

WYDAWNICTWO SIGMA-NOT X

3/2025

Miesięcznik COW
tom 56

ISSN 0137-3676
e-ISSN 2449-9900
cena 38,00
(w tym 8% VAT)

CIEPŁOWNICTWO OGRZEWNICTWO WENTYLACJA

DISTRICT HEATING, HEATING, VENTILATION

**Kształtowanie zdrowego i bezpiecznego
środowiska w obiektach ochrony zdrowia**



www.techmedis.pl

Dowiedz się więcej na: www.broen.pl

BROEN
VALVE TECHNOLOGIES

BROEN BALLOMAX® DN 40 - 150 ZAWORY NOWEJ GENERACJI

Ekologiczny, materiałowo zoptymalizowany zawór stworzony, aby zmienić przyszłość technologii zaworów.



BROEN
BALLOMAX® *Designed to Last*

ZAPRASZAMY NA:

XXXII Sympozjum Naukowo-
Techniczne **WIOSENNE**
SPOTKANIE CIEPŁOWNIKÓW
08-10 kwietnia 2025, Zakopane

Znajdziesz nas na stoisku BROEN
pod patronatem DBDH i Ambasady
Królestwa Danii.



- 50% mniejszy ślad węglowy,
- 30% niższa waga,
- 60% mniejsza ilość odpadów materiałowych,*
- brak zużycia wody w procesie testowania szczelności.

Pełen przelot DN 40 - 150, Zredukowany przelot DN 50 - 150
PN 40, 25 & 16 | Końcówki do wstawiania i kołnierzowe

* Obliczenia oparte na zaworze referencyjnym DN100, o zredukowanym przełocie, końcówkach do wstawiania, przy użyciu GWP A1-A3 CO2e i EN 15804 (A2).

OD REDAKCJI

Szanowni Państwo,

jest nam niezmiernie miło oddać w Państwa ręce kolejny numer czasopisma Ciepłownictwa, Ogrzewnictwa, Wentylacji, w którym podejmujemy temat kształtowania zdrowego i bezpiecznego środowiska w obiektach ochrony zdrowia. Jest to kwestia niezwykle istotna – zarówno z perspektywy pacjentów, jak i personelu medycznego, który na co dzień dba o zdrowie i życie społeczeństwa.

Jednym z bieżących przedsięwzięć w tej dziedzinie jest projekt **TechMedis**, realizowany przez Polskie Zrzeszenie Inżynierów i Techników Sanitarnych w ramach programu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego – **Nauka dla Społeczeństwa II**. Celem programu jest utworzenie aktywnej platformy współpracy pomiędzy sektorem naukowym i B+R a placówkami ochrony zdrowia oraz projektantami instalacji sanitarnych i inżynierii środowiska. Platforma ma wspierać transfer wiedzy i technologii inżynierskich stosowanych w obiektach ochrony zdrowia, a także umożliwiać rozwój krajowych przedsiębiorstw i producentów urządzeń na potrzeby szpitalnictwa. Więcej informacji o tej wartościowej inicjatywie znajdą Państwo na stronie www.techmedis.pl.

Niniejszy numer COW poświęcony jest wyzwaniom, przed którymi stoją placówki medyczne oraz nowoczesnym rozwiązaniom technicznym wspierającym ich funkcjonowanie. Przygotowaliśmy dla Państwa zestaw artykułów, które przedstawiają istotne zagadnienia związane z instalacjami w szpitalach, gospodarką o obiegu zamkniętym w ochronie zdrowia oraz z nowoczesnymi metodami zapewnienia bezpieczeństwa sanitarnego.

Prof. Agnieszka Malesińska zwraca uwagę na brak szczególnych regulacji technicznych dotyczących projektowania i eksploatacji instalacji kanalizacyjnych w szpitalach. W artykule przedstawiono analizę norm europejskich i polskich przepisów w tym zakresie oraz zasugerowano konieczność opracowania bardziej precyzyjnych wytycznych.

Dr inż. Anna Rolewicz-Kalińska, wskazuje, że w obliczu rosnącej produkcji odpadów medycznych i wysokiego śladu węglowego sektora ochrony zdrowia konieczne stają się zmiany systemowe. Autorka przedstawia innowacyjne strategie



zarządzania odpadami, ponownego wykorzystania sprzętu w placówkach medycznych i redukcji emisji CO₂.

Prof. Iwona Skoczko podejmuje temat dostępu do bezpiecznej i czystej wody w placówkach medycznych i w swym artykule omawia nowoczesne technologie dezynfekcji oraz sposoby eliminowania ryzyka zakażeń przenoszonych przez wodę w instalacjach szpitalnych.

Dr inż. Amelia Staszowska podejmuje temat wykorzystania nanotechnologii w walce z patogenami. Autorka analizuje skuteczność nanomateriałów w dezynfekcji powierzchni szpitalnych i powietrza, wskazując na ich duży potencjał w redukcji zagrożeń mikrobiologicznych.

Dr inż. Sylwia Szczęśniak i dr inż. Michał Karpuk sprawdzają jak polskie szpitale wpisują się w ambitne cele klimatyczne Unii Europejskiej. W artykule analizują wymagania pakietu Fit for 55 w kontekście budynków medycznych i możliwości dostosowania tych budynków do bardziej ekologicznych standardów.

Natomiast w artykule, który przygotowaliśmy wspólnie z mgr Vasco Vasconcelos i mgr inż. Natalią Lisicką omawiamy kwestię wentylacji sal operacyjnych – przedstawiamy dyskusję, która toczy się na temat wpływu zastosowanego rozwiązania wentylacyjnego na sterylność środowiska operacyjnego.

Zapraszamy również do zapoznania się z informacjami podanymi w sekcji Z życia wyższych uczelni, w której mgr inż. Mirella Fuhrmann przybliży działalność Młodzieżowej Rady Klimatycznej III kadencji, a także do działu Patronat Medialny, gdzie znajdą Państwo informacje o konferencji online „Klimatyzacja obiektów szpitalnych”, organizowanej w ramach projektu **TechMedis**.

Zbliżające się Święta Wielkanocne to czas refleksji, odrodzenia i nadziei. Życzymy wszystkim Czytelnikom pogodnych i ciepłych dni w gronie najbliższych, zdrowia oraz sukcesów – zarówno w życiu zawodowym, jak i prywatnym. Niech ten czas doda Państwu energii do dalszego działania i inspiracji do poszukiwania nowoczesnych rozwiązań, które uczynią nasz świat lepszym i bezpieczniejszym.

*Redaktor Naczelna
Anna Bogdan*

PRENUMERATA 2025

Wydawnictwo SIGMA-NOT Sp. z o.o.

WYDAWNICTWO
SIGMA-NOT


 ul. Ratuszowa 11, 03-450 Warszawa
 tel.: 22 818-09-18, 818-98-32, fax 619-21-87
Internet: <http://www.sigma-not.pl>Sekretariat: sekretariat@sigma-not.plPrenumerata e-mail: prenumerata@sigma-not.plInformacje e-mail: informacja@sigma-not.pl**Dział Reklamy i Marketingu**

Wydawnictwa SIGMA-NOT Sp. z o.o.

 ul. Ratuszowa 11, 03-450 Warszawa
 tel. 22 827 43 65 – stacjonarny
 604 528 865 – Katarzyna Przybytniak-Marzec
 e-mail: reklama@sigma-not.pl

© SIGMA-NOT Sp. z o.o.

Wszelkie prawa zastrzeżone

Skład i druk:
 Zakład Poligrafii i Kolportażu
 Wydawnictwa SIGMA-NOT Sp. z o.o.
 ul. Księdza Jerzego Popiełuszki 19/21
 01-595 Warszawa
 tel. 22 833 40 69
 e-mail: drukarnia@sigma-not.pl

Kolportaż: 22 840 35 89

Rodzaje prenumerat:

- ▶ Prenumerata papierowa
- ▶ Prenumerata cyfrowa
- ▶ Prenumerata w pakiecie w wersji PLUS zawiera wersję papierową, cyfrową + dostęp do archiwum na Portalu www.sigma-not.pl

Ceny prenumeraty w roku 2025:

- ▶ Cena 1 egzemplarza (okładkowa) 38 zł (z VAT),
- ▶ Cena prenumeraty rocznej w wersji papierowej 432 zł + roczny koszt wysyłki 42 zł,
- ▶ Cena prenumeraty rocznej w wersji cyfrowej 360 zł,
- ▶ Cena prenumeraty rocznej w pakiecie w wersji PLUS PAKIET (wersja papierowa + cyfrowa + dostęp do archiwalnych treści) – 552 zł

Prenumeratę można zamówić:

- ▶ Telefonicznie: 22 840 30 86, 22 840 35 89,
- ▶ e-mailem: prenumerata@sigma-not.pl,
- ▶ Listownie: Zakład Poligrafii i Kolportażu Wydawnictwa SIGMA-NOT Sp. z o.o., ul. Ks. J. Popiełuszki 19/21, 01-595 Warszawa,
- ▶ Dokonując wpłaty na konto: Wydawnictwo SIGMA-NOT Sp. z o.o. ul. Ratuszowa 11, 03-450 Warszawa, nr 24 1020 1026 0000 1002 0250 0577

UWAGA! Okres prenumeraty nie ulega skróceniu



KOLEGIUM REDAKCYJNE EDITORIAL STAFF

Redaktor naczelny – Editor in Chief
dr hab. inż. ANNA BOGDAN, prof. PW

Zastępca redaktora naczelnego
– osoba do kontaktu
mgr inż. BARBARA RUBIK tel. 605 032 330

Redaktorzy tematyczni
dr hab. inż. BOŻENA BABIARZ, prof. PRz
dr hab. inż. TOMASZ CHOLEWA, prof. PL
dr hab. inż. ROBERT CICHOWICZ, prof. PL
dr hab. inż. JOANNA FERDYN-GRYGIEREK
dr inż. ANDRZEJ GÓRKA
mgr inż. EWA KRĘCIELEWSKA
mgr inż. PAWEŁ LACHMAN
prof. dr hab. inż. ROBERT SEKRET
mgr inż. WOJCIECH RATAJCZAK
dr inż. MARIAN RUBIK
dr inż. SYLWIA SZCZĘŚNIAK
dr inż. PIOTR ZIĘTEK

Redaktor językowy
mgr HANNA MICHALIK

Redaktor statystyczny
mgr MACIEJ PERETA

Adres Redakcji:
CIEPŁOWNICTWO, OGRZEWNICTWO,
WENTYLACJA
ul. Czackiego 3/5, pokój 217
00-430 Warszawa,
tel. 605 032 330

INTERNET: www.cieplowent.pl
www.sigma-not.pl
e-mail: cieploogrzewwent@sigma-not.pl
e-mail: redakcja.cow@cieplowent.pl

ISSN 0137-3676, e-ISSN 2449-9900

Materiałów nie zamówionych redakcja nie zwraca.
Redakcja nie ponosi odpowiedzialności za treść
ogłoszeń.

Wszystkie artykuły naukowe są recenzowane.

Wersja pierwotna czasopisma – papierowa.

Jesteśmy w bazach czasopism technicznych: BazTech,
Index Copernicus = ICV 2023 = 80.56 oraz POL-index.
Artykuły publikowane w naszym czasopiśmie są reje-
strowane w bazie danych CrossRef. Każdy artykuł ma
numer identyfikacyjny DOI (Digital Object Identifier).
Prosimy autorów artykułów o stosowanie numeru DOI
w wykazach literatury.

Nakład (w tym wersja elektroniczna) do 1400 egz.

W NUMERZE 3/2025 CONTENTS

strona
page

Od redakcji – **Anna Bogdan** 1

INSTALACJE W SZPITALACH

Instalacja kanalizacyjna w placówkach medycznych – „mały” kłopot?
Sewage Installation in Medical Facilities – a “Small” Problem? – **Agnieszka
Malesińska** 3

Gospodarka o obiegu zamkniętym w ochronie zdrowia. Strategie redukcji
odpadów i śladu węglowego w szpitalach
*Circular Economy in Healthcare: Strategies to Reduce Waste and Carbon
Footprint in Hospitals* – **Anna Rolewicz-Kalińska** 6

Bezpieczna woda w szpitalach. Nowoczesne metody dezynfekcji i zapo-
bieganie zagrożeniom
Safe Water in Hospitals. Modern Disinfection Methods and Risk Prevention
– **Iwona Skoczko** 12

Wykorzystanie nanomateriałów do dezynfekcji powierzchni i powietrza
Application of Nanomaterials in Surface and Air Disinfection – **Amelia
Staszowska** 19

Obiekty służby zdrowia a wymagania Fit for 55. Jaką mamy szansę na
realizację założeń?
*Health Facilities and Fit For 55 Requirements – What Chance do we Have
of Meeting Targets?* – **Sylwia Szczęśniak, Michał Karpuk** 22

Przegląd rozwiązań systemów wentylacji w salach operacyjnych – donie-
sienia naukowe
*Overview of Air-Conditioning Solutions in Operating Theatres – Scientific
Reports* – **Anna Bogdan, Vasco Vasconcelos, Natalia Lisicka** 33

*Publikacje dofinansowane ze środków budżetu państwa w ramach programu
Ministra Edukacji i Nauki/Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego pod nazwą
„Nauka dla Społeczeństwa II” nr projektu NdS-II/SN/0008/2024/01, kwota
dofinansowania 775 500,00 zł, całkowita wartość projektu 775 500,00 zł.*

Z ŻYCIA WYŻSZYCH UCZELNI

Młodzieżowa Rada Klimatyczna III kadencji – **Mirella Fuhrmann** 39

PATRONAT MEDIALNY

Zaproszenie na konferencję online z cyklu „Klimatyzacja obiektów szpital-
nych” poświęconą projektowi TechMedis 11

Nowość Wydawnictwa Naukowego PWN: „Metody numeryczne w symula-
cji sieci gazowych” 40

Pomaganie Buduje 48 h III okł.

Czasopismo znajduje się w wykazie czasopism naukowych Ministerstwa Nauki
i Szkolnictwa Wyższego.

Artykuły publikowane w czasopiśmie są oznaczane numerem DOI: 10.15199/9.....,
stanowiącym cyfrowy identyfikator dokumentu elektronicznego.

Zapraszamy do odwiedzenia strony
www.cieplowent.pl



dr hab. inż. AGNIESZKA MALESIŃSKA, prof. uczelni

ORCID ID: 0000-0003-1554-2454
Wydział Instalacji Budowlanych Hydrotechniki
i Inżynierii Środowiska
Politechnika Warszawska
agnieszka.malesińska@pw.edu.pl

Instalacja kanalizacyjna w placówkach medycznych – „mały” kłopot?

Sewage Installation in Medical Facilities – a “Small” Problem?

Słowa kluczowe: instalacja kanalizacyjna, placówki medyczne, ścieki medyczne, bezpieczeństwo sanitarne, projektowanie instalacji

Streszczenie

W artykule przeanalizowano wymagania dotyczące instalacji kanalizacyjnych w placówkach medycznych w świetle polskich przepisów prawnych. Podkreślono brak szczegółowych regulacji określających parametry techniczne takich instalacji, mimo że ścieki medyczne mogą stanowić zagrożenie dla zdrowia publicznego i środowiska. Autorka wskazuje na konieczność oddzielania ścieków szpitalnych od kanalizacji bytowej oraz stosowania urządzeń podczyszczających. Przedstawiono także analizę norm europejskich, które nie dostarczają wystarczających wytycznych projektowych dla placówek medycznych. Wnioskiem jest potrzeba opracowania precyzyjnych wytycznych do projektowania i eksploatacji instalacji kanalizacyjnych w szpitalach i innych obiektach ochrony zdrowia.

Keywords: sewage system, medical facilities, medical wastewater, health protection, sanitary safety, system design

Abstract

The article examines the requirements for sewage systems in medical facilities under Polish regulations. It highlights the lack of detailed technical specifications for such systems, despite the fact that medical wastewater can pose risks to public health and the environment. The author emphasizes the need to separate hospital wastewater from domestic sewage and to use pre-treatment devices. The analysis of European standards shows that they do not provide sufficient design guidelines for medical facilities. The conclusion suggests the necessity of developing precise guidelines for designing and operating sewage systems in hospitals and other healthcare institutions.

© 2006-2025 Wydawnictwo SIGMA-NOT Sp. z o.o.
All right reserved

1. Wstęp

Placówki opieki zdrowotnej zgodnie z *Ustawą Prawo Budowlane* [1] są kwalifikowane do XI kategorii obiektów budowlanych. Zgodnie z przepisami ogólnymi *Rozporządzenia w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie* [2], placówki opieki zdrowotnej klasyfikuje się jako budynki użyteczności publicznej. Jak każdy obiekt budowlany, aby mógł pełnić funkcje zgodne ze swoim przeznaczeniem, musi zostać wyposażony w niezbędne instalacje wewnątrz [2]. Jedną z takich instalacji jest instalacja kanalizacyjna.

Każdy z nas, nawet jeżeli sam nigdy nie musiał korzystać z usług takich placówek, zdaje sobie sprawę z ich wyjątkowego charakteru. Naturalne wydaje się oczekiwanie, że korzystanie z usług w takich placówkach, nie może powodować komplikacji zdrowotnych wśród pacjentów, personelu czy osób odwiedzających. Nie można więc dopuścić, aby niedbałość lub brak wiedzy czy doświadczenia wśród projektantów i eksploataatorów placówek medycznych prowadziły do zwiększenia ryzyka zdrowotnego osób korzystających z usług takich placówek. Jedną z instalacji, która obciążona jest wysokim ryzykiem

negatywnego wpływu na środowisko, zarówno wewnątrz jak i zewnątrz, jest instalacja kanalizacyjna. W dalszej części artykułu podjęto próbę doprecyzowania wymagań projektowych stawianych takim instalacjom w przepisach krajowych.

2. Podstawy prawne projektowania instalacji kanalizacyjnych w placówkach medycznych

Ogólne wymagania stawiane instalacjom kanalizacyjnym w placówkach medycznych opisane są w dwóch aktach prawnych:

1. *Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 26 marca 2019 r. w sprawie szczegółowych wymagań, jakim powinny odpowiadać pomieszczenia i urządzenia podmiotu wykonującego działalność leczniczą* [3],

2. *Ustawa z dnia 7 czerwca 2001 r. (z późniejszymi zmianami Dz.U. 2024 r., poz.757), o zbiorowym zaopatrzeniu w wodę i zbiorowym odprowadzeniu ścieków* [4].

Niestety w żadnym z tych dokumentów nie podano kompleksowych wymagań projektowych dot. instalacji kanalizacyjnej, pomimo, że ścieki z takich placówek mogą być niebezpieczne dla człowieka i środowiska.

Z *Rozporządzenia* [3] dowiemy się w jakie urządzenia należy wyposażyć pomieszczenia w zależności od ich przeznaczenia. W każdym pomieszczeniu, do którego zgodnie z wymaganiami *Rozporządzenia* doprowadzona jest instalacja wodociągowa, musi pojawić się również instalacja kanalizacyjna. Poniżej przedstawiono listę pomieszczeń, w których instalacja wodociągowa niezbędna jest do utrzymania czystości urządzeń medycznych wielokrotnego użytku, jak i czystości samych pomieszczeń:

- pomieszczenie do mycia i dezynfekcji środków transportu zwłok,
- pomieszczenia do mycia i sterylizacji narzędzi oraz sprzętu wielokrotnego użycia (np. pracownia badań endoskopowych),
- blok operacyjny,
- zakład patomorfologii,
- stacja dializ (pomieszczenia wydzielone do hemodializ pacjentów zakażonych wirusami przenoszonymi drogą krwiopochodną),
- pomieszczenie porządkowe, w którym myje się i dezynfekuje sprzęt do utrzymania czystości w obiekcie.

W Art. 9 *Ustawy* [4] określono zakazy związane z odprowadzeniem ścieków i odpadów. I tak między innymi zabrania się wprowadzania do urządzeń kanalizacyjnych:

- odpadów stałych, ..., nawet jeżeli znajdują się one w stanie rozdrobnionym,
- ścieków zawierających chorobotwórcze drobnoustroje pochodzące z:
 - obiektów, w których są leczeni chorzy na choroby zakaźne,
 - stacji krwiodawstwa.

W Art. 10 *Ustawy* [4] w punkcie 2, wskazany jest obowiązek dla Dostawcy ścieków przemysłowych, polegający na obowiązku instalowania niezbędnych urządzeń podczyszczających ścieki przemysłowe i prawidłowej eksploatacji tych urządzeń.

Art. 10 w sposób jednoznaczny wskazuje na obowiązek podczyszczania ścieków przemysłowych do wymaganej jakości przed wprowadzeniem ich do kanalizacji.

Prowadząc dalszą analizę krajowych przepisów, w *Ustawie Prawo Wodne* [5], Art. 78 zauważymy wzmiankę o zakazie wprowadzenia do wód lub do ziemi (w ramach zwykłego korzystania) ścieków zawierających chorobotwórcze drobnoustroje pochodzące z obiektów, w których leczeni są chorzy na choroby zakaźne. Próżno jednak szukać tam wzmianki o stacjach krwiodawstwa, nie mówiąc już o innych źródłach ścieków medycznych.

Wydawać by się mogło, że rozwiązanie problemu znajdziemy w *Warunkach Technicznych jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie* [2]. W tym *Rozporządzeniu* w paragrafie 122 ust. 2 przywołane zostały normy, na podstawie których mamy obowiązek projektować i eksploatować instalacje kanalizacyjne. Do szczegółowego przeanalizowania norm pod kątem instalacji kanalizacyjnych w podmiotach medycznych przejdziemy za chwilę. Wcześniej należy zwrócić uwagę na paragraf 123, którego treść jest zgodna z Art. 10 *Ustawy o zbiorowym zaopatrzeniu w wodę i zbiorowym odprowadzaniu ścieków* [4] oraz z Art. 78 *Ustawy Prawo Wodne* [5]. W paragrafie tym powołując się na przepisy odrębne, nakłada się obowiązek wyposażenia instalacji kanalizacyjnej budynku, do której są wprowadzane ścieki nieodpowiadające warunkom dotyczącym ochrony ziemi i wód oraz odprowadzania ścieków do sieci kanalizacyjnej,

w urządzenia służące do ich oczyszczania do stanu zgodnego z tymi przepisami.

Na podstawie przeanalizowanych przepisów krajowych oczywisty wydaje się obowiązek wydzielenia instalacji kanalizacyjnej w podmiotach szpitalnych od kanalizacji bytowej oraz wyposażenie tej wydzielonej instalacji w urządzenia podczyszczające odprowadzane ścieki do wymaganej jakości. Najstosowniejszym rozwiązaniem wydaje się być zastosowanie urządzeń, które odseparują cząstki stałe (które zostaną poddane utylizacji zgodnie z przepisami dot. odpadów medycznych), a następnie przeprowadzenie dezynfekcji ścieków przed wprowadzeniem ich do sieci kanalizacyjnych.

W analizowanych dotychczas przepisach nie znajdziemy jednak żadnych parametrów technicznych, które mogłyby pomóc w projektowaniu instalacji kanalizacyjnych przeznaczonych do placówek medycznych, w celu maksymalizacji bezpieczeństwa użytkowników.

Czy przywołane w *Rozporządzeniu* [2] normy uszczegółwiają wymagania projektowe dla instalacji kanalizacyjnych w podmiotach medycznych, nakazując stosowanie jakiegoś szczególnych rozwiązań technicznych zwiększających bezpieczeństwo pacjentów i personelu medycznego?

Norma europejska, przywołana w *Rozporządzeniu*, składa się z 5 części:

- *PN-EN 12056-1 Systemy kanalizacji grawitacyjnej wewnątrz budynków Część 1: Postanowienia ogólne i wymagania* [6],
- *PN-EN 12056-2 Systemy kanalizacji grawitacyjnej wewnątrz budynków Część 2: Kanalizacja sanitarna, projektowanie układu i obliczenia* [7],
- *PN-EN 12056-3 Systemy kanalizacji grawitacyjnej wewnątrz budynków Część 3: Przewody deszczowe – Projektowanie układu i obliczenia* [8],
- *PN-EN 12056-4 Systemy kanalizacji grawitacyjnej wewnątrz budynków Część 4: Pompownie ścieków – Projektowanie układu i obliczenia* [9],
- *PN-EN 12056-5 Systemy kanalizacji grawitacyjnej wewnątrz budynków Część 5: Montaż i budowa, instrukcje dzialania, użytkowania i eksploatacji* [10].

W Części 1 Normy wyraz „szpital” pojawia się pierwszy i jedyny raz na liście definicji nr 3.4.2. W punkcie tym podano definicję „inne urządzenia sanitarne” czyli takie, które wykorzystywane są do obsługi masowej w kuchni, pralniach, laboratoriach, **szpitalach**, hotelach itp. W punkcie 4.6 tej części znajdziemy adnotację, że wymagania jakościowe i ilościowe ścieków dopływających do systemu kanalizacji powinny spełniać wymagania krajowe i lokalne. W tym samym punkcie pojawia się możliwość używania urządzeń do mielenia odpadów (macerowania) co jest zabronione zapisem w Art. 9 *Ustawy o zbiorowym zaopatrzeniu w wodę i zbiorowym odprowadzeniu ścieków* [4]. Znajdziemy również lakoniczne wzmianki o tym, że systemy kanalizacyjne powinny być projektowane i wykonywane w sposób nie wywierający negatywnego wpływu na zdrowie i bezpieczeństwo użytkowników i lokatorów (punkt 5.2 i 5.3).

W Części 2 w punkcie 6.1. dotyczącym obliczeń, dowiemy się, że systemy instalacji odprowadzających ścieki z obiektów usługowych i przemysłowych, czyli z naszego szpitala, należy obliczać indywidualnie. Jako wsparcie w obliczeniach w punkcie 6.3. znajdziemy wartość współczynnika czystości dla okresowego korzystania z kanalizacji, np. szpitala $K = 0,7$. Natomiast w Tabeli 6 znajdziemy możliwość doboru średnicy dla urządzenia do rozdrabniania ręczników

LITERATURA

papierowych zamontowanego na instalacji kanalizacyjnej. Jak już wspomniano wcześniej jest to niezgodne z przepisami krajowymi – szkoda, że w normie nie podano odwołania, które zwróciłoby na to uwagę.

W pozostałych częściach nie znajdziemy żadnych dodatkowych informacji o projektowaniu instalacji kanalizacyjnej w szpitalu.

3. Podsumowanie

Projektanci zmuszeni są więc do bazowania na własnym doświadczeniu i wiedzy, która pozwoli im bezpiecznie zaprojektować instalację kanalizacyjną w obiektach opieki zdrowia. W przepisach krajowych znajdziemy wymagania, które nakładają obowiązek dbania o środowisko, ale zewnętrzne, poza podmiotami medycznymi (możliwość odprowadzenia ścieków), w żaden sposób nie gwarantują one bezpieczeństwa personelowi i pacjentom tych placówek. Za to bezpieczeństwo odpowiedzialni są projektanci instalacji i ich przeświadczenie, że wiedza o specyfice oraz wyjątkowości takich obiektów gwarantuje takie bezpieczeństwo.

Pytanie o konieczność stworzenia wytycznych do projektowania instalacji kanalizacyjnych w obiektach opieki zdrowotnej pozostaje otwarte.

- [1] Ustawa Prawo Budowlane, Dz.U. 1994 nr 89 poz. 414, z późniejszymi zmianami.
- [2] Rozporządzenie w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie, Dz.U. 2022 poz. 1225, wraz z późniejszymi zmianami.
- [3] Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 26 marca 2019 r. w sprawie szczegółowych wymagań, jakim powinny odpowiadać pomieszczenia i urządzenia podmiotu wykonującego działalność leczniczą, Dz.U.2022.402.
- [4] Ustawa o zbiorowym zaopatrzeniu w wodę i zbiorowym odprowadzaniu ścieków, Dz.U. 2024, poz. 757, wraz z późniejszymi zmianami.
- [5] Ustawa Prawo Wodne, Dz.U. 2017 poz. 1566, wraz z późniejszymi zmianami.
- [6] PN-EN 12056-1 Systemy kanalizacji grawitacyjnej wewnątrz budynków Część 1: Postanowienia ogólne i wymagania.
- [7] PN-EN 12056-2 Systemy kanalizacji grawitacyjnej wewnątrz budynków Część 2: Kanalizacja sanitarna, projektowanie układu i obliczenia.
- [8] PN-EN 12056-3 Systemy kanalizacji grawitacyjnej wewnątrz budynków Część 3: Przewody deszczowe – Projektowanie układu i obliczenia.
- [9] PN-EN 12056-4 Systemy kanalizacji grawitacyjnej wewnątrz budynków Część 4: Pompownie ścieków – Projektowanie układu i obliczenia.
- [10] PN-EN 12056-5 Systemy kanalizacji grawitacyjnej wewnątrz budynków Część 5: Montaż i budowa, instrukcje działania, użytkowania i eksploatacji.

Od 75 lat
poszerzamy
Twoje
horyzonty



WYDAWNICTWO
SIGMA-NOT 

**dr inż. ANNA ROLEWICZ-KALIŃSKA**

ORCID ID: 0000-0002-5266-9086
Katedra Ochrony i Kształtowania Środowiska
Wydział Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki
i Inżynierii Środowiska
Politechnika Warszawska
anna.kalinska@pw.edu.pl

Gospodarka o obiegu zamkniętym w ochronie zdrowia. Strategie redukcji odpadów i śladu węglowego w szpitalach

Circular Economy in Healthcare. Strategies to Reduce Waste and Carbon Footprint in Hospitals

Słowa kluczowe: ślad węglowy, odpady medyczne, gospodarka o obiegu zamkniętym, ponowne wykorzystanie, szpital

Streszczenie

W artykule omówiono wpływ sektora opieki zdrowotnej na środowisko, ze szczególnym uwzględnieniem problematyki wytwarzania odpadów medycznych oraz emisji gazów cieplarnianych. Zwrócono uwagę na zależności pomiędzy stosowaniem jednorazowych narzędzi i urządzeń medycznych a koniecznością wdrażania zasad gospodarki o obiegu zamkniętym (GOZ). Przedstawione analizy wskazują, że implementacja praktyk ponownego wykorzystania materiałów oraz racjonalizacja zarządzania zasobami mogą znacząco ograniczyć ilość odpadów i zredukować emisję CO₂. Podkreślono, że instrumenty wielokrotnego użytku, przy zachowaniu odpowiednich procedur sterylizacji, mogą zapewnić poziom bezpieczeństwa porównywalny z jednorazowymi odpowiednikami, jednocześnie zmniejszając koszty operacyjne placówek ochrony zdrowia. Wskazano, że przejście na model cyrkularny w medycynie wymaga przezwyciężenia barier regulacyjnych oraz obaw związanych z ryzykiem zakażeń szpitalnych.

Keywords: carbon footprint, medical waste, circular economy, reuse, hospital

Abstract

The article discusses the environmental impact of the healthcare sector, with a particular focus on the generation of medical waste and greenhouse gas emissions. Attention is drawn to the relationship between the widespread use of single-use medical instruments and devices and the need to implement circular economy (CE) principles. The analyses presented show that the implementation of material reuse practices and the rational management of resources can significantly reduce the amount of waste and CO₂ emissions. It is emphasised that reusable instruments, if appropriate sterilisation procedures are maintained, can provide a level of safety comparable to disposable counterparts, while reducing the operating costs of healthcare facilities. It is pointed out that the transition to a circular model in medicine requires overcoming regulatory barriers and concerns about the risk of hospital-acquired infections.

© 2006-2025 Wydawnictwo SIGMA-NOT Sp. z o.o.
All right reserved

1. Wstęp

Przewiduje się, że w roku 2025 sektor opieki zdrowotnej zużyje 22 miliony ton tworzyw sztucznych, łącznie zostanie w nim wytworzone blisko 67 milionów ton odpadów. Sektor ten odpowiada ponadto za około 5% globalnych emisji gazów cieplarnianych, w krajach o wysokich dochodach udział ten może sięgać nawet 10%. Powyższe dane pokazują istotny wpływ sektora na środowisko naturalne i konieczność podejmowania działań w kierunku zrównoważonych strategii prowadzenia działalności w tym obszarze. Wdrożenie dekarbonizacji w opiece zdrowotnej wymaga nie tylko inwestycji w bardziej wydajne i odnawialne źródła energii, ale także racjonalizacji wykorzystania zasobów, wdrażania zrównoważonych praktyk zaopatrzeniowych oraz redukcji odpadów – co jest kluczowe, zważywszy na

fakt, że ponad 70% emisji dwutlenku węgla w tym sektorze pochodzi z łańcucha dostaw [2]. Jednym z kluczowych wyzwań w sektorze medycznym jest tendencja stosowania urządzeń jednorazowego użytku, która przyczynia się do wytwarzania aż 90% odpadów medycznych [13]. W skali globalnej przemysł medyczny wypuszcza rocznie na rynek około 2 milionów wyrobów i urządzeń, z czego około 60% to produkty jednorazowe [9]. Szczególnej uwagi wymagają szpitale, w których zużywa się najwięcej produktów medycznych i wytwarza najwięcej odpadów. Za najbardziej zasobochłonne jednostki w szpitalu uznaje się sale operacyjne, które wymagają od trzech do sześciu razy więcej energii niż inne oddziały i generują średnio 12 kilogramów odpadów na operację [15].

Aby ograniczyć uciążliwość dla środowiska i optymalizować zużycie zasobów, proces zagospodarowania produktów

pod koniec ich cyklu życia, powinien priorytetyzować zapobieganie powstawaniu odpadów, zgodnie z planem działania Unii Europejskiej na rzecz gospodarki o obiegu zamkniętym [5] i zgodnie z hierarchią sposobów postępowania z odpadami [14]. Podejście to podkreśla znaczenie utrzymywania materiałów w łańcuchu wartości tak długo, jak to możliwe oraz preferuje odnowienie i ponowne użycie przed procesem recyklingu. Odpowiedzią na te wymagania jest dynamiczny rozwój praktyk gospodarki o obiegu zamkniętym w sektorze opieki zdrowotnej, szczególnie w kontekście efektywnego zarządzania odpadami i optymalizacji zużycia materiałów i produktów. Szczególnie istotna w tym aspekcie jest wysoka efektywność wykorzystania zasobów tj. taka, która skupia się na redukcji ilości wytwarzanych odpadów, przedłuża cykl użytkowania materiałów i produktów oraz promuje zamknięty obieg wartości [4]. Powszechnie przyjętym standardem pomiaru pozwalającym określić efektywność wykorzystania wartości w całym łańcuchu dostaw jest metoda analizy cyklu życia (*Life Cycle Assessment* – LCA), a najczęściej używanym wskaźnikiem jest ślad węglowy – szacunkowa ilość emisji gazów cieplarnianych związana z produktem, procesem lub systemem, zrównana i zsumowana jako ekwiwalenty ditlenku węgla (CO_{2e}). Wskaźnik ten może być stosowany w ocenie uciążliwości środowiskowej sektora medycznego [16].

Barierą do wdrażania strategii GOZ w obszarze medycznym, w szczególności do ponownego wykorzystania sprzętu i urządzeń, są rygorystyczne normy dotyczące bezpieczeństwa pacjentów oraz różnice w podejściu regulacyjnym pomiędzy regionami (np. USA, UE, Azja). Ponadto producenci, dążąc do maksymalizacji zysków, często wybierają model jednorazowego użytku, co z jednej strony minimalizuje ryzyko zakażeń, ale z drugiej strony ogranicza możliwości wdrożenia technologii odzyskiwania materiałów. Dodatkowo, brak jednolitych standardów dotyczących ponownego użycia urządzeń wprowadza niepewność ekonomiczną, co hamuje inwestycje w nowoczesne technologie segregacji i recyklingu [9]. Globalne cele dotyczące neutralności klimatycznej, w tym strategia Europejskiego Zielonego Ładu i cele dotyczące GOZ, sprawiają że w kontekście konieczności ograniczenia śladu węglowego oraz efektywniejszego wykorzystania zasobów, zastosowanie strategii, takich jak ponowne użycie czy recykling, stanowi kluczowe wyzwanie również dla sektora medycznego [5], [6].

Celem artykułu jest analiza możliwości wdrożenia w obszarze medycznym zasad gospodarki o obiegu zamkniętym w celu ograniczenia emisji gazów cieplarnianych i ilości wytwarzanych odpadów medycznych. Artykuł koncentruje się na problematyce nadmiernego zużycia jednorazowych narzędzi i urządzeń medycznych oraz wskazuje na konieczność wdrażania bardziej zrównoważonych praktyk, takich jak ponowne wykorzystanie sprzętu i optymalizacja zarządzania zasobami. Podkreśla również wyzwania związane z regulacjami dotyczącymi bezpieczeństwa, różnicami w podejściu legislacyjnym oraz ekonomicznymi barierami utrudniającymi wdrożenie zasad GOZ w sektorze medycznym.

2. Wyzwania środowiskowe w szpitalach

Produkty medyczne można klasyfikować zarówno na podstawie ich zastosowania, jak i cyklu życia. Zastosowanie wyrobów medycznych obejmuje szeroki zakres działań – od profilaktyki, przez diagnostykę, leczenie, aż po rehabilitację.

W literaturze wyróżnia się trzy główne kategorie wyrobów, na podstawie ich cyklu życia [8], [20]:

- jednorazowe wyroby medyczne,
- wyroby medyczne wielokrotnego użytku,
- wyroby medyczne o długim cyklu życia.

Jednorazowe wyroby medyczne są projektowane z myślą o jednokrotnym zastosowaniu, po którym następuje ich unieszkodliwienie. W przeciwieństwie do nich, wyroby medyczne wielokrotnego użytku poddawane są procesom sterylizacji, co umożliwia ich wielokrotne wykorzystanie i wydłuża ich cykl życia. Urządzenia o długim cyklu życia (np. wszczepialne rozruszniki serca czy protezy) są przeznaczone do stałego użytkowania przez pacjenta, co wyróżnia je pod względem trwałości i funkcjonalności. Ciekawą alternatywą są instrumenty hybrydowe, łączące cechy jednorazowych i wielorazowych urządzeń medycznych [3].

Badania wykazują, że wyroby i urządzenia medyczne, zwłaszcza te jednorazowego użytku, składają się z wielu rodzajów materiałów. Typowa strzykawka może zawierać elementy wykonane ze stali nierdzewnej (igła), polipropylenu (korpus) oraz gumy (uszczelka). Takie wielomateriałowe konstrukcje utrudniają proces segregacji i recyklingu, gdyż standardowe technologie recyklingu są zazwyczaj dostosowane do jednolitych strumieni materiałowych. Dane wskazują, że około 50% materiałów stosowanych w urządzeniach medycznych to polimery, a ich udział w wadze odpadów medycznych wynosi około 20%-25% [9]. Jednorazowe narzędzia chirurgiczne są powszechnie wykorzystywane w procedurach medycznych ze względu na ich zalety w zakresie sterylności i ostrości. Badania wskazują jednak, że narzędzia wielokrotnego użytku również mogą zapewnić te cechy przy wdrożeniu odpowiednich procedur postępowania (w zakresie dekontaminacji i weryfikacji jakości). Mogą być przy tym bardziej opłacalne. Szacuje się, że ślad węglowy narzędzi wielorazowych to 25% śladu węglowego narzędzi jednorazowego użytku [1].

Studium przypadku dotyczące stosowania instrumentów do laparoskopowej cholecystektomii przeprowadzone w Wielkiej Brytanii wykazało, że nożyczki wielokrotnego użytku kosztują 998 funtów przy śladzie węglowym 1,87 kg CO_{2e}, w porównaniu z 24 funtami przy 0,475 kg CO_{2e} w przypadku nożyczek jednorazowego użytku. Ponadto, ponieważ urządzenie wielokrotnego użytku może być używane co najmniej 500 razy, przy wielokrotnym użyciu ogólny ślad węglowy i koszty są niższe (2,00 funta, 0,004 kg CO_{2e} na użycie) [16].

Według przeglądu praktyk w różnych szpitalach na całym świecie emisja śladu węglowego z oddziałów intensywnej opieki medycznej waha się od 88 kg CO_{2e} do 178 kg CO_{2e} na pacjenta na dobę. Główne źródła emisji to zużycie energii, obejmujące zarówno elektryczność, jak i gaz, oraz materiały jednorazowego użytku stosowane w procedurach medycznych. W siedmiu badaniach przytoczonych w cytowanym artykule oszacowano, że masa odpadów medycznych w oddziałach intensywnej opieki medycznej wahała się od 1,1 kg do 13,7 kg na pacjenta na dobę [7].

Z kolei analiza dotycząca optymalizacji wykorzystania małych urządzeń medycznych, na przykładzie nożyczek laparoskopowych, które tradycyjnie są używane jednokrotnie, wykazała, że zwiększenie udziału tych urządzeń poddawanych ponownemu wykorzystaniu (po procesie dekontaminacji i weryfikacji) skutkuje redukcją liczby nowych urządzeń wymaganych do zaspokojenia popytu, zmniejszeniem liczby urządzeń trafiających do unieszkodliwienia oraz obniżeniem

emisji CO₂. Przy założeniu redukcji wytwarzanych odpadów na poziomie 80% obserwuje się redukcję emisji na poziomie bliskim 48%. Eksperyment dotyczący liczby cykli użycia wykazał, że przedłużenie eksploatacji urządzeń przez ich ponowne przetwarzanie generuje dalsze redukcje emisji, przy czym efekt ten stabilizuje się po osiągnięciu określonej liczby cykli. W badanym studium przypadku zaobserwowano, że całkowity koszt przypadający na pacjenta spadł o około 45% [19]. Podobne wnioski przedstawiono w innym artykule, również dotyczącym chirurgii laparoskopowej, w którym stwierdzono, że urządzenia laparoskopowe wielokrotnego użytku wykazują potencjał do znaczącej redukcji kosztów operacyjnych oraz śladu węglowego w porównaniu z ich jednorazowymi odpowiednikami, przy zachowaniu porównywalnego poziomu bezpieczeństwa. W tym samym badaniu wykazano, że instrumenty hybrydowe charakteryzują się około czterokrotnie mniejszym śladem węglowym w porównaniu do urządzeń jednorazowych.

Badanie analizujące procedurę transuretralnej resekcji guza pęcherza moczowego – od momentu podjęcia decyzji o leczeniu do momentu wypisu pacjenta – w celu identyfikacji głównych źródeł emisji oraz opracowania strategii ich ograniczenia wykazało, że średnia wartość śladu węglowego na pacjenta osiągnęła 153,8 kg CO_{2e}. Wartości różniły się w zależności od rodzaju przyjęcia pacjenta, przy czym pacjenci operowani jako „hospitalizacja jednego dnia” generowali niższe emisje niż osoby przyjmowane na dłuższą hospitalizację, odpowiednio 121,3 kg CO_{2e} i 161,9 kg CO_{2e}. Główne źródła emisji w tym procesie obejmowały kilka kategorii. Sprzęt chirurgiczny odpowiadał za około 22,2% całkowitych emisji, wskazując na istotny wpływ używanych instrumentów jednorazowych. Podróże pacjentów i personelu były odpowiedzialne za 18,6% emisji, a zużycie gazu oraz energii elektrycznej stanowiło 13,3% emisji. Z kolei procedura znieczulenia, leki oraz związane z nimi akcesoria, generowały 27,0% emisji. Autorzy oszacowali, że niewielkie zmiany w procedurach, takie jak redukcja liczby używanych cewników, ograniczenie irygacji lub zastąpienie niektórych jednorazowych akcesoriów produktami wielokrotnego użytku, mogłyby obniżyć emisje o około 13,4% na pojedynczą operację [12].

3. Wyzwania dla producentów wyrobów i urządzeń medycznych

Ważną rolę w procesie transformacji sektora ochrony zdrowia w stronę bardziej zrównoważonej i cyrkularnej działalności odgrywają firmy technologii medycznej. Badanie jakościowe czterech międzynarodowych firm, które wdrożyły systemy recyklingu oraz ponownego użycia, wykazało, że producenci dostrzegają problem nadmiernej

ilości odpadów z urządzeń jednorazowych oraz ograniczone opcje ich recyklingu. Tradycyjni producenci sprzętu koncentrują się na sprzedaży nowych urządzeń, co ogranicza możliwości wydłużenia ich cyklu życia. Dodatkowo, zarządzanie odpadami medycznymi i brak infrastruktury do skutecznego recyklingu stanowią istotne wyzwania logistyczne [11].

Aby sprostać tym problemom, firmy wdrażają projektowanie cyrkularne, które obejmuje łatwość demontażu i naprawy, wybór ekologicznych materiałów oraz wydłużenie cyklu życia urządzeń. Implementują zamknięte łańcuchy dostaw, umożliwiające odzyskiwanie i ponowne wykorzystanie surowców, co prowadzi do redukcji zużycia surowców pierwotnych oraz kosztów operacyjnych. Kluczowym elementem strategii jest współpraca z dostawcami, placówkami medycznymi i regulatorami, aby dostosować standardy ponownego wykorzystania sprzętu do norm bezpieczeństwa.

W pracy analizującej stan obecny w projektowaniu urządzeń medycznych wykazano, że wdrażanie strategii GOZ w tym sektorze jest nadal ograniczone, mimo rosnącej świadomości i presji regulacyjnej na zmniejszenie ilości odpadów. Do przeglądu wybrano 13 krajów z różnych kontynentów i o zróżnicowanym poziomie dochodów: Norwegię, Australię, Meksyk, USA, Niemcy, Indie, Chiny, Japonię, Republikę Południowej Afryki, Kenię, Brazylię, Szwecję i Wielką Brytanię. Spośród 1400 analizowanych urządzeń jedynie 25% stosowało choć jedną strategię GOZ, a tylko 5% charakteryzowało się wysokim poziomem cyrkularności. Najczęściej wdrażano ponowne użycie (95%), redukcję zużycia materiałów i energii (10%), odnawianie (12%) oraz recykling (5%) [10].

Ponowne użycie było dominującą strategią, obejmującą głównie sterylizowane instrumenty chirurgiczne i urządzenia diagnostyczne, jednak obawy o bezpieczeństwo i skuteczność dekontaminacji stanowią istotną barierę. Strategia redukcji materiałów koncentrowała się na minimalizacji komponentów elektronicznych i tworzyw sztucznych (redukcja nawet o 20%), co zmniejszało ślad węglowy i koszty produkcji, ale rodziło wyzwania technologiczne związane z trwałością urządzeń.

Odnawianie sprawdzało się w przypadku sprzętu o wysokiej wartości, jak endoskopy czy aparaty do terapii ultradźwiękowej, redukując ślad węglowy nawet o 50%. Wymaga jednak zaawansowanej infrastruktury i certyfikacji, co ogranicza jego skalę. Recykling miał najmniejszy udział (5%), głównie z powodu trudności w odzyskaniu materiałów wieloskładnikowych i ograniczeń regulacyjnych. Tylko 15% producentów projektowało urządzenia z myślą o łatwym demontażu, co utrudniało ich efektywne przetwarzanie i odzysk surowców.

TABELA 1. Przykładowe wartości śladu węglowego w obszarze medycznym
TABLE 1. Examples of carbon footprint values in the medical sector

Procedura	Ślad węglowy kg CO _{2e}	Główne źródła
Oddziały intensywnej terapii	88 kg-178 kg CO _{2e} /dobę	energia elektryczna, gaz, sprzęt jednorazowego użytku
Chirurgia laparoskopowa	0,004 kg-0,475 kg CO _{2e} na użycie	nożyczki laparoskopowe, narzędzia chirurgiczne
Transuretralna resekcja guza pęcherza moczowego	121,3–161,9 kg CO _{2e}	sprzęt chirurgiczny (22,2%), podróże pacjentów (18,6%), energia (13,3%), anestezja i leki (27%)
Użycie nożyczek laparoskopowych wielokrotnego użytku	2,00 funta, 0,004 kg CO _{2e} na użycie	produkcja, transport, dekontaminacja

4. Strategie wdrażania GOZ i redukcji śladu węglowego

Wiele z przytoczonych w niniejszym artykule badań dokumentuje, że w większości przypadków ślad węglowy przedmiotów wielokrotnego użytku na sali operacyjnej jest niższy niż w przypadku ekwiwalentów jednorazowego użytku, w tym m.in. nożyczek, fartuchów i prześcieradeł, podkładów laparotomijnych, pojemników na ostre przedmioty, tacek na środki znieczulające, masek krtniowych oraz uchwytów i ostrzy laryngoskopu [16].

Raport analizujący wyzwania i możliwości uwzględnienia wpływu środowiskowego w procesie podejmowania decyzji dotyczących wyboru i stosowania narzędzi i urządzeń medycznych w brytyjskim systemie ochrony zdrowia (NHS England) uwzględnił analizę wszystkich etapów cyklu życia wyrobów medycznych. Założono w nim, że kluczowe znaczenie ma wdrożenie zasad gospodarki o obiegu zamkniętym, takich jak redukcja, ponowne użycie, naprawa i odnawianie. W raporcie wskazano, że redukcja wpływu wyrobów medycznych na środowisko wymaga działań na każdym etapie ich cyklu życia. Kluczowe jest wykorzystanie energii odnawialnej w produkcji, co może zmniejszyć ślad węglowy o 94%-96% oraz unikanie marnotrawstwa materiałów, wody i energii. W dystrybucji rekomenduje się ograniczenie transportu lotniczego na rzecz bardziej ekologicznych rozwiązań, np. pojazdów elektrycznych, które mogą zmniejszyć emisję CO₂ o 89%. W fazie użytkowania produktów jednorazowych istotnym problemem jest nadprodukcja i marnotrawstwo. Wykazano m.in., że 2,5% wszystkich produktów stosowanych w procedurach neurointerwencyjnych jest niewykorzystanych i trafia do odpadów. Możliwość przedłużenia cyklu życia sprzętu, na przykład poprzez stosowanie zasady „jednorazowe dla jednego pacjenta” zamiast całkowitej jednorazowości, mogą znacząco ograniczyć ilość wytwarzanych odpadów. Dodatkowo, odnawianie i ponowne wykorzystanie urządzeń oznaczonych jako jednorazowe, takich jak cewniki elektrofizjologiczne, może obniżyć ich ślad węglowy o 50%-60% w porównaniu z nowymi produktami.

Jeśli chodzi o produkty wielokrotnego użytku, to kluczowe znaczenie ma maksymalizacja liczby cykli użytkowania. Zwiększenie liczby użyć maski krtniowej z 10 do 40 cykli pozwala na redukcję emisji CO₂ o 35%. Istotna jest również optymalizacja procesów sterylizacji i prania – badania wykazały, że odpowiednie załadunki autoklawów mogą zmniejszyć ślad węglowy o 60% w porównaniu z najmniej efektywnym sposobem ich wykorzystania. Ponadto naprawa sprzętu, zamiast jego wymiany, jest kolejną skuteczną strategią ograniczania emisji – przykładem jest naprawa nożyczek chirurgicznych, która pozwala zmniejszyć emisję CO₂ o 20%.

Na etapie przetwarzania odpadów pełna możliwość recyklingu opakowań mogłaby zmniejszyć ich ślad węglowy o 38%, choć recykling urządzeń medycznych jest utrudniony z powodu ich zanieczyszczenia biologicznego. W takich przypadkach odzyskiwanie energii z odpadów stanowi alternatywne rozwiązanie [17].

Strategie GOZ i ograniczania śladu węglowego mogą być implementowane również na etapie produkcji urządzeń medycznych. Aby jednak osiągnąć ten cel, konieczne są zmiany regulacyjne, rozwój nowoczesnych technologii oraz wdrożenie innowacyjnych modeli biznesowych, które umożliwią bardziej efektywne wykorzystanie zasobów i ograniczenie

TABELA 2. Możliwości ograniczania śladu węglowego przez wdrażanie GOZ na etapie eksploatacji (wybrane przykłady)

TABLE 2. Possibilities of reducing the carbon footprint by implementing circular economy at the operation stage (selected examples)

Produkt	Redukcja śladu węglowego
Nożyczki chirurgiczne	20% (dzięki naprawie),
Fartuchy i prześcieradła	35% (przy 40 cyklach prania),
Podkłady laparotomijne	30% (dzięki ponownemu użyciu),
Maski krtniowe	35% (przy wzroście liczby użyć z 10 do 40),
Pojemniki na ostre przedmioty	50% (dzięki sterylizacji i ponownemu użyciu),
Uchwyty i ostrza laryngoskopów	45% (przy regeneracji i ponownym użyciu).

odpadów. Kluczowe znaczenie ma dostosowanie regulacji prawnych przez uproszczenie procedur certyfikacji odnawianych urządzeń, wprowadzenie jednolitych standardów regeneracji i recyklingu oraz stworzenie mechanizmów zachęt finansowych, takich jak ulgi podatkowe czy dotacje dla producentów i placówek medycznych stosujących odnawiane urządzenia.

Rozwój technologii dekontaminacji i regeneracji sprzętu stanowi kolejny istotny krok w kierunku wdrażania GOZ. Nowoczesne metody sterylizacji, takie jak technologie plazmowe czy niskotemperaturowe sterylizatory, mogą zapewnić bezpieczne wielokrotne użycie urządzeń medycznych. Kluczowe jest również wdrożenie systemów monitorowania jakości odnawianych urządzeń, co mogłoby zwiększyć ich akceptację w placówkach medycznych. Dodatkowo, integracja cyfrowych systemów śledzenia cyklu życia sprzętu, np. RFID, umożliwiłaby precyzyjne monitorowanie urządzeń gotowych do regeneracji i optymalizację ich ponownego wykorzystania.

Optymalizacja logistyki recyklingu i odzyskiwania materiałów jest niezbędna do skutecznego zarządzania odpadami medycznymi. Tworzenie scentralizowanych punktów zbiórki i segregacji sprzętu usprawni proces odzyskiwania surowców i ponownego przetwarzania urządzeń. Wprowadzenie zaawansowanych metod separacji i recyklingu, zwłaszcza komponentów elektronicznych oraz trudnych do unieszkodliwienia materiałów, takich jak biotworzywa czy metale rzadkie, pozwoliłoby na efektywniejsze wykorzystanie zasobów.

Zmiana podejścia do projektowania urządzeń medycznych odgrywa kluczową rolę w implementacji strategii GOZ. Projektowanie modułowe pozwala na łatwy demontaż, naprawę i ponowne użycie sprzętu, zwiększając jego żywotność i ograniczając ilość odpadów. Zwiększenie udziału materiałów nadających się do recyklingu oraz eliminacja trudnych do separacji komponentów zmniejszy obciążenie środowiskowe. Ponadto, uwzględnienie analizy LCA już na etapie projektowania pozwoli ocenić wpływ środowiskowy urządzenia i dostosować jego konstrukcję do zasad cyrkularności [10].

Ważnym krokiem w kierunku gospodarki o obiegu zamkniętym jest wdrożenie nowych modeli biznesowych. Przejście od tradycyjnej sprzedaży na systemy „produkt jako usługa” umożliwi producentom zachowanie kontroli nad cyklem życia urządzenia, ułatwiając jego regenerację

TABELA 3. Możliwości ograniczania śladu węglowego przez wdrażanie GOZ dla wyrobów i urządzeń medycznych klasyfikowanych na podstawie ich zastosowania i cyklu życia

TABLE 3. Opportunities for reducing the carbon footprint by implementing the circular economy for medical products and devices classified based on their use and life cycle

Kategoria urządzeń	Charakterystyka	Przykłady	Wpływ na środowisko	Możliwości redukcji śladu węglowego
Jednorazowe wyroby medyczne	przeznaczone do jednokrotnego użycia, po którym następuje ich unieszkodliwienie. Zapewniają wysoką sterylność i bezpieczeństwo.	strzykawki, igły, opatrunki, cewniki, nożyczki chirurgiczne jednorazowe.	wysoka emisja CO ₂ związana z produkcją i unieszkodliwianiem, trudności w recyklingu ze względu na wielomateriałowe konstrukcje.	zastosowanie biopolimerów, ograniczenie zbędnego zużycia, zamiana na urządzenia wielokrotnego użytku, gdzie to możliwe.
Wyroby medyczne wielokrotnego użytku	poddawane procesom sterylizacji, umożliwiającym ich wielokrotne użycie, co zmniejsza ilość odpadów.	nożyczki chirurgiczne, maski krtaniowe, narzędzia laparoskopowe, laryngoskopy, pojemniki na ostre przedmioty.	redukcja emisji CO ₂ w porównaniu do jednorazowych odpowiedników (np. 25% śladu węglowego w porównaniu z narzędziami jednorazowymi).	optymalizacja liczby cykli użytkowania, lepsza efektywność sterylizacji, stosowanie modułowych konstrukcji ułatwiających naprawy.
Wyroby medyczne o długim cyklu życia	urządzenia implantowane lub wykorzystywane przez pacjenta przez długi czas, minimalizujące konieczność wymiany.	protezy, rozruszniki serca, pompy insulinowe.	wysoka energochłonność produkcji, konieczność recyklingu komponentów elektronicznych i metalowych.	projektowanie modułowe umożliwiające wymianę zużytych elementów, rozwój efektywnych metod recyklingu baterii i elektroniki.
Instrumenty hybrydowe	łączą cechy urządzeń jednorazowych i wielokrotnego użytku, często obejmują części wymienne lub regenerowane.	narzędzia chirurgiczne z wymiennymi końcówkami, systemy laparoskopowe z wymiennymi elementami.	znacznie niższy ślad węglowy (ok. 4 razy niższy niż urządzenia jednorazowe).	możliwość wdrożenia systemu odnawiania komponentów, leasing sprzętu zamiast sprzedaży, regeneracja zamiast unieszkodliwiania.

i modernizację. Implementacja modelu zwrotu i odnawiania sprzętu pozwoli na wydłużenie jego eksploatacji oraz optymalizację kosztów. Przykłady z sektora IT pokazują, że strategia leasingu sprzętu może znacząco ograniczyć ilość wytwarzanych odpadów i poprawić efektywność wykorzystania zasobów [16].

Ostatecznie, wdrażanie GOZ wymaga ścisłej współpracy między producentami, placówkami medycznymi i instytucjami regulacyjnymi w celu tworzenia wspólnych standardów i strategii. Długoterminowe inwestycje w technologie umożliwiające efektywne zarządzanie cyklem życia urządzeń, takie jak sztuczna inteligencja do optymalizacji procesów regeneracji, będą miały kluczowe znaczenie. Promowanie zrównoważonych strategii w przetargach publicznych może dodatkowo zachęcać dostawców sprzętu medycznego do wdrażania cyrkularnych modeli operacyjnych.

5. Podsumowanie i wnioski

Wdrożenie gospodarki o obiegu zamkniętym w placówkach medycznych, m.in. przez zastąpienie produktów jednorazowych wielorazowymi, może znacząco zmniejszyć emisję CO₂ oraz obniżyć koszty operacyjne w szpitalach. Przejście na model cyrkularny nie tylko umożliwia bardziej efektywne wykorzystanie zasobów, ale także stwarza podstawę do dalszych działań usprawniających zarządzanie odpadami oraz zmniejszających negatywny wpływ na środowisko. Ekologizacja szpitali nie może się jednak odbywać się kosztem bezpieczeństwa pacjenta i wyników klinicznych. Obawy te mogą stanowić barierę do wdrożenia nowych procedur. Doświadczenia pandemii COVID-19, w czasie której wdrożenie wzmocnionych środków zapobiegania zakażeniom doprowadziło do wielu niedoborów dostaw medycznych i leków na całym świecie, miało negatywny wpływ na perspektywę wdrażania zrównoważonego rozwoju w sektorze opieki zdrowotnej. W świetle globalnych wyzwań obszar ten jednak powinien się otworzyć na zmiany

i szukać możliwości ulepszenia istniejących procedur, również w kontekście ograniczania wpływu na środowisko.

Ograniczeniem opisanego w niniejszym artykule podejścia jest sama metodyka pomiaru śladu węglowego, której wyniki będą silnie uzależnione od szczegółowości wprowadzonych danych, szczegółowości i szczegółowości zebranych danych oraz źródła współczynników konwersji. Przy ustandaryzowanych i klarownych procedurach obliczeń właściwe wykorzystanie śladu węglowego może dostarczyć cennych informacji na temat uciążliwości środowiskowej sektora ochrony zdrowia.

LITERATURA

- [1] Ali F., H. Jabouri, R. A. Abbott, and A. Wernham. 2024. "National Dermatological Surgery Sustainability Survey: An Evaluation of Healthcare Professional Beliefs and Practices." *Clinical and Experimental Dermatology*. <https://doi.org/10.1093/ced/llae524>.
- [2] Campbell-Lendrum D., T. Neville, C. Schweizer, et al. 2023. "Climate Change and Health: Three Grand Challenges." *Nature Medicine* 29: 1631-1638. <https://doi.org/10.1038/s41591-023-02438-w>
- [3] Chauvet P., A. Enguix, V. Sautou, and K. Slim. 2024. "A Systematic Review Comparing the Safety, Cost and Carbon Footprint of Disposable and Reusable Laparoscopic Devices." *Journal of Visceral Surgery* 161 (2S): 25-31. <https://doi.org/10.1016/j.jvisurg.2023.10.006>.
- [4] D'Alessandro C., K. Szopik-Depczyńska, M. Tarczyńska-Łuniewska, C. Silvestri, and G. Ioppolo. 2024. "Exploring Circular Economy Practices in the Healthcare Sector: A Systematic Review and Bibliometric Analysis." *Sustainability* 16 (1): 401. <https://doi.org/10.3390/su16010401>
- [5] European Commission: Directorate-General for Communication. 2020. *Circular Economy Action Plan – For a Cleaner and More Competitive Europe*. Publications Office of the European Union. <https://data.europa.eu/doi/10.2779/05068>
- [6] European Commission: Directorate-General for Research and Innovation. 2021. *European Green Deal – Research & Innovation Call*. Publications Office of the European Union. <https://data.europa.eu/doi/10.2777/33415>
- [7] Gaetani, M., E. Uleryk, C. Halgren, et al. 2024. „Ślad Węglowy Intensywnej Terapii: Przegląd Systematyczny.” *Intensive Care Medicine* 50: 731-745. <https://doi.org/10.1007/s00134-023-07307-1>
- [8] Hernandez A. 2020. "Single-Use Medical Devices Reuse and Reprocessing." In *Clinical Engineering Handbook*, edited by E. Iadanza,

- 2nd ed., 276-279. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813467-2.00043-2>
- [9] Hossain R., A. Ghose, and V. Sahajwalla. 2025. "Circular Economy of the Materials in the Healthcare Industry: Opportunities and Challenges." *Resources, Conservation and Recycling* 215: 108041. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.108041>.
- [10] Hoveling T., A. S. Nijdam, M. Moninx, J. Faludi, and C. Bakker. 2024. "Circular Economy for Medical Devices: Barriers, Opportunities and Best Practices from a Design Perspective." *Resources, Conservation and Recycling* 208: 107719. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107719>.
- [11] Ishaq S., T. G. Hoang, U. Tanveer, T. H. Hoang, and H. Q. Truong. 2024. "Transformative Capabilities of MedTech Organizations in Driving Circularity in the Healthcare Industry: Insights from Multiple Cases." *Journal of Cleaner Production* 446: 141370. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141370>.
- [12] John, J. B., M. Collins, S. Eames, K. O'Flynn, T. W. R. Briggs, W. K. Gray, and J. S. McGrath. 2025. "The Carbon Footprint of the Perioperative Transurethral Resection of Bladder Tumour Pathway." *BJU International* 135: 78-87. <https://doi.org/10.1111/bju.16477>.
- [13] Marquet, M., and R. Vettors. 2024. "Driving Innovation in MedTech: The Power of Circularity and Sustainable Product Design." EY, June.
- [14] Obwieszczenie Marszałka Sejmu Rzeczypospolitej Polskiej. 2023. „Ogłoszenie Jednolitego Tekstu Ustawy o Odpadach.” *Dziennik Ustaw*, 7 lipca, poz. 1587.
- [15] Ramos, T. M., T. B. Christensen, A. Bour, et al. 2023. "A Not So Circular Healthcare Economy: A Review of Challenges with Plastic Associated Chemicals." *TrAC Trends in Analytical Chemistry* 166: 117191. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2023.117191>.
- [16] Rizan, C., and M. F. Bhutta. 2022. "Environmental Impact and Life Cycle Financial Cost of Hybrid (Reusable/Single-Use) Instruments Versus Single-Use Equivalents in Laparoscopic Cholecystectomy." *Surgical Endoscopy*: 1-12. <https://doi.org/10.1007/s00464-022-09391-9>.
- [17] Rizan, C., and M. F. Bhutta. 2024. *Policy Brief: Reducing the Environmental Impact of Medical Devices Adopted for Use in the NHS*. Brighton and Sussex Medical School. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.26977.93283>.
- [18] Rizan, C., C. Thiel, and M. F. Bhutta. 2024. "Purpose and Limitations of Carbon Footprinting for Healthcare." *Journal of the Royal Society of Medicine* 117 (9): 292-296. <https://doi.org/10.1177/01410768241274047>.
- [19] Shoaib, M., A. Tako, R. Fayad, and A. Vargas-Palacios. 2024. "Towards Using Simulation to Evaluate the Circular Economy of Small Medical Devices." *Winter Simulation Conference (WSC)*, Orlando, FL, 1059-1070. <https://doi.org/10.1109/WSC63780.2024.10838979>.
- [20] World Health Organization. 2024. "Medical Devices Nomenclature."

Zaproszenie na konferencję online z cyklu

„Klimatyzacja obiektów szpitalnych” poświęconą projektowi TechMedis



Z ogromną przyjemnością zapraszamy do udziału w **V Konferencji Naukowo-Technicznej „Klimatyzacja obiektów szpitalnych”**, która odbędzie się w dniu **28 marca 2025 roku** w formule online. Udział w konferencji jest bezpłatny.

Od lat wydarzenie to stanowi platformę wymiany wiedzy i doświadczeń pomiędzy ekspertami z branży medycznej, inżynierskiej i technicznej, poświęconą nowoczesnym rozwiązaniom w zakresie klimatyzacji, wentylacji i higieny szpitalnej. W tym roku tematem przewodnim Konferencji jest projekt prowadzony przez Polskie Zrzeszenie Inżynierów i Techników Sanitarnych **„TechMedis. Kształtowanie zdrowego i bezpiecznego środowiska w obiektach ochrony zdrowia”**, którego celem jest utworzenie aktywnej platformy współpracy pomiędzy sektorem nauki i B+R a ochroną zdrowia, a także inżynierami instalacji sanitarnych i inżynierii środowiska.

**Więcej informacji na temat konferencji
znajdą Państwo na stronie**

<https://techmedis.pl/>

Tematy przedstawiane podczas Konferencji:

- TechMedis. Kształtowanie zdrowego i bezpiecznego środowiska w obiektach ochrony zdrowia
- Gospodarka o obiegu zamkniętym w ochronie zdrowia. Strategie redukcji odpadów i śladu węglowego w szpitalach
- Woda jako nośnik patogenów w placówkach ochrony zdrowia – między higieną a zagrożeniem
- Instalacje wodociągowe w obiektach szpitalnych wg wymagań i wytycznych światowych
- Bezpieczna woda w szpitalach. Nowoczesne metody dezynfekcji i zapobieganie zagrożeniom
- Wykorzystanie nanomateriałów do dezynfekcji powietrza i powierzchni
- Obiekty służby zdrowia a wymagania Fit for 55. Czy mamy szansę na realizację założeń?
- Europejskie standardy środowiska cieplnego w salach operacyjnych: wytyczne i rekomendacje
- Kaskady ciśnienia w pomieszczeniach czystych – dlaczego i jak?
- Recykulacja powietrza w salach operacyjnych – przegląd wytycznych i danych naukowych

Projekt dofinansowany ze środków budżetu państwa, przyznanych przez Ministra Edukacji i Nauki w ramach Programu „Nauka dla Społeczeństwa II”



prof. dr hab. inż. IWONA SKOCZKO

ORCID ID: 0000-0002-7397-4231
Wydział Budownictwa i Nauk o Środowisku
Politechnika Białostocka
PZITS O/Białystok
iwona.skoczko@pzits.pl

Bezpieczna woda w szpitalach. Nowoczesne metody dezynfekcji i zapobieganie zagrożeniom

Safe Water in Hospitals. Modern Disinfection Methods and Risk Prevention

Słowa kluczowe: choroby przenoszone przez wodę, szpitale, dezynfekcja, opieka zdrowotna

Streszczenie

Niniejszy artykuł stanowi przegląd aktualnych rozwiązań w zakresie zapewnienia bezpieczeństwa wody w placówkach medycznych, w tym szereg metod uzdatniania, które można podzielić na konwencjonalne oraz nowoczesne rozwiązania technologiczne. Do najczęściej stosowanych metod należą chlorowanie, ozonowanie, promieniowanie UV oraz filtracja membranowa, jednak coraz większe zainteresowanie budzą innowacyjne technologie, takie jak dezynfekcja elektrolityczna, plazmowa oraz wykorzystanie nanotechnologii. Współczesne badania wskazują na konieczność łączenia różnych strategii dezynfekcji oraz implementacji inteligentnych systemów monitoringu, które umożliwiają wczesne wykrywanie zagrożeń mikrobiologicznych i natychmiastowe reagowanie. W kontekście wzrastającej liczby zakażeń związanych z opieką zdrowotną oraz narastającej oporności drobnoustrojów na standardowe metody eliminacji, kluczowe jest wdrażanie innowacyjnych i multidyscyplinarnych strategii zarządzania jakością wody.

Keywords: water-borne diseases, hospitals, disinfection, health care

Abstract

This work reviews current solutions for ensuring water safety in medical care units, including a range of disinfection methods that can be divided into conventional and modern technological solutions. The most commonly used methods include chlorination, ozonation, UV radiation and membrane filtration, but there is growing interest in innovative technologies such as electrolytic disinfection, plasma disinfection and the use of nanotechnology. Recent research points to the need to combine different disinfection strategies and to implement intelligent monitoring systems that enable early detection of microbial threats and immediate response. In the context of the increasing number of healthcare-associated infections and the growing resistance of microorganisms to standard elimination methods, the implementation of innovative and multidisciplinary water quality management strategies is crucial.

© 2006-2025 Wydawnictwo SIGMA-NOT Sp. z o.o.
All right reserved

1. Wprowadzenie

Zapewnienie wysokiej jakości wody w placówkach medycznych stanowi jeden z kluczowych aspektów ochrony zdrowia publicznego. Woda wykorzystywana w szpitalach pełni szereg funkcji – od zastosowań sanitarnych, poprzez przygotowanie roztworów medycznych, aż po zastosowania technologiczne, takie jak chłodzenie urządzeń czy obsługa systemów nawilżania powietrza [35]. Ze względu na szeroki zakres zastosowań oraz potencjalne konsekwencje zdrowotne wynikające z jej zanieczyszczenia, konieczne jest wdrażanie skutecznych strategii dezynfekcji i monitorowania jakości wody. Woda w szpitalach może stanowić wektor transmisji licznych patogenów, w tym bakterii *Legionella pneumophila*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Escherichia coli* oraz grzybów i wirusów odpornych na standardowe metody uzdatniania [2]. Zakażenia związane z wodą

są szczególnie niebezpieczne w grupach pacjentów immunoniekompetentnych, na przykład na oddziałach intensywnej terapii, onkologicznych czy transplantacyjnych, gdzie infekcje oportunistyczne mogą prowadzić do poważnych powikłań [11]. Pandemia COVID-19 istotnie zmieniła perspektywę w zakresie zagrożeń związanych z jakością wody w placówkach medycznych. Wzrosła świadomość dotycząca możliwości transmisji wirusów i bakterii drogą wodną, a problem wtórnych zakażeń szpitalnych stał się bardziej aktualny niż kiedykolwiek wcześniej [29]. Wykazano, że wirus SARS-CoV-2 może przetrwać w wodzie i ściekach przez długi czas, co rodzi obawy dotyczące potencjalnego skażenia systemów wodociągowych [21].

Z tego względu jednym z głównych wyzwań w utrzymaniu odpowiedniej jakości wody w szpitalach jest zarządzanie systemem wodociągowym, który cechuje się złożoną architekturą obejmującą liczne punkty poboru, zbiorniki

magazynowe oraz układy cyrkulacyjne. W systemach tych dochodzi do zjawisk sprzyjających namnażaniu mikroorganizmów, takich jak stagnacja wody, powstawanie osadów i biofilmów bakteryjnych oraz fluktuacje temperatury [12]. W szczególności biofilm stanowi poważne zagrożenie epidemiologiczne, ponieważ może być rezerwuarem dla drobnoustrojów odpornych na standardowe metody dezynfekcji [14]. Często systemy wodociągowe w szpitalach mają charakter zamknięty, co ogranicza dostęp do pełnych badań nad ich funkcjonowaniem i skutecznością metod dezynfekcji. Badania przeprowadzone przez Sulaiman [31] wskazuje, że w wielu systemach szpitalnych obecne są mikroorganizmy o wysokiej odporności na środki dezynfekcyjne, szczególnie w biofilmach rozwijających się na wewnętrznych powierzchniach rur. Jednocześnie, jak podkreśla Hoenich [18], literatura naukowa dotycząca długoterminowej skuteczności różnych metod dezynfekcji w zamkniętych systemach wodociągowych jest wciąż niepełna, a istniejące badania często skupiają się jedynie na krótkoterminowych efektach stosowania poszczególnych technologii.

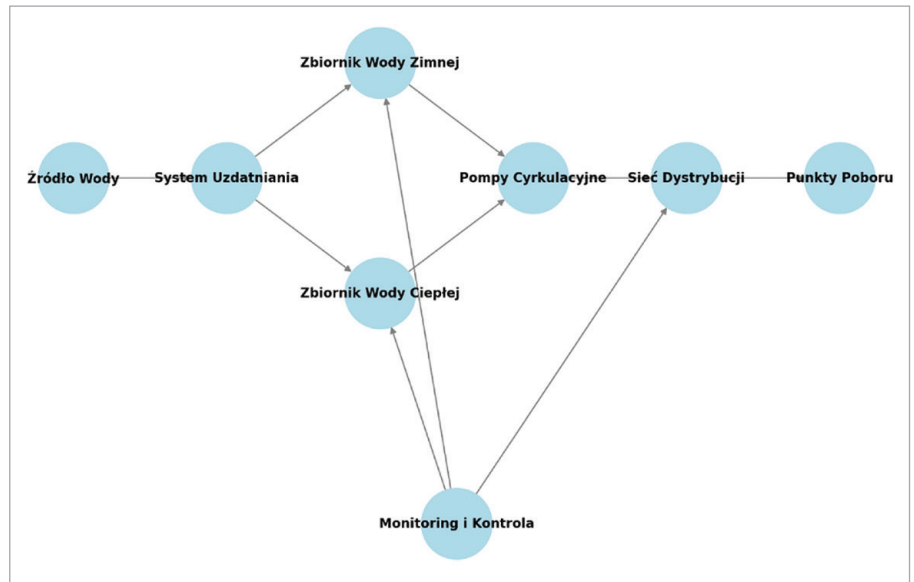
2. System wodociągowy w szpitalu

System wodociągowy w szpitalach jest złożoną infrastrukturą, której celem jest zapewnienie stałego dostępu do wody o odpowiedniej jakości mikrobiologicznej i fizykochemicznej. Na rysunku 1 przedstawiono kluczowe elementy tego systemu, obejmujące źródło wody, system uzdatniania, zbiorniki magazynowe (wody ciepłej i zimnej), pompy cyrkulacyjne, sieć dystrybucji oraz punkty poboru.

2.1. Źródła zasilania wodą

Szpitaly są zasilane wodą głównie z systemów wodociągowych miejskich, jednak w niektórych placówkach stosuje się również alternatywne źródła, takie jak studnie głębinowe oraz systemy zbiorników awaryjnych, które mogą zapewniać dostawy wody w sytuacjach kryzysowych [1]. Woda dostarczana do szpitali musi spełniać rygorystyczne normy jakości, określone przez Światową Organizację Zdrowia oraz krajowe agencje sanitarne [35]. W przypadku wykrycia skażenia wody lub awarii sieci wodociągowej, stosowane są procedury zarządzania kryzysowego, obejmujące natychmiastową szokową dezynfekcję oraz wdrożenie systemów przepływów rezerwowych. Woda pochodząca z alternatywnych źródeł wymaga dodatkowego uzdatniania, aby spełniać normy mikrobiologiczne i fizykochemiczne [3].

Systemy dystrybucji wody w placówkach medycznych są rozbudowane i obejmują sieci przewodów transportujących wodę do poszczególnych stref szpitala, takich jak oddziały szpitalne, sale operacyjne, laboratoria i pomieszczenia sanitarne [3]. Istotne jest, by woda była dostarczana do obiektu w sposób ciągły i bez żadnych przerw. Z tego względu prawidłowo zaprojektowany system dystrybucji wody w szpitalach



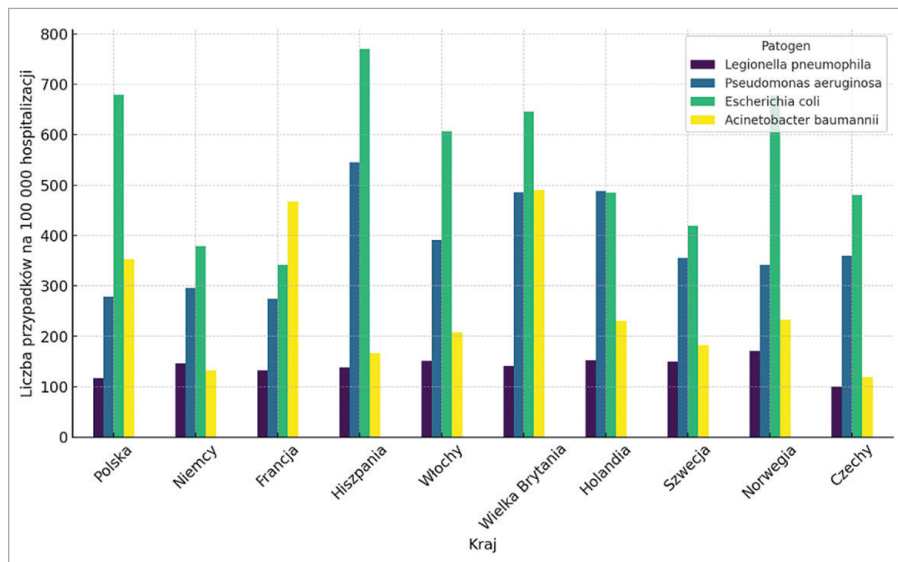
Rys. 1. Schemat systemu wodociągowego w szpitalu (opracowanie własne)

wymaga zapewnienia co najmniej dwóch niezależnych od siebie ujęć wody. Zakłada się, że woda jest dostarczana z zewnętrznej, np. miejskiej, sieci wodociągowej. Ponadto każdy szpital powinien mieć korzystając w sytuacjach awaryjnych lub zwiększonego zapotrzebowania na wodę z własnego, bezpiecznego, rezerwowego ujęcia wody. Najczęściej ujęcie takie stanowi studnia głębinowa lub zbiornik magazynowo-rezerwowo, którego pojemność powinna być taka, by zabezpieczyć zaopatrzenie w wodę wszystkich oddziałów szpitala przez minimum 12 godzin. Złożoność szpitalnych systemów dystrybucyjnych może sprzyjać stagnacji wody oraz powstawaniu biofilmów bakteryjnych, co zwiększa ryzyko zakażeń szpitalnych. Każdy z oddziałów szpitala wymaga utrzymania odpowiednich parametrów fizykochemicznych i mikrobiologicznych, co wiąże się z koniecznością ciągłego monitorowania jakości wody oraz zastosowania systemów uzdatniania [11], [2], [27].

Szpitaly wyposażone są w odrębne zbiorniki magazynowe zimnej i ciepłej wody, co ma kluczowe znaczenie przy kontroli termicznej i prewencji rozwoju *Legionella pneumophila* [11]. Ciepła woda przechowywana jest zwykle w temperaturze powyżej 60°C, co ogranicza namnażanie bakterii, natomiast temperatura zimnej wody powinna być utrzymywana poniżej 10°C, aby zapobiec ich proliferacji [4]. Regularne czyszczenie i dezynfekcja zbiorników magazynowych są niezbędne do zapobiegania osadzaniu się biofilmów i innych zanieczyszczeń. Niezwykle istotne jest monitorowanie punktów końcowych sieci, takich jak prysznice, umywalki i wylewki kranowe, które mogą stanowić rezerwuariat dla bakterii. Wdrażanie prewencyjnej dezynfekcji końcowych punktów poboru jest standardową praktyką w szpitalach wysokiego ryzyka [1], [18].

3. Źródła zagrożeń

W placówkach medycznych jakość wody stanowi kluczowy element zapewnienia bezpieczeństwa pacjentów i personelu. Zanieczyszczona woda może stanowić rezerwuariat drobnoustrojów oraz substancji chemicznych, które prowadzić mogą do zakażeń szpitalnych. Według Europejskiego Centrum ds. Zapobiegania i Kontroli Chorób (ECDC) [9],



Rys. 2. Średnia liczba zakażeń szpitalnych wywołanych przez bakterie wodne w Europie w latach 2020-2025 (opracowanie własne na podstawie [35] i [9])

zakażenia związane z opieką zdrowotną dotyczą około 7,1% pacjentów hospitalizowanych w Europie, a w krajach rozwijających się wartość ta może przekraczać 10%. Szczególnie narażone są osoby z osłabionym układem odpornościowym, przebywające na oddziałach intensywnej terapii oraz pacjenci poddawani zabiegom inwazyjnym [27].

Mikroorganizmy patogenne mogą rozwijać się w instalacjach wodnych szpitali, zwłaszcza w obszarach stagnacji i cyrkulacji wody ciepłej. Badania przeprowadzone przez Exner [11], [12] i Flemming z zespołami [14] wskazują, że 40%-60% zakażeń szpitalnych może być związanych z mikroorganizmami obecnymi w wodzie.

Do najczęściej występujących drobnoustrojów należą:

Legionella pneumophila (LP) – bakteria rozwijająca się w temperaturze 25°C-45°C, powodująca legionellozę, która może prowadzić do ciężkiego zapalenia płuc.

Pseudomonas aeruginosa (PA) – oportunistyczny patogen odporny na wiele antybiotyków, często powodujący infekcje u pacjentów z obniżoną odpornością.

Escherichia coli (szczepy patogenne) (EC) – bakteria powodująca zakażenia układu pokarmowego i moczowego.

Acinetobacter baumannii (AB) – organizm wysoce odporny na antybiotyki, zdolny do przetrwania w szpitalnym środowisku wodnym.

Bakterie patogenne mogą przetrwać długi czas w biofilmie, czyli strukturze tworzącej warstwę ochronną dla drobnoustrojów. Występuje głównie w przewodach wodociągowych, zbiornikach oraz urządzeniach sanitarnych. Charakteryzuje się wysoką opornością na dezynfekcję chemiczną i termiczną, co czyni go trudnym do eliminacji. Niektóre z bakterii są odporne na antyseptykę, ponieważ są zdolne do wytwarzania przetrwalników, inne są związane z biofilmem, mogą bytować w komórkach innych organizmów lub występują w postaci skupisk, co ogranicza bezpośredni kontakt dezynfektanta z komórkami bakteryjnymi i obniża skuteczność prowadzonej dezynfekcji. Badania pokazują, że bakterie w biofilmie mogą wykazywać nawet 1000-krotnie większą odporność na antybiotyki w porównaniu do form planktonicznych [14]. W rezultacie część mikroorganizmów obecnych w wodzie przechodzi przez systemy uzdatniania wody i przedostaje się do systemów dystrybucji.

Analiza danych dotyczących zakażeń szpitalnych wywołanych przez bakterie wodne w wybranych krajach Europy przedstawionych na rysunku 2 wskazuje na znaczące różnice w częstości ich występowania. Najwyższe wskaźniki odnotowano w krajach południowej Europy, co może wynikać zarówno z cieplejszego klimatu sprzyjającego namnażaniu patogenów w systemach wodnych, jak i z większego obciążenia systemu ochrony zdrowia. W Europie Środkowej, obejmującej Niemcy, Francję, Wielką Brytanię, Polskę i Czechy, zakażenia utrzymują się na umiarkowanym poziomie, jednak Polska wyróżnia się wyraźnie wyższą liczbą zakażeń LP, co sugeruje konieczność optymalizacji systemów wodociągowych i metod dezynfekcji w placówkach medycznych. Najniższe

wskaźniki zakażeń odnotowano w krajach skandynawskich, takich jak Szwecja i Norwegia, co może wynikać z bardziej rygorystycznych norm sanitarnych, zaawansowanych systemów monitorowania jakości wody oraz skuteczniejszych metod dezynfekcji. W analizowanych krajach szczególnie problematyczna jest AB, o wysokiej oporności na antybiotyki, której najwyższe wskaźniki odnotowano w Hiszpanii, Włoszech i Polsce. Porównując Europę Zachodnią i Środkowo-Wschodnią, można zauważyć podobny poziom zakażeń, jednak wyższe wskaźniki infekcji LP mogą świadczyć o niedostatecznym nadzorze jakości wody. Wzrost antybiooporności wskazuje na konieczność wdrażania nowoczesnych metod dezynfekcji i lepszej kontroli mikrobiologicznej wody w szpitalach.

4. Konwencjonalne metody dezynfekcji stosowane w szpitalach

Dezynfekcja wody w placówkach medycznych jest kluczowym elementem strategii zapobiegania zakażeniom szpitalnym i zapewnienia bezpieczeństwa pacjentów oraz personelu. Skuteczność metod dezynfekcji zależy od ich zdolności do eliminowania patogenów, utrzymania stabilności wody oraz braku ryzyka wtórnego skażenia. Konwencjonalne metody dezynfekcji, mimo ich szerokiego zastosowania, mają określone ograniczenia, które wymagają dostosowania strategii w zależności od charakterystyki placówki medycznej oraz warunków środowiskowych [11], [12].

4.1. Chlorowanie i jego pochodne

Chlorowanie jest jedną z najczęściej stosowanych metod dezynfekcji wody w placówkach medycznych. Wykorzystuje się pięć głównych form chloru: chlor gazowy (Cl₂), podchloryn sodu (NaOCl), podchloryn wapnia (Ca(OCl)₂), dichloraminę (NHCl₂) oraz monochloraminę (NH₂Cl). Każdy z tych środków ma odmienną charakterystykę działania oraz efektywność w eliminacji mikroorganizmów. Mechanizm dezynfekcji polega na reakcji chloru z wodą, w wyniku której powstaje kwas podchloryny (HOCl) i jon podchlorynowy (OCl⁻), które wykazują silne właściwości bakteriobójcze,

uszkadzając błony komórkowe i zaburząc metabolizm [28].

Chlor gazowy (Cl_2) jest najbardziej efektywną i ekonomiczną formą chlorowania, jednak jego stosowanie wymaga szczególnych środków ostrożności ze względu na toksyczność i wysoką reaktywność chemiczną. Podchloryn sodu (NaOCl), stosowany w postaci roztworu, jest łatwiejszy w aplikacji, lecz jego skuteczność zależy od stężenia oraz wartości pH wody. Podchloryn wapnia (Ca(OCl)_2), dostępny w postaci granulatu lub tabletek, wykazuje stabilniejsze działanie, ale może powodować powstawanie osadów w systemie wodociągowym. Chloraminy, w tym dichloramina (NHCl_2) i monochloramina (NH_2Cl), są stosowane głównie do długoterminowego utrzymania jakości wody. Monochloramina jest bardziej stabilna niż wolny chlor i wykazuje niższą reaktywność w tworzeniu produktów ubocznych dezynfekcji, takich jak trihalometany (THM). Jednak jej skuteczność wobec niektórych patogenów, takich jak LP, jest niższa w porównaniu do chloru gazowego i podchlorynu [8].

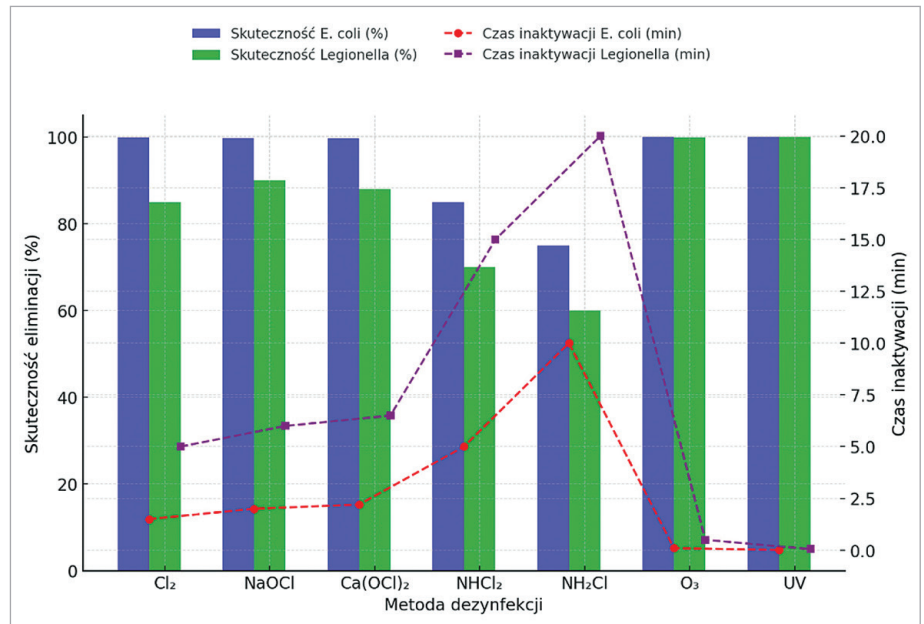
Chlorowanie jest skuteczne wobec szerokiego spektrum patogenów i zapewnia utrzymanie poziomu chloru resztkowego w sieci wodociągowej, co chroni przed wtórnym skażeniem. Niestety produkty uboczne chlorowania, takie jak trihalometany (THM) i haloacetonitryle (HAN), mogą mieć działanie toksyczne i są uznawane za rakotwórcze. Długotrwałe stosowanie chloru i jego pochodnych może prowadzić do korozji instalacji wodociągowej oraz zwiększać ryzyko powstawania osadów [28].

4.2. Ozonowanie

Ozonowanie jest metodą dezynfekcji opartą na silnych właściwościach oksydacyjnych ozonu (O_3), który niszczy błony komórkowe patogenów oraz składników cytoplazmatycznych. W porównaniu do chloru, ozonowanie cechuje się większą skutecznością wobec bakterii, wirusów oraz odpornych na środki chemiczne form przetrwalnikowych [22]. Ozonowanie jest szybkie i nie powoduje powstawania trwałych produktów ubocznych. Skutecznie eliminuje biofilmy w instalacjach wodnych, co jest istotne w prewencji zakażeń szpitalnych. Jednakże ozon jest gazem nietrwałym i nie zapewnia długotrwałej ochrony przed wtórnym skażeniem i wymaga stosowania specjalistycznych generatorów in situ. Nadmierna ekspozycja na ozon może powodować korozję instalacji wodnych oraz negatywnie wpływać na zdrowie personelu i pacjentów w przypadku niekontrolowanego uwalniania ozonu do powietrza [32].

4.3. Promieniowanie UV

Promieniowanie ultrafioletowe (UV) jest jedną z najbardziej efektywnych metod dezynfekcji stosowanych w szpitalnych systemach wodociągowych. Fale UV o długości 254 nm niszczą DNA mikroorganizmów, uniemożliwiając



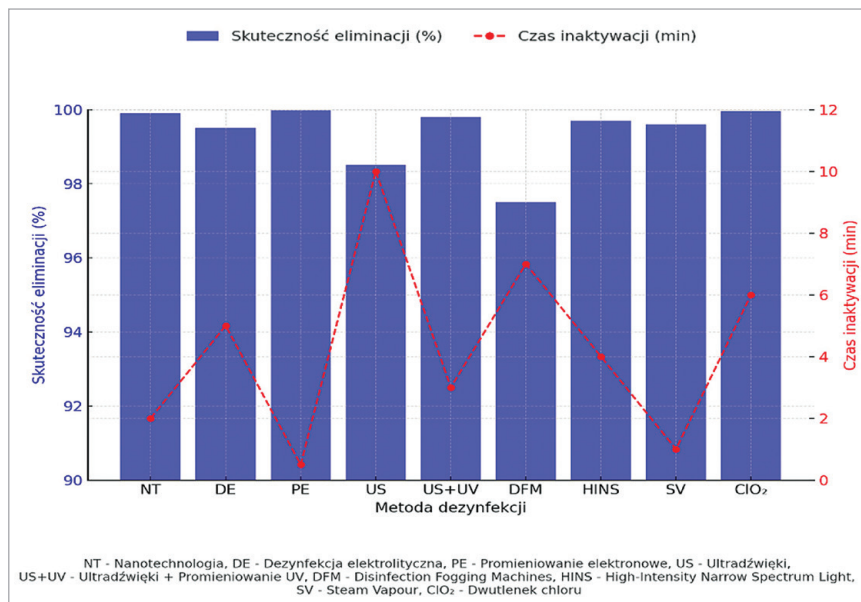
Rys. 3. Porównanie skuteczności i czasu inaktywacji wybranych bakterii przy zastosowaniu konwencjonalnych metod dezynfekcji (opracowanie własne na podst. [8], [28], [32], [36], [25], [26])

ich dalsze namnażanie i prowadząc do ich eliminacji. Dezynfekcja UV nie wymaga stosowania substancji chemicznych, dzięki czemu eliminuje ryzyko powstawania toksycznych produktów ubocznych. Jest szczególnie skuteczna wobec wirusów, bakterii i pierwotniaków, w tym form odpornych na chlor. Z drugiej jednak strony metoda UV nie zapewnia długoterminowej ochrony przed skażeniem, ponieważ nie pozostawia żadnych substancji dezynfekujących w wodzie [36].

Przedstawione na rysunku 3 analizy skuteczności metod dezynfekcji wskazują, że ozonowanie oraz promieniowanie UV wykazują najwyższą efektywność w eliminacji zarówno EC i LP, osiągając niemal 100% skuteczność inaktywacji w bardzo krótkim czasie. Metody oparte na chlorze (Cl_2 , NaOCl , Ca(OCl)_2) charakteryzują się wysoką efektywnością wobec EC (ponad 99%), jednak ich skuteczność względem LP jest niższa, szczególnie dla Ca(OCl)_2 . Chloraminy: NHCl_2 i NH_2Cl wykazują najniższą skuteczność oraz najdłuższy czas inaktywacji. Analiza czasu inaktywacji pokazuje, że metody bazujące na O_3 i UV eliminują patogeny w ułamku minuty, co czyni je bardziej efektywnymi w sytuacjach wymagających natychmiastowej dezynfekcji. Metody chlorowe charakteryzują się znacznie dłuższym czasem działania. Wyniki te potwierdzają, że wybór odpowiedniej metody dezynfekcji powinien być dostosowany do specyfiki zanieczyszczenia mikrobiologicznego oraz wymaganej szybkości działania w danym systemie wodociągowym placówki medycznej.

5. Nowoczesne metody dezynfekcji wody – perspektywy przyszłości

Postęp technologiczny w dziedzinie uzdatniania i dezynfekcji wody prowadzi do opracowania nowoczesnych metod, które charakteryzują się wyższą skutecznością wobec patogenów oraz mniejszymi skutkami ubocznymi w porównaniu do tradycyjnych technik. W obliczu rosnącej antybiotykooporności drobnoustrojów oraz wzrastających wymagań sanitarnych w placówkach medycznych, kluczowe staje



Rys. 4. Porównanie skuteczności i czasu inaktywacji wybranych bakterii przy zastosowaniu nowoczesnych metod dezynfekcji (opracowanie własne na podst. [5], [6], [7], [10], [13], [15], [16], [19], [20], [23], [31], [34], [37],[22-38])

się wdrażanie innowacyjnych metod dezynfekcji. Rozwój nanotechnologii, dezynfekcji elektrolitycznej, technologii plazmowych, fotokatalizy, ultradźwięków oraz promieniowania elektronowego otwiera nowe możliwości w zakresie skutecznego i bezpiecznego uzdatniania wody szpitalnej.

5.1. Nanotechnologia w dezynfekcji wody

Nanotechnologia wykorzystuje materiały o nano-rozmiarach, które wykazują unikalne właściwości chemiczne i biologiczne. Nanocząstki węgla, srebra, żelaza, tlenku cynku oraz dwutlenku tytanu charakteryzują się silnym działaniem przeciwdrobnoustrojowym. Mechanizm działania nanocząstek opiera się na interakcji z błonami komórkowymi patogenów, prowadząc do ich uszkodzenia oraz zakłócenia procesów metabolicznych [10]. Nanorurki węglowe CNT wykazują właściwości przeciwdrobnoustrojowe. Zachodzi tu reakcja chemiczna, ale nie powstają żadne toksyczne produkty uboczne. Nanocząstki srebra szczególnie skutecznie niszczą bakterie Gram-ujemne, takie jak PA, oraz bakterie wielooporne, co czyni je atrakcyjnym rozwiązaniem w dezynfekcji wody szpitalnej. Działanie przeciwdrobnoustrojowe nanosrebra opiera się na ciągłym uwalnianiu jonów srebra bez potrzeby dodatkowych urządzeń energochłonnych. Nanosrebro ma zastosowanie w dezynfekcji szczególnie punktów poboru wody [15]. Nanocząstki ZnO wykazują się niezwykłą aktywnością fotokatalityczną i uwalnianiem wolnych rodników niszczących mikroorganizmy [5]. Nanocząsteczki żelaza (Fe NP) to najnowocześniejsza nanotechnologia, która może całkowicie odmienić proces oczyszczania wody pitnej. Są zdolne do interakcji z komórkami drobnoustrojów, co powoduje uszkodzenie błon komórkowych i prowadzi do inaktywacji. Ta technika jest bardzo skuteczna w walce z szeroką gamą bakterii, wirusów i pierwotniaków. Z kolei fotokataliza oparta na dwutlenku tytanu generuje reaktywne formy tlenu pod wpływem promieniowania UV, skutecznie degradując związki organiczne i niszcząc drobnoustroje, w tym wirusy RNA i bakterie wielooporne [16].

5.2. Dezynfekcja elektrolityczna

Technologia dezynfekcji elektrolitycznej polega na elektrolizie roztworów solnych, w wyniku czego powstają aktywne formy chloru, takie jak kwas podchlorawy i podchloryn. Proces ten eliminuje konieczność stosowania klasycznych środków chemicznych i pozwala na unikanie produktów ubocznych, takich jak THM. Badania wykazały, że dezynfekcja elektrolityczna jest skuteczna wobec LP, EC oraz wirusów enterowirusowych, co sprawia, że jest to metoda szczególnie obiecująca dla szpitali [19]. Zastosowanie alkalicznej wody elektrolizowanej nie powoduje negatywnych zmian organoleptycznych wody pitnej. Woda ta ma neutralne pH i jest bezpieczna, nie powodując podrażnień błon śluzowych i skóry [6].

5.3. Promieniowanie elektronowe

Promieniowanie elektronowe (EB) polega na wykorzystaniu wysokoenergetycznych elektronów do niszczenia mikroorganizmów. EB nie generuje produktów ubocznych i jest skuteczne wobec bakterii wieloopornych. Metoda ta umożliwia szybkie niszczenie wirusów i bakterii przez uszkodzenie ich kwasów nukleinowych, co uniemożliwia ich replikację. Woda dezynfekowana w ten sposób zachowuje swoją jakość, nie wykazując zmiany smaku czy zapachu [6]. Proces ten może stanowić realną alternatywę dla ostatecznego unieszkodliwienia niebezpiecznych mikroorganizmów i innych toksycznych związków w wodzie i ściekach. Gdy wysokoenergetyczne elektrony uderzają w wodny roztwór powstają reaktywne cząstki o charakterze silnie utleniającym i dezynfekcyjnym [28]. Podczas wybuchu pandemii COVID-19 w mieście Shiyan w prowincji Hubei w Chinach uruchomiono pierwszy projekt demonstracyjny oczyszczania wody z wykorzystaniem technologii EB. Wszystkie wirusy zostały skutecznie usunięte przez wiązkę elektronów [34].

5.4. Dezynfekcja ultradźwiękowa i ultradźwiękowa z UV

Ultradźwięki generują fale akustyczne, które prowadzą do kawitacji, czyli powstawania mikropęcherzyków implodujących z dużą energią. Proces ten powoduje mechaniczne uszkodzenia błon komórkowych drobnoustrojów, a także może prowadzić do utleniania składników ich komórek. Połączenie ultradźwięków z promieniowaniem UV dodatkowo wzmacnia skuteczność dezynfekcji, umożliwiając jednoczesne uszkodzenie DNA i RNA patogenów. Technologia ta jest szczególnie skuteczna wobec wirusów i bakterii tworzących biofilm [13].

5.5. Zamglawianie dezynfekcyjne

Zamglawianie dezynfekcyjne polega na generowaniu mikroskopijnych kropelek środka dezynfekcyjnego, które wnikają w trudno dostępne miejsca systemów wodnych i urządzeń szpitalnych. Jest to metoda szeroko stosowana w dezynfekcji powietrza, jednak coraz częściej wykorzystywana

do eliminacji biofilmów bakteryjnych i ochrony instalacji wodociągowych przed wtórnym skażeniem [31].

5.6. High-intensity Narrow Spectrum Light (HINS)

HINS to nowoczesna metoda dezynfekcji oparta na wykorzystaniu światła o określonej długości fali, które niszczy mikroorganizmy przez uszkodzenie ich struktur komórkowych. Badania wskazują, że HINS może skutecznie eliminować bakterie Gram-dodatnie i Gram-ujemne, a także wirusy, nie powodując przy tym zmian chemicznych w wodzie [23]. HINS wykorzystuje dłuższe długości fal o mniejszej energii napromieniowania niż UV, takie jak światło widzialne (405 nm). Badania wskazały, że inaktywacja przy długości fali 405 nm jest spowodowana absorpcją porfiryn w organizmie, tworząc reaktywne formy tlenu – wolne rodniki uszkadzające DNA i zakłócające funkcje komórkowe. Wykazano też zwiększoną podatność patogenów układu oddechowego, takich jak SARS-CoV-2 i wirus grypy A na metodę HINS [7]. Znaczne korzyści w zakresie bezpieczeństwa fal światła niebieskiego w porównaniu ze światłem UV, a także ich zdolność do dezaktywacji niebezpiecznych patogenów jak MRSA, potwierdzają potencjał wykorzystania fal innych niż UV do celów dezynfekcyjnych [23].

5.7. Steam Vapour

Para wodna jest stosowana jako metoda dezynfekcji zarówno powierzchni, jak i instalacji wodociągowych. Dzięki wysokiej temperaturze skutecznie niszczy struktury białkowe mikroorganizmów i jest szczególnie efektywna w eliminacji form przetrwalnikowych. Dezynfekcja parą o wysokiej temperaturze odnosi się do procesu obróbki cieplnej na mokro, który wykorzystuje nasyconą parę wodną o temperaturze wyższej niż 100°C do zabijania mikroorganizmów na nośniku transmisyjnym, np. wylewki sieci wodociągowej przez określony czas [37]. Ze względu na ciepło utajone uwalniane przez parę wodną, patogenne mikroorganizmy ulegają denaturacji i koagulacji białek, co prowadzi do ich śmierci [20]. Para wodna może być skutecznie stosowana do sterylizacji systemów ciepłej wody użytkowej w szpitalach, co ogranicza ryzyko namnażania bakterii m.in. z rodzaju LP. Dezynfekcja wszystkich wielolekoopornych patogenów przebiega szybko i całkowicie [37].

5.8. Dwutlenek chloru (ClO₂)

Dwutlenek chloru (ClO₂) jest jedną z najskuteczniejszych metod chemicznej dezynfekcji wody. W przeciwieństwie do Cl₂, ClO₂ działa skutecznie w szerokim zakresie pH, nie generuje znacznych ilości THM i skutecznie niszczy zarówno bakterie, wirusy, jak i biofilmy. Jak wspomniano wcześniej bakterie i biofilmy mogą rozwijać się w rurociągach szpitalnych i prowadzić do potencjalnie poważnych infekcji. ClO₂ może być stosowany w różnych miejscach systemu wodociągowego szpitala, zapewniając kompleksową dezynfekcję [20]. Może być on stosowany w początkowym punkcie dostawy wody, aby uderzeniowo unieszkodliwić patogeny, zanim przedostaną się do układu wodnego szpitala. Ponadto ClO₂ może być stosowany w urządzeniach chłodniczych, które mogą być siedliskiem bakterii LP. ClO₂ jest również skuteczny w zapobieganiu rozwojowi i likwidacji biofilmu znajdującego się w zbiornikach magazynujących

wodę i przewodach wodociągowych. Regularne zastosowanie ClO₂ pozwala ośrodkom służby zdrowia znacznie zmniejszyć możliwość skażenia biofilmem, podczas gdy woda pozostaje zdezynfekowana i bezpieczna [17].

Inną znaczącą zaletą stosowania dwutlenku chloru w szpitalach jest możliwość jego wytwarzania na miejscu. Eliminuje to potrzebę transportu i przechowywania chemikaliów, zmniejszając zarówno wyzwania logistyczne i zapewniając stałe dostawy tego dezynfekanta przy jednoczesnym minimalizowaniu odpadów. W złożonym środowisku szpitala utrzymanie jakości wody jest priorytetem nie podlegającym negocjacji. Dwutlenek chloru oferuje wysoce skuteczne rozwiązanie do uzdatniania wody, które jest w stanie sprostać wyjątkowym wyzwaniom stawianym przez szpitalne systemy wodne [38].

5.9. Synergia nowoczesnych metod dezynfekcji

Integracja różnych metod dezynfekcji pozwala na zwiększenie skuteczności eliminacji drobnoustrojów i minimalizację negatywnych skutków ubocznych stosowania pojedynczych technik. Połączenie metod fizycznych, chemicznych i biologicznych pozwala na wielopoziomową inaktywację patogenów oraz ograniczenie ryzyka ich ponownego namnażania się w systemach wodociągowych. Przykładem skutecznej synergii jest zastosowanie promieniowania UV w połączeniu z ozonowaniem. Ozon skutecznie niszczy błony komórkowe mikroorganizmów oraz rozkłada substancje organiczne, natomiast promieniowanie UV dodatkowo degraduje materiał genetyczny drobnoustrojów, zapobiegając ich dalszej replikacji. Tego typu podejście znacząco zwiększa skuteczność dezynfekcji, redukując również ilość środków chemicznych potrzebnych do uzdatniania wody [34]. Podobnie połączenie pary wodnej z promieniowaniem elektronowym może stanowić skuteczną metodę sterylizacji instalacji wodnych w szpitalach, eliminując zarówno bakterie, jak i ich formy przetrwalnikowe [33], [30]. Kolejnym przykładem synergii jest zastosowanie nanocząstek w połączeniu z filtracją membranową. Filtry membranowe skutecznie usuwają większe cząstki i mikroorganizmy, natomiast nanocząstki srebra lub tlenku cynku działają jako środek bakteriobójczy, eliminując nawet oporne szczepy drobnoustrojów. Takie rozwiązanie pozwala na ograniczenie powstawania biofilmów oraz redukcję ryzyka wtórnego skażenia systemów wodociągowych [38]. Połączenie ultradźwięków z dezynfekcją chemiczną również stanowi obiecujące podejście. Kawitacja generowana przez fale ultradźwiękowe powoduje rozrywanie struktur biofilmów, co umożliwia skuteczniejsze działanie środków chemicznych, takich jak dwutlenek chloru (ClO₂), który skutecznie penetruje powstałe pęknięcia w strukturach mikroorganizmów [16].

6. Wnioski

1. Wysoka jakość wody w placówkach medycznych jest kluczowa dla bezpieczeństwa pacjentów i personelu, a skuteczna dezynfekcja jest niezbędnym elementem zapobiegania zakażeniom szpitalnym.

2. Konwencjonalne metody dezynfekcji, takie jak chlorowanie, ozonowanie i promieniowanie UV, są nadal szeroko stosowane, ale ich skuteczność może być ograniczona przez odporność drobnoustrojów oraz powstawanie produktów ubocznych.

3. Nowoczesne technologie dezynfekcji, w tym nanotechnologia, dezynfekcja elektrolityczna, promieniowanie elektronowe i HINS, oferują skuteczniejsze metody eliminacji patogenów oraz redukcję skutków ubocznych stosowania chemicznych środków dezynfekcyjnych.

4. Synergia różnych metod dezynfekcji, np. połączenie UV i ozonowania, ultradźwięków i chemicznych środków dezynfekcyjnych lub nanocząstek i filtracji membranowej, pozwala na zwiększenie skuteczności eliminacji mikroorganizmów i poprawę jakości wody.

5. W przyszłości kluczowe będzie wdrażanie inteligentnych systemów monitoringu jakości wody, które pozwolą na bieżące dostosowywanie metod dezynfekcji w zależności od rodzaju i stopnia skażenia mikrobiologicznego.

6. Wdrażanie zaawansowanych technologii dezynfekcji w szpitalnych systemach wodociągowych wymaga dalszych badań nad ich skutecznością, kosztami operacyjnymi oraz wpływem na środowisko i zdrowie pacjentów.

LITERATURA

[1] Anaissie E. J., Penzak, S. R., Dignani, M. C. 2002. „The hospital water supply as a source of nosocomial infections: a plea for action”. *Archives of internal medicine* 162,13: 1483-1492.

[2] Bartram J., Chartier, Y., Lee, J. V., Pond, K., Surman-Lee, S. 2019. „Legionella and the prevention of legionellosis”. WHO. *Water, Sanitation, Hygiene and Health* (WSH). ISBN: 9 241562 978.

[3] Bross L., Bäumer, J., Voggenreiter, I., Wienand, I. 2021. „Public health without water? Emergency water supply and minimum supply standards of hospitals in high-income countries using the example of Germany and Austria”. *Water Policy*, 23,2: 205-221.

[4] Cullom A. C., Martin, R. L., Song, Y., Williams, K. 2020. „Critical review: propensity of premise plumbing pipe materials to enhance or diminish growth of Legionella and other opportunistic pathogens”. *Pathogens*, 9, 11: 957.

[5] Danwittayakul S.; Songngam, S.; Sukkasi, S. 2020. „Enhanced solar water disinfection using ZnO supported photocatalysts”. *Environ. Technol.*, 41: 349-356.

[6] Dewi F.R.; Stanley, R.; Powell, S.M.; Burke, C.M. 2017. „Application of electrolysed oxidising water as a sanitiser to extend the shelf-life of seafood products: A review.” *J. Food Sci. Technol.*, 54: 1321-1332.

[7] Dixon A. 2024. „High Intensity Narrow Spectrum light (HINS) at 405nm is a safe and continuous disinfection technology proven to kill harmful viruses, including”; Covid19, Influenza-A, and bacteria linked to HAIs. ACIPC Conference materials. <https://acipconference.com.au/the-virucidal-effects-of-405nm-visible-light-on-sars-cov-2-and-influenza-a-virus/>

[8] Drogui P., Daghrrir, R. 2015. „Chlorine for water disinfection: Properties, applications and health effects”. *CO2 sequestration, biofuels and depollution*, 1-32.

[9] ECDC. 2021. „Healthcare-associated infections surveillance in Europe. European Centre for Disease Prevention and Control”. <https://www.ecdc.europa.eu/en>

[10] Elhenawy S., Khraisheh, M., AlMomani, F., Al-Ghouti, M. 2024. „Emerging Nanomaterials for Drinking Water Purification: A New Era of Water Treatment Technology”. *Nanomaterials*, 14,21: 1707. <https://doi.org/10.3390/nano14211707>

[11] Exner M, Kramer A, Lajoie L, Gebel J. 2005. „Prevention and control of health care-associated waterborne infections in health care facilities”. *Am J Infect Control*, 33, 5 : 26-40. doi: 10.1016/j.ajic.2005.04.002. PMID: 15940114.

[12] Exner M., Bhattacharya, S., Gebel, J., Goroncy-Bermes, P. 2020. „Chemical disinfection in healthcare settings: critical aspects for the development of global strategies. *GMS hygiene and infection control*, 15, Doc36.

[13] Fetyan, N. A. H., Salem Attia, T. M. (2020). „Water purification using ultrasound waves: application and challenges”. *Arab Journal of Basic and Applied Sciences*, 27, 1: 194-207. <https://doi.org/10.1080/25765299.2020.1762294>

[14] Flemming H. C., Wuertz, S. 2019. „Bacteria and biofilm dynamics in hospital water systems”. *Nature Reviews Microbiology*, 17, 11: 671-680.

[15] Gadgil D.J., Shetty Kodialbail, V. 2021. „Suspended and polycaprolactone immobilized Ag @TiO2/polyaniline nanocomposites for water

disinfection and endotoxin degradation by visible and solar light-mediated photocatalysis.” *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 28: 12780-12791.

[16] Gehrke I, Geiser A, Somborn-Schulz A. 2015. „Innovations in nanotechnology for water treatment”. *Nanotechnol Sci Appl*. 6; 8:1-17. doi: 10.2147/NSA.S43773. PMID: 25609931.

[17] Hinenoya A., Awasthi, S. P., Yasuda, N., Shima, A. 2015. „Chlorine dioxide is a better disinfectant than sodium hypochlorite against multi-drug resistant *Staphylococcus aureus*, *Pseudomonas aeruginosa*, and *Acinetobacter baumannii*. *Jap.J. Inf. Deseas.*, 68,4: 276-279.

[18] Hoenich N. A. 2009. „Disinfection of the hospital water supply: a hidden risk to dialysis patients”. *Critical Care*, 13: 1-2.

[19] Hricova D., Stephan R., Zweifel C. 2008. „Electrolyzed water and its application in the food industry”. *J. Food Protect.*, 71: 1934-1947.

[20] Hsu M. S., Wu M. Y., Huang Y. T., Liao C. H. 2016. „Efficacy of chlorine dioxide disinfection to non-fermentative Gram-negative bacilli and non-tuberculous mycobacteria in a hospital water system”. *Journal of Hospital Infection*, 93,1: 22-28.

[21] Kitajima, M., Ahmed W., Bibby K., Carducci A. 2020. „SARS-CoV-2 in wastewater: State of the knowledge and research needs”. *Sci.of Tot. Env.*, 739: 139076.

[22] LeChevallier M. W., Kwok-Keung A. (2004). „Water treatment and pathogen control: Process efficiency in achieving safe drinking-water. WHO”. *Water, Sanitation, Hygiene and Health* (WSH).

[23] Maclean M., MacGregor SJ., Anderson JG., Woolsey GA. (2010). „Environmental decontamination of a hospital isolation room using high-intensity narrow-spectrum light”. *J.of Hosp.Inf.* 76,3: 247-251.

[24] Manawi Y., Kochkodan V., Hussein MA., Khaleel M. A. 2016. „Can carbon-based nanomaterials revolutionize membrane fabrication for water treatment and desalination?”. *Desalin.*, 391: 69-88.

[25] Marjanowski J., (2021). „Legionella – porównanie efektywności dezynfekcji termicznej i chemicznej”. Instytut Gospodarki Komunalnej i Przemysłowej, materiały IGCP. Dostępne online: <https://www.igcp.pl/wp-content/themes/igcp/download.php?p=8.-Marcor.pdf>

[26] Matuszewska R., Stankiewicz A. (2017). „Metody dezynfekcji stosowane do usuwania zanieczyszczenia mikrobiologicznego wody”. *Hygieia Public Health*, 52,3: 226-233. Dostępne online: <https://www.h-ph.pl/pdf/hyg-2017/hyg-2017-3-226.pdf>

[27] Maynard E., Whapham C. (2020). „Quality and supply of water used in hospitals. In *Decontamination in Hospitals and Healthcare* (45-69). Woodhead Publishing.

[28] Mazhar M. A., Khan N. A., Ahmed S., Khan A. H. (2020). „Chlorination disinfection by-products in municipal drinking water—a review”. *J.of Clean.Prod.*, 273: 123159.

[29] Morawska L., Milton D. K. (2020). „It is time to address airborne transmission of COVID-19”. *Clinical infectious diseases: official public of the Infectious Diseases Society of America*, ciaa939.

[30] Sharma A., Sharma N. and Luthra , G. (2023). „An Overview of the Importance of Fogging Disinfection Method in the Healthcare Set-ups”, *J.Pharm. Res. Internat.I*, 35,4 :1-8. doi: 10.9734/jpri/2023/v35i47319.

[31] Sulaiman I. M. (Ed.). (2024). „Diagnosis of pathogenic microorganisms causing infectious diseases”. Florida, US: CRC Press.Gagnon, G. A., Huck, P. M., Plaza, E., Barbeau, B. (2022). Innovative approaches in drinking water disinfection. *Water Research*, 208, 117879.

[32] Tu L. H., Oanh L. H., Trung N. V., Cuong L. C. (2020). „Study of ozone disinfection in the hospital environment”. *Viet.J.Chem.*, 58,4: 565-568.

[33] Waite T D, Kurucz C N, Cooper W J, Brown D. (1998). „Full scale electron beam systems for treatment of water, wastewater and medical waste”. IAEA: N. Web.

[34] Wang J, Wang S, Chen C, Hu J, He S. (2022). „Treatment of hospital wastewater by electron beam technology: Removal of COD, pathogenic bacteria and viruses”. *Chemosphere*, 308, 1 :136265. doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.136265.

[35] WHO. (2021). „Water quality and health. World Health Organization”. <https://www.who.int>

[36] Yang JH., Wu UI., Tai HM., Sheng WH. (2019). „Effectiveness of an UV-C disinfection system for reduction of healthcare-associated pathogens”. *J.Microbiol., Immun.&Infect.*, 52,3: 487-493.

[37] Zhang Z. L. S. L., Liu S., Lu J., & Yao M. 2016. „Development and application prospect of high temperature steam technology of medical wastes. In *Annual Meeting of Chinese Society of Environmental Sciences*”, Haikou, China.

[38] Zhao Y. L., Huang H. P., Chen T. L., Chiang P. C. 2021. „A smart sterilization robot system with chlorine dioxide for spray disinfection”. *IEEE Sensors Journal*, 21,19: 22047-22057.



dr inż. AMELIA STASZOWSKA

ORCID ID: 0000-0002-7434-6480
Katedra Jakości Powietrza Wewnętrznego
i Zewnętrznego
Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki
Politechnika Lubelska
a.staszowska@pollub.pl

Wykorzystanie nanomateriałów do dezynfekcji powierzchni i powietrza

Application of Nanomaterials in Surface and Air Disinfection

Słowa kluczowe: *nanomateriały, dezynfekcja, czystość powierzchni, mikrobiologiczna jakość powietrza*

Streszczenie

Czystość mikrobiologiczna powierzchni i powietrza jest kluczowym warunkiem poprawnego przebiegu procesu leczenia i rekonwalescencji po przebytych zabiegach operacyjnych. Nadal jednak zakażenia wewnątrzszpitalne dotyczą ok. 10% hospitalizowanych pacjentów pomimo stosowanych zabiegów dezynfekcji i sterylizacji. W artykule omówiono możliwość wykorzystania wybranych grup nanomateriałów w procesie dezynfekcji powierzchni i powietrza z uwzględnieniem ich potencjalnego wpływu na zdrowie personelu medycznego i środowiska.

Keywords: *nanomaterials, disinfection, surface cleanliness, microbiological air quality*

Abstract

The microbiological cleanliness of surfaces and air is a key condition for the correct course of the treatment process and recovery after surgery. However, nosocomial infections still affect about 10% of hospitalized patients despite the disinfection procedures used. The article discusses the possibility of using selected groups of nanomaterials in the process of surface and air disinfection, taking into account their potential impact on the health of medical personnel and the environment.

© 2006-2025 Wydawnictwo SIGMA-NOT Sp. z o.o.
All right reserved

1. Wstęp

Zapewnienie bezpieczeństwa mikrobiologicznego powierzchni i powietrza w podmiotach wykonujących działalność leczniczą jest kluczowym działaniem pozwalającym ograniczyć problem zakażeń wewnątrzszpitalnych, skrócić czas leczenia i rekonwalescencji pacjentów po przebytych zabiegach. Jest szczególnie istotne na oddziałach o wysokim rygorze sanitarnym m.in. oddziałach intensywnej opieki medycznej, blokach operacyjnych, oddziałach neonatologicznych lub onkologicznych [7]. Powietrze w pomieszczeniach jest środkiem transportu mikroorganizmów, które następnie opadają na różne powierzchnie. Ograniczenie występowania mikroorganizmów chorobotwórczych na powierzchniach często dotykanych przez pacjentów i personel medyczny zmniejsza również narażenie zawodowe wśród kadry medycznej i niemedycznej, a także osób odwiedzających [3]. Do obniżenia liczebności mikroorganizmów lub zahamowania ich rozwoju stosuje się proces dezynfekcji chemicznej i fizycznej. Najczęściej wykorzystuje się w tym celu preparaty oparte na roztworach alkoholi (etanol, izopropanol), czwartorzędowe sole amoniowe, aldehydy (np. glutarowy, formaldehyd), środki utleniające, takie jak podchloryn sodu, nadtlenek wodoru, jod, fenole, związki metali (jodopowidon), biguanidy (chlorheksydyna i jej pochodne) [10]. Produkty do dezynfekcji powinny wykazywać się wysoką skutecznością biobójczą (bakterio-, drożdżako-, wirusobójczą) przy jednoczesnym jak najmniejszym oddziaływaniu drażniącym lub uciążliwości

zapachowej. W handlu dostępne są w postaci płynów, sprayów, żeli, gazików i chusteczek dezynfekujących.

Do dezynfekcji powierzchni i powietrza najczęściej wykorzystuje się lampy będące źródłem promieniowania UVC (222 nm, 254 nm) w opcji stacjonarnej lub przenośnej, jako jednostki sufitowe/naścienne. Lampy przepływowe z zamkniętą komorą nadają się jedynie do dezynfekcji powietrza i mogą być użytkowane w obecności ludzi w pomieszczeniu. Do dezynfekcji powierzchni stosuje się lampy bezpośrednio działania. Natomiast jednoczesną dezynfekcję powietrza i powierzchni zapewniają lampy dwufunkcyjne [9].

W czasach pandemii koronawirusa zyskała zainteresowania inna technika dezynfekcji tj. zamgławianie, które polega na uwalnianiu do powietrza drobnej mgiełki środka dezynfekującego (nadtlenek wodoru, która osadza się na wszystkich powierzchniach, eliminując patogeny. Zamgławianie jest szczególnie przydatne w miejscach, do których trudno dotrzeć konwencjonalnymi metodami czyszczenia, takich jak sufity, ściany i powierzchnie urządzeń. Tradycyjne sposoby dezynfekcji mają pewne wady, do których należy zaliczyć w przypadku środków w formie płynnej – niszczenie dezynfekowanych powierzchni, a w przypadku ludzi zmiany skórne, podrażnienie oczu, dróg oddechowych. Użycie promieniowania UVC o długości fali 254 nm jest wysoce szkodliwe dla organizmów żywych, zatem nie może być stosowane bezpośrednio w obecności ludzi. Żywotność żarnika lampy również jest ograniczona i konieczna jest jego okresowa wymiana. Pośrednio zmniejszenie stężenia drobnoustrojów

w powietrzu można uzyskać stosując odpowiednie systemy oczyszczania powietrza wykorzystujące filtry HEPA i filtry elektrostatyczne o udowodnionej wysokiej skuteczności do usuwania cząstek o wymiarach nawet poniżej 0,3 μm [18]. W literaturze branżowej można również znaleźć doniesienia o możliwości dezynfekcji powietrza z użyciem filtrów fotokatalitycznych i plazmowych, jednakże ich skuteczność w tym zakresie jest dyskusyjna. Nie bez znaczenia jest również generowanie ubocznych produktów reakcji rodnikowych, np. formaldehydu [13].

Stąd też istnieje konieczność poszukiwania innych alternatywnych metod dezynfekcji, które byłyby równie skuteczne co konwencjonalne i jednocześnie pozwalały na bezpieczne ich użytkowanie. Do takich rozwiązań należy zaliczyć wykorzystanie nanomateriałów.

2. Nanomateriały

Według Centrum Monitorowania Unii Europejskiej ds. Nanomateriałów [20] nanomateriały definiuje się jako substancje chemiczne lub materiały o wielkości cząstek od 1 do 100 nanometrów (nm) w co najmniej jednym wymiarze. Z uwagi na zwiększone pole powierzchni właściwej nanomateriały mogą mieć inne właściwości w porównaniu z tym samym materiałem bez cech w nanoskali. Nanomateriałem według Komisji Europejskiej [21] może być naturalny, powstały przypadkowo lub wytworzony materiał zawierający cząstki w stanie swobodnym lub w formie agregatu bądź aglomeratu, w którym co najmniej 50% cząstek w liczbowym rozkładzie wielkości ma co najmniej jeden wymiar w zakresie 1 nm-100 nm. W drodze odstępstwa za nanomateriały należy uznać fulereny, płatki grafenowe oraz jednościenne nanorurki węglowe o co najmniej jednym wymiarze poniżej 1 nm. Nanomateriały mają duży potencjał wykorzystania w różnych dziedzinach techniki (budownictwie, przemyśle motoryzacyjnym, precyzyjnym), medycynie a także tekstyliach i ochronie środowiska [18,19].

3. Wykorzystanie nanomateriałów w oczyszczaniu i dezynfekcji powietrza

Najczęściej do inaktywacji patogenów wykorzystuje się cztery grupy nanomateriałów: metale i ich tlenki, nanomateriały węglowe, siarkowe i azotowe [7].

Nanocząstki metali hamują rozwój bakterii i wirusów za pomocą złożonego i nie do końca poznanego mechanizmu, który polega na mechanicznym uszkodzeniu struktur komórkowych, destabilizacji błony komórkowej i zwiększeniu jej przepuszczalności oraz powstawaniu reaktywnych form tlenu co jest szczególnie ważne w zwalczaniu wirusów [17]. Spośród najlepiej przebadanych nanocząstek metali należy wskazać srebro. Jego działanie biobójcze zostało szeroko udokumentowane w przypadku bakterii *Staphylococcus aureus*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Escherichia coli*, *Bacillus cereus*, *Listeria innocua*, *Salmonella choleraesuis*.

Nanosrebro można stosować jako składnik płynów do dezynfekcji (na rynku polskim pod terminem srebro koloidalne), środków do zamgławiania, ale także powłok samodezynfekujących na powierzchniach klamek, uchwytów, ram, blatów. Znanie są również wyroby tekstylne z tym nanomateriałem stosowane do produkcji środków ochrony osobistej jak maseczki czy fartuchy. Nanosrebro może również ograniczać transmisję bioarozoli jako składnik materiałów do

filtracji powietrza [2], [5], [16]. Oprócz srebra, obiecujące wyniki w zakresie sterylizacji wykazują Cu (CuO, Cu₂O), Al (Al₂O₃), Bi (Bi₂O₃), Ce (CeO₂), Fe (Fe₂O₃), Mg (MgO), Ti (TiO₂) i Zn (ZnO) oraz ich mieszaniny [17], [18].

Nanostruktury TiO₂ wykorzystuje się m.in. do fotokatalitycznej dezynfekcji. TiO₂ tworzy aktywne powłoki antywirusowe przeciwko wirusom otoczkowym i bezotoczkowym m.in. ludzkiemu norowirusowi, wirusowi grypy A (A/PR8/H1N1) i wirusowi opryszczki pospolitej [13]. Wymaga ona jednak użycia zewnętrznego promieniowania UVA, które jest konieczne do aktywacji fotokatalizatora, a w pomieszczeniach nie ma swojego naturalnego źródła. Aby pokonać to ograniczenie stosuje się mechanizm domieszkiwania TiO₂ innymi metalami (glin), co w konsekwencji rozszerza zakres pasma promieniowania aktywnego do światła widzialnego i znacznie wydłuża czas życia nośników ładunku wzbudzonych światłem (bizmut). Natomiast metale przejściowe jak wanad, żelazo, chrom, niob i nikiel mogą poprawić aktywność fotokatalityczną TiO₂ poprzez zwężenie przerwy energetycznej. Oprócz pierwiastków metalicznych, domieszkowane mogą być również niektóre pierwiastki niemetaliczne. Użycie azotu zwięża przerwę energetyczną TiO₂, co powoduje wzrost aktywności fotokatalitycznej w świetle widzialnym. Bor, węgiel i siarka dają podobny efekt. Coraz więcej badań kieruje się w stronę współdomieszkiwania wieloelementowego np. cynk i azot. Pozwala to skrócić wymagany czas dezynfekcji z 60 minut do 30 minut lub mniej i osiągnąć 100% usunięcie mikroorganizmów.

Podobne do TiO₂ właściwości w zakresie dezynfekcji i sterylizacji wykazują **nanomateriały oparte na cynku, miedzi i złocie** [17]. Intensywne badania prowadzono nad bakteriobójczym działaniem disiarczku molibdenu i disiarczku wolframu. Wyniki okazały się być bardzo obiecujące – po 20 minutach zdeaktywowano ponad 99% *S. aureus* i *E. coli*.

Nanomateriały na bazie węgla np. nanorurki węglowe, grafen, fulereny, sadza itp. również wykazują zdolność do sterylizacji i dezynfekcji. Najwięcej doniesień naukowych dotyczy g-C₃N₄ i jego skuteczności wobec *E. coli*, *S. aureus*, and *S. typhimurium* [19]

Nanopowłoki antybakteryjne mogą poprawiać skuteczność procesów filtracji, adsorpcji, fotokatalizy i dezynfekcji. Nanowłókna ze względu na dużą powierzchnię właściwą mają zdolność do wychwytywania bardzo małych cząstek w strumieniu powietrza [12]. Mogą zatem być wykorzystane do filtracji powietrza z pyłów zawieszonych i bioarozoli. Elektroprzędzone nanowłókna z polichlorku winylu, octanu celulozy i poliakrylonitrylu z dodatkiem środków przeciwustrojowych np. jonów srebra i nanosrebra pozwalają skutecznie usunąć *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*, *Bacillus subtilis* i *Pseudomonas aeruginosa* [11].

Funcjonalizowane nanomateriały węglowe (nanorurki, fulereny, grafen i jego pochodne – tlenek grafenu, węglowe kropki kwantowe) wykazują potwierdzone właściwości biobójcze w stosunku do bakterii wielolekoopornych. Natomiast antybakteryjne i fotokatalityczne izoporowate membrany wielokrotnego użytku do filtracji powietrza na bazie nanorurek ZnO mają zdolność działania bakteriobójcze zarówno w stosunku do bakterii Gram-dodatnich (*Staphylococcus aureus*), jak i Gram-ujemnych (*Salmonella enteritidis*). Wspomniane filtry membranowe można łatwo czyścić i ponownie używać wiele razy poprzez proste czyszczenie natryskowe mieszaną wodą i etanolu [1].

Nanokompozyty mogą również być z powodzeniem używane w produkcji materiałów na potrzeby środków ochrony

osobistej (maski ochronne, odzież). W celu zapobiegania zakażeniom bakteryjnym w szpitalach lub innych placówkach opieki zdrowotnej opracowano samodezynfekujący się materiał tekstylny na bazie porfiryńowych struktur metaloorganicznych (PCN-224) i nanocząstek Ag na dzianinie bawełnianej. Nawet po dziesięciu praniach, tkanina nadal gwarantowała 6log inaktywacji bakterii *E. coli* i *S. aureus* [14]. Biorąc pod uwagę powszechność i użyteczność produktów na bazie tworzyw sztucznych we współczesnym społeczeństwie, aktywne integrowanie nanostruktur z polimerami, które same sterylizują się może zapewnić sposób na spowolnienie transmisji infekcji wirusowych. Cienkie folie poliimidowe z nanoporowatymi membranami i nanomateriałami na bazie węgla mogą działać jako bariery ochronne przed wirusami w środkach ochrony osobistej i filtrach powietrza [4]. Jednak nieprawidłowe użycie i utylizacja środków ochrony osobistej może narazić użytkownika na kontakt z wirionami uwiecznionymi w tkaninie, zwiększając ryzyko infekcji. Rozpylane materiały przeciwwirusowe są również cenne w utrzymaniu czystości środowiska pacjenta i sprzętu ochronnego. Może to obejmować szerokospektralne nanożele lub nanocząstki, które naśladują komórkowy siarczan heparyny, aby przywierają do glikoprotein wirusowych i blokować ich interakcję z receptorami komórek gospodarza. Oprócz zapobiegania wnikaniu wirusa, niektóre nanomateriały, takie jak cynk, hamują również polimerazę RNA wirusa, a tym samym replikację wirusa poprzez uwalnianie jonów metali [15]. W porównaniu do antybiotyków o wąskim działaniu i leków przeciwwirusowych, nanocząstki na bazie metali mają różnorodne mechanizmy inaktywacji, co utrudnia bakteriom i wirusom rozwinięcie oporności, ponieważ musiałyby one nabyć wiele mutacji ochronnych jednocześnie [13], [17]. Źródło światła, jego intensywność i czas trwania bezpośredniego naświetlania ma istotny wpływ na aktywność wirusobójczą TiO_2 . Wykazano, że szkło powlekanie TiO_2 miało znacznie zwiększoną aktywność wraz ze wzrostem oświetlenia z 0,001 do 1,0 mWcm^2 . Przy typowych natężeniach oświetlenia wewnętrznego (~0,01 mWcm^2) zaobserwowano pewną aktywność, ale potrzeba było prawie 24 h, aby zmniejszyć miano wirusa poniżej granicy wykrywalności. Potencjalnym rozwiązaniem tego problemu może być zastosowanie fluorowanego TiO_2 , który może wydajnie wykorzystywać oświetlenie fluorescencyjne do fotokatalitycznej dezynfekcji. Optymalnym podłożem dla powłok TiO_2 do fotodegradacji bakterii (zachodzi 50 razy szybciej) są powierzchnie porowate, takie jak filtry z mikrofibry szklanej, w porównaniu z gładkimi. Warto podkreślić, że do przygotowania takich powłok na powierzchniach porowatych wymagana ilość fotokatalizatora jest znacznie mniejsza na jednostkę powierzchni, przy jednoczesnym osiągnięciu lepszej ogólnej dyspersji, ponieważ włókna szklane tworzą strukturę mikroplytek TiO_2 [8, 13].

ZnO i jego nanocząstki mają właściwości antybakteryjne przeciwko szerokiej gamie mikroorganizmów, w tym *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Klebsiella pneumoniae*, *Pseudomonas vulgaris* i *Campylobacter jejuni*. Jednocześnie tlenek cynku, nawet w formie nanocząstek, jest uważany za bezpieczny w kontakcie z ludźmi. Nanocząstki tlenku cynku są wiodącym kandydatem wirusobójczym do zastosowań terapeutycznych i szpitalnych powłok samosterylizujących ze względu na ich unikalne cechy niskiej cytotoksyczności dla komórek ludzkich, fotokatalizę generującą rodniki tlenkowe i hydroksylowe, które powodują stres oksydacyjny i peroksydację lipidów, a w konsekwencji uszkodzenie błony biologicznej i indukcję apoptozy [8], [17].

4. Podsumowanie

Doniesienia naukowe wskazują, że nanomateriały stanowią obiecującą alternatywę lub uzupełnienie tradycyjnie stosowanych technik dezynfekcji powierzchni i powietrza w obiektach związanych z opieką zdrowotną. Warto podkreślić, że część z proponowanych rozwiązań jest już dostępna na rynku. Należy również wspomnieć, że ograniczeniem w szerszym wykorzystaniu nanomateriałów jest obawa o ich wpływ na zdrowie ludzi i bezpieczeństwo środowiskowe. Podstawowym, lecz nadal nierozpoznanym zagrożeniem ze strony nanomateriałów jest ich niekontrolowane uwalnianie się do środowiska z użytkowanych wyrobów i powstających z nich odpadów.

LITERATURA

- [1] Attia Y. A., Ezet, A. E., Saeed, S., Galmed, A. H. 2024. Nano carbon-modified air purification filters for removal and detection of particulate matters from ambient air. *Scientific Reports*, 14 (1), 621.
- [2] Butler J., Morgan, S., Jones, L., Upton, M., Besinis, A. 2024. Evaluating the antibacterial efficacy of a silver nanocomposite surface coating against nosocomial pathogens as an antibiofilm strategy to prevent hospital infections. *Nanotoxicology*, 18 (4), 410-436.
- [3] Cao J. J., Huang, Y., Zhang, Q. 2021. Ambient air purification by nanotechnologies: from theory to application. *Catalysts*, 11 (11), 1276.
- [4] Choi Y. H., Kim, M. J., Lee, J., Pyun, J. C., Khang, D. Y. 2021. Recyclable, antibacterial, isoporous through-hole membrane air filters with hydrothermally grown ZnO nanorods. *Nanomaterials*, 11 (12), 3381.
- [5] Deshmukh S. P., Patil, S. M., Mullani, S. B., Delekar, S. D. 2019. Silver nanoparticles as an effective disinfectant: A review. *Materials Science and Engineering: C*, 97, 954-965.
- [6] Dong X., Wang, S., Ren, K. 2023. Application of composite antibacterial nanoparticle non-woven fabric in sterilization of hospital infection. *Preventive Medicine*, 173, 107597.
- [7] Hu Z. T., Chen, Y., Fei, Y. F., Loo, S. L., Chen, G., Hu, M., Wang, J. 2022. An overview of nanomaterial-based novel disinfection technologies for harmful microorganisms: Mechanism, synthesis, devices and application. *Science of The Total Environment*, 837, 155720.
- [8] Jose A., Gizdavic-Nikolaidis, M., Swift, S. 2023. Antimicrobial coatings: reviewing options for healthcare applications. *Applied Microbiology*, 3 (1), 145-174.
- [9] Kchaou M., Abuhasel, K., Khadr, M., Hosni, F., Alquraish, M. 2020. Surface disinfection to protect against microorganisms: Overview of traditional methods and issues of emergent nanotechnologies. *Applied Sciences*, 10 (17), 6040.
- [10] Lin N., Verma, D., Saini, N., Arbi, R., Munir, M., Jovic, M., Turak, A. 2021. Antiviral nanoparticles for sanitizing surfaces: A roadmap to self-sterilizing against COVID-19. *Nano Today*, 40, 101267.
- [11] Lu T., Cui, J., Qu, Q., Wang, Y., Zhang, J., Xiong, R., Huang, C. 2021. Multistructured electrospun nanofibers for air filtration: a review. *ACS Applied Materials Interfaces*, 13 (20), 23293-23313.
- [12] Madhu A., Singh, N., Yadav, M. 2024. Challenges and Opportunities in Nanotechnology for Textile Finishing. *Nanotechnology in Textile Finishing: Advancements and Applications*, 487-511.
- [13] Mohite V. S., Darade, M. M., Sharma, R. K., Pawar, S. H. 2022. Nanoparticle engineered photocatalytic paints: a roadmap to self-sterilizing against the spread of communicable diseases. *Catalysts*, 12 (3), 326.
- [14] Nie X., Wu, S., Liao, S., Chen, J., Huang, F., Li, W., Wei, Q. 2021. Light-driven self-disinfecting textiles functionalized by PCN-224 and Ag nanoparticles. *Journal of Hazardous Materials*, 416, 125786.
- [15] Ortega-Nieto C., Losada-Garcia, N., Prodan, D., Furtos, G., Palomo, J. M. 2023. Recent advances on the design and applications of antimicrobial nanomaterials. *Nanomaterials*, 13 (17), 2406.
- [16] Polívková M., Hubáček, T., Staszek, M., Švorčík, V., Siegel, J. 2017. Antimicrobial treatment of polymeric medical devices by silver nanomaterials and related technology. *International journal of molecular sciences*, 18 (2), 419.
- [17] Soni V., Khosla, A., Singh, P., Nguyen, V. H., Van Le, Q., Selvasembian, R., Raizada, P. 2022. Current perspective in metal oxide based photocatalysts for virus disinfection: A review. *Journal of Environmental Management*, 308, 114617.
- [18] Yılmaz G. E., Göktürk, I., Ovezova, M., Yılmaz, F., Kılıç, S., Denizli, A. 2023. Antimicrobial nanomaterials: a review. *Hygiene*, 3 (3), 269-290.
- [19] Wang X., Wang, R., Zhang, Y., Meng, J., Zhang, W., Cao, R., Chen, M. 2025. Development and evaluation of antibacterial nanofiber membranes via coaxial electrospinning for enhanced air filtration performance. *Journal of Membrane Science*, 716, 123524.
- [20] <https://echa.europa.eu/pl/regulations/nanomaterials>
- [21] <https://uon.echa.europa.eu/pl/definition-of-nanomaterial>



dr inż. SYLWIA SZCZĘŚNIAK

ORCID ID: 0000-0003-4358-0263
Katedra Klimatyzacji, Ogrzewnictwa,
Gazownictwa i Ochrony Powietrza
Politechnika Wrocławska
Osoba do kontaktu:
sylwia.szczesniak@pwr.edu.pl



dr inż. MICHAŁ KARPUK

ORCID ID: 0000-0002-1827-9834
Katedra Klimatyzacji, Ogrzewnictwa,
Gazownictwa i Ochrony Powietrza
Politechnika Wrocławska

Obiekty służby zdrowia a wymagania Fit for 55. Jaką mamy szansę na realizację założeń?

Health Facilities and Fit For 55 Requirements – What Chance do we Have of Meeting Targets?

Słowa kluczowe: HVAC, efektywność energetyczna, neutralność klimatyczna

Streszczenie

W artykule przeanalizowano możliwości poprawy efektywności energetycznej budynków opieki zdrowotnej w kontekście wymagań pakietu Fit for 55, którego celem jest redukcja emisji gazów cieplarnianych o 55% do 2030 roku. Przedstawiono kontekst regulacyjny wynikający z polityki klimatycznej Unii Europejskiej oraz globalnych porozumień, takich jak Porozumienie Paryskie. Podkreślono, że sektor opieki zdrowotnej odpowiada za 4,4% światowych emisji gazów cieplarnianych, a głównym źródłem zużycia energii są systemy HVAC. W Polsce wiele placówek medycznych działa w przestarzałych budynkach, co utrudnia realizację założeń Fit for 55. W artykule omówiono kluczowe strategie poprawy efektywności energetycznej, w tym termomodernizację, wykorzystanie odnawialnych źródeł energii (OZE), optymalizację systemów HVAC oraz wdrożenie systemów zarządzania energią (EMS). Analiza raportów ESG grup LuxMed i Diagnostyka wskazuje na różnice w podejściu do redukcji emisji – LuxMed wykazuje wzrost udziału OZE w bilansie energetycznym, podczas gdy Diagnostyka nadal bazuje na konwencjonalnych źródłach energii. Wnioski artykułu podkreślają konieczność modernizacji infrastruktury budynków służby zdrowia, usprawnienia raportowania zużycia energii i emisji CO₂, a także edukacji personelu medycznego w zakresie efektywnego zarządzania energią. Zwiększenie efektywności energetycznej w placówkach ochrony zdrowia stanowi kluczowy krok w realizacji celów neutralności klimatycznej UE.

Keywords: HVAC, energy efficiency, climate neutrality

Abstract

The article examines the potential for enhancing the energy efficiency of healthcare buildings in the context of the Fit for 55 package requirements. The Fit for 55 package is a series of legislative measures designed to reduce greenhouse gas emissions by 55% by 2030. The regulatory framework resulting from the European Union's climate policy and global agreements, such as the Paris Agreement, is presented. It is highlighted that the healthcare sector accounts for 4.4% of global greenhouse gas emissions, with HVAC systems being the primary source of energy consumption. In Poland, a significant challenge to meeting the Fit for 55 targets is posed by the fact that many medical facilities operate in outdated buildings. The article goes on to discuss key strategies for enhancing energy efficiency, including building retrofitting, the integration of renewable energy sources (RES), HVAC system optimization, and the implementation of energy management systems (EMS). An analysis of ESG reports from LuxMed and Diagnostyka reveals discrepancies in their approaches to emission reduction, with LuxMed demonstrating an increasing share of RES in its energy balance, while Diagnostyka continues to rely on conventional energy sources. The article concludes that achieving the Fit for 55 goals in healthcare buildings requires modernising infrastructure, enhancing energy consumption and CO₂ emission reporting, and educating medical personnel on energy-efficient management practices. The enhancement of energy efficiency in healthcare facilities is identified as a critical step toward achieving the EU's climate neutrality objectives.

© 2006-2025 Wydawnictwo SIGMA-NOT Sp. z o.o.
All right reserved

1. Wstęp

Według Światowej Organizacji Zdrowia (WHO) zanieczyszczenie powietrza zewnętrznego jest przyczyną ok. 4,2 miliona przedwczesnych zgonów na całym świecie a zachodzące zmiany klimatu, które są konsekwencją emisji zanieczyszczeń do atmosfery, wpływają na warunki narodzin, dorastania, pracy, starzenia się a także codziennego życia ludzi [40].

Od lat toczy się dyskusja nad wpływem zanieczyszczeń emitowanych do atmosfery (szczególnie gazów cieplarnianych) na zachodzące zmiany klimatu. W efekcie tych dyskusji oraz licznych publikacji naukowych od Konwencji Wiedeńskiej (1985 rok), przez Protokoły w Montrealu (1989 rok) oraz w Kyoto (2005 rok) do Porozumienia Paryskiego (2015 rok) określane były warunki oraz możliwości ograniczenia gwałtownie zachodzących zmian klimatu. Porozumienie Paryskie było międzynarodowym traktatem

klimatycznym, który został przyjęty podczas Konferencji Narodów Zjednoczonych w sprawie Zmian Klimatu (COP21) w Paryżu w grudniu 2015 roku. Głównym celem tego porozumienia było ograniczenie globalnego ocieplenia do poziomu o 2°C niższego niż przed rewolucją przemysłową. Ustalenia, które zostały przyjęte w czasie COP21 stanowią podstawę polityki klimatycznej, szczególnie te w zakresie zastopowania globalnego ocieplenia. Porozumienie paryskie weszło w życie w 2016 roku, kiedy spełniony został warunek jego ratyfikacji przez co najmniej 55 państw odpowiedzialnych za co najmniej 55% globalnych emisji gazów cieplarnianych. W 2016 roku porozumienie podpisało 170 państw. Od 2025 r. wszystkie 198 krajów poparło porozumienie paryskie. Spośród nich 195 ugruntowało swoje poparcie przez formalne zatwierdzenie. Obejmujący stanowisko prezydenta Stanów Zjednoczonych Donald Trump, podobnie, jak miało to miejsce w 2020 roku wycofał USA z porozumienia. Porozumienie paryskie uwzględnia zasadę sprawiedliwości klimatycznej oraz zobowiązuje kraje rozwinięte do finansowego oraz technologicznego wspierania krajów rozwijających się aby przeciwdziałać zmianom klimatycznym. Państwa uczestniczące w porozumieniu paryskim zobowiązały się do przedstawienia krajowych celów redukcji emisji gazów cieplarnianych, znanych jako *Nationally Determined Contributions* (NDCs).

Ze względu jednak na nadal rosnącą globalną temperaturę powierzchni ziemi, wzrost temperatury mórz i oceanów i gwałtowne zjawiska pogodowe (powodzie, pożary itp.) Rada i Parlament Europejski na drodze porozumień i konsultacji ustaliły dodatkowe cele, których osiągnięcie ma znacząco ograniczyć wpływ człowieka na globalne zmiany klimatu i ma również przyczynić się do uzyskania celów porozumienia paryskiego. Cele te zapisane zostały w Europejskim Prawie o Klimacie, które zostało wprowadzone w 2021 roku [12].

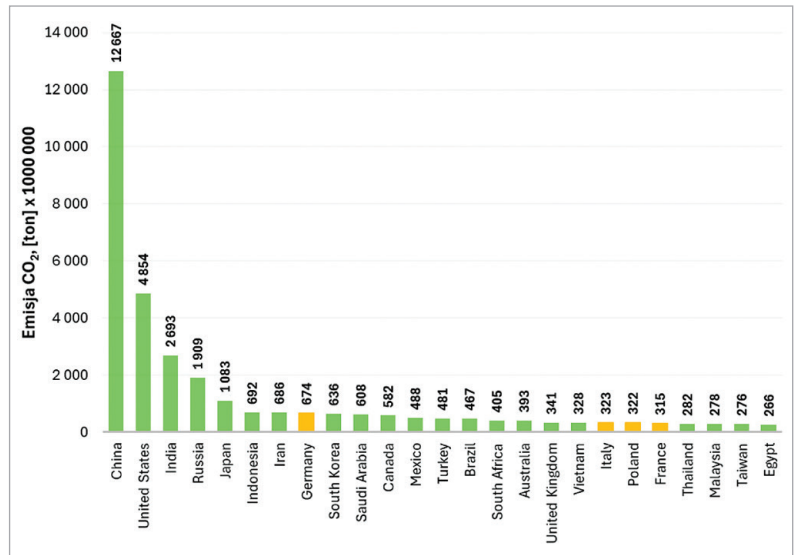
Prawo to określiło 4 podstawowe cele klimatyczne:

Cel 1 – ustanowienie ram służących osiągnięciu neutralności klimatycznej w Unii Europejskiej (UE) do 2050 r. (tj. zrównoważeniu w całej UE emisji gazów cieplarnianych* i ich pochłaniania uregulowanych innym prawem),

Cel 2 – stanowi, że państwa członkowskie UE powinny dążyć do osiągnięcia ujemnych emisji,

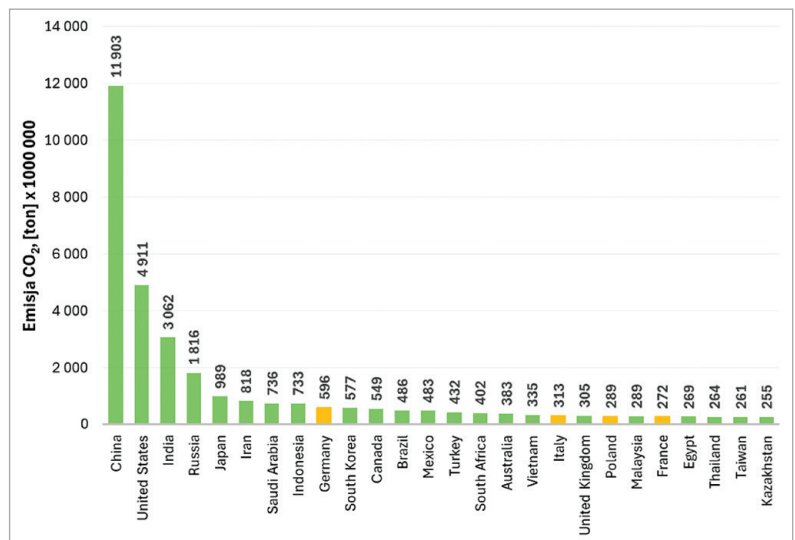
Cel 3 – zakłada ograniczenie unijnych emisji netto gazów cieplarnianych do 2030 r. o co najmniej 55% (w porównaniu z poziomami z 1990 r.) oraz przewiduje określenie celu klimatycznego na 2040 r. w ciągu sześciu miesięcy od pierwszego globalnego przeglądu przeprowadzonego w ramach porozumienia paryskiego [31], które weszło w życie w 2016 roku;

Cel 4 – wprowadza przepisy zapewniające ciągłe postępy w realizacji globalnego celu w zakresie przystosowania się do zmiany klimatu, ustanowionego na mocy porozumienia paryskiego.



Rys. 1. Emisje dwutlenku węgla (CO₂) z paliw kopalnych i przemysłu w roku 2022 bez uwzględnienia zmiany użytkowania gruntów [41]

Fig. 1. Carbon dioxide (CO₂) emissions from fossil fuels and industry in 2022 excluding land use change [41]



Rys. 2. Emisje dwutlenku węgla (CO₂) z paliw kopalnych i przemysłu w roku 2023 bez uwzględnienia zmiany użytkowania gruntów [41]

Fig. 2. Carbon dioxide (CO₂) emissions from fossil fuels and industry in 2023 excluding land use change [41]

Nazwa pakietu „Fit for 55” (Gotowi na 55) [30] jest nawiązaniem do celu 2, którym jest ograniczenie emisji CO₂ do roku 2030 o co najmniej 55%. Pakiet „Fit for 55” zawiera inicjatywy ustawodawcze, które mają być pomocne w ograniczaniu emisji GHG netto a tym samym w osiągnięciu neutralności klimatycznej.

2. Emisja CO₂ na świecie oraz w Europie

Kluczowym założeniem Fit for 55 jest ograniczenie gazów cieplarnianych wyrażonych ekwiwalentem emisji CO₂ do atmosfery. Aby określić skalę zmian na rys. 1 oraz 2 przedstawiono emisję CO₂ dla wielkość emisji ekwiwalentu CO₂ w 2022 i 2023 roku dla 25 państw o największej emisyjności. Największym emiterami niezależnie od rozpatrywanego roku są Chiny. Drugie miejsce zajmują Stany Zjednoczone z emisją o ok. 62% w 2022 r. i ok. 59% w 2023 r. mniejszą

od Chin. Trzecie miejsce zajmują Indie z emisją o ok. 79% dla roku 2022 i o ok. 74% dla roku 2023 mniejszą niż Chiny. Polska w tym zestawieniu znajduje się na 20 pozycji z emisją mniejszą niż emisja Chin – CO₂ o ok. 94% w roku 2022 i o ok. 97% w roku 2023. Największym emiterem w Europie zarówno w roku 2022 jak i 2023 były Niemcy, które znajdują się na 4 pozycji w zestawieniu dla 2022 roku oraz na 5 pozycji w zestawieniu dla roku 2023.

W roku 2023 w porównaniu do roku 2022 Chiny zmniejszyły emisję o ok. 6%. Polska zmniejszyła emisję o ok. 11%. Niemcy także ograniczyły emisję o ok. 6%. Do państw, które zwiększyły emisję należą Stany Zjednoczone (wzrost o ok. 1%), Indie (wzrost o ok. 12%) i Iran (wzrost o ok. 16%). Wielkości emisji ekwiwalentu CO₂ na całym świecie w roku 2023 przedstawiono na rys. 3.

Niezależnie od emisji całkowitej warto także przyjrzeć się emisji jednostkowej „per capita”. W tym zestawieniu najgorzej wyglądają Arabia Saudyjska, Australia i Kanada oraz Stany Zjednoczone. W Europie najgorzej wypada Polska, która zarówno w 2022 jak i w 2023 roku znajdowała się na pierwszej pozycji z największą jednostkową emisją ekwiwalentu CO₂ do atmosfery. Warto jednak zwrócić uwagę na fakt, że globalnie w 2022 roku znajdowaliśmy się na miejscu 10 natomiast w 2023 roku było to miejsce 13 (rys. 4 i 5).

3. Droga do osiągnięcia neutralności klimatycznej

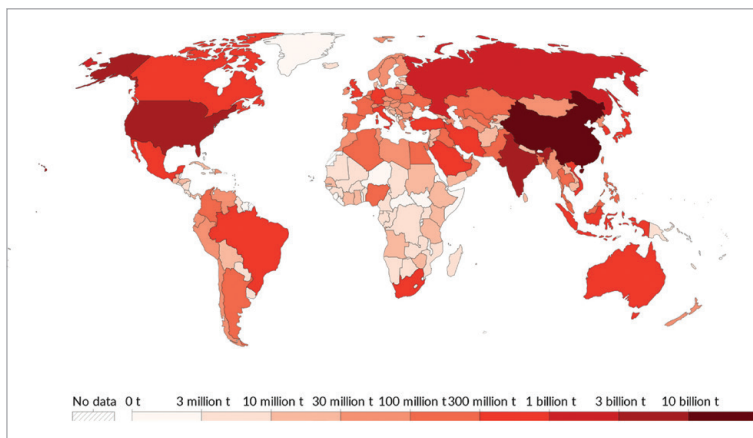
Międzynarodowa Agencja Energii (International Energy Agency – IEA) określiła kluczowe kamienie milowe na drodze do zerowego zużycia energii netto dla sektorów: budynki (B), transport (T), przemysł (P), ciepło i energia elektryczna (C+E) i innych (I).

Spełnienie tych wymagań powinno w efekcie wpłynąć na znaczne zmniejszenie emisji, a tym samym na zatrzymanie wzrostu globalnej temperatury ziemi. Wszystkie kamienie milowe wraz określeniem roku ich uzyskania przedstawiono w tabeli 1. Dodatkowo kolorem zielonym oznaczono kamienie milowe, które bezpośrednio dotyczą budynków, w tym budynków szpitalnych.

Opisane w tabeli 1 kamienie milowe mają skutecznie ograniczyć wpływ człowieka na emisję gazów cieplarnianych do atmosfery, a tym samym ograniczyć efekt cieplarniany, który pojawia się w wyniku ich kumulacji w atmosferze.

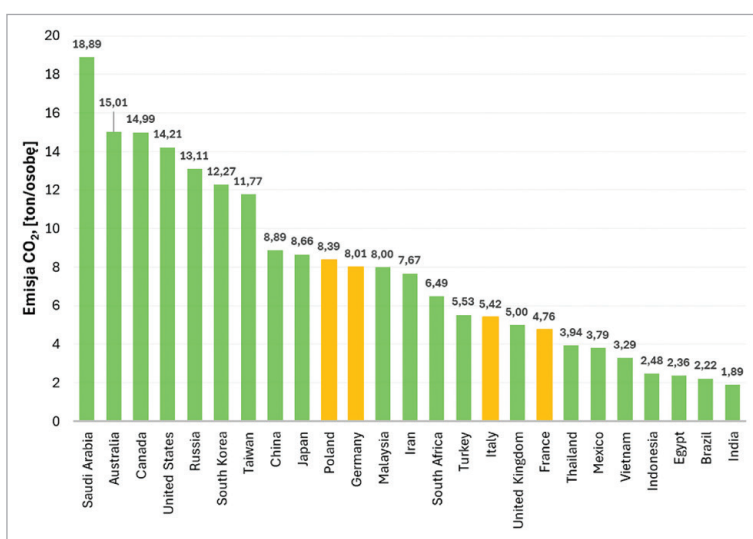
4. Fit for 55

Pakiet Fit for 55 jest kluczową częścią założeń osiągnięcia neutralności klimatycznej i odnosi się bezpośrednio do ograniczenia emisji gazów cieplarnianych do atmosfery. W marcu 2023 r. Parlament Europejski zagłosował za ograniczeniem emisji gazów cieplarnianych we wskazanych sektorach do 2030 r. z 30% do 40% w porównaniu z poziomem z 2005 roku. Wszystkie kraje UE są zobowiązane



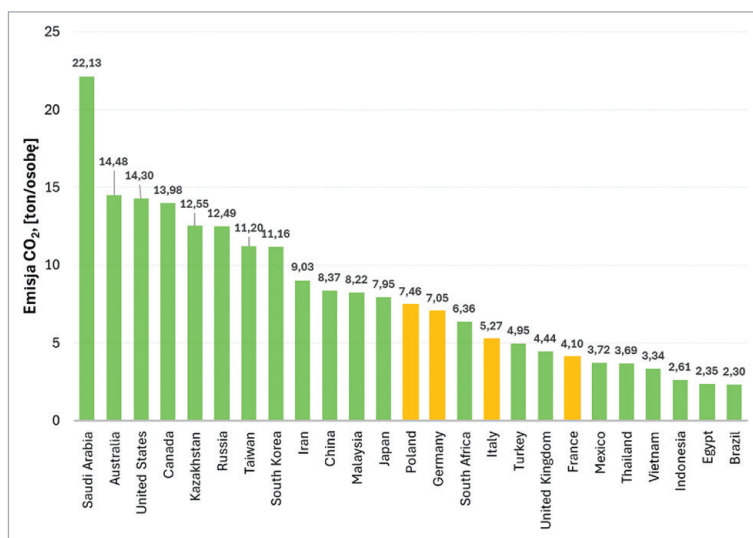
Rys. 3. Roczne emisje CO₂ z paliw kopalnych i przemysłu w roku 2023. Nie uwzględniono zmiany użytkowania gruntów [26]

Fig. 3. Annual CO₂ emissions from fossil fuels and industry in 2023. Land use change not included [26]



Rys. 4. Emisje dwutlenku węgla (CO₂) per capita z paliw kopalnych i przemysłu w roku 2022 bez uwzględnienia zmiany użytkowania gruntów [41]

Fig. 4. Carbon dioxide emissions (CO₂) per capita from fossil fuels and industry in 2022 excluding land use change [41]



Rys. 5. Emisje dwutlenku węgla (CO₂) per capita z paliw kopalnych i przemysłu w roku 2023 bez uwzględnienia zmiany użytkowania gruntów [41]

Fig. 5. Carbon dioxide emissions (CO₂) per capita from fossil fuels and industry in 2023 excluding land use change [41]

**TABELA 1. Kluczowe kamienie milowe na drodze do zera-
wego zużycia energii netto dla sektorów: budynki (B), trans-
port (T), przemysł (P), ciepło i energia elektryczna (C+E) i in-
nych (I) z oznaczeniem roku ich osiągnięcia [20]**

**TABLE 2. Key milestones towards net zero energy consump-
tion for the buildings (B), transport (T), industry (P), heat and
power (C+E) and other (I) sectors, with an indication of the
year they were achieved [20]**

Rok	Założenie do spełnienia	Sektor
2021	brak nowych elektrowni węglowych zatwierdzonych do rozwoju	C+E
	brak nowych pól naftowych i gazowych zatwierdzonych do zagospodarowania.	I
	brak nowych kopalń węgla lub rozbudowy kopalń	I
2025	brak nowej sprzedaży kotłów na paliwa kopalne	B
2030	powszechny dostęp do źródeł energii	B
	wszystkie nowe budynki są przystosowane do zerowej emisji dwutlenku węgla	B
	60% globalnej sprzedaży samochodów to pojazdy elektryczne	T
	większość nowych czystych technologii w przemyśle ciężkim zademonstrowana na dużą skalę	P
	1 020 GW rocznych przyrostów energii słonecznej i wiatrowej	C+E
	wycofanie nielimitowanego węgla w zaawansowanych gospodarkach	C+E
	150 mln ton niskoemisyjnego wodoru 850 GW elektrolizerów	I
2035	większość sprzedawanych urządzeń i systemów chłodzenia jest najlepsza w swojej klasie.	B
	50% sprzedaży samochodów ciężarowych to pojazdy elektryczne	T
	brak sprzedaży nowych samochodów spalinowych	T
	wszystkie sprzedawane przemysłowe silniki elektryczne są najlepsze w swojej klasie	P
	całkowita zerowa emisja netto energii elektrycznej w gospodarkach rozwiniętych	C+E
	4 Gt wychwytywanego CO ₂	I
2040	50% istniejących budynków zmodernizowanych do poziomu gotowości do zerowej emisji dwutlenku węgla	B
	50% paliw wykorzystywanych w lotnictwie to paliwa niskoemisyjne	T
	około 90% istniejących mocy produkcyjnych w przemyśle ciężkim osiąga koniec cyklu inwestycyjnego.	P
	energia elektryczna o zerowej emisji netto na całym świecie	C+E
	stopniowe wycofywanie wszystkich elektrowni węglowych i olejowych	C+E
2045	50% zapotrzebowania na ciepło zaspokajane przez pompy ciepła	B
	435 mln ton niskoemisyjnego wodoru 3 000 GW elektrolizerów	I
2050	ponad 85% budynków jest gotowych na zerową emisję dwutlenku węgla.	B
	ponad 90% ciężkiej produkcji przemysłowej jest niskoemisyjna.	P
	prawie 70% globalnej produkcji energii elektrycznej pochodzi z fotowoltaiki i wiatru	C+E
	7,6 Gt wychwyconego dwutlenku węgla	I

do ograniczenia emisji gazów cieplarnianych, na różnych poziomach (od 10% do 50%). Polska zobowiązała się do ograniczenia emisji gazów cieplarnianych o 17,7% w porównaniu z emisją wykazaną w roku bazowym 2005 [28].

Obecnie większość emisji gazów cieplarnianych przelicza się na ekwiwalent emisji CO₂ co znacząco ułatwia analizę oraz porównanie emisji zarówno w skali globalnej jak i lokalnej.

Zgodnie z założeniami Unii Europejskiej pakiet Fit for 55 wskazuje drogi ograniczenia emisji GHGs netto, a tym samym ograniczenia emisji ekwiwalentu CO₂ do atmosfery.

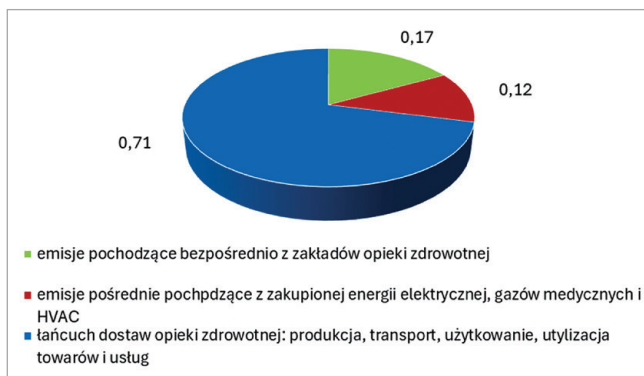
W skład pakietu wchodzi następujące działania (w wyszczególnieniu rozdzielono poszczególne sektory i zakres działań):

- redukcja emisji z transportu, budynków, rolnictwa i odpadów,
- osiąganie celów klimatycznych w sektorach użytkowania gruntów i leśnictwa,
- redukcja emisji metanu z paliw kopalnych,
- przejście z gazu kopalnego na gazy odnawialne i niskoemisyjne,
- zwiększenie wykorzystanie energii odnawialnej,
 - uzyskanie wyższej efektywności energetycznej (zmniejszenie zapotrzebowania na energię)
 - zwiększanie ekologiczności budynków,
 - reforma unijnego systemu handlu emisjami,
 - zmiana opodatkowania energii,
 - rozwiązanie kwestii emisji spoza UE,
 - wykorzystanie funduszu wspierającego najbardziej dotkniętych obywateli i przedsiębiorstwa,
 - ♦ wykorzystanie zrównoważonego transportu,
 - ♦ zwiększenie wykorzystania bardziej ekologicznych paliw w sektorze lotniczym i morskim,
 - ♦ zaostrzenie norm emisji CO₂ dla samochodów osobowych i dostawczych,

Sektor opieki zdrowotnej w Polsce i w Europie, podobnie jak inne sektory, musi sprostać wyzwaniom określonym w pakiecie Fit for 55. Ze względu na charakter sektor ten dokładnie musi sprostać wyzwaniom związanym z koniecznością zwiększenia efektywności energetycznej oraz zwiększenia ekologiczności budynków.

5. Emisja CO₂ w odniesieniu do budynków opieki zdrowotnej

Budynki, w odniesieniu ogólnym, odpowiadają za 30% globalnego zużycia energii końcowej i 26% globalnych emisji związanych z zapotrzebowaniem na energię (z tego 8% to emisje bezpośrednie w budynkach, a 18% to emisje pośrednie związane z produkcją energii elektrycznej i ciepła wykorzystywanego w budynkach) [21]. Budynki opieki zdrowotnej odpowiadają ogółem za 4,4% emisji gazów cieplarnianych do atmosfery i w związku ze zmianami klimatu oraz rosnącym zapotrzebowaniem na coraz lepsze warunki emisje te stale rosną. W służbie zdrowia aż 84% wszystkich emisji pochodzi ze spalania paliw kopalnych (węgiel, ropa naftowa, gaz). Podział emisji ze względu na ich źródła przedstawiono na rys. 6. Za 71% emisji odpowiada łańcuch dostaw (produkcja, użytkowanie, utylizacja towarów i usług). 17% stanowią emisje pochodzące bezpośrednio z zakładów opieki zdrowotnej, a pozostałe 12% stanowią emisje pośrednie



Rys. 6. Udział poszczególnych źródeł w całkowitej emisji gazów cieplarnianych z budynków opieki zdrowotnej [37]
 Fig. 6. Share of individual sources in total greenhouse gas emissions for healthcare buildings [37]

z zakupionej energii elektrycznej, gazów medycznych i systemów HVAC. Tak duże emisje związane są ze specyfiką sektora, który ma całodobowy charakter, bardzo wysokie wymagania w zakresie klimatyzacji, warunków przechowywania leków oraz specjalistycznego sprzętu medycznego. Co jednak najważniejsze wiele szpitali i innych placówek służby zdrowia nadal ma przestarzałą infrastrukturę, która nie odpowiada wymaganiom efektywności energetycznej.

Zmniejszenie tych emisji możliwe jest zatem m.in. przez większą efektywność energetyczną lub mniejsze zużycie energii, co ma kluczowe znaczenie do osiągnięcia neutralności klimatycznej do 2050 roku oraz ograniczenie emisji CO2 do 2030 r.

6. Raporty ESG w drodze do uzyskania założeń Fit for 55

Obecnie część podmiotów gospodarczych musi corocznie przedstawiać tzw. raport ESG, nazywany także raportem zrównoważonego rozwoju (dawniej raport niefinansowy). Raport zawiera informacje o działalności przedsiębiorstwa dotyczący trzech obszarów:

Obszar 1 – środowiskowy (*Environmental*) – dotyczy ochrony środowiska, zarządzania zużyciem zasobów naturalnych, emisji gazów cieplarnianych, zarządzania odpadami, ochrony różnorodności biologicznej,

Obszar 2 – społeczny (*Social*) – obejmuje politykę zatrudnienia, prawa pracownicze, bezpieczeństwo pracy, zaangażowanie społeczne oraz zrównoważony rozwój społeczności lokalnej,

Obszar 3 – ład korporacyjny (*Governance*) – dotyczy struktury zarządzania w firmie oraz praktyk zarządczych (skład i funkcja zarządu, przejrzystość działań i systemów kontroli wewnętrznej, etyka biznesowa, polityka antykorupcyjna, relacje z akcjonariuszami) [13].

Raporty, o ile są wykonane rzetelnie, są pomocne m.in. w ocenie możliwości uzyskania założeń określonych w protokole paryskim czy pakiecie Fit for 55 ponieważ zawierają m.in. emisje pośrednie i bezpośrednie gazów cieplarnianych oraz zużycie energii i jej źródła, usuwanie gazów cieplarnianych i projekty usuwania gazów cieplarnianych finansowane za pomocą jednostek emisji dwutlenku węgla, wewnętrzne ustalanie opłat za emisję gazów cieplarnianych i antycypowane skutki finansowe wynikające z istotnego ryzyka fizycznego i ryzyka przejścia oraz potencjalnych szans związanych z klimatem [13]. Do obliczenia emisji gazów

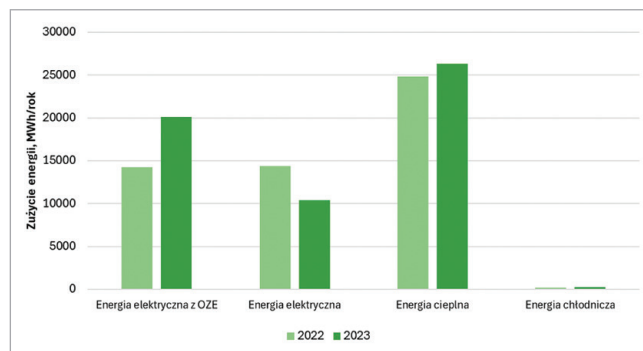
cieplarnianych, firmy powinny stosować standardy rozliczania gazów cieplarnianych określone w korporacyjnym standardzie rachunkowości i sprawozdawczości [16]. Dopuszcza się także zastosowanie metodologii rozliczania emisji gazów cieplarnianych wg normy ISO 14064-1:2018 [22]. Zgodnie z wytycznymi obliczeń zawartymi w [16] obliczenia emisji należy wykonywać dla:

- zakresu 1 – bezpośrednie emisje z posiadanych lub kontrolowanych źródeł, w tym: spalanie stacjonarne (paliwa i źródła ogrzewania), spalanie mobilne (pojazdy), emisje ulotne (wynikające z nieszczelności chłodzenia lub klimatyzacji) oraz emisje procesowe z procesów przemysłowych,
- zakresu 2 – pośrednie emisje z zakupionej lub nabytej energii elektrycznej, ciepła lub pary,
- zakresu 3 – inne pośrednie emisje, które występują w łańcuchu wartości zarówno na poprzedzającym, jak i następczym szczeblu działalności. Emisje gazów cieplarnianych z zakresu 3 można dalej podzielić na łącznie 15 kategorii.

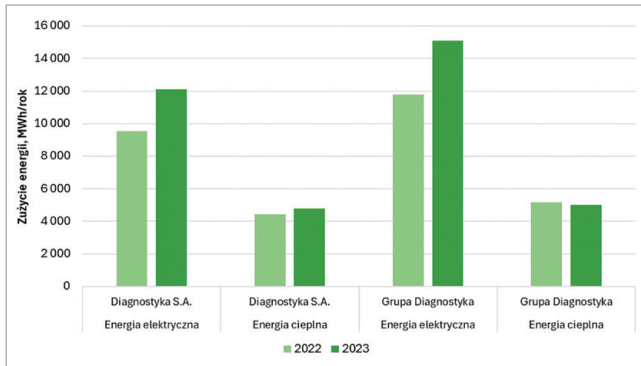
Z zakresu obiektów służby zdrowia raporty takie przedstawia grupa LuxMed oraz grupa Diagnostyka.

Na rysunku 7 przedstawiono zużycie energii wykazane w raporcie ESG przedstawionym przez grupę LuxMed. Z raportu wynika, że część energii elektrycznej uzyskiwana jest z wykorzystaniem odnawialnych źródeł energii (panele PV oraz pompy ciepła). Jak wynika z raportu udział odnawialnych źródeł energii w całkowitym zapotrzebowaniu na energię w 2022 roku było na poziomie 36% w odniesieniu do sumarycznej energii zakupionej oraz na poziomie niemal 50% w odniesieniu do zużycia energii elektrycznej. Natomiast już w roku 2023 wartości te wynosiły odpowiednio ponad 54% w odniesieniu do sumarycznej energii zakupionej i niemal 66% w odniesieniu do zużycia energii elektrycznej. Należy zwrócić uwagę na fakt, że energia chłodnicza w odniesieniu do wykorzystywanej energii elektrycznej stanowiła tylko 1% w roku 2022 i niemal 2% w roku 2023. Może to wskazywać na fakt sporadycznie stosowanej klimatyzacji pomieszczeń.

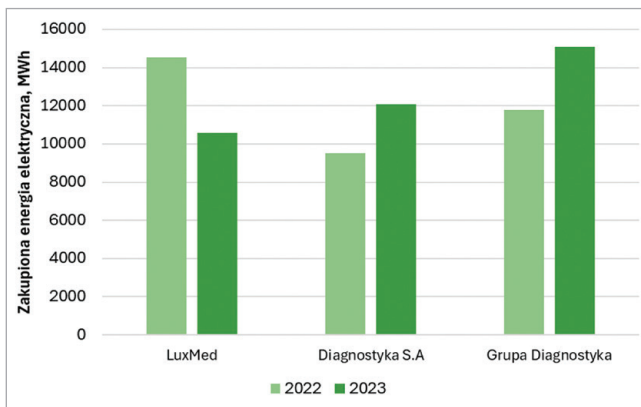
Na rysunku 8 przedstawiono zużycie energii wykazane w raporcie ESG przedstawionym przez grupę Diagnostyka. Z raportu wynika, że zarówno w odniesieniu do energii elektrycznej jak i ciepła nie są jeszcze wykorzystywane źródła energii odnawialnej. Podobnie, jak w przypadku grupy LuxMed zapotrzebowanie na energię elektryczną jest większe w porównaniu do zapotrzebowania na ciepło. Zauważalny jest wzrost zapotrzebowania na energię elektryczną o ok. 21% i ok. 22% odpowiednio dla Diagnostyka S.A. i Grupa Diagnostyka. Zapotrzebowanie na ciepło w Diagnostyce S.A. w roku 2023 było o 7% a w Grupie



Rys. 7. Zużycie energii wykazane w raporcie ESG przez LuxMed z podziałem na poszczególne źródła [18]
 Fig. 7. Energy consumption reported in the ESG report by LuxMed by source [18]



Rys. 8. Zużycie energii wykazane w raporcie ESG przez grupę Diagnostyka z podziałem na poszczególne źródła [17]
 Fig. 8. Energy consumption as reported in the ESG report by Diagnostics Group by source [17]



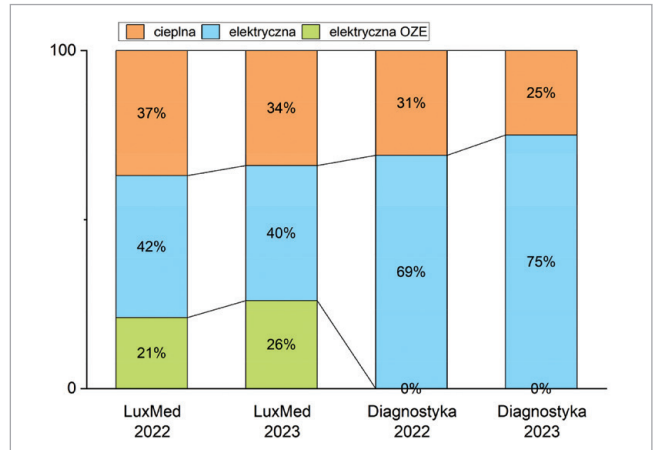
Rys. 9. Zakupiona energia elektryczna wykazana w raportach ESG przedstawionych przez grupy LuxMed i Diagnostykę [17], [18]
 Fig. 9. Purchased electricity shown in ESG reports provided by LuxMed and Diagnostics groups [17], [18]

Diagnostyka o ok. 4% mniejsze w porównaniu do roku 2022. Nie zostało jednak określone czy przeprowadzono termomodernizację obiektów budowlanych lub czy były przeprowadzane inne prace na rzecz poprawy efektywności energetycznej.

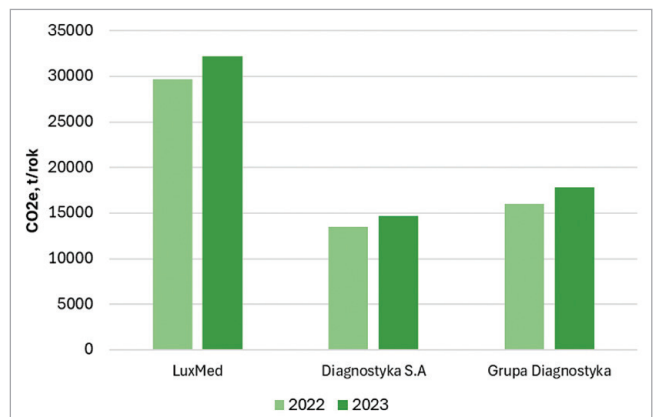
Na rysunku 9 zestawiono wartości zakupionej w latach 2022 i 2023 energii elektrycznej dla grupy LuxMed, Diagnostyka S.A. oraz Grupy Diagnostyka. W tym przypadku dla Grupy LuxMed nie uwzględniono energii elektrycznej wyprodukowanej z wykorzystaniem instalacji PV.

Udział poszczególnych rodzajów energii w całkowitym zapotrzebowaniu na energię niezbędną do utrzymania budynków w ruchu w roku 2022 i 2023 przedstawiono na rys. 10 zarówno w Grupie LuxMed jak i Diagnostyka.

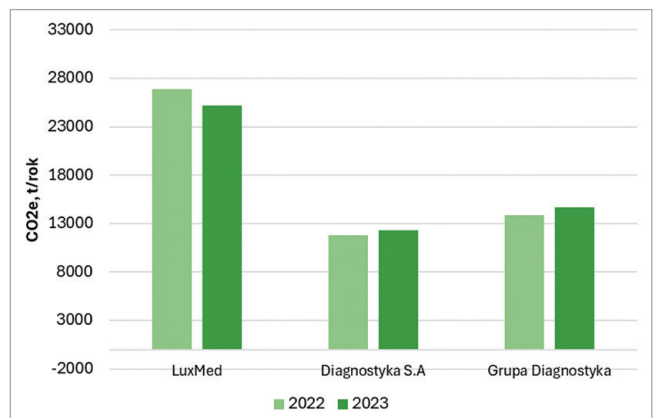
Z raportu przedstawionego przez Grupę Diagnostyka wynika, że przeprowadzone w 2021 roku szacowanie emisji wykazało, że prawie 90% emisji CO_{2e} Diagnostyki stanowią emisje w Zakresie 3, głównie w łańcuchu dostaw w kategorii Zakupione produkty i usługi. W przedstawionym raporcie ESG nie wykazano wartości emisji określonych dla zakresu 3. Dlatego dla porównania wartości emisji dla grupy LuxMed oraz grupy Diagnostyka na rys. 11-14. przedstawiono porównanie tylko dla zakresów 1 i 2. Na rysunkach 11 i 12 przedstawiono emisje roczne, natomiast na rys. 13 i 14. zamieszczono jednostkowe emisje roczne odniesione na 1 pracownika. Zdecydowanie lepszym wskaźnikiem byłaby jednostka powierzchni– jednak została ona podana tylko dla grupy LuxMed.



Rys. 10. Udział energii elektrycznej, elektrycznej uzyskanej z OZE i ciepła w energii sumarycznej niezbędnej do utrzymania budynków w ruchu grupy LuxMed i grupy Diagnostyka w latach 2022 i 2023 [17], [18]
 Fig. 10. Share of electricity, RES-generated electricity and heat in the total energy required to keep the buildings in operation for the LuxMed group and the Diagnostics group in 2022 and 2023 [17], [18]

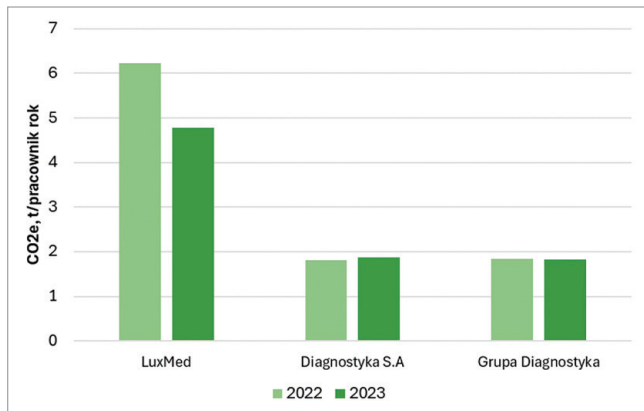


Rys. 11. Porównanie emisji dla zakresu 1 i 2 obliczanej metodą location-based [17], [18]
 Fig. 11. Comparison of Scope 1 and Scope 2 emissions calculated using the location-based method [17], [18]

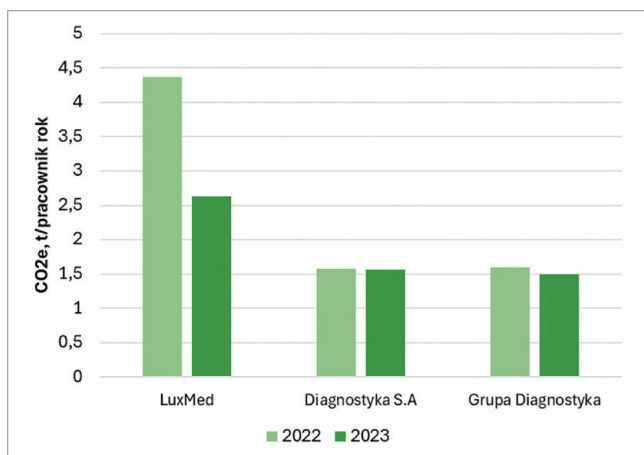


Rys. 12. Porównanie emisji dla zakresu 1 i 2 obliczanej metodą market-based [17], [18]
 Fig. 12. Comparison of Scope 1 and Scope 2 emissions calculated using the market-based method [17], [18]

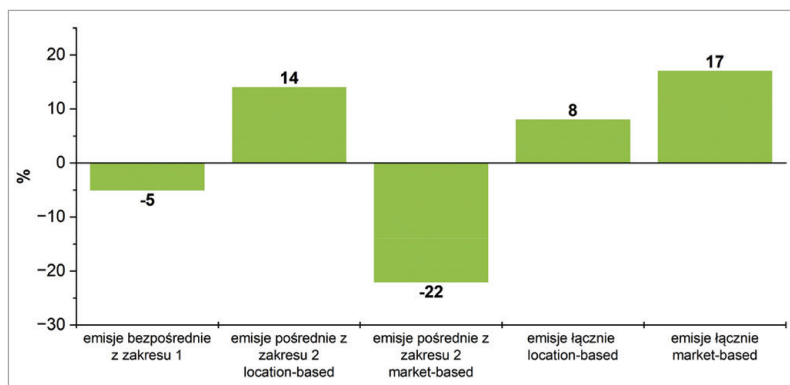
Wykresy obrazują różnice w określaniu emisji metodą market-based oraz location-based. Metoda location-based bazuje na określeniu emisji na podstawie średniego krajowego wskaźnika emisji, natomiast metoda market-based bazuje na obliczaniu emisji z energii elektrycznej z wykorzystaniem



Rys. 13. Porównanie jednostkowej emisji odniesione dla pojedynczego pracownika dla zakresu 1 i 2 obliczanej metodą location-based [17], [18]
 Fig. 13. Comparison of specific emissions for a single worker for scope 1 and 2 calculated using the location-based method [17], [18]

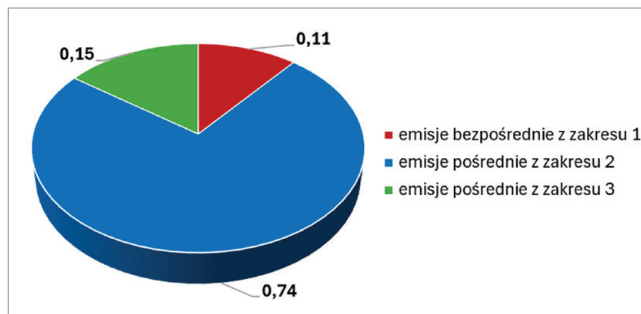


Rys. 14. Porównanie jednostkowej emisji odniesione dla pojedynczego pracownika dla zakresu 1 i 2 obliczanej metodą market-based [17], [18]
 Fig. 14. Comparison of specific emissions for a single worker for scope 1 and 2 calculated using the market-based method [17], [18]

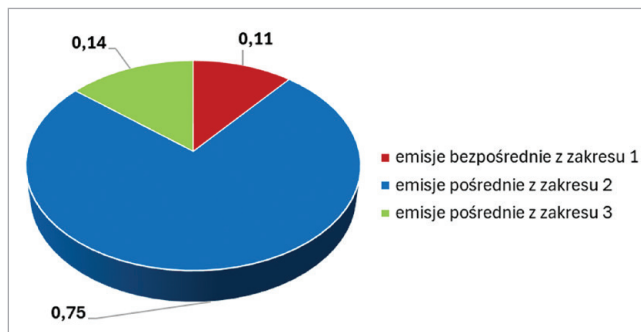


Rys. 15. Zmiana emisji bezpośrednich i pośrednich z uwzględnieniem metod obliczeniowych w porównaniu do roku bazowego 2019 wykazane przez grupę LuxMed [18]
 Fig. 15. Change in direct and indirect emissions including calculation methods compared to base year 2019 reported by LuxMed group [18]

wskaźnika emisji właściwego dla sprzedawcy energii. Stąd widoczne różnice w wartościach oraz widoczna różnica w tendencji zmian. W grupie LuxMed emisje obliczone metodą market-based w roku 2023 były o ok. 6% niższe w porównaniu do roku 2022. Jednocześnie emisje obliczone metodą location-based w roku 2023 były o ok. 8% wyższe w porównaniu do roku 2022. W grupie Diagnostyka emisje obliczone metodą market-based w roku 2023 były



Rys. 16. Udział poszczególnych emisji ekwiwalentu CO₂ w grupie LuxMed w roku 2022 [18]
 Fig. 16. Share of individual CO₂ – equivalent emissions in the LuxMed group in 2022 [18]



Rys. 17. Udział poszczególnych emisji ekwiwalentu CO₂ w grupie LuxMed w roku 2023 [18]
 Fig. 17. Share of individual CO₂ – equivalent emissions in the LuxMed group in 2023 [18]

o ok. 5% wyższe w porównaniu do roku 2022, a dla metody location-based emisje w roku 2022 były o 10% wyższe. Zmianę emisji CO₂ w odniesieniu do roku bazowego 2019 wykazała grupa LuxMed. Wyniki zmian obrazuje wykres przedstawiony na rys. 15. Grupa LuxMed wykazała, że w odniesieniu do roku bazowego 2019 ograniczyła emisje bezpośrednie CO_{2e} o 5% oraz emisje pośrednie dla zakresu 2 liczone metodą market-based o ok. 22%.

Z uwagi na to, że w grupie Diagnostyka nie podano wartości emisji pośrednich z zakresu 3 dlatego zestawienie emisji pośrednich i bezpośrednich odpowiednio dla lat 2022 i 2023 podano tylko dla grupy LuxMed. Udział poszczególnych emisji jest zbliżony z wartościami przedstawianymi w raporcie Zielone szpitale.

7. Możliwości uzyskania założeń pakietu Fit for 55 dla obiektów służby zdrowia

Jak wykazano w poprzednim rozdziale raportowanie ESG może być i z pewnością będzie przydatne w ocenie możliwości (1) ograniczenia energii, (2) pozyskiwania energii ze źródeł energii odnawialnej a tym samym (3) ograniczania emisji. Jednak wytyczne przygotowania raportów i raportowanie musi być spójne i powinno oprócz wartości bezwzględnych zawierać także wartości względne odniesione np. dla m² powierzchni zajmowanych budynków lub innych. Zawsze powinna być także wykazana zmiana w odniesieniu do roku bazowego. Nie może zabraknąć informacji dotyczących konkretnych

działań podejmowanych na rzecz ograniczenia zapotrzebowania na energię oraz wykorzystania źródeł energii odnawialnej.

Zgodnie z danymi przedstawianymi przez GUS w 2023 roku w Polsce funkcjonowały 894 szpitale, 23 460 przychodni i 257 placówek lecznictwa uzdrowiskowego [14] z czego większość zlokalizowana jest w budynkach wymagających remontów lub nawet przebudowy.

W raporcie [37] wykazano, że w obiektach szpitalnych instalacje sanitarne są w ogólnie złym stanie, źródła ciepła są wysłużone i pracują nieefektywnie i jednocześnie bardzo często ulegają awarii. Systemy rozprowadzania ciepła i ciepłej wody użytkowej zwykle nie mają izolacji, bywają zazwyczaj skorodowane i nieszczelne. Dodatkowo większość pomieszczeń szpitalnych ma właściwej wentylacji i odpowiedniej instalacji z odzyskiwaniem ciepła. W większości przypadków pomieszczenia w zimie są wychładzane przez otwieranie okien, a w lecie nagrzewają się do bardzo wysokiej temperatury, co stwarza realne zagrożenie dla zdrowia i życia pacjentów. Pomimo istniejących środków, które w dużej mierze koncentrują się na poprawie oszczędności energii, liczba badań dokumentujących ich wpływ na efektywność energetyczną w placówkach opieki zdrowotnej jest nadal mocno ograniczona. Brakuje także informacji, pochodzących z badań czy audytów dotyczących eksploatacyjnego zapotrzebowania na energię niezbędną do utrzymania budynków w ruchu czy do łańcucha dostaw, usług itd. Trudno zatem szacować możliwości ograniczenia emisji, szczególnie w odniesieniu do roku 2030. Jak pokazują wyniki przedstawione w poprzednim rozdziale zapotrzebowanie na energię ogółem rośnie.

W budynkach szpitalnych znaczna część energii jest zużywana przez systemy HVAC. Intensywne wykorzystywanie systemów niezbędnych do wentylacji, ogrzewania, ochładzania a także nawilżania powietrza generuje znaczące potrzeby energetyczne, a przez to znaczną emisję CO₂ [34]. Powyższe wskazuje, że szpitale jako jedne z najbardziej energochłonnych obiektów nadal posiadają znaczny potencjał w zakresie oszczędzania energii.

Obecnie w wysokorozwiniętych krajach świata inwestuje się w obiekty służby zdrowia w tym szpitale, przekształcając je – bez uszczerbku dla opieki medycznej, w bardziej odporne, zrównoważone i przyjazne dla środowiska instytucje [6].

Środki poprawiające efektywność energetyczną, zużycie wody i gospodarkę odpadami w znacznym stopniu przyczyniają się do zmniejszenia śladu węglowego szpitali [23], [25], [39]. Wymaga to jednak przede wszystkim zaangażowania instytucjonalnego. Dodatkowo badania potwierdzają ogromną rolę ludzi i ich zachowań w odniesieniu do środowiska wewnętrznego, co z kolei decyduje o konieczności podniesienia świadomości oraz wdrażanie praktyk ekologicznych wśród wszystkich pracowników obiektów służby zdrowia.

Zgodnie z wytycznymi zawartymi w raporcie Zielone Szpitale [37] najważniejszymi działaniami, które są drogą do uzyskania założeń pakietu Fit for 55 oraz neutralności klimatycznej są:

1. Zmiana w podejściu do efektywności energetycznej szpitali, tj. zastosowanie odnawialnych źródeł energii do zasilania budynków placówek medycznych, wymiana oświetlenia na oświetlenie typu LED.
2. Termomodernizacja budynków placówek medycznych.
3. Cyfryzacja szpitali, czyli przeprowadzanie szeroko pojętych transformacji technologicznych, dotyczących

m.in. obiegu dokumentów, zarządzania energią czy też komunikacji z pacjentami.

4. Ustanawiają obowiązkowej konsultacji żywienia.

5. Sformułowanie obligatoryjnych wymagań wobec zamówień publicznych w aspekcie łańcucha dostaw i jakości żywności (uwzględnianie wysokiej jakości żywności, która pochodzi z regionalnych i ekologicznych upraw, a przy tym redukuje ślad węglowy powstający w wyniku wydłużania łańcucha dostaw).

6. Zmiana w podejściu do wykorzystania sprzętu medycznego oraz zarządzania odpadami,

7. Świadome wykorzystanie ogrodów w zagospodarowaniu terenu szpitali i placówek ochrony zdrowia

8. Zwiększenie efektywności energetycznej w drodze do zmniejszenia emisji gazów cieplarnianych

Znane są skuteczne strategie oszczędzania energii na poziomie obiektów służby zdrowia, które charakteryzują się mniejszą lub większą złożonością, poprawiające wskaźnik efektywności energetycznej, zmniejszające ilość zużytej energii a tym samym ograniczające emisję dwutlenku węgla. Wdrażanie tych strategii należy wprowadzać biorąc pod uwagę: potrzeby energetyczne, aktualne dane dotyczące zużycia energii, bieżący koszt pokrycia tego zużycia i wynikający z tego wpływ na środowisko, istniejącą infrastrukturę, istniejące zasoby techniczne i finansowe oraz warunki pogodowe (według badań szpitale zlokalizowane w najzimniejszych strefach mają niższe zużycie energii niż te w najcieplejszych strefach) [1], [5], [8]. Należy pamiętać, że nigdy pojedyncze działania nie dadzą takiego efektu jak działania przeprowadzane kompleksowo.

Do działań, które mogą potencjalnie wpłynąć na zwiększenie efektywności energetycznej oraz obniżenie zużycie energii można zaliczyć [4]:

- a) Przeprowadzenie audytu zużycia energii – umożliwia to szpitalom ustalenie poziomu bazowego zużycia energii, co pozwala na benchmarking energetyczny i zdefiniowanie wskaźników, które umożliwiają regularne monitorowanie zużycia energii [9].
- b) Wymianę oświetlenia żarowego na diody elektroluminescencyjne (LED). Zależą one od liczby lamp, godzin świecenia i ich wydajności (stosunek strumienia świetlnego do poboru mocy elektrycznej). Szacuje się, że inwestycje takie, bez uwzględnienia oszczędności związanych z konserwacją i żywotnością lamp, zwróciłyby się w ciągu ośmiu lat [15], [42].
- c) Stosowanie czujników ruchu do regulacji systemu ogrzewania/chłodzenia i/lub oświetlenia w zależności od zajętości pomieszczenia. Jest to najbardziej skuteczne w gabinetach diagnostycznych i zabiegowych,
- d) Monitorowanie stężenia CO₂ w pomieszczeniu oraz w systemach ogrzewania, wentylacji i klimatyzacji (HVAC) w celu uniknięcia nadmiernego strumienia powietrza wentylującego. Jest to wykorzystywane w wentylacji sterowanej zapotrzebowaniem (DCV) [10], [5].
- e) Wykorzystanie systemów monitorowania energii (EMS), które umożliwiają śledzenie zużycia energii w budynku (budynkach). Ich stosowanie i prawidłowa praca prowadzi do zminimalizowania zapotrzebowania na energię budynku, które obejmują urządzenia, oświetlenie, regulację temperatury, ogrzewanie wody, działanie systemów HVAC.

Aktualnie do optymalizacji pracy tych systemów wykorzystuje się sieci neuronowe i sztuczną inteligencję. Pomimo początkowych wysokich nakładów inwestycyjnych, efektywność energetyczną dla całego budynku można zwiększyć o 36% [29], [27].

f) Zmiany infrastrukturalne, w tym dodanie izolacji termicznej odsłoniętych ścian zewnętrznych [29], [42], a także wymiana ram okiennych ale przede wszystkim stosowanie żaluzji zewnętrznych [5], [15], [29], co ogranicza konieczność intensywnej eksploatacji systemów HVAC, a tym samym minimalizuje zapotrzebowanie na energię i ogranicza koszt.

g) Poprawa sprzętu lub technologii medycznych, takich jak rezonans magnetyczny, sprzęt laboratoryjny i windy. Wykorzystanie inteligentniejszych technologii pozwala na automatyzację i zmniejszenie zużycia energii w okresach ograniczonej aktywności [15], [29].

h) Na tyle, na ile to możliwe wykorzystanie kolektorów słonecznych do wspomagania przygotowania ciepłej wody użytkowej [2], [42].

i) Wymiana nieefektywnych kotłów centralnego ogrzewania i regularna ich konserwacja [15], [19], [42].

j) Wdrożenie wydajnych systemów HVAC, pracujących z racjonalnie określonym i nie nadmiernie dużym strumieniem powietrza wentylującego oraz regulowanych w sposób płynny i wynikający z chwilowych potrzeb odniesionych do wymagań poszczególnych pomieszczeń [10], [24].

k) Wykorzystanie prawidłowo dobranych i eksploatowanych pomp ciepła [29] oraz innych metod wykorzystania energii odnawialnej do ogrzewania, chłodzenia i wytwarzania energii elektrycznej, co przyczynia się do znacznego zmniejszenia zużycia np. gazu ziemnego wykorzystywanego do podgrzewania wody, ogrzewania itd. [2], [29]. Zmniejszają one koszty i emisję dwutlenku węgla oraz, przy wykorzystaniu magazynów energii są niezależnym źródłem energii, co zwiększa bezpieczeństwa szpitali [1], [42].

l) Wykorzystanie jako źródła ciepła systemów skojarzonych (kogeneracja i trigeneracja), Niektóre źródła podają, że wykorzystanie kogeneracji pozwala zmniejszyć od 8% do 25% koszty energii w szpitalach [32], [35].

m) Przeprowadzanie szkoleń i kampanii skierowanych do pracowników służby zdrowia, ponieważ odgrywają one ważną rolę w zmniejszaniu zużycia energii, głównie przez zmianę zachowań, takich jak wyłączenie świateł lub urządzeń, gdy nie są używane co w efekcie może dać zmniejszenie zużycia energii elektrycznej nawet o co najmniej 13% [33].

Dodatkowo technologia magazynowania ciepła – a konkretnie zastosowanie materiałów zmienno-fazowych (PCM) w projektach architektonicznych – jawi się jako obiecujące rozwiązanie, aby sprostać temu wyzwaniu [34] oferując znaczące korzyści w zakresie oszczędzania energii i regulacji.

Jednocześnie pamiętać należy o racjonalnym sterowaniu pracą układów wentylacyjnych czy klimatyzacyjnych [36]. Racjonalność ta powinna polegać na jednoczesnym zachowaniu wymaganych parametrów ciepłno-wilgotnościowych oraz czystości powietrza przy jak najmniejszym zużyciu energii niezbędnej do ogrzewania ochładzania, osuszania, nawilżania, oczyszczania i transportu powietrza.

Pod żadnym pozorem warunki ciepłno-wilgotnościowe utrzymywane w poszczególnych strefach czy pomieszczeniach szpitalnych nie powinny odbiegać od takich, które

sprzyjają zdrowieniu wszystkich pacjentów [38] nie powinny także wpływać na pracę personelu, szczególnie w strefie sal operacyjnych [7].

9. Wnioski

Budynki opieki zdrowotnej wymagają modernizacji – ze względu na wysoką energochłonność i przestarzałą infrastrukturę konieczne jest zatem wdrożenie działań poprawiających efektywność energetyczną, w tym termomodernizacji, modernizacji systemów HVAC oraz wykorzystania odnawialnych źródeł energii.

Realizacja celów Fit for 55 w sektorze medycznym wymaga systemowego podejścia – aby ograniczyć emisję gazów cieplarnianych i osiągnąć neutralność klimatyczną, niezbędne są zarówno działania technologiczne, jak i organizacyjne, w tym cyfryzacja zarządzania energią oraz optymalizacja zużycia zasobów.

Raportowanie ESG jest kluczowym narzędziem monitorowania postępów – analiza raportów grup LuxMed i Diagnostyka pokazuje, że systematyczne raportowanie zużycia energii i emisji CO₂ może pozwolić na ocenę skuteczności działań redukcyjnych i wdrażanie lepszych strategii.

Szpitala i placówki medyczne w Polsce mają duży potencjał oszczędzania energii – wdrożenie inteligentnych systemów zarządzania energią, zastosowanie energooszczędnych urządzeń oraz edukacja personelu mogą znacząco przyczynić się do zmniejszenia zużycia energii i kosztów operacyjnych.

Inwestycje w efektywność energetyczną przynoszą korzyści ekologiczne i ekonomiczne – redukcja emisji CO₂ nie tylko wspiera politykę klimatyczną UE, ale przede wszystkim poprawia rentowność placówek medycznych, zmniejszając ich wydatki na energię niezbędną do utrzymania budynków w ruchu.

Dalsze działania powinny koncentrować się na dostosowaniu obiektów służby zdrowia do wymagań neutralności klimatycznej – konieczne jest wsparcie finansowe i legislacyjne umożliwiające modernizację infrastruktury medycznej, tak aby placówki mogły sprostać wyzwaniom związanym z redukcją emisji i zrównoważonym zarządzaniem energią.

LITERATURA

- [1] Alexis G.K., and P. Liakos. 2013. "A Case Study of a Cogeneration System for a Hospital in Greece. Economic and Environmental Impacts." *Applied Thermal Engineering* 54 (2): 488-96. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.02.019>.
- [2] Atienza-Márquez Antonio, Fernando Domínguez Muñoz, Francisco Fernández Hernández, and José Manuel Cejudo López. 2022. "Domestic Hot Water Production System in a Hospital: Energy Audit and Evaluation of Measures to Boost the Solar Contribution." *Energy* 261 (December):125275. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125275>.
- [3] Azizi NSM, MAM Din, YT Phan, and JY Tai. 2018. "Review of Energy Saving Behaviour Strategies in Hospital Buildings." *International Journal of Civil Engineering and Technology* 9 (11).
- [4] Chen-Xu José, Irina Kislava, Ricardo M Fernandes, Joana Carvalho, Beatriz J Blanco-Rojas, Omnia El-Omrani, Edoardo Miotto, Katja Čič, Paulo Boto, and Susana Viegas. 2024a. "Interventions for Increasing Energy Efficiency in Hospitals." *Cochrane Database of Systematic Reviews* 2024 (3). <https://doi.org/10.1002/14651858.CD015693>.
- [5] Čongradac Velimir, Bogdan Prebiračević, Nikola Jorgovanović, and Darko Stanišić. 2012. "Assessing the Energy Consumption for Heating and Cooling in Hospitals." *Energy and Buildings* 48 (May):146-54. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.01.022>.
- [6] Corvalan Carlos, Elena Villalobos Prats, Aderita Sena, Diarmid Campbell-Lendrum, Josh Karliner, Antonella Rizzo, Susan Wilburn, et al. 2020. "Towards Climate Resilient and Environmentally Sustainable Health Care Facilities." *International Journal of Environmental Research and Public Health* 17 (23). <https://doi.org/10.3390/ijerph17238849>.

- [7] Ćwiklińska Dominika, Anna Bogdan, and Mirosław Szyłak-Szydłowski. 2022. "Survey on Factors Influencing Surgeons' Sensation in Polish Operating Theatres." *Building and Environment* 214 (April):108929. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.108929>.
- [8] Cygańska Małgorzata, and Magdalena Kludacz-Alessandri. 2021. "Determinants of Electrical and Thermal Energy Consumption in Hospitals According to Climate Zones in Poland." *Energies* 14 (22): 7585. <https://doi.org/10.3390/en14227585>.
- [9] Dadi Daniele, Vito Introna, Annalisa Santolamazza, Marcello Salvio, Chiara Martini, Tiberio Pastura, and Fabrizio Martini. 2022. "Private Hospital Energy Performance Benchmarking Using Energy Audit Data: An Italian Case Study." *Energies* 15 (3): 806. <https://doi.org/10.3390/en15030806>.
- [10] Delgado Alison, Kevin Keene, and Nora Wang. 2021. "Integrating Health and Energy Efficiency in Healthcare Facilities." Richland, WA (United States). <https://doi.org/10.2172/1773167>.
- [11] Duraivelu Revati, and Natarajan Elumalai. 2021. "Performance Evaluation of a Decentralized Rooftop Solar Photovoltaic System with a Heat Recovery Cooling Unit." *Environmental Science and Pollution Research* 28 (15): 19351-66. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-12104-0>.
- [12] Unia Europejska. 2021. "Europejskie Prawo o Klimacie." <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/?uri=LEGISSUM:4536626>. July 2021. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/?uri=LEGISSUM:4536626>.
- [13] Giełda Papierów Wartościowych w Warszawie. 2023. "Wytyczne Do Raportowania ESG. Przewodnik Dla Spółek." Warszawa. https://www.gpw.pl/pub/GPW/ESG/Wytyczne_do_raportowania_ESG.pdf.
- [14] Główny Urząd Statystyczny GUS. 2024. "Zdrowie i Ochrona Zdrowia w 2023 Roku." <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/zdrowie/zdrowie-i-ochrona-zdrowia-w-2023-roku,1,14.html>. December 2024. <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/zdrowie/zdrowie-i-ochrona-zdrowia-w-2023-roku,1,14.html>.
- [15] Gordo Esther, Ângels Pilar Campos, and D Coelho. 2011. "Energy Efficiency in a Hospital Building Case Study: Hospitais Da Universidade de Coimbra." *Proceedings of the 2011 3rd International Youth Conference on Energetics (IYCE)*, 1-6. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:21893529>.
- [16] Greenhouse Gas Protokol. 2011. "Corporate Value Chain (Scope 3) Accounting and Reporting Standard." https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/Corporate-Value-Chain-Accounting-Reporting-Standard_041613_2.pdf.
- [17] Grupa Diagnostyka. 2024. „Więcej Dla Zdrowia. Raport ESG Za Rok 2023.” <https://grupadiagnostyka.pl/app/uploads/2024/09/raport-esg-2023.pdf>.
- [18] Grupa LuxMed. 2024. „Raport Zrównoważonego Rozwoju Za Rok 2023.” <https://www.luxmed.pl/raport-zrownowazonego-rozwoju-grupy-lux-med>.
- [19] Hendron, Robert, Matt Leach, Eric Bonnema, Diwanshu Shekhar, Shanti Pless, Ira Krepchin, Lee Hamilton, et al. 2013. "Advanced Energy Retrofit Guide Practical Ways to Improve Energy Performance." <https://www.nrel.gov/docs/fy13osti/57864.pdf>.
- [20] International Energy Agency. 2021. "Net Zero by 2050. A Roadmap for the Global Energy Sector." https://iea.blob.core.windows.net/assets/deebef5d-0c34-4539-9d0c-10b13d840027/NetZeroBy2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector_CORR.pdf.
- [21] International Energy Agency. n.d. "Energy System. Buildings." <https://www.iea.org/energy-system/buildings>. Accessed July 11, 2023.
- [22] ISO Standards. 2018. *ISO 14064-1:2018 Greenhouse Gases Part 1: Specification with Guidance at the Organization Level for Quantification and Reporting of Greenhouse Gas Emissions and Removals*. <https://www.iso.org/standard/66453.html>. <https://www.iso.org/standard/66453.html>.
- [23] Kaplan Susan, Blair Sadler, Kevin Little, Calvin Franz, and Peter Orris. 2012. "Can Sustainable Hospitals Help Bend the Health Care Cost Curve?"
- [24] Koullamas C., A. Moronis, A. Kalogeras, and D. Libranome. 2017. "Choosing Measures for Energy Efficient Hospital Buildings." In *2017 22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, 1-7. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ETFA.2017.8247666>.
- [25] McGain Forbes, and Chris Naylor. 2014. "Environmental Sustainability in Hospitals – a Systematic Review and Research Agenda." *Journal of Health Services Research & Policy* 19 (4): 245-52. <https://doi.org/10.1177/1355819614534836>.
- [26] Our World in Data. n.d. "Annual CO₂ Emissions, 2023." <https://ourworldindata.org/grapher/annual-co2-emissions-per-country?tab=map&time=latest>. Accessed March 4, 2025. <https://ourworldindata.org/grapher/annual-co2-emissions-per-country?tab=map&time=latest>.
- [27] Papantoniou Sotiris, Dionysia Kolokotsa, and Kostas Kalaitzakis. 2015. "Building Optimization and Control Algorithms Implemented in Existing BEMS Using a Web Based Energy Management and Control System." *Energy and Buildings* 98 (July):45-55. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.10.083>.
- [28] Parlament Europejski. 2018. *Ograniczanie Emisji Gazów Ciężkich w UE: Krajowe Cele Na 2030 r.* <https://www.europarl.europa.eu/topics/pl/article/20180208STO97442/ograniczanie-emisji-gazow-cieplarnianych-w-ue-krajowe-cele-na-2030-r>.
- [29] Prada Marcela, Ioana Francesca Prada, Monica Cristea, Daniela Elena Popescu, Constantin Bungău, Lotfi Aleya, and Constantin C. Bungău. 2020. "New Solutions to Reduce Greenhouse Gas Emissions through Energy Efficiency of Buildings of Special Importance – Hospitals." *Science of The Total Environment* 718 (May):137446. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137446>.
- [30] Rada Europejska, Rada Unii Europejskiej. 2021. "Gotowi Na 55 (Fit for 55)." <https://www.consilium.europa.eu/pl/policies/fit-for-55/>. July 2021. <https://www.consilium.europa.eu/pl/policies/fit-for-55/>.
- [31] Rada Europejska, Rada Unii Europejskiej. 2015. "Paryskie Porozumienie Klimatyczne." <https://www.consilium.europa.eu/pl/policies/paris-agreement-climate/>. 2015. <https://www.consilium.europa.eu/pl/policies/paris-agreement-climate/>.
- [32] Salem Szkło, Alexandre, Jeferson Borghetti Soares, and Maurício Tiomno Tolmasquim. 2004. "Energy Consumption Indicators and CHP Technical Potential in the Brazilian Hospital Sector." *Energy Conversion and Management* 45 (13-14): 2075-91. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2003.10.019>.
- [33] Sawyer Louise, Simon Kemp, Patrick James, and Michael Harper. 2021. "Assessment of a Nurse Led Energy Behavior Change Intervention in an NHS Community Hospital Ward." *Energies* 14 (20): 6523. <https://doi.org/10.3390/en14206523>.
- [34] Shehab Salman Ali Salman. 2017. "Enhancing Environmental Sustainability of Healthcare Facilities: A System Dynamics Analysis Approach." London: Brunel University. <http://bura.brunel.ac.uk/handle/2438/15593>.
- [35] Suszanowicz D., and P. Ratuszny. 2019. "Energy Efficiency Improvement in Hospital Buildings, Based on the Example of a Selected Type of Hospital Facility in Poland." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 564 (1): 012129. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/564/1/012129>.
- [36] Szczęśniak Sylwia. 2023. "Możliwości ograniczenia energii niezbędnej do utrzymania systemów wentylacji mechanicznej i klimatyzacji z odzyskiem ciepła w obiektach szpitalnych." *Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja* 1 (3): 12-22. <https://doi.org/10.15199/9.2023.3.2>.
- [37] UN Global Compact. Network Poland. 2022. "Zielone Szpitale." Warszawa. https://ungc.org/pl/wp-content/uploads/2023/05/Raport_UN_GCNP_Zielone_szpitale.pdf.
- [38] Uścińciewicz Piotr, Anna Bogdan, Mirosław Szyłak-Szydłowski, Magdalena Młynarczyk, and Dominika Ćwiklińska. 2023. "Subjective Assessment of Indoor Air Quality and Thermal Environment in Patient Rooms: A Survey Study of Polish Hospitals." *Building and Environment* 228 (January):109840. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109840>.
- [39] Watts Nick, Markus Amann, Nigel Arnell, Sonja Ayeb-Karlsson, Kristine Belesova, Maxwell Boykoff, Peter Byass, et al. 2019. "The 2019 Report of The Lancet Countdown on Health and Climate Change: Ensuring That the Health of a Child Born Today Is Not Defined by a Changing Climate." *The Lancet* 394 (10211): 1836-78. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(19\)32596-6](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(19)32596-6).
- [40] World Health Organization. n.d. "Ambient (Outdoor) Air Pollution." <https://www.who.int/news/item/26-02-2025-who-unveils-updated-global-database-of-air-quality-standards>. Accessed October 24, 2024. <https://www.who.int/news/item/26-02-2025-who-unveils-updated-global-database-of-air-quality-standards>.
- [41] Worldometers "CO₂ Emissions by Country." <https://www.worldometers.info/co2-emissions/co2-emissions-by-country>. Accessed March 4, 2025. <https://www.worldometers.info/co2-emissions/co2-emissions-by-country>.
- [42] Zaza Paraskevi N., Anastasios Sepetis, and Pantelis G. Bagos. 2022. "Prediction and Optimization of the Cost of Energy Resources in Greek Public Hospitals." *Energies* 15 (1): 381. <https://doi.org/10.3390/en15010381>.



REWOLUCJA W TECHNOLOGII OCZYSZCZANIA POWIETRZA

W PLACÓWKACH MEDYCZNYCH

USUWA

99,99%

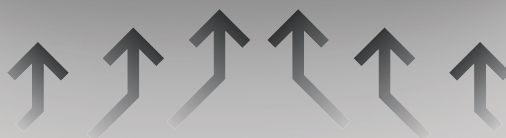
ZANIECZYSZCZEŃ

ZMYWALNE FILTRY

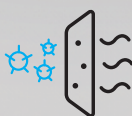
ELIMINUJĄ ODPADY

CICHA PRACA

I ŁATWA OBSŁUGA



PM 2.5



WIRUSY



BAKTERIE



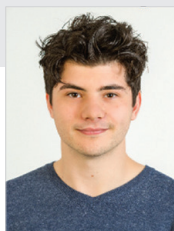
NEF900

ELEKTROSTATYCZNY
**OCZYSZCZACZ
POWIETRZA**



**dr hab. inż. ANNA BOGDAN,
prof. uczelni**

Wydział Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki
i Inżynierii Środowiska
Politechnika Warszawska
Osoba do kontaktu
anna.bogdan@pw.edu.pl



mgr VASCO VASCONCELOS

Wydział Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki
i Inżynierii Środowiska
Politechnika Warszawska
vasco.vasconcelos@pw.edu.pl



mgr inż. NATALIA LISICKA

Wydział Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki
i Inżynierii Środowiska
Politechnika Warszawska
natalia.lisicka.stud@pw.edu.pl

Przegląd rozwiązań systemów wentylacji w salach operacyjnych – doniesienia naukowe

Overview of Air-Conditioning Solutions in Operating Theatres – Scientific Reports

Słowa kluczowe: szpital, sala operacyjna, wentylacja, klimatyzacja

Streszczenie

Wentylacja sal operacyjnych odgrywa kluczową rolę w zapewnieniu odpowiedniej jakości powietrza oraz minimalizacji ryzyka zakażeń miejsca operowanego. W artykule dokonano przeglądu różnych systemów wentylacyjnych stosowanych w salach operacyjnych, analizując ich skuteczność, zalety oraz ograniczenia. Omówione zostały zarówno systemy wentylacji mieszającej (MV), rozwiązania z jednokierunkowym przepływem powietrza (LAF), a także systemy hybrydowe, które łączą cechy obu tych metod. Podkreślono także znaczenie czynników dodatkowych, takich jak odpowiednie rozmieszczenie lamp operacyjnych, ubiór personelu czy liczba otwartych drzwi podczas zabiegu. Te aspekty mają udowodniony wpływ na jakość powietrza w sali operacyjnej, często w większym stopniu niż sam rodzaj zastosowanej wentylacji. Podsumowując, choć systemy jednokierunkowego przepływu powietrza często zapewniają lepsze warunki sterylne, ich wpływ na ograniczenie SSI jest nadal przedmiotem badań. Kluczowe znaczenie mają również inne czynniki, takie jak dyscyplina zespołu chirurgicznego oraz optymalizacja konfiguracji sprzętu medycznego, które mogą równie istotnie wpływać na czystość powietrza w polu operacyjnym.

Keywords: hospital, operating room, ventilation, air conditioning

Abstract

Ventilation in operating theatres plays a key role in ensuring adequate air quality and minimising the risk of surgical site infection. This article reviews the different ventilation systems used in operating theatres, analysing their effectiveness, advantages and limitations. Both mixed ventilation (MV) and laminar airflow (LAF) solutions are discussed, as well as hybrid systems that combine the features of both methods. The importance of additional factors such as the correct positioning of surgical lights, staff clothing and the number of times doors are opened during surgery is also highlighted. These aspects have been shown to affect the air quality in the operating theatre, often more than the type of ventilation used. In conclusion, although unidirectional airflow systems often provide better sterile conditions, their impact on SSI reduction is still under investigation. Other factors, such as the discipline of the surgical team and optimisation of the medical equipment configuration, are also critical and can have a significant impact on the cleanliness of the air in the operating theatre.

© 2006-2025 Wydawnictwo SIGMA-NOT Sp. z o.o.
All right reserved

1. Wstęp

Dyskusja na temat stosowania różnych rozwiązań wentylacji w salach operacyjnych została rozpoczęta przez Charnleya w 1964 i 1969 [1], [2], który jako pierwszy chciał sprawdzić, czy istnieje korelacja między liczbą bakterii

w powietrzu sali operacyjnej a częstością występowania zakażeń po operacjach wszczepienia endoprotezy stawu biodrowego. Przeprowadzone badania wykazały, że istnieje statystycznie istotna zależność – im większa była liczba bakterii w powietrzu, tym większe było ryzyko infekcji u pacjentów. W badaniach wykazano zatem, że czystość powietrza w sali

operacyjnej ma kluczowe znaczenie dla zapobiegania zakażeniom pooperacyjnym oraz, że zastosowanie systemu jednokierunkowego przepływu powietrza wpływało na zmniejszanie zakażeń pooperacyjnych (z 8,9% do 1,3%). Badania te miały istotny wpływ na rozwój systemów wentylacji i filtracji powietrza oraz przestrzeganie ścisłych zasad aseptyki podczas wykonywania operacji.

Kolejne badania, znaczące dla rozwoju nauki w tym zakresie, opublikował Lidwell [3], który stwierdził, że pacjenci operowani w salach z ultraczystym powietrzem narażeni byli na dwukrotnie mniejsze ryzyko wystąpienia zakażenia stawów w porównaniu do pacjentów operowanych w konwencjonalnie wentylowanych salach. Co więcej, zastosowanie specjalnych wentylowanych kombinezonów przez zespół operacyjny dodatkowo zmniejszyło ryzyko zakażeń, obniżając je o około 75%. W całym badaniu odnotowano zakażenie w 1,5% operacji w grupie kontrolnej (salach z tradycyjną wentylacją) i 0,6% w grupie z ultraczystym powietrzem.

W kolejnych latach pojawiały się kolejne doniesienia omawiające wpływ różnych elementów czy parametrów związanych z wykonywaniem operacji na czystość powietrza w polu operacyjnym, a także wykazujące przewagę systemu LAF w stosunku do przepływu bazującego na turbulentnym mieszaniu powietrza lub też brak korzyści wynikających z montowania systemu LAF, jednakże dyskusji na ten temat nie można uznać za zakończoną. Z tej przyczyny celem niniejszego artykułu było przedstawienie rozwoju sposobów wentylacji powietrza w salach operacyjnych, na przestrzeni lat, z uwzględnieniem najnowszych wyników dostępnych badań.

2. Rodzaje systemów wentylacji stosowane w salach operacyjnych

Wentylacja z turbulentnym przepływem powietrza, wentylacja mieszająca (z ang. *Mixing Ventilation*, w skr. MV) polega na wprowadzaniu świeżego powietrza do pomieszczenia i równomierne mieszanie go z powietrzem już znajdującym się w sali. Celem tego procesu jest rozcieńczenie zanieczyszczeń powstających w sali operacyjnej, takich jak bakterie, pyły itp. W MV powietrze jest wprowadzane do sali operacyjnej poprzez dyfuzory, które zazwyczaj są umieszczone w suficie. Powietrze nie jest kierowane bezpośrednio na stół operacyjny, ale rozprzestrzenia się po całym pomieszczeniu. Powietrze wraz z zanieczyszczeniami jest usuwane z sali operacyjnej poprzez otwory wentylacyjne umieszczone zazwyczaj przy podłodze, dzięki czemu minimalizuje się ryzyko ich osiadania na narzędziach chirurgicznych lub ranie operacyjnej. System ten jest zazwyczaj stosowany do operacji o średnim poziomie ryzyka zakażeń i jego instalacja i eksploatacja jest tańsza niż systemu laminarnego. Obecnie zakłada się, że nie jest tak skuteczny w redukcji zanieczyszczeń bezpośrednio nad polem operacyjnym jak systemy wentylacji jednokierunkowej, gdyż na efektywność zachowania odpowiedniej jakości powietrza w polu operacyjnym wpływa wiele czynników, takich jak: lokalizacja nawiewu i wywiewu, charakterystyka nawiewnika, układ i wymiary pomieszczenia, lokalizacja i wielkość źródeł zanieczyszczeń i ciepła, ale też liczba osób w pomieszczeniu i ich aktywność. Badania wykazują również ryzyko nierównomiernego rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń, szczególnie jeśli w sali operacyjnej jest duży ruch personelu.

Wentylacja z jednokierunkowym, pionowym przepływem powietrza, określana (choć czasem niesłusznie) również jako przepływ laminarny (z ang. *Laminar Air Flow*, w skr. LAF), jest rozwiązaniem, którego celem jest utrzymanie ultraczystych warunków podczas zabiegów chirurgicznych, szczególnie w procedurach wysokiego ryzyka, takich jak operacje ortopedyczne czy kardiochirurgiczne. Podstawową zasadą LAF jest zapewnienie jednokierunkowego, liniowego przepływu powietrza o stosunkowo niskich prędkościach (0,2 m/s-0,3 m/s) i przy skuteczności filtracji HEPA (99,5%-99,7%) [4], które przepływa przez wyznaczone pole w sposób kontrolowany i bez turbulencji. Uzyskanie niskoturbulentnego przepływu powietrza ma kluczowe znaczenie w przypadku systemów jednokierunkowych do utrzymania wysokiej jakości czystości powietrza nad pacjentem i narzędziami chirurgicznymi. Powietrze jest dostarczane zazwyczaj bezpośrednio z sufitu lub przez specjalne osłony, tworząc tzw. „kurtynę powietrza” wokół pola operacyjnego, a zanieczyszczone powietrze jest usuwane przez specjalne otwory wentylacyjne znajdujące się przy podłodze, po bokach sali operacyjnej. Ostatnie badania wykazały jednak, że umieszczenie wyciągu w suficie może zapobiec recyrkulacji zanieczyszczeń w powietrzu i przyczynić się do poprawy efektywności wentylacji LAF [5], [6]. Ideą rozwiązania jednokierunkowego jest uzyskanie efektu tworzenia przez strumień powietrza swoistej bariery zapobiegającej przedostawaniu się zanieczyszczeń z innych części sali operacyjnej do obszaru zabiegowego. Przez lata wskazywano, że LAF znacznie zmniejsza ilość bakterii w powietrzu nad polem operacyjnym, co minimalizuje ryzyko zakażeń miejsca operowanego (z ang. *Surgical Site Infection*, w skr. SSI) oraz umożliwia precyzyjną kontrolę parametrów powietrza, takich jak: temperatura, wilgotność i ciśnienie, co jest kluczowe w operacjach wysokiego ryzyka. Największymi wadami LAF są wysokie koszty montażu i eksploatacji, gdyż powierzchnia nawiewu powietrza musi być znaczna (co najmniej $3,2 \text{ m}^2 \times 3,2 \text{ m}^2$) a zatem zachowanie odpowiednich prędkości powietrza powoduje konieczność dostarczania dużych ilości przygotowanego powietrza zgodnie z DIN 1946-4 [7].

Poziome i mobilne systemy jednokierunkowego przepływu powietrza (mLAF) to rozwiązania stosowane tam, gdzie nie ma możliwości instalacji systemów pionowych (np. z powodu specyficznych warunków przestrzennych sali operacyjnej) lub jako rozwiązanie tymczasowe w salach operacyjnych, które nie są wyposażone w stałe systemy LAF. Działają one podobnie jak standardowe systemy LAF, ale mają mniejszy zasięg i są przenośne, co pozwala na ich zastosowanie w różnych miejscach sali operacyjnej. Powietrze jest wprowadzane nad pacjenta i narzędzia chirurgiczne, a następnie usuwane z bocznych części sali. Poziome systemy LAF są proste w montażu, łatwe do utrzymania i bardziej ekonomiczne w porównaniu do sufitowych systemów LAF, jednak na efektywność działania wpływa personel chirurgiczny, sprzęt medyczny itp. Na przykład stół narzędziowy może znaleźć się poza strefą chronioną [8]. Mobilne urządzenia dostarczają filtrowane powietrze za pomocą wózka, który umożliwia skierowanie powietrza bezpośrednio na pole operacyjne z prędkością 0,4 m/s-0,5 m/s [9]. Dzięki temu potencjalnie skażone powietrze jest wypychane ze strefy czystej. Mimo że chroniony obszar w przypadku mobilnych jednostek LAF jest mniejszy niż w systemach sufitowych czy montowanych

na ścianie, ich przewaga polega na bezpośrednim dotarciu bez przeszkód do pola operacyjnego lub stołu narzędziowego w postaci lamp chirurgicznych czy personelu medycznego. Ponieważ jednak brak jest dowodów klinicznych potwierdzających bezpośredni wpływ mobilnych systemów LAF na redukcję wskaźnika zakażeń miejsca operowanego a w konsekwencji nie ma obecnie szczegółowych wytycznych dotyczących parametrów przepływu powietrza.

Systemy hybrydowe, np. System TcAF (Temperature Controlled Airflow w skr. TcAF) łączy elementy wentylacji mieszającej i laminarnej – powietrze jest dostarczane do sali operacyjnej przez specjalne nawiewniki, które generują turbulentny, ale kontrolowany przepływ [10], [11]. Zamiast tworzyć całkowicie laminarny przepływ, jak w klasycznym LAF, TcAF zapewnia pewne kontrolowane zawirowania, co pozwala na skuteczniejsze rozprzestrzenianie i rozcieńczenie zanieczyszczeń. Jednocześnie nad strefą chronioną zastosowany jest przepływ LAF. System TcAF łączy cechy systemów jednokierunkowego i mieszającego przepływu powietrza. W tym rozwiązaniu powietrze filtrowane przez filtry HEPA jest kierowane w stronę strefy chirurgicznej, przy czym jego temperatura jest niższa o 1,5°C-3°C w porównaniu z temperaturą otoczenia. Jak wskazują dotychczasowe badania strumień powietrza dostarczany przez system TcAF jest odporny na przeszkody oraz strumienie konwekcyjne [12] a jednocześnie dostarczana jest mniejsza objętości strumienia powietrza i zużywa mniej energii niż tradycyjne systemy jednokierunkowe i mieszające.

3. Który system stosować?

Niestety nie ma na to jednoznacznej odpowiedzi, gdyż w pytaniu tym zazwyczaj kryje się nie tylko kwestia dotycząca ryzyka zakażenia pola operacyjnego, ale również koszty instalacji i użytkowania systemu.

Badanie przeprowadzone w 2008 r. przez Brandt i innych [13] odegrało ważną rolę w dyskusji na temat stosowania poszczególnych systemów wentylacji sal operacyjnych, ponieważ w przypadku różnych operacji, z wyjątkiem operacji jelita grubego, nie udało się znaleźć żadnych dowodów na to, że laminarny przepływ powietrza ma działanie ochronne, a nawet zidentyfikowano zwiększone ryzyko infekcji. W przypadku operacji wykonywanych przy użyciu systemu laminarnego zidentyfikowano albo wyższe wskaźniki SSI w przypadku całkowitej alloplastyki stawu biodrowego, całkowitej alloplastyki stawu kolanowego, wyrostka robaczkowego, cholecystektomii i operacji przepukliny, albo mniej infekcji w przypadku operacji jelita grubego. Badanie obejmowało dane z niemieckiego krajowego systemu nadzoru nad zakażeniami szpitalnymi z lat 2000-2004 (99 230 operacji z 1 901 ZMO, co odpowiada 1,9%).

W kolejnych latach Assadian i in. [14] oraz Kramer i in. [15] odnieśli się krytycznie do tego badania. Stwierdzili m.in., że parametry techniczne i konfiguracja systemów HVAC nie zostały sprawdzone na początku badania. Co więcej, prawdopodobnie w większości przypadków nie zapewniono wymaganych wymiarów nawiewnika sufitowego (tj. 3,2 m × 3,2 m), ponieważ norma [7] po raz pierwszy opisała tę koncepcję wentylacji dopiero w grudniu 2008 roku. Uznano również, że nie uwzględniono kilku potencjalnych czynników zakłócających, na przykład: liczby chirurgów, wyposażenia sali operacyjnej, zastosowanych obłożeń

chirurgicznych, czynników ryzyka u pacjentów, profilaktyki okołoperacyjnej, usuwania owłosienia pacjentów lub działań następczych. Co więcej, uzyskiwanie informacji od zespołu kontroli zakażeń przekazywane było drogą pocztową bez dodatkowej rozmowy z ankietowanymi więc personel techniczny często nie był w stanie udzielić prawidłowych odpowiedzi dotyczących rodzaju stosowanej wentylacji, np. czy perforowane sufity sklasyfikować można jako nawiewniki LAF. Innym krytycznym aspektem był fakt, że szczególnie w przypadku implantacji protez całkowitych, większość SSI ujawnia się dopiero po wypisaniu pacjenta ze szpitala.

W 2015 McHugh i in. [16] dokonali analizy literatury pod kątem skuteczności stosowania systemów laminarnego przepływu powietrza (LAF) w redukcji zakażeń miejsca operacyjnego (SSI). Autorzy przeprowadzili dokładny przegląd literatury naukowej, opierając się na artykułach z ostatnich 50 lat, które dotyczyły tematyki przepływu laminarnego, zapobiegania zakażeniom miejsca operacyjnego, wentylacji sal operacyjnych oraz procedur ortopedycznych. Badano wyniki eksperymentalne dotyczące zarówno liczby bakterii w powietrzu, jak i wskaźników infekcji w przypadkach operacji wykonywanych w salach operacyjnych z LAF oraz bez tego systemu. Przegląd literatury wykazał, że systemy LAF skutecznie zmniejszają liczbę bakterii obecnych w powietrzu na salach operacyjnych. Niemniej jednak, badania te niejednoznacznie powiązały te wyniki z redukcją rzeczywistych zakażeń SSI. W większości badań klinicznych nie zaobserwowano istotnej korelacji między stosowaniem LAF a zmniejszeniem liczby zakażeń SSI. W artykule podkreślono kilka kluczowych kwestii, które mogą wyjaśniać brak jednoznacznych wyników badań nad LAF:

- dyscyplina na sali operacyjnej – badania sugerowały, że przestrzeganie zasad higieny i protokołów w trakcie operacji (np. ograniczenie ruchu personelu, zamykanie drzwi) może mieć większy wpływ na ograniczenie zakażeń niż sam system wentylacji,

- rozmiar systemu LAF – różnice w rozmiarach systemów LAF mogą wpływać na skuteczność wentylacji. Większe systemy LAF pokrywające całe pole operacyjne są bardziej efektywne niż mniejsze systemy, które mogą powodować turbulencje i zwiększać ryzyko zanieczyszczenia instrumentów chirurgicznych.

- zbyt duże zaufanie LAF – niektóre badania sugerują, że personel medyczny może zbyt poolegać na systemie LAF, zaniedbując inne kluczowe procedury prewencji zakażeń, co w efekcie prowadzi do zwiększenia liczby SSI.

Dodatkowo, niektóre badania sugerują, że przepływ powietrza w systemach LAF może powodować spadek temperatury ciała pacjenta, co z kolei sprzyja wystąpieniu zakażeń pooperacyjnych. Artykuł kończył się konkluzją, że choć LAF może zmniejszać liczbę bakterii w powietrzu, nie ma wystarczających dowodów na to, że istotnie zmniejsza liczbę zakażeń SSI. Autorzy sugerowali, że zanim całkowicie odstąpi się od stosowania LAF, konieczne są dalsze, wieloosrodkowe badania, które uwzględnią inne czynniki, takie jak: rozmiar systemu LAF, przestrzeganie protokołów operacyjnych oraz zmienne wpływające na ryzyko zakażeń.

W kolejnym artykule przeglądowym, na postawie przeprowadzonej meta-analizy Bischoff i in. [17] wskazali brak istotnej różnicy w ryzyku zakażeń SSI w operacjach biodra i stawu kolanowego między systemami LAF a MV. Wypunktowano również, że skoro nie ma różnic w otrzymany

badaniach, a instalacja i eksploatacja systemów LAF może być kosztowniejsza niż MV to nie należy ich instalować w nowych salach operacyjnych jako środka zapobiegającego zakażeniom. Podejście metodologiczne badania Bischoffa zostało również poddane dyskusji, np. w badaniu nie przedstawiono rozróżnienia ani definicji systemu LAF na podstawie specyfikacji technicznej, braku lub ograniczonej dokumentację noszonej odzieży chirurgicznej oraz walidacji sufitowych systemów LAF.

Kolejnym znaczącym dokumentem kwestionującym konieczność stosowania LAF są wytyczne Światowej Organizacji Zdrowia (WHO) z 2018 roku [18], w których stwierdzono, że w kontekście operacji endoprotezoplastyki stawów biodrowych i kolanowych, WHO sugeruje, aby nie stosować systemów laminarnych przepływów powietrza (LAF) jako środka zapobiegającego zakażeniom miejsca operowanego. Analiza przeprowadzona przez WHO wykazała, że dowody są niskiej jakości, a w niektórych badaniach sugerowano nawet, że systemy LAF mogą zwiększać ryzyko infekcji w przypadkach, gdzie jest stosowany w operacjach totalnej endoprotezoplastyki stawu biodrowego lub kolanowego. W odniesieniu do wentylacji mieszającej wskazano, że systemy te są szczególnie skuteczne w operacjach innych niż ortopedyczne, gdzie nie ma potrzeby stosowania systemów o bardzo niskim poziomie zanieczyszczeń powietrza, takich jak systemy LAF. Dowody na skuteczność konwencjonalnej wentylacji są bardziej umiarkowane, jednak badania sugerują, że w wielu przypadkach jest ona równie skuteczna, tak jak systemy laminarnych przepływów. Oprócz uwag dotyczących rozdziału powietrza wskazano, że systemy wentylacyjne muszą być wyposażone w wysokosprawne filtry HEPA zdolne do usunięcia 99,97% cząstek o średnicy 0,3 μm lub większej. Filtry te odgrywają kluczową rolę w utrzymaniu czystości powietrza w salach operacyjnych i wymagają regularnej konserwacji oraz wymiany, aby zapewnić skuteczność działania. Ważnym aspektem utrzymania skuteczności systemów wentylacyjnych jest również monitorowanie różnicy ciśnienia między różnymi strefami sali operacyjnej, co zapobiega przedostawaniu się zanieczyszczonego powietrza z innych pomieszczeń do sterylnej strefy operacyjnej.

Badacze analizujący wytyczne WHO wskazywali jednak, że w tym raporcie pojawiają się następujące błędy metodyczne dotyczące oceny systemów wentylacji sal operacyjnych, w tym niska jakość dowodów (większość dowodów pochodzi z badań obserwacyjnych lub z danych z rejestrów krajowych, które nie były zaprojektowane specjalnie do porównania systemów wentylacyjnych); potencjalne czynniki zakłócające (większość dostępnych badań nie przeprowadzała porównań między systemami LAF i wentylacją mieszającą w tych samych warunkach szpitalnych) oraz ograniczenia zakresu danych (dane pochodzące z systemów nadzoru infekcji są szeroko wykorzystywane, jednak mogą one zawierać istotne ograniczenia, takie jak brak szczegółowych informacji na temat procedur wentylacyjnych stosowanych w poszczególnych przypadkach lub ograniczenia w raportowaniu zakażeń, co prowadzi do niedoszacowania rzeczywistego ryzyka infekcji). W raporcie zwrócono jednak uwagę na potrzebę dalszych badań, zwłaszcza w kontekście stosowania systemów laminarnych przepływów powietrza w operacjach implantacji ortopedycznych.

W 2019 roku porównanie LAF i MV pod kątem zapewnienia odpowiedniej jakości powietrza podczas zabiegów ortopedycznych przeprowadził Cao i in. [19]. Badanie

przeprowadzono w dwóch salach operacyjnych w St. Olav Hospital w Norwegii. Jedna sala wyposażona była w system LAF, a druga w MV. Symulacje obejmowały manekina termicznego reprezentującego pacjenta, a także trzy manekiny symulujące personel chirurgiczny. W ramach eksperymentu mierzono parametry przepływu powietrza, takie jak: prędkość, intensywność turbulencji oraz rozkład powietrza w różnych scenariuszach z i bez lamp chirurgicznych. Wyniki badań wskazały, że ponieważ w systemie LAF przepływ powietrza ma charakter pionowy, dostarczając czyste powietrze bezpośrednio nad polem operacyjnym, prędkość powietrza tuż nad pacjentem była znacznie niższa niż w dalszej odległości, co wskazuje na zakłócenie przepływu przez strumienie konwekcyjne generowane przez pacjenta oraz sprzęt chirurgiczny. Dla przykładu, nad miednicą pacjenta prędkość powietrza wynosiła zaledwie 0,08-0,24 m/s, co jest wynikiem obecności dwóch członków zespołu chirurgicznego stojących w pobliżu, którzy również emitowali ciepło i zakłócili laminarny przepływ powietrza. Z kolei nad klatką piersiową pacjenta prędkość powietrza była wyższa niż nad miednicą. W systemie MV powietrze jest dostarczane i mieszane w całej sali operacyjnej, a prędkość powietrza nad pacjentem była bardziej stabilna. Wysoka prędkość powietrza sugeruje, że system MV zapewnia bardziej równomierny przepływ powietrza w całej przestrzeni operacyjnej. W porównaniu z LAF, MV lepiej radził sobie z zachowaniem stabilności przepływu powietrza, nawet w obecności sprzętu chirurgicznego i personelu. Ponadto obecność lamp chirurgicznych miała znaczący wpływ na przepływ powietrza w obu systemach – w LAF przepływ powietrza nad pacjentem był bardziej zakłócony przez strumienie konwekcyjne generowane przez lampy i personel, a z kolei w systemie MV lampy chirurgiczne miały większy wpływ na równomierność rozkładu powietrza, ale zakłócenia były mniej intensywne. Podsumowując wskazano, że system LAF, mimo że teoretycznie powinien zapewniać bardziej kontrolowane środowisko operacyjne, jest bardziej podatny na zakłócenia powodowane przez strumienie konwekcyjne oraz obecność personelu i sprzętu, co nierównomierny przepływ powietrza, zwłaszcza w pobliżu pacjenta, co może zwiększać ryzyko kontaminacji pola operacyjnego natomiast system MV lepiej radzi sobie z równomiernym rozprowadzaniem powietrza w całej sali operacyjnej, co skuteczniej rozprasza zanieczyszczenia i zmniejsza ryzyko ich koncentracji w jednym miejscu. Autorzy zasugerowali potrzebę opracowania nowych wytycznych dotyczących projektowania systemów wentylacyjnych w salach operacyjnych, które uwzględniałyby specyficzne potrzeby chirurgii ortopedycznej oraz dynamiczny charakter środowiska operacyjnego.

W 2024 roku badania porównawcze 4 systemów przeprowadził również Lans [20] na bazie pomiarów prowadzonych w pełni funkcjonujących salach operacyjnych w szpitalach w Holandii. Sale operacyjne miały porównywalne wymiary oraz wysokości pomieszczeń.

W badaniach oceniano cztery różne systemy wentylacyjne:

CV – system tradycyjnej wentylacji mieszanej, który równomiernie miesza powietrze w całym pomieszczeniu operacyjnym,

cDV – system kontrolowanej wentylacji rozcieńczającej, w którym powietrze jest dostarczane przez dysze powietrzne, zapewniając mieszanie powietrza w ultra-czystym obszarze oraz na obrzeżach pomieszczenia,

TcAF – system kontrolowanego przepływu powietrza, który dostarcza chłodne powietrze bezpośrednio nad stołem operacyjnym, a cieplejsze powietrze na obrzeżach,

UDAF – system jednokierunkowego przepływu powietrza, który wypiera istniejące powietrze w ultraczystym obszarze za pomocą filtrowanego powietrza HEPA.

Pomiarów dokonywano w trzech obszarach:

Obszar A – standardowy obszar ultra-czysty obejmujący 1x1 m z 9 punktami pomiarowymi,

Obszar B – obszar poza standardowym ultra-czystym obszarem, obejmujący 4 m × 4 m z 16 punktami pomiarowymi,

Obszar AB – połączenie obszarów A i B z 25 punktami pomiarowymi.

Cząstki emitowano za pomocą generatora aerozoli, a pomiary liczby cząstek w powietrzu przeprowadzono w cyklach minutowych przez 10 minut w każdym z punktów pomiarowych. Wyniki badań wskazały, że UDAF wykazał najwyższą skuteczność wentylacji w obszarze A, tj. dostarczane powietrze o wyższej czystości docierało do obszaru operacyjnego w krótszym czasie. Systemy TcAF i CV nie różniły się znacząco pod względem efektywności usuwania cząstek w ciągu 10 minut i systemy skutecznie rozprowadzały powietrze w ultra-czystym obszarze, natomiast cDV wykazał niższą skuteczność w obszarze A w porównaniu do UDAF. W obszarze B, systemy UDAF i cDV były porównywalne i obydwa systemy skutecznie rozprowadzały powietrze również poza bezpośrednim obszarem operacyjnym a CV wykazywał podobną skuteczność do UDAF, co oznacza, że mieszanie powietrza w obszarze B było równie efektywne w obu systemach. Natomiast w obszarze AB system UDAF przewyższał inne systemy w efektywności usuwania cząstek nawet w szerszym obszarze, choć cDV również był skuteczny. Wyniki sugerują, że systemy UDAF są najbardziej odpowiednie do operacji wymagających utrzymania ultra-czystego powietrza w bezpośrednim otoczeniu rany.

Jak przedstawiono powyżej, choć wiele badań wskazuje przewagę systemu jednokierunkowego w zakresie utrzymania czystszej powierza w polu chronionym, różne aspekty, które wpływają na skuteczność tego rozwiązania nie pozwalają na jednoznaczne wskazanie, że zastosowanie tego rozwiązania może wpłynąć na ograniczenie ryzyka zakażenia miejsca operowanego.

4. Inne aspekty mające udowodniony wpływ na efektywność wentylacji w strefie chronionej

Zastosowanie lamp operacyjnych

Aganovic i inni [21] badali wpływ zastosowania lamp operacyjnych na rozkład prędkości i poziom zanieczyszczeń w powietrzu w salach operacyjnych wyposażonych w systemy laminarnych przepływów powietrza (LAF). Zaobserwował, że zastosowanie lamp operacyjnych znacznie obniżało prędkość przepływu powietrza w pobliżu stołu operacyjnego, co skutkowało powstaniem stref o niskiej prędkości powietrza (<0,0355 m/s), co może prowadzić do osadzania się mikroorganizmów przenoszonych drogą powietrzną, co zwiększa ryzyko infekcji. Ponadto lampy o zamkniętym kształcie (bez otworów między modułami świetlnymi) powodowały większe zakłócenia przepływu powietrza niż światła z otworami, co prowadziło do większej liczby zanieczyszczeń w powietrzu wokół stołu operacyjnego. Autor wskazał, że w celu minimalizacji zakłóceń przepływu powietrza i w konsekwencji ryzyka infekcji, zaleca się dobór

lamp operacyjnych z otworami umożliwiającymi lepszy przepływ powietrza, a także umieszczanie ich z dala od stołu operacyjnego, o ile to możliwe.

Odzież i zachowanie personelu

Cao i inni [22] skupili się na sprawdzeniu jak zachowania odnośnie do stosowanej odzieży chirurgicznej, aktywności personelu oraz otwieraniu drzwi wpływają na poziom zanieczyszczenia mikrobiologicznego w salach operacyjnych z systemem wentylacji mieszającej (MV). W przypadkach, gdzie zespół chirurgiczny nosił kombinezony ochronne oraz odpowiednio dopasowane kaptury, zaobserwowano niższy poziom CFU/m³ (kolonii bakterii na metr sześcienny powietrza). Niewłaściwe zastosowanie kapturek chirurgicznych (niedopasowane lub źle założone) powodowało wzrost CFU i brak spełnienia wymagania ultraczystego powietrza (≤ 10 CFU/m³), które było możliwe do osiągnięcia przy prawidłowym dopasowaniu kapturek. Również aktywność chirurgów, symulowana jako młotkowanie czy manipulowanie kończynami pacjenta, znacząco zwiększała poziom zanieczyszczeń w powietrzu. Najwyższy poziom CFU był obserwowany podczas fazy wymiany stawu, gdzie konieczne było intensywne poruszanie się personelu, co prowadziło do zwiększenia liczby bakterii w powietrzu. W fazach o niższej aktywności, takich jak nacięcie i zszywanie rany, poziom CFU był znacznie niższy. Autorzy podsumowali, że możliwe jest osiągnięcie wymogu ≤ 10 CFU/m³ w salach operacyjnych z wentylacją mieszającą, ale wymaga to odpowiedniej odzieży oraz minimalizacji aktywności chirurgicznej, co również wskazuje potencjalne ograniczenie stosowania MV do niektórych rodzajów operacji.

Otwieranie drzwi

W badaniach [23] analizowano, m.in wpływ otwierania drzwi do sali operacyjnej wyposażonej w system MV. Gdy drzwi były otwierane, poziom CFU wzrastał z 25 CFU/m³ do 28 CFU/m³. Zauważono, że wzrost poziomu CFU nie zawsze był natychmiastowy po otwarciu drzwi. W niektórych przypadkach zaobserwowano opóźnienie, co może wynikać z dynamicznych przepływów powietrza w sali oraz ruchów personelu chirurgicznego. Autorzy sugerowali, że otwieranie drzwi wprowadza zanieczyszczenia, które mogą z opóźnieniem docierać do miejsca operowanego.

5. Podsumowanie

Przegląd dostępnych systemów wentylacji stosowanych w salach operacyjnych pokazuje, że każda z metod ma zarówno zalety, jak i ograniczenia, a wybór odpowiedniego rozwiązania zależy od wielu czynników, w tym rodzaju przeprowadzanej operacji, wymagań dotyczących sterylności powietrza oraz kosztów instalacji i eksploatacji systemu.

Systemy wentylacji mieszającej (MV) zapewniają równomierne rozcieńczenie zanieczyszczeń w powietrzu, jednak mogą być mniej skuteczne w bezpośrednim polu operacyjnym w porównaniu do systemów jednokierunkowego przepływu powietrza (LAF). Z kolei LAF, choć skutecznie redukuje liczbę bakterii w powietrzu, nie zawsze przekłada się na zmniejszenie ryzyka zakażeń miejsca operowanego (SSI).

Ponadto, istnieją również systemy hybrydowe, takie jak TcAF, które łączą elementy wentylacji mieszającej i laminarnej, oferując kompromis pomiędzy efektywnością a kosztami eksploatacji. Dalsze badania w tym zakresie powinny

koncentrować się na ocenie efektywności różnych systemów w warunkach rzeczywistych operacji chirurgicznych, z uwzględnieniem dynamicznych czynników wpływających na czystość powietrza.

Ponadto, rozwój nowych technologii wentylacyjnych oraz udoskonalanie obecnych systemów może przyczynić się do zwiększenia skuteczności eliminacji patogenów, a tym samym dalszego zmniejszenia ryzyka infekcji pooperacyjnych.

LITERATURA

[1] Charnley, J. 1964. „A clean-air operating enclosure”. *Journal of British Surgery*, 51(3): 202-205.

[2] Charnley J., Eftekhar N. 1969. „Postoperative infection in total prosthetic replacement arthroplasty of the hip-joint with special reference to the bacterial content of the air of the operating room”, *Br. J. Surg.*, 56, pp. 641-649

[3] Lidwell O. M., Lowbury, E. J., Whyte, W., Blowers, R., Stanley, S. J., & Lowe, D. 1982. „Effect of ultraclean air in operating rooms on deep sepsis in the joint after total hip or knee replacement: a randomised study”. *Br Med J (Clin Res Ed)*, 285(6334), 10-14.

[4] Melhado M. D. A., J. L. M. Hensen, and M. G. L. C. Loomans. „Review of operating room ventilation standards.” conference; ACV 2006: Air-conditioning and Ventilation Conference 2006; 17, Prague; 2006-05-17; 2006-05-19. STP-Society of Environmental Engineering, 2006.

[5] Lin Tee, et al. „An experimental study of the flow characteristics and velocity fields in an operating room with laminar airflow ventilation.” *Journal of Building Engineering* 29 (2020): 101184.

[6] Agirman Aleyna, et al. „Effect of air exhaust location on surgical site particle distribution in an operating room.” *Building Simulation*. Vol. 13. Tsinghua University Press, 2020.

[7] DIN 1946-4 Ventilation and air conditioning – Part 4: Ventilation in buildings and rooms of health care

[8] Sadrizadeh Sasan, Sture Holmberg, and Ann Tammelin. 2014. „A numerical investigation of vertical and horizontal laminar airflow ventilation in an operating room.” *Building and Environment* 82: 517-525.

[9] Casagrande Diego, and Marzio Pillar. 2020. „Conflicting effects of a portable ultra-clean airflow unit on the sterility of operating rooms: A numerical investigation.” *Building and Environment* 171: 106643.

[10] Wang Cong, Sture Holmberg, and Sasan Sadrizadeh. 2018. „Numerical study of temperature-controlled airflow in comparison with turbu-

lent mixing and laminar airflow for operating room ventilation.” *Building and Environment* 144: 45-56.

[11] Alsvéd Malin, et al. 2018. „Temperature-controlled airflow ventilation in operating rooms compared with laminar airflow and turbulent mixed airflow.” *Journal of Hospital Infection* 98.2: 181-190.

[12] Sadrizadeh Sasan, and Peter Ekolind. „A new principle of ventilation system for operating rooms: Temperature-Controlled Air Flow.” *CLIMA* 2016. 2016.

[13] Brandt Christian, et al. 2008. „Operating room ventilation with laminar airflow shows no protective effect on the surgical site infection rate in orthopedic and abdominal surgery.” *Annals of surgery* 248.5: 695-700.

[14] Assadian Ojan, et al. 2009. „Protective effect of HEPA-filtered operating room air ventilation with or without laminar airflow on surgical site infections.” *Annals of surgery* 250.4: 659-660.

[15] Kramer A. et al. 2010. „Infektiologische Bedeutung von Raumluft-technischen Anlagen (RLTA) in Operations-und Eingriffsräumen.” *Zentralblatt für Chirurgie* 135.01: 11-17.

[16] McHugh S. M., A. D. K. Hill, and H. Humphreys. 2015. „Laminar airflow and the prevention of surgical site infection. More harm than good?.” *The Surgeon* 13.1: 52-58.

[17] Bischoff P. Kubilay, N. Z., Allegranzi, B., Egger, M., & Gastmeier, P. 2017. „Effect of laminar airflow ventilation on surgical site infections: a systematic review and meta-analysis”. *The Lancet Infectious Diseases*, 17(5), 553-561.

[18] World Health Organization. „Global guidelines on the prevention of surgical site infection.” *Global guidelines on the prevention of surgical site infection*. 2016.

[19] Cao Guangyu, et al. 2019. „Laminar airflow and mixing ventilation: Which is better for operating room airflow distribution near an orthopedic surgical patient?.” *American journal of infection control* 47.7: 737-743.

[20] Lans JLA 2024, „Operating Room Ventilation: A View From Different Perspectives”, Doctor of Philosophy, Delft University of Technology. <https://doi.org/10.7480/abe.2024.21>

[21] Aganovic Amar, et al. 2017. „Impact of surgical lights on the velocity distribution and airborne contamination level in an operating room with laminar airflow system.” *Building and Environment* 126: 42-53.

[22] Cao G, Pedersen C, Zhang Y, Drangsholt F, Radtke A, Langvatn H, Stenstad LI, Mathisen HM, Skogås JG. Can clothing systems and human activity in operating rooms with mixed flow ventilation systems help achieve the ultraclean air requirement (≤ 10 CFU/m³) during orthopaedic surgeries? *J Hosp Infect*. 2022 Feb;120:110-116. doi: 10.1016/j.jhin.2021.11.005. Epub 2021 Nov 16. PMID: 34798173.

[23] US Pharmacopeial Convention. „General Chapter, Validation of Microbial Recovery from Pharmacopeial Articles.” USP 39—NF 34 (2016).



Czytelnikom, Autorom, Reklamodawcom
i Współpracownikom naszego czasopisma,
życzymy zdrowych, pogodnych Świąt
Wielkanocnych, pełnych wiary, nadziei
i miłości. Radosnego, wiosennego nastroju,
serdecznych spotkań w gronie rodziny
i wśród przyjaciół oraz wesołego Alleluja!

Redakcja



mgr inż. MIRELLA FUHRMANN

ORCID ID: 0009-0001-1271-7119
 Katedra Katedry Ogrzewnictwa, Wentylacji
 i Techniki Odpylania
 Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki
 Politechnika Śląska
 Mirella.Fuhrmann@polsl.pl

Młodzieżowa Rada Klimatyczna III kadencji

4 grudnia 2024 r. została powołana Młodzieżowa Rada Klimatyczna III kadencji. Młodzieżowa Rada Klimatyczna (MRK) to organ doradczy, który działa przy Ministrze Klimatu i Środowiska. Misją Rady jest zaangażowanie młodzieży w procesy decyzyjne dotyczące ochrony klimatu i środowiska. MRK koncentruje się na kilku kluczowych obszarach: wyrażaniu opinii na temat zagadnień związanych z klimatem, energią i środowiskiem, promowaniu postaw proekologicznych wśród młodzieży oraz podnoszeniu poziomu wiedzy na temat tych istotnych kwestii. Dzięki działalności MRK młodzież ma możliwość aktywnego udziału w kształtowaniu polityki ekologicznej i klimatycznej, co jest niezwykle ważne w kontekście współczesnych wyzwań środowiskowych. Młodzieżowa Rada Klimatyczna nie tylko działa przy Ministrze Klimatu i Środowiska, ale również aktywnie współpracuje z różnorodnymi partnerami, takimi jak: organizacje pozarządowe, instytucje rządowe, szkoły, uczelnie i media. MRK regularnie organizuje spotkania, na których omawiane są aktualne problemy klimatyczne oraz planowane przyszłe działania. Członkowie MRK mają również okazję uczestniczyć w konferencjach, seminariach i innych wydarzeniach związanych z ochroną środowiska, gdzie mogą przedstawiać swoje pomysły i propozycje.

Działania MRK obejmują między innymi planowane zmiany polityki, strategii oraz legislacji w obszarach klimatu, energii i środowiska. MRK angażuje młodzież w działania na rzecz ochrony środowiska, inspirując ich do podejmowania



Fot: MKiŚ

inicjatyw proekologicznych i proklimatycznych. MRK organizuje różnorodne działania edukacyjne, które mają na celu zwiększenie świadomości młodzieży na temat zagadnień związanych z klimatem, energią i środowiskiem.

W skład MRK wchodzi 19 osób, które reprezentują różne środowiska społeczne. Kadencja każdego członka Rady trwa 2 lata, co pozwala na regularne wprowadzanie nowych pomysłów i perspektyw. Członkowie Rady są wylani w drodze naboru przeprowadzanego przez Ministra Klimatu i Środowiska.

Jednym z członków Rady jest doktorantka z Katedry Ogrzewnictwa, Wentylacji i Techniki Odpylania Politechniki Śląskiej, **mgr inż. Mirella Fuhrmann**, która objęła stanowisko Koordynatora ds. szkolnictwa wyższego w Młodzieżowej Radzie Klimatycznej. Jako Koordynator pełni kluczową funkcję w budowaniu świadomości ekologicznej i promowaniu działań na rzecz ochrony klimatu w środowisku akademickim. Jej celem jest współpraca z przedstawicielami środowisk akademickich, organizacja wydarzeń edukacyjnych, warsztatów czy konferencji, mających na celu zwiększenie świadomości na temat zmian klimatycznych i potrzeb związanych z ochroną środowiska wśród studentów i wykładowców. Praca Koordynatora skupia się obecnie na inicjowaniu projektów proekologicznych na poziomie uczelni, promujących zrównoważony rozwój i świadomość zrównoważonego cyklu życia. Jej celem jest również zaangażowanie młodzieży z różnych środowisk akademickich w działania na rzecz klimatu, tworząc przestrzeń do dialogu i współpracy pomiędzy studentami, a instytucjami edukacyjnymi.



Fot: MKiŚ

Nowość Wydawnictwa Naukowego PWN: „Metody numeryczne w symulacji sieci gazowych”

Książka „Metody numeryczne w symulacji sieci gazowych”, autorstwa prof. dr hab. inż. Andrzeja J. Osiadacza – wybitnego specjalisty w dziedzinie automatyki, robotyki oraz inżynierii gazownictwa. Publikacja ta jest unikalnym dziełem na rynku polskim, poświęconym zarówno podstawowym, jak i zaawansowanym metodom numerycznym wykorzystywanym w symulacjach komputerowych sieci gazowych.

Dlaczego warto sięgnąć po tę książkę?

Programy symulacyjne odgrywają coraz większą rolę w efektywnym zarządzaniu sieciami gazowymi – zarówno w stanach ustalonych, jak i nieustalonych. Aby świadomie korzystać z narzędzi obliczeniowych, rozwijać je, a także poprawnie interpretować wyniki obliczeń, niezbędne jest solidne zrozumienie metod obliczeniowych. W książce znajdują Państwo:

- elementy teorii grafów,
- numeryczne metody rozwiązywania równań algebraicznych liniowych i nieliniowych,
- metody interpolacji i aproksymacji funkcji,
- numeryczne metody rozwiązywania równań różniczkowych zwyczajnych i cząstkowych.

Dla kogo jest ta książka?

Książka „Metody numeryczne w symulacji sieci gazowych” jest skierowana do:

- studentów i doktorantów kierunków takich jak energetyka, inżynieria środowiska, inżynieria chemiczna i procesowa,
- projektantów, instalatorów i eksploataatorów sieci gazowych,
- planistów rozwoju systemów gazowych,
- inżynierów odpowiedzialnych za transport gazu oraz inżynierów środowiska i energetyki.

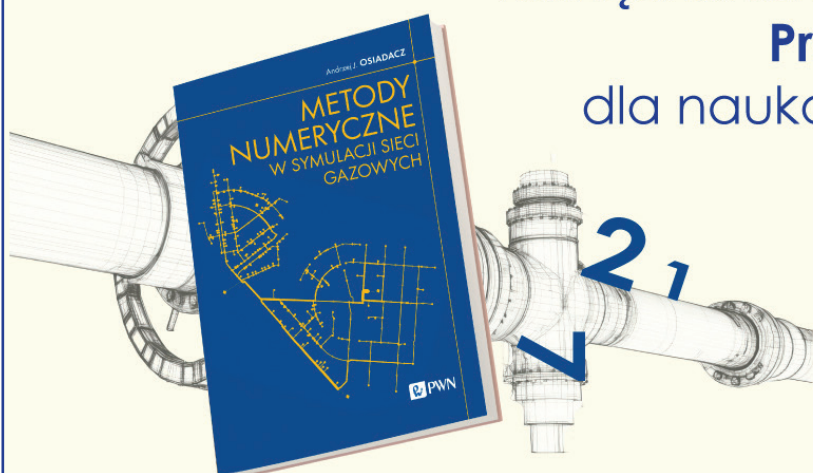
ze specjalnym kodem rabatowym: **METODYNUMERYCZNE** książka dostępna z 28% rabatem od ceny katalogowej; oferta ważna do końca marca na ksiegarnia.pwn.pl

<https://ksiegarnia.pwn.pl/Metody-numeryczne-w-symulacji-sieci-gazowych,1095167191,p.html>

 @PWN STEM

 PWN

**Klucz do efektywnego
zarządzania sieciami gazowymi.
Praktyczne narzędzie
dla naukowców i inżynierów!**



Sprawdź 

POMAGANIE BUDUJE **48H**

**Dwa dni pełne dobroczynności i emocji,
które zostaną z nami na zawsze**

KIEDY?

30 maja

Konferencja Architektura Życia
z networkingiem biznesowym

31 maja

II Mistrzostwa Polski Branży Budowlanej
w kolarstwie szosowym oraz turniej golfowy

Wydarzenie artystyczne i licytacja charytatywna na
rzecz Podopiecznych Fundacji Rodziny Maj

GDZIE?

Siedziba SMAY Sp. z o.o.,
Podłęże 678, k. Krakowa

DOŁĄCZ DO NASZEGO **PELETONU DOBRA**

Zapisy i więcej informacji na stronie:
pomaganiebuduje.pl



PRENUMERATA 2025

**Prenumerata drukowana i cyfrowa
– rzetelna wiedza na wyciągnięcie ręki**

Prenumeruj, w wygodnej dla siebie wersji!

Cena 1 egzemplarza: 38 zł

PRENUMERATA CYFROWA

Cena: 360 zł

PRENUMERATA PAPIEROWA

Cena: 432 zł brutto + koszt rocznej wysyłki 42 zł

PAKIET PLUS (papier + cyfra + archiwum)

Cena: 552 zł brutto (koszty wysyłki pokrywa wydawca)

Ceny prenumeraty całorocznej dotyczą wyłącznie zamówień składanych w Zakładzie Kolportażu Wydawnictwa SIGMA-NOT.



ZAMÓWIENIA:

☎ 22 840 35 89 lub 22 840 30 86

@ prenumerata@sigma-not.pl

🌐 www.sigma-not.pl



WYDAWNICTWO SIGMA-NOT