wykryć zapadnięcie płuc lub zaburzenia dystrybucji powietrza podczas manewru rekrutacyjnego, co może pomóc w leczeniu [8]. Ponadto zastosowanie EIT pozwala na właściwy dobór parametrów wentylacji [9].

Podobne wnioski uzyskaliśmy po analizie zastosowania EIT u naszego pacjenta. Literatura wskazuje, że optymalne dobranie PEEP u pacjentów z ARDS już na wczesnym etapie wentylacji mechanicznej przyspiesza powrót funkcji narządów oraz redukuje śmiertelność [8]. Sprawia również, iż energia przyjmowana przez płuca podczas wentylacji dodatnim ciśnieniem ulega zmniejszeniu, podczas gdy wysoka energia przedłuża okres pobytu pod respiratorem oraz obniża przeżywalność pacjentów [10,11]. Jedną ze strategii poprawy stanu pacjentów i zmniejszenia śmiertelności jest pozycja na brzuchu (*Prone Position*) [12]. W tym ułożeniu zaobserwowano znaczne różnice w optymalnym PEEP w stosunku do standardowej pozycji ocenione w EIT, które pozwala ocenić, czy pacjent odniesie korzyść z takiej pozycji [13]. W opisanym przypadku ze

względem na ranę po torakotomii przedniej po zabiegu kardiochirurgicznym ułożenie pacjenta na brzuchu celem poprawy wentylacji nie było wykonalne. W celu zapewnienia odpowiedniej saturacji krwi tlenem stosowano u chorego wspomaganie ECMO wobec drastycznej hipoksemii i nieadekwatnego utlenowania innymi technikami. Po okresie ustabilizowania pacjenta i planach wyłączenia wspomagania obawiano się powrotu niewydolności oddechowej i konieczności wentylacji wysokimi ciśnieniami w drogach oddechowych, co stwarzałoby ryzyko uszkodzenia płuc i powrotu do wspomagania ECMO. Ryzyko nierównomiernej wentylacji i niedodmy płuc oraz możliwość uszkodzenia płuc przez respirator w przypadku stosowania nieadekwatnego ciśnienia w drogach oddechowych u skrajnych pacjentów, wymusza poszukiwanie metody adekwatnej oceny wentylacji. Stosowanie nadmiernie wysokiego ciśnienia w drogach oddechowych podyktowane koniecznością zapewnienia natlenowania krwi może zniweczyć poprawę kliniczną, dlatego podjęto decyzję o kontrolnym obrazowaniu wentylacji płuc przy użyciu EIT. Zastosowanie tej techniki okazało się skuteczne w ustaleniu odpowiednich parametrów wentylacji, szczególnie optymalnego PEEP i pozwoliło na skuteczne zakończenie terapii ECMO. W literaturze anestezjologicznej występują nieliczne opisy wykorzystania EIT podczas eksplantacji ECMO i ustalania parametrów wentylacji po zakończonym wspomaganie ECMO w respiratorze, istnieje natomiast wiele opisów o korzystnym zastosowaniu EIT podczas prób odłączenia pacjenta od terapii respiratorem [14,15]. Z piśmiennictwa wynika, że nawet 20% prób zakończenia wspomaganie respiratorem kończy się niepowodzeniem, a związane jest to z niedoskonałością dotychczas stosowanych metod oceny pacjentów [16]. Zaobserwowano, że w grupie pacjentów z sukcesem odłączonych od respiratora parametry impedancji mierzonej przez EIT różniły się istotnie od parametrów obserwowanych u pacjentów, u których nie udało się zakończyć wentylacji mechanicznej [17]. Stwarza to możliwość przewidywania na podstawie pomiarów impedancji szans powodzenia powrotu na oddech spontaniczny pacjenta. Czułość i specyficzność tej metody określono na wyższą od uzyskiwanej w pośrednich metodach oceny prawdopodobieństwa sukcesu m. in. gazometrii krwi tętniczej [17]. Pereira SM et al. badali przydatność EIT w grupie pacjentów poddawanych zabiegom w znieczuleniu ogólnym [18]. Opisana została ocena upowietrznienia płuc pacjentów

dokonana po wybudzeniu (obrazowana w tomografii komputerowej) w której porównano grupę z PEEP ustalonym przy pomocy EIT z niezmienną wartością 4 cmH₂O uzyskując jednoznacznie lepsze rezultaty końcowe w postaci mniejszych obszarów niedodmy [18]. Ponadto wykazano, że u pacjentów z indywidualnie dobranym PEEP obniżeniu ulega ciśnienie napędowe wentylacji (*driving pressure*) w porównaniu z grupą kontrolną, a skorelowane było to z mniejszym zapadaniem się pęcherzyków płucnych podczas wydechu [18]. Wg danych z piśmiennictwa, różnica ta rośnie wraz ze wzrostem BMI (*Body Mass Index*) pacjenta [18]. U pacjentów wentylowanych z użyciem zindywidualizowanego PEEP uzyskuje się wyższy współczynnik PaO₂/FiO₂, a także wyższą końcowo-wydechową objętość płuc, szczególnie w przypadku operacji laparoskopowych, dodatkowo zwiększa to jednorodność rozkładu wentylacji płuc [19]. Tomografia impedancyjna klatki piersiowej pozwala nie tylko na ocenę upowietrzenia płuc, ale również na wykrycie i pomiar fali pulsu z tętnicy płucnej, co daje możliwość oszacowania PAP (*Pulmonary Artery Pressure*). Choć metoda ta nie jest powszechna i ma skąpe zastosowanie kliniczne, to w badaniu na zdrowych ochotnikach wykazano, że po odpowiedniej kalibracji charakteryzuje się podobną precyzją co ocena ciśnienia w tętnicy płucnej przy użyciu echokardiografii przezklatkowej, będąc przy tym metodą tańszą oraz pozwalającą na ciągły pomiar [20]. Istotnym, choć nielicznym, ograniczeniem metody EIT oceny PAP jest jednak duża wrażliwość na prawidłowe zamocowanie pasa elektrod [21]. Pamiętając, że ARDS powoduje wzrost oporu naczyń płucnych, mogący prowadzić do dysfunkcji prawej komory możliwość ciągłego nieinwazyjnego pomiaru zarówno upowietrzenia płuc jak i równolegle PAP jest warta uwagi [22]. Warto ponadto zwrócić uwagę również na szerokie stosowanie EIT w badaniach klinicznych. Jako urządzenie pomiarowe do oceny klatki piersiowej pozwala, w sposób nieinwazyjny dla pacjenta oraz personelu, zebrać rzetelne dane na

temat wpływu różnych technik wentylacji, ułożenia, czy chirurgii pacjentów na rozprężanie tkanki płucnej oraz efektywność wentylacji [23-25].

Wnioski

Elektryczna Tomografia Impedancyjna jest nieinwazyjnym, bezpiecznym sposobem oceny dynamicznej funkcji płuc dającym możliwość pomiaru ciągłego praktycznie bez szkody dla pacjenta, szeroko wykorzystywanym w badaniach klinicznych. Wykazano pozytywną wartość jej zastosowania przy optymalizacji wentylacji mechanicznej pacjentów z ARDS oraz poddawanych zabiegom w znieczuleniu ogólnym, a ciągły rozwój technologii daje nowe możliwości jej zastosowania mogące przyczynić się do poprawy jakości leczenia pacjentów oraz rozwoju zabiegowych dziedzin medycyny. Przytoczony opis przypadku ukazuje realną korzyść, jaką odniósł pacjent z wykonania badania trwającego 8 minut.

Konflikt interesów / Conflict of interest

Brak/None

ORCID:

Piotr Jakubów 0000-0002-5680-9146

Szymon Kocańda 0000-0003-1156-0284

Karolina Niedźwiecka 0000-0001-9211-4328

Aleksander Turczynowicz 0000-0002-6344-5096

Adres do korespondencji / Correspondence address

✉ Piotr Jakubów

Klinika Anestezjologii i Intensywnej Terapii Dzieci i Młodzieży z Pododdziałem Pooperacyjnym i Leczenia bólu

Uniwersytecki Dziecięcy Szpital Kliniczny

w Białymstoku

ul. Jerzego Waszyngtona 17, 15-274 Białystok

☎ (+48 85) 74 50 549

✉ piotr.jakubow@umb.edu.pl

Piśmiennictwo/References

1. Putensen C, Hentze B, Muenster S, Muders T. Electrical Impedance Tomography for Cardio-Pulmonary Monitoring. *J Clin Med*. 2019;8(8):1176. doi: 10.3390/jcm8081176. PMID: 31394721; PMCID: PMC6722958.
2. Victorino JA, Borges JB, Okamoto VN, et al. Imbalances in regional lung ventilation: a validation study on electrical impedance tomography. *Am J Respir Crit Care Med*. 2004;169(7):791-800. doi: 10.1164/rccm.200301-133OC. Epub 2003 Dec 23. PMID: 14693669.

3. Adler A, Amyot R, Guardo R, et al. Monitoring changes in lung air and liquid volumes with electrical impedance tomography. *J Appl Physiol* (1985). 1997;83(5):1762-7. doi: 10.1152/jappl.1997.83.5.1762. PMID: 9375349.
4. Santa Cruz R, Villarejo F, Irrazabal C, Ciapponi A. High versus low positive end-expiratory pressure (PEEP) levels for mechanically ventilated adult patients with acute lung injury and acute respiratory distress syndrome. *Cochrane Database Syst Rev*. 2021;3(3):CD009098. doi: 10.1002/14651858.CD009098.pub3. PMID: 33784416; PMCID: PMC8094163.
5. Meyer NJ, Gattinoni L, Calfee CS. Acute respiratory distress syndrome. *Lancet*. 2021 Aug 14;398(10300):622-637. doi: 10.1016/S0140-6736(21)00439-6. Epub 2021 Jul 1. PMID: 34217425; PMCID: PMC8248927.
6. Lachmann B. Open up the lung and keep the lung open. *Intensive Care Med*. 1992;18(6):319-21. doi: 10.1007/BF01694358. PMID: 1469157.
7. Gattinoni L, Tonetti T, Cressoni M, et al. Ventilator-related causes of lung injury: the mechanical power. *Intensive Care Med*. 2016;42(10):1567-75. doi: 10.1007/s00134-016-4505-2. Epub 2016 Sep 12. PMID: 27620287.
8. Heines SJH, Becher TH, van der Horst ICC, Bergmans DCJJ. Clinical Applicability of Electrical Impedance Tomography in Patient-Tailored Ventilation: A Narrative Review. *Tomography*. 2023;9(5):1903-32. doi: 10.3390/tomography9050150. PMID: 37888742; PMCID: PMC10611090.
9. He H, Chi Y, Yang Y, Yuan S, et al. Early individualized positive end-expiratory pressure guided by electrical impedance tomography in acute respiratory distress syndrome: a randomized controlled clinical trial. *Crit Care*. 2021;25(1):230. doi: 10.1186/s13054-021-03645-y. PMID: 34193224; PMCID: PMC8243615.
10. Jimenez JV, Munroe E, Weirauch AJ, et al. Electric impedance tomography-guided PEEP titration reduces mechanical power in ARDS: a randomized crossover pilot trial. *Crit Care*. 2023;27(1):21. doi: 10.1186/s13054-023-04315-x. PMID: 36650593; PMCID: PMC9843117.
11. Parhar KKS, Zjadewicz K, Soo A, et al. Epidemiology, Mechanical Power, and 3-Year Outcomes in Acute Respiratory Distress Syndrome Patients Using Standardized Screening. An Observational Cohort Study. *Ann Am Thorac Soc*. 2019;16(10):1263-72. doi: 10.1513/AnnalsATS.201812-910OC. PMID: 31247145; PMCID: PMC6812172.
12. Munshi L, Del Sorbo L, Adhikari NKJ, et al. Prone Position for Acute Respiratory Distress Syndrome. A Systematic Review and Meta-Analysis. *Ann Am Thorac Soc*. 2017;14(Suppl. 4):S280-S288. doi: 10.1513/AnnalsATS.201704-343OT. PMID: 29068269.
13. Mi L, Chi Y, Yuan S, He H, Long Y, et al. Effect of Prone Positioning With Individualized Positive End-Expiratory Pressure in Acute Respiratory Distress Syndrome Using Electrical Impedance Tomography. *Front Physiol*. 2022;13:906302. doi: 10.3389/fphys.2022.906302. PMID: 35845997; PMCID: PMC9282375.
14. Puel F, Crognier L, Soulé C, et al. Assessment of electrical impedance tomography to set optimal positive end-expiratory pressure for venovenous ECMO-treated severe ARDS patients. *J Crit Care*. 2020;60:38-44. doi: 10.1016/j.jcrc.2020.06.017. Epub 2020 Jul 8. PMID: 32736198.
15. Franchineau G, Bréchet N, Lebreton G, et al. Bedside Contribution of Electrical Impedance Tomography to Setting Positive End-Expiratory Pressure for Extracorporeal Membrane Oxygenation-treated Patients with Severe Acute Respiratory Distress Syndrome. *Am J Respir Crit Care Med*. 2017;196(4):447-57. doi: 10.1164/rccm.201605-1055OC. PMID: 28103448.
16. Nemer SN, Barbas CS. Predictive parameters for weaning from mechanical ventilation. *J Bras Pneumol*. 2011;37(5):669-79. English, Portuguese. doi: 10.1590/s1806-37132011000500016. PMID: 22042401.
17. Wang G, Zhang L, Li B, Niu B, Jiang J, Li D, Yue Z, Weng Y. The Application of Electrical Impedance Tomography During the Ventilator Weaning Process. *Int J Gen Med*. 2021;14:6875-83. doi: 10.2147/IJGM.S331772. PMID: 34703292; PMCID: PMC8528545.
18. Pereira SM, Tucci MR, Morais CCA, et al. Individual Positive End-expiratory Pressure Settings Optimize Intraoperative Mechanical Ventilation and Reduce Postoperative Atelectasis. *Anesthesiology*. 2018 Dec;129(6):1070-1081. doi: 10.1097/ALN.0000000000002435. PMID: 30260897.
19. Girrbach F, Petroff D, Schulz S, et al. Individualised positive end-expiratory pressure guided by electrical impedance tomography for robot-assisted laparoscopic radical prostatectomy: a prospective, randomised controlled clinical trial. *Br J Anaesth*. 2020;125(3):373-82. doi: 10.1016/j.bja.2020.05.041. Epub 2020 Jul 19. PMID: 32665059.
20. Proença M, Braun F, Lemay M, et al. Non-invasive pulmonary artery pressure estimation by electrical impedance tomography in a controlled hypoxemia study in healthy subjects. *Sci Rep*. 2020;10(1):21462. doi: 10.1038/s41598-020-78535-4. PMID: 33293566; PMCID: PMC7722929.
21. Braun F, Proença M, Lemay M, et al. Limitations and challenges of EIT-based monitoring of stroke volume and pulmonary artery pressure. *Physiol Meas*. 2018;39(1):014003. doi: 10.1088/1361-6579/aa9828. PMID: 29099725.
22. Li DK, Mao JY, Long Y, et al. Pulmonary hypertension with adult respiratory distress syndrome: prevalence, clinical impact, and association with central venous pressure. *Pulm Circ*. 2020;10(3):2045894020933087. doi: 10.1177/2045894020933087. PMID: 32699608; PMCID: PMC7357056.
23. Rowley DD, Malinowski TP, Di Peppe JL, et al. A Randomized Controlled Trial Comparing Two Lung Expansion Therapies After Upper Abdominal Surgery. *Respir Care*. 2019;64(10):1181-1192. doi: 10.4187/respcare.06812. Epub 2019 May 21. PMID: 31113857.
24. Longhini F, Bruni A, Garofalo E, et al. Chest physiotherapy improves lung aeration in hypersecretive critically ill patients: a pilot randomized physiological study. *Crit Care*. 2020;24(1):479. doi: 10.1186/s13054-020-03198-6. PMID: 32746877; PMCID: PMC7396943.
25. Riedel T, Bürgi F, Greif R, et al. Changes in lung volume estimated by electrical impedance tomography during apnea and high-flow nasal oxygenation: A single-center randomized controlled trial. *PLoS One*. 2022;17(9):e0273120. doi: 10.1371/journal.pone.0273120. PMID: 36170281; PMCID: PMC9518885.