TECHMEDIS

Kształtowanie zdrowego i bezpiecznego środowiska
w obiektach ochrony zdrowia

# Recyrkulacja powietrza w salach operacyjnych – wskazówki

TechMedis - wersja do konsultacji

Warszawa, 2026

Autorzy:
Dr hab. inż. Anna Bogdan, Dr inż. Sylwia Szczęśniak, Dr Maciej Szczotko, Dr inż. Amelia Staszowska, Mgr inż. Marcin Michalski, Mgr inż. Dominika Kwiecińska

Koordynator projektu TechMedis:
Dr hab. inż. Anna Bogdan

Skład techniczny i projekt okładki:
Agnieszka Chojnacka

Wydawca:
Polskie Zrzeszenie Inżynierów i Techników Sanitarnych

Publikacja w formie elektronicznej

e-ISBN: ...

Publikacja dofinansowana 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.

Publikacja bezpłatna

**Zastrzeżenie dotyczące aktualności informacji.** Informacje zawarte w niniejszym opracowaniu odzwierciedlają stan wiedzy, przepisów prawnych i norm na dzień jego wydania (16.11.2026). Ze względu na rozwój wiedzy, nowe wyniki badań oraz zmiany przepisów i norm część informacji może z czasem utracić aktualność. Przed zastosowaniem wskazówek w konkretnym projekcie lub obiekcie należy sprawdzić aktualny stan prawny i normatywny. Opracowanie ma charakter informacyjny i nie zastępuje projektu instalacji ani obowiązujących przepisów i norm.

**Wykorzystanie narzędzi sztucznej inteligencji.** Przy przygotowaniu opracowania korzystano z narzędzi sztucznej inteligencji (AI) jako wsparcia w redakcji tekstu i formatowaniu bibliografii. Wszystkie treści zostały sprawdzone przez autorów, którzy ponoszą pełną odpowiedzialność za merytoryczną zawartość publikacji.

TechMedis - wersja do konsultacji

## Spis treści

1. Wprowadzenie ..... 4
2. Podstawy prawne i normatywne ..... 5
3. Oszczędność energii ..... 14
4. Aspekty sanitarne ..... 21
5. Wskazówki ograniczające ryzyko sanitarne (mikrobiologiczne i chemiczne) związane z recyrkulacją powietrza w salach operacyjnych i hybrydowych ..... 30
6. Podsumowanie ..... 33
7. Bibliografia ..... 34

TechMedis - wersja do konsultacji

## 1. Wprowadzenie

Zakażenia związane z opieką zdrowotną, w tym zakażenia miejsca operowanego, pozostają jednym z najpoważniejszych wyzwań współczesnej medycyny. Według danych Światowej Organizacji Zdrowia (WHO) zakażenia w szpitalach o profilu ostrym dotyczą 7 na 100 pacjentów w krajach o wysokich dochodach i 15 na 100 pacjentów w krajach o niskich i średnich dochodach (Odoom i in., 2025; WHO, 2022). Europejskie Centrum ds. Zapobiegania i Kontroli Chorób (ang. European Centre for Disease Prevention and Control, ECDC) wskazuje, że w Europie w dowolnym dniu co najmniej 1 na 15 pacjentów hospitalizowanych oraz 1 na 26 mieszkańców zakładów opieki długoterminowej doświadcza zakażenia związanego z opieką zdrowotną, co przekłada się na około 8,9 mln przypadków rocznie (Suetens i in., 2018). Według najnowszego badania punktowego ECDC (2022–2023) co najmniej jedno takie zakażenie rocznie dotyczy ok. 4,3 mln pacjentów szpitali ostrych w Unii Europejskiej i Europejskim Obszarze Gospodarczym (UE/EOG), a zakażenia miejsca operowanego stanowią 16,1% wszystkich zakażeń (ECDC, 2024). Skala problemu uzasadnia szczególną uwagę poświęconą jakości powietrza w salach operacyjnych i innych pomieszczeniach o wysokich wymaganiach czystości mikrobiologicznej.

Powietrze w salach operacyjnych stanowi potencjalną drogę transmisji drobnoustrojów chorobotwórczych, ale również nośnik aerozoli chirurgicznych, w tym tzw. dymu chirurgicznego (ang. surgical smoke), cząstek tkankowych, lotnych związków organicznych oraz gazów anestetycznych. Źródła zanieczyszczeń mają charakter zarówno endogenny (personel, pacjent), jak i egzogenny (instalacje wentylacji i klimatyzacji, otoczenie budynku). Z tego względu system wentylacji i klimatyzacji jest jednym z kluczowych elementów kontroli ryzyka zakażeń, obok procedur aseptycznych i organizacji pracy bloku operacyjnego.

Równocześnie projektowanie systemów ogrzewania, wentylacji i klimatyzacji (*ang. Heating, Ventilation and Air Conditioning,* HVAC) w obiektach ochrony zdrowia musi uwzględniać wymagania efektywności energetycznej. Tradycyjne podejście, polegające na całkowitej eliminacji recyrkulacji powietrza, wywodzi się z okresu ograniczonych możliwości filtracyjnych i niskiej szczelności instalacji. Współczesne technologie umożliwiają wielostopniową filtrację, w tym zastosowanie filtrów HEPA o bardzo wysokiej skuteczności separacji cząstek w zakresie krytycznym mikrobiologicznie. Przy zapewnieniu szczelnego rozdziału strumieni powietrza, kontroli szczelności systemu, stałego monitoringu parametrów pracy oraz regularnego nadzoru technicznego, jakość powietrza w systemach z ograniczoną recyrkulacją może być utrzymywana na poziomie porównywalnym pod względem stężenia cząstek i liczby drobnoustrojów w powietrzu z układami opartymi wyłącznie na powietrzu zewnętrznym.

W kontekście odzysku ciepła należy podkreślić, że rozwiązania stosowane w szpitalach (np. wymienniki z czynnikiem pośredniczącym, rurki ciepła, pompy ciepła) zapewniają wysoki poziom bezpieczeństwa higienicznego poprzez szczelne oddzielenie strumieni powietrza nawiewanego i wywiewanego, jednak umożliwiają tylko odzysk ciepła jawnego. Recyrkulacja, poza zmianą temperatury, pozwala również na częściowe wykorzystanie energii związanej z wilgotnością powietrza, co ogranicza zapotrzebowanie na osuszanie i nawilżanie oraz poprawia bilans energetyczny całego systemu.

W świetle powyższego zasadne jest ponowne, oparte na aktualnym stanie wiedzy inżynierskiej i epidemiologicznej, przeanalizowanie możliwości kontrolowanego stosowania recyrkulacji powietrza w salach operacyjnych. Warunkiem jej dopuszczalności jest spełnienie rygorystycznych wymagań w zakresie filtracji końcowej, monitoringu, zarządzania eksploatacyjnego oraz integracji z kompleksowym systemem kontroli zakażeń. Niniejsze opracowanie ma na celu przedstawienie technicznych i sanitarnych przesłanek uzasadniających takie podejście.

W kolejnych rozdziałach omówiono podstawy prawne i normatywne (rozdział 2), analizę zapotrzebowania na energię cieplną i elektryczną do uzdatniania powietrza dla trzech wariantów

TechMedis – wersja do konsultacji

układu klimatyzacji sali operacyjnej (rozdział 3), aspekty sanitarne, w tym metody poprawy jakości powietrza i specyfikę sal hybrydowych (rozdział 4), zalecenia ograniczające ryzyko związane z recyrkulacją (rozdział 5) oraz wnioski (rozdział 6).

## 2. Podstawy prawne i normatywne

Kwestia recyrkulacji powietrza w obiektach jest regulowana następującymi zapisami:

- ROZPORZĄDZENIE MINISTRA INFRASTRUKTURY z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie[1]

*§ 150. 3. W instalacjach wentylacji i klimatyzacji nie należy łączyć ze sobą przewodów z pomieszczeń o różnych wymaganiach użytkowych i sanitarno-zdrowotnych. Nie dotyczy to budynków jednorodzinnych i rekreacji indywidualnej oraz wydzielonych lokali mieszkalnych lub użytkowych z indywidualną zorganizowaną wentylacją nawiewno-wywiewną.*

*§ 151. 1. W instalacjach wentylacji mechanicznej ogólnej nawiewno-wywiewnej lub klimatyzacji komfortowej o wydajności 500 m3 /h i więcej należy stosować urządzenia do odzyskiwania ciepła z powietrza wywiewanego o sprawności temperaturowej co najmniej 50% lub recyrkulację, gdy jest to dopuszczalne. W przypadku zastosowania recyrkulacji strumień powietrza zewnętrznego nie może być mniejszy niż wynika to z wymagań higienicznych. Dla wentylacji technologicznej zastosowanie odzysku ciepła powinno wynikać z uwarunkowań technologicznych i rachunku ekonomicznego. 2. (...) 3. Recyrkulację powietrza można stosować wówczas, gdy przeznaczenie wentylowanych pomieszczeń nie wiąże się z występowaniem bakterii chorobotwórczych, z emisją substancji szkodliwych dla zdrowia, uciążliwych zapachów, przy zachowaniu wymagań § 149 ust. 1 oraz wymagań dotyczących ochrony przeciwpożarowej. 4. W budynku opieki zdrowotnej recyrkulacja powietrza może być stosowana tylko za zgodą i na warunkach określonych przez właściwego państwowego inspektora sanitarnego. 5. W przypadku stosowania recyrkulacji powietrza w instalacjach wentylacji mechanicznej nawiewno-wywiewnej lub klimatyzacji należy stosować układy regulacji umożliwiające w korzystnych warunkach pogodowych zwiększanie udziału powietrza zewnętrznego do 100%. 6. Przepisu ust. 5 nie stosuje się w przypadkach, gdy zwiększanie strumienia powietrza wentylacyjnego uniemożliwiałoby dotrzymanie poziomu czystości powietrza wymaganego przez względy technologiczne. 7. Wymagań ust. 1 można nie stosować w przypadku instalacji używanych krócej niż przez 1000 godzin w roku.*

- ROZPORZĄDZENIE MINISTRA ZDROWIA z dnia 26 marca 2019 r. w sprawie szczegółowych wymagań, jakim powinny odpowiadać pomieszczenia i urządzenia podmiotu wykonującego działalność leczniczą

*§ 38. W blokach operacyjnych, izolatkach oraz pomieszczeniach dla pacjentów o obniżonej odporności stosuje się wentylację nawiewno-wywiewną lub klimatyzację zapewniającą parametry jakości powietrza dostosowane do funkcji tych pomieszczeń.*

*§ 39. W salach operacyjnych oraz innych pomieszczeniach, w których podtlenek azotu jest stosowany do znieczulenia, nawiew powietrza odbywa się górą, a wyciąg powietrza w 20% górą i w 80% dołem i zapewnia nadciśnienie w stosunku do korytarza; rozmieszczenie punktów nawiewu nie może powodować przepływu powietrza od strony głowy pacjenta przez pole operacyjne.*

*§ 40. 1. Instalacje i urządzenia wentylacji mechanicznej i klimatyzacji podlegają okresowemu przeglądowi, czyszczeniu lub dezynfekcji, lub wymianie elementów instalacji zgodnie z zaleceniami producenta, nie rzadziej niż co 12 miesięcy. 2. Dokonanie czynności, o których mowa w ust. 1, wymaga udokumentowania.*

[1] *Stan prawny na dzień 16 listopada 2026 r. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (t.j. Dz.U. 2022 poz. 1225 z późn. zm.) utraciło moc z dniem 20 września 2026 r., a nowe rozporządzenie w sprawie warunków technicznych do dnia przygotowania niniejszego opracowania nie zostało ogłoszone. Na podstawie art. 102a–102c ustawy – Prawo budowlane, dodanych ustawą z dnia 31 lipca 2026 r. (Dz.U. 2026 poz. 1161), przez 18 miesięcy od 20 września 2026 r., tj. do 20 marca 2028 r., w zakresie określonym w tej ustawie stosuje się dotychczasowe przepisy wykonawcze; inwestor może złożyć oświadczenie, że projekt przygotowano na ich podstawie.*

Technedis - wersja do konsultacji

- ROZPORZĄDZENIE MINISTRA PRACY I POLITYKI SOCJALNEJ z dnia 26 września 1997 r. w sprawie ogólnych przepisów bezpieczeństwa i higieny pracy

*§ 38. 1. Przy stosowaniu w pomieszczeniach pracy wentylacji mechanicznej z recyrkulacją powietrza ilość powietrza świeżego nie powinna być mniejsza niż 10% ogólnej ilości wymienianego powietrza. 2. W powietrzu wprowadzanym do pomieszczeń pracy przy stosowaniu recyrkulacji zanieczyszczenie czynnikami szkodliwymi dla zdrowia nie powinno przekraczać poziomu, przy którym suma stosunków stężeń poszczególnych substancji do odpowiadających im wartości najwyższych dopuszczalnych stężeń przekracza 0,3. 3. Recyrkulacja powietrza nie powinna być stosowana w pomieszczeniach pracy, w których występują szkodliwe czynniki biologiczne, czynniki chemiczne stwarzające zagrożenia określone w przepisach w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy związanej z występowaniem w miejscu pracy czynników chemicznych, materiały wydzielające nieprzyjemne lub uciążliwe zapachy albo w których jest możliwe nagłe zwiększenie stężenia substancji chemicznych stwarzające zagrożenie, a także w przestrzeniach zagrożonych wybuchem*

Dodatkowo w przypadku sal hybrydowych należy przestrzegać zapisów:

- Obwieszczenie Prezesa Rady Ministrów z dnia 29 marca 2022 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Rady Ministrów w sprawie szczegółowych warunków bezpiecznej pracy ze źródłami promieniowania jonizującego (Dz.U. 2022 poz. 967), w którym wymagania dotyczące wentylacji są zawężone do pracowni izotopowych, tj.:

*§ 15. W przypadku pracowni izotopowej klasy II: (...) 4) wentylację mechaniczną nawiewno-wyciągową gwarantującą: a) przepływ powietrza w kierunku pomieszczeń, w których istnieje większe prawdopodobieństwo powstawania skażeń promieniotwórczych, b) ruch powietrza lub układ ciśnień, który zapobiega rozprzestrzenianiu się skażeń promieniotwórczych powstających na stanowiskach pracy, c) wyrzut powietrza na wysokości co najmniej 1 m ponad kalenicą budynku pracowni izotopowej klasy II i budynku sąsiadującego.*

Dla pracowni izotopowych klasy III rozporządzenie wymaga natomiast odrębnej wentylacji mechanicznej zapewniającej co najmniej 3 wymiany powietrza na godzinę (§ 14 ust. 1 pkt 6). W obu przypadkach wymagania dotyczą pracowni, w których stosuje się otwarte źródła promieniotwórcze, a nie pracowni rentgenowskich.

- ROZPORZĄDZENIE MINISTRA ZDROWIA z dnia 21 sierpnia 2006 r. w sprawie szczegółowych warunków bezpiecznej pracy z urządzeniami radiologicznymi

*§ 10. 1. Gabinety rentgenowskie, z zastrzeżeniem ust. 2, są wyposażone w wentylację zapewniającą co najmniej 1,5-krotną wymianę powietrza w ciągu godziny.*

Można zatem zauważyć, że zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Infrastruktury w budynku opieki zdrowotnej recyrkulacja powietrza może być stosowana tylko za zgodą i na warunkach określonych przez właściwego państwowego inspektora sanitarnego. Jednocześnie zgodnie z tym samym rozporządzeniem w instalacjach wentylacji mechanicznej ogólnej nawiewno-wywiewnej lub klimatyzacji komfortowej o wydajności 500 $m^3/h$ i więcej należy stosować urządzenia do odzyskiwania ciepła z powietrza wywiewanego o sprawności temperaturowej co najmniej 50% lub recyrkulację, gdy jest to dopuszczalne.

W wytycznych wielu krajów dotyczących systemów ogrzewania, wentylacji i klimatyzacji w obiektach szpitalnych sprawa recyrkulacji jest regulowana uznanymi prawnie normami. Niestety w Polsce brakuje tego rodzaju ścisłej regulacji, co sprawia, że w wielu przypadkach stosuje się tylko odzysk ciepła i nie wykorzystuje się recyrkulacji, co w efekcie końcowym powoduje znaczące zużycie energii niezbędnej dla zapewnienia wymaganych warunków cieplnych i wilgotnościowych w pomieszczeniach szpitalnych czy ochrony zdrowia.

Czym zatem jest recyrkulacja? I czy zawsze należy się jej obawiać? Przegląd norm obowiązujących w krajach Europy oraz w Stanach Zjednoczonych pokazuje, że *recyrkulacja*

TechMedis – wersja do konsultacji

pojawia się zarówno pod tą znaną ogólnie nazwą, ale także opisywana jest jako *powietrze wtórne*. Oba pojęcia – choć często używane zamiennie – w rzeczywistości oznaczają różne rozwiązania techniczne, których dopuszczalność i warunki stosowania zależą od przepisów, norm i wymagań higienicznych. Zdecydowane rozróżnienie oraz definicję *recyrkulacji* i *powietrza wtórnego* podaje VDI 6022 Blatt 1 (VDI, 2018). Zgodnie z tą wytyczną ***recyrkulacja*** powietrza (niem. Umluft, ang. recirculated air) oznacza, zawracanie do systemu powietrza wywiewanego i ponowne dostarczanie go jako części powietrza nawiewanego do co najmniej jednego pomieszczenia, z którego pierwotnie nie pochodziło. Ponieważ wszelkie nieszczelności w elementach systemu, takich jak przepustnice czy rekuperatory ciepła, mogą również prowadzić do recyrkulacji, dlatego obrotowe wymienniki do odzysku ciepła (z uszczelnieniem szczotkowym lub filcowym) są zgodnie z (VDI, 2018) zawsze traktowane jako recyrkulacja, o ile nie jest zapewniony wystarczający spadek ciśnienia między powietrzem zewnętrznym a powietrzem wywiewanym. ***Powietrze wtórne*** natomiast (niem. Sekundärluft) definiowane jest jako powietrze pobrane z danego pomieszczenia, które po uzdatnieniu jest zawracane wyłącznie do tego samego pomieszczenia. Oznacza to ***lokalny obieg*** powietrza, odmienny od recyrkulacji w systemie centralnym. Jest to kluczowa różnica w porównaniu do klasycznie pojętej recyrkulacji, w której powietrze wywiewane jest zawracane do centralnego systemu uzdatniania powietrza i dostarczane jako część powietrza nawiewnego do co najmniej jednego pomieszczenia, z którego pierwotnie nie pochodziło. Innymi słowy, ***powietrze wtórne*** to ***lokalna recyrkulacja*** w obrębie jednego pomieszczenia, podczas gdy *recyrkulacja* w szerszym systemie może oznaczać powietrze obiegowe, które po centralnym zmieszaniu z powietrzem zewnętrznym może krążyć często między różnymi pomieszczeniami.

Rozróżnienie to jest kluczowe w odniesieniu do pomieszczeń o wysokich wymaganiach higienicznych – np. sal operacyjnych – gdzie stosowanie powietrza wtórnego, czyli inaczej mówiąc *recyrkulacji lokalnej* może być dopuszczalne. Klasyczna *recyrkulacja centralna* wiąże się z większym ryzykiem krzyżowego przenoszenia zanieczyszczeń i jej zastosowanie może być ryzykowne.

Szerszy obraz definicji oraz możliwości wykorzystania recyrkulacji w pomieszczeniach czystych oraz ochrony zdrowia przedstawiono w Tabeli 1, w której zestawiono wytyczne dla wybranych norm i standardów.

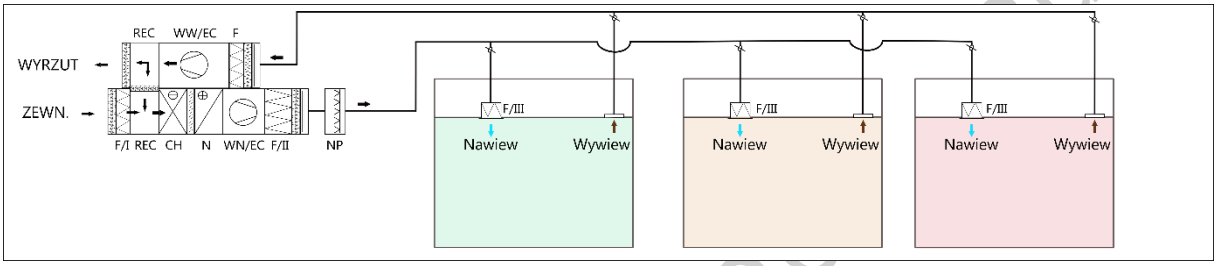
*Tabela 1. Recyrkulacja powietrza w salach operacyjnych w wybranych normach i wytycznych*

| **VDI 6022 Blatt 1** (VDI, 2018) | **DIN 1946-4** (DIN, 2018) | **SWKI VA105-01** (SWKI, 2015) | **PN-EN ISO 14644-16** (CEN, 2019a) | **ANSI/ASHRAE/ASHE 170** (ASHRAE, 2021) |
|---|---|---|---|---|
| Definicyjne rozdzielenie pojęć na **recyrkulację** oraz **powietrze wtórne**. Recyrkulacja: zawracanie powietrza wywiewanego do systemu i ponowne podanie go jako składnika nawiewu (także wskutek nieszczelności; obrotowe wymienniki ciepła, w których nie zapewniono odpowiedniej różnicy ciśnień między strumieniem nawiewnym i wywiewnym, traktuje się jak recyrkulację). Powietrze wtórne: strumień pobrany z | Nie rozdziela pojęć definicyjnie, ale precyzuje praktykę: w salach operacyjnych dopuszcza mieszanie powietrza zewnętrznego z **powietrzem recyrkulowanym z tej samej sali (i funkcjonalnie powiązanych pomieszczeń)**, przy końcowej filtracji HEPA; minimalny strumień powietrza | Nie rozdziela pojęć definicyjnie, ale używa pojęcia **recyrkulacji wewnątrz pokojowej** jako dopuszczalnej metody poprawy czystości i efektywności energetycznej, z twardymi wyjątkami: np. brak recyrkulacji w strefie aseptycznej oraz wymagania dotyczące filtracji i zachowania gradacji ciśnień. | Nie rozdziela pojęć definicyjnie i nie zakazuje recyrkulacji; traktuje ją jako narzędzie optymalizacji energii (dobór topologii recyrkulacji, utrzymanie prefiltrów, sterowanie adaptacyjne itp.). W definicjach centrali wentylacyjnej przewidziane jest **mieszanie powietrza zewnętrznego i recyrkulowanego.** | Nie rozdziela pojęć definicyjnie i dopuszcza centralną recyrkulację w salach operacyjnych (nie jest wymagane 100% powietrza zewnętrznego), np.: minimum 4 wymiany na godzinę powietrza zewnętrznego, gdy całe powietrze z pomieszczenia wymieniane jest 20 razy w ciągu godziny, wysoka filtracja (min. MERV-16, a w salach do zabiegów ortopedycznych, transplantacji, neurochirurgii i oparzeń – filtry HEPA |

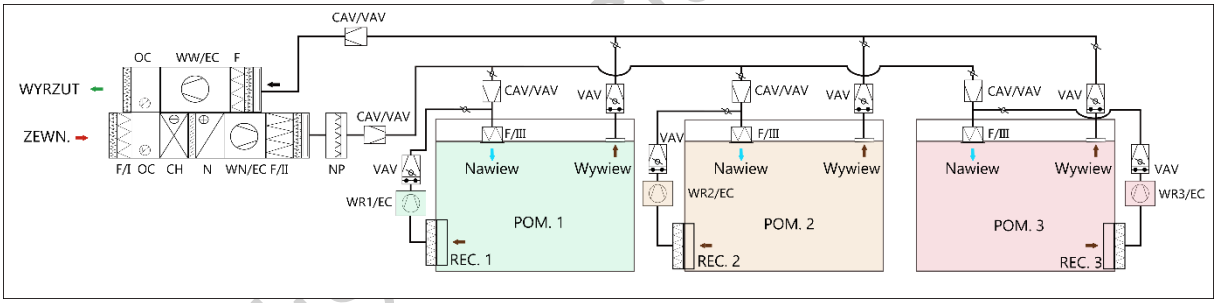
Testmedia - wersja do konsultacji

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| danego pomieszczenia i po obróbce zawrócony do tego samego pomieszczenia (lokalna recyrkulacja). | zewnętrznego **≥1200 m³/h**. | | | w nawiewniku) i dodatnie ciśnienie. Zakazuje natomiast jednostek recyrkulacyjnych montowanych bezpośrednio w pomieszczeniu z uwagi na częste problemy z ich czyszczeniem. |

Wydaje się, że uzupełnianie słowa recyrkulacja o przydawkę przymiotną: ***centralna*** *i* ***lokalna*** powinno w pełni oddać zasadność i możliwość jej wykorzystania. Zasadę działania centralnego układu klimatyzacyjnego z recyrkulacją centralną oraz lokalną przedstawiono odpowiednio na Rysunku 1 i 2.




*Rysunek 1. Recyrkulacja centralna. Oznaczenia na rysunku: F/I, F/II, F/III – filtracja odpowiednio pierwszego, drugiego i trzeciego stopnia; REC – komora mieszania; CH – chłodnica; N – nagrzewnica; WN/EC, WW/EC – wentylator odpowiednio nawiewny i wywiewny płynną regulacją obrotów; NP – nawilżacz parowy*




*Rysunek 2. Recyrkulacja lokalna. Oznaczenia na rysunku: F/I, F/II, F/III – filtracja odpowiednio pierwszego, drugiego i trzeciego stopnia; REC 1, REC 2, REC 3 – lokalny obieg recyrkulacji powietrza wywiewanego z pomieszczenia odpowiednio POM.1, POM. 2 i POM. 3; CH – chłodnica; N – nagrzewnica; WN/EC, WW/EC, WRi/EC – wentylator z płynną regulacją obrotów odpowiednio nawiewny, wywiewny i recyrkulacji w i-tym pomieszczeniu, OC – odzysk ciepła, NP – nawilżacz parowy, VAV – regulator zmiennego wydatku ze szczelną przepustnicą zamykającą, CAV/VAV – regulator stałego wydatku z możliwością nastawy wartości brzegowych punktów pracy,*

W przypadku recyrkulacji centralnej (Rysunek 1) powietrze indywidualnie z każdego pomieszczenia trafia do kanału magistralnego (zbiorczego), którym transportowane jest do centrali wentylacyjnej i tam po oczyszczeniu na filtrze w całości lub częściowo kierowane jest do części nawiewnej, gdzie zostaje zmieszane z oczyszczonym powietrzem zewnętrznym. W takim rozwiązaniu oczywista jest możliwość krzyżowego przemieszczania zanieczyszczeń. W recyrkulacji lokalnej (Rysunek 2) powietrze recyrkulowane jest tylko w obrębie pojedynczego pomieszczenia lub stref o tych samych warunkach emisji zanieczyszczeń. W takim przypadku wyeliminowane jest przenoszenie zanieczyszczeń pyłowych i mikrobiologicznych między pomieszczeniami przez wspólną pętlę recyrkulacji; pozostają jednak inne drogi ich przemieszczania, m.in. przez otwierane drzwi i nieszczelności przegród.

Recyrkulacja centralna i lokalna są rozwiązaniami technicznymi, które ograniczają zapotrzebowanie na energię niezbędną dla zapewnienia wymaganej temperatury i zarazem

wilgotności względnej powietrza w budynkach czy pomieszczeniach. W ten sposób wpływają na poprawę efektywności energetycznej systemów HVAC. Jednakże ich zastosowanie w szpitalach i pomieszczeniach czystych powinno być ściśle regulowane przez normy i wytyczne higieniczne. Kluczowymi warunkami ich stosowania są: skuteczna filtracja, kontrola kierunku przepływu powietrza oraz zapobieganie ryzyku przenoszenia zanieczyszczeń między pomieszczeniami.

W Tabelach 2–4 przedstawiono zapisy odpowiednio w normach DIN 1946-4:2008-12, SWKI VA105-01 oraz ANSI/ASHRAE/ASHE 170-2021 dotyczące szczegółowych wymagań dotyczących recyrkulacji powietrza w salach operacyjnych oraz pomieszczeniach radioterapii i diagnostyki rentgenowskiej. Przegląd wytycznych daje pełniejszy obraz możliwości, konieczności oraz bezpieczeństwa zastosowania recyrkulacji powietrza w pomieszczeniach ochrony zdrowia.

*Tabela 2.* **Norma DIN 1946-4:2008-12 (DIN, 2008)**

| Rodzaj pomieszczenia/systemu | Minimalny strumień powietrza zewnętrznego | Dodatkowe uwagi |
|---|---|---|
| Sale operacyjne (wszystkie) | 1200 $m^3/h$ | Reszta jako powietrze recyrkulowane z sali operacyjnej. |

*Tabela 3.* **SWKI VA105-01 (SWKI, 2015)**

| Kategoria Pomieszczenia (Nr. DIN 13080) | Koncepcja wentylacyjna (LK) | Minimalna krotność wymian powietrza (n min) | Minimalny strumień powietrza zewnętrznego lub recyrkulacja | Filtracja Nawiew/ wywiew | Dodatkowe Wymagania / Uwagi |
|---|---|---|---|---|---|
| Sale operacyjne z przepływem wyporowym (TAV) (1.09.01.01) | 1a | Wymaga średniej prędkości nawiewu > 0,25 m/s pod stropem o powierzchni ok. 9 $m^2$ | Min. 800 $m^3/h$ powietrza zewnętrznego przypadający na jedną salę operacyjną | H13/ F7 | Powietrze zewnętrzne (800 $m^3/h$ jest mieszane z powietrzem recyrkulowanym w obrębie sali i nawiewane przez wielkopowierzchniowy strop TAV (o powierzchni ok. 9 $m^2$) |
| Sale operacyjne z wentylacją mieszającą (TML)(1.09.01.02) | 1b | > 25 $h^{-1}$ | Min. 800 $m^3/h$ powietrza zewnętrznego przypadający na jedną salę operacyjną | H13/ F7 | Jakość działania wentylacji w sali TML weryfikuje się poprzez pomiar czasu powrotu do czystości bazowej (skuteczność 100:1) – wymagany czas wynosi t< 20 minut. należy przeanalizować lub zastosować śluzę powietrzną na przejściu do korytarza zaopatrzeniowego |
| Sterylne korytarze z bezpośrednim dostępem do sal operacyjnych (1.09.01.06) | 2a | Strumień powietrza i wynikowa krotność wymian są dobierane tak, aby zapewnić wymaganą kinetykę samooczyszczania oraz utrzymać narzucony reżim nadciśnienia | W tabeli szczegółowej wersji niemieckiej - 500 $m^3/h$ powietrza zewnętrznego. W zestawieniu francuskim (Annexe E) oraz w niektórych ujęciach zbiorczych - 100 | H13/ H13 | Wymagany test czasu odzysku czystości Erholzeit (100:1) wynoszący < 25 minut |

TechMedis - wersja do konsultacji

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | $m^3/h$ (co stanowi bazową wartość dla mniejszych korytarzy/śluz przelewowych). Nadmiar czystego powietrza ze sterylnego korytarza (LK 2a) z bezpośrednim dostępem do sal operacyjnych stanowi jedyny dopuszczalny przypadek, w którym powietrze przelewowe może być skierowane bezpośrednio do sali operacyjnej | | |

*Tabela 4.* **ANSI/ASHRAE/ASHE 170-2021 (ASHRAE, 2021)**

| Funkcja Pomieszczenia | Min. krotność wymian powietrza zewnętrznego | Min. krotność wymian powietrza wentylacyjnego | Recyrkulacja urządzeniami pokojowymi | Filtracja |
|---|---|---|---|---|
| Sala Operacyjna | 4<br>Norma **zabrania stosowania lokalnych urządzeń recyrkulacyjnych** (przypis do tej kolumny dopuszcza jedynie w istniejących obiektach urządzenia z filtrami HEPA jako tymczasowy, dodatkowy środek kontroli czynników zakaźnych przenoszonych drogą powietrzną) | 20 | Nie | MERV-16 (hh) |

Porównanie ogólnych standardów obowiązujących w wybranych krajach w Europie i na świecie przedstawiono w Tabeli 5.

Oprócz przedstawionych wymagań w normach pojawiają się dodatkowe zapisy obejmujące:

- ANSI/ASHRAE/ASHE 170 (ASHRAE, 2021): całe powietrze recyrkulowane przechodzi przez odpowiednie filtry zanim zostanie ponownie wprowadzone do sali oraz należy spełnić wymagania National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH, 1977) dotyczące narażenia zawodowego na gazy i opary znieczulające oraz kontroli narażenia zawodowego na podtlenek azotu, tj. należy zapewnić zarówno miejscowe systemy odciągowe, jak i ogólną wentylację obszarów, w których stosowane są odpowiednie gazy;
- DIN 1946-4 (DIN, 2018): sale operacyjne/przygotowanie narzędzi to pomieszczenia klasy I z trzystopniową filtracją powietrza, należy zachować dodatni bilans powietrza: suma wszystkich strumieni powietrza nawiewanego > suma wszystkich strumieni powietrza wywiewanego; należy wziąć pod uwagę zagrożenia zdrowotne spowodowane

TechMedis - wersja do konsultacji

promieniowaniem rentgenowskim/laserami, dymem chirurgicznym oraz gazami anestetycznymi przed zaprojektowaniem wywiewów, przepływ powietrza zewnętrznego ≥ 1200 $m^3$/h, przy czym strumień powietrza zewnętrznego powinien być odpowiedni w celu eliminacji zagrożeń zdrowotnych spowodowanych emisją szkodliwych gazów (gazami anestetycznymi, gazami z środków dezynfekujących, dymem chirurgicznym itp.) oraz wywiewy należy wyposażyć w separatory kłaczków,

- AFNOR SPEC S99-120 (Association Française de Normalisation [AFNOR], 2019) i NF S90-351 (AFNOR, 2013): powietrze powracające musi być odpowiednio oczyszczone (przez filtry HEPA), w trybie czuwania system nawiewa powietrze świeże, a recyrkulacja jest wyłączona lub ograniczona.

Dokumentem niebędącym normą, ale wspierającym projektantów w Danii, Norwegii, Szwecji i Finlandii jest „R3 Nordic Guideline for Hospital Ventilation General Requirements, Operating Suites, and Isolation Rooms" (R3 Nordic, 2023), w którym dopuszczalna jest recyrkulacja lokalna, ale kluczowe jest spełnienie wymagań dodatkowych, tj.: powietrze recyrkulowane spełnia te same wymagania jakościowe co powietrze pierwotne; niedozwolona jest recyrkulacja między różnymi pomieszczeniami lub strefami; należy upewnić się, że do sali operacyjnej nie jest dostarczane powietrze, które nie zostało czyszczone przez filtry HEPA, natomiast filtry HEPA powinny być zainstalowane jak najbliżej końcowego punktu nawiewu (np. przy nawiewnikach); test integralności filtrów HEPA powinien być przeprowadzony zgodnie z normą EN ISO 14644-3 (CEN, 2019b) i należy go przeprowadzać przy instalacji i każdej wymianie filtra oraz okresowo (zwykle nie rzadziej niż co 2 lata); zastosowanie chłodnic powietrza w układzie chłodzenia powietrza recyrkulacyjnego powinno być zaprojektowane jako suche, niedopuszczalna jest kondensacja a jej powstawanie musi być kontrolowane; niezbędne jest zapewnienie lokalnego odciągu powietrza zanieczyszczonego gazami znieczulającymi. Wytyczne dopuszczają jako powietrze wtórne wyłącznie powietrze wywiewane z tego samego pomieszczenia i określają minimalny strumień powietrza zewnętrznego dla sali operacyjnej na 0,275 $m^3$/s (ok. 990 $m^3$/h), przy założeniu zastosowania miejscowego odciągu gazów anestetycznych i dymu chirurgicznego (R3 Nordic, 2023).

TechMedis - wersja do konsultacji

*Tabela 5.* Porównanie kluczowych elementów związanych z recyrkulacją w standardach i regulacjach obowiązujących w innych krajach

| Kraj | Recyrkulacja lokalna w salach operacyjnych | Wymagana krotność wymian powietrza (ACH) | Różnica ciśnień | Uwagi / Normy | Warunki stosowania |
|---|---|---|---|---|---|
| Niemcy | ✅ Dozwolona – tylko lokalnie, z HEPA, bez mieszania stref | ≥ 20–25 ACH | +15–30 Pa | DIN 1946-4: tylko w obrębie sali, z HEPA, brak mieszania | HEPA; brak mieszania; tylko lokalnie |
| Japonia | ✅ Dozwolona – systemy laminarnych nawiewów z HEPA | ≥ 25 ACH | +20 Pa | HEPA + ISO, system laminarny dopuszczalny | System laminarny; HEPA; ISO 5–7 |
| Chiny | ✅ Dozwolona – lokalne systemy z kontrolą ciśnienia i HEPA | ≥ 20 ACH | +10–25 Pa | Systemy z nadzorem, HEPA, brak mieszania stref | Kontrola ciśnienia; HEPA; zamknięty układ |
| Korea Południowa | ✅ Dozwolona – TAV z recyrkulacją w tej samej strefie | ≥ 20 ACH | +15–20 Pa | Recyrkulacja dozwolona w systemach TAV, HEPA | HEPA; TAV; zamknięty obieg |
| Australia | ✅ Dopuszczalna – zamknięte układy z HEPA (AS 1668.2) | ≥ 20–25 ACH | +15 Pa | AS 1668.2, HEPA, zamknięty system w sali operacyjnej | AS 1668.2; HEPA; zamknięty system |
| Indie | ✅ Dozwolona – zgodnie z ISHRAE i NABH, z HEPA | ≥ 20 ACH | +15–25 Pa | HEPA i separacja stref, ISHRAE 2020 | ISHRAE; HEPA; separacja stref |
| Austria | ✅ Dozwolona – lokalna recyrkulacja z HEPA (ÖNORM H 6020) | ≥ 20 ACH | +15–30 Pa | Norma ÖNORM H 6020 – dopuszczona lokalna recyrkulacja | ÖNORM H 6020; HEPA; brak mieszania |
| Zjednoczone Emiraty Arabskie | ✅ Dopuszczalna – system zamknięty z HEPA (DHA) | ≥ 20 ACH | +15–30 Pa | HEPA + zgodność z ASHRAE 170 i lokalnymi wytycznymi | DHA; HEPA; zamknięty system |
| Arabia Saudyjska | ✅ Dopuszczalna – lokalna recyrkulacja w obrębie sali (SFDA) | ≥ 20 ACH | +15–30 Pa | MOH + SFDA – dopuszczają lokalną recyrkulację z HEPA | HEPA; ta sama sala |
| Brazylia | ✅ Dozwolona – system TAV z HEPA (ANVISA RDC 50) | ≥ 20 ACH | +10–25 Pa | ANVISA: dopuszcza system TAV z filtracją końcową | ANVISA RDC 50; HEPA; TAV |
| Argentyna | ✅ Możliwa – lokalna recyrkulacja z HEPA, za zgodą (IRAM) | ≥ 20 ACH | +15–25 Pa | IRAM + nadzór zdrowia – możliwa lokalna recyrkulacja z HEPA | RAM; HEPA; nadzór higieniczny |
| Francja | ✅ Dopuszczalna lokalnie na specjalnych zasadach | ≥ 20 ACH | +10–25 Pa | NF S 90-351: dopuszczalna lokalna recyrkulacja z HEPA w tej samej sali, separacja stref | NF S 90-351; HEPA; separacja stref; ta sama sala |

TechMedis – wersja do konsultacji

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Hiszpania | ✅ Dopuszczalna lokalnie na specjalnych zasadach | ≥ 20–25 ACH | +15–30 Pa | UNE 100713 + ISO 14644: dopuszczalna recyrkulacja z HEPA, brak mieszania pomieszczeń | UNE 100713; HEPA; brak mieszania; zgodność ISO |
| Portugalia | ✅ Dopuszczalna lokalnie na specjalnych zasadach | ≥ 20 ACH | +15–25 Pa | RSECE: dopuszczalna lokalna recyrkulacja w tej samej sali z HEPA, zgodność z ISO 14644 | SECE; HEPA; tylko w tej samej sali; zgodność ISO |
| Szwecja | ✅ Dopuszczalna lokalnie na specjalnych zasadach | ≥ 20 ACH | +15–25 Pa | SS-EN ISO 14644 + wytyczne krajowe: dopuszczalna lokalna recyrkulacja z HEPA w tej samej sali, tylko dla wybranych klas czystości, nadciśnienie obowiązkowe | SS-EN ISO 14644; HEPA; tylko wybrane klasy czystości; nadciśnienie |
| Finlandia | ✅ Dopuszczalna dla niższych klas (ISO 7–8) | ≥ 20 ACH | +15–25 Pa | RakMK D2, RT-kortit – dopuszcza się lokalną recyrkulację w klasie ISO 7–8 | RT-kortit; HEPA/F9; ISO 7–8; zamknięty system |
| Norwegia | ✅ Dopuszczalna lokalnie na specjalnych warunkach | ≥ 20 ACH | +15–25 Pa | Byggforskserien + FHI: możliwa recyrkulacja lokalna z HEPA, zamknięty obieg | FHI; HEPA; obieg zamknięty |
| Szwajcaria | ✅ Dopuszczalna lokalnie na specjalnych warunkach | ≥ 20 ACH | +15–25 Pa | SWKI VA105: dopuszczalna lokalna recyrkulacja z HEPA w tej samej sali, przy nadciśnieniu | SWKI VA105-01; HEPA; nadciśnienie; ta sama sala |
| Łotwa | ❌ Zakazana | ≥ 20 ACH | +15–25 Pa | LVS EN ISO 14644 – tylko świeże powietrze | LVS EN ISO 14644; wyłącznie powietrze zewnętrzne |
| Litwa | ❌ Zakazana | ≥ 20 ACH | +15–25 Pa | Litewskie normy higieniczne – tylko nawiew świeży | Krajowe normy higieniczne; wyłącznie powietrze zewnętrzne |
| Czechy | ✅ Dopuszczalna lokalnie na specjalnych zasadach | ≥ 20 ACH | +15–25 Pa | ČSN + ISO 14644 – dopuszczalna lokalna recyrkulacja z HEPA, zamknięty obieg | ČSN; HEPA; zamknięty układ; ta sama sala |
| Wielka Brytania | ✅ Dopuszczalna lokalnie w systemach zamkniętych | ≥ 20 ACH | +15–25 Pa | HTM 03-01: możliwa recyrkulacja lokalna w UDF z HEPA, bez mieszania | HTM 03-01; HEPA; UDF; zamknięty system |
| Słowacja | ✅ Dopuszczalna lokalnie na specjalnych zasadach | ≥ 20 ACH | +15–25 Pa | STN EN ISO 14644 – dopuszczalna recyrkulacja w tej samej sali z HEPA | STN EN ISO 14644; HEPA; zamknięty układ |
| Węgry | ✅ Dopuszczalna w systemach zamkniętych | ≥ 20 ACH | +15–25 Pa | MSZ EN ISO 14644 – dopuszczalna lokalna recyrkulacja z HEPA | MSZ EN ISO 14644; HEPA; system lokalny |
| Słowenia | ❌ Zakazana | ≥ 20 ACH | +15–25 Pa | SIST EN ISO 14644 – wymagane 100% świeżego powietrza | SIST EN ISO 14644; brak recyrkulacji |
| Chorwacja | ❌ Zakazana | ≥ 20 ACH | +15–25 Pa | NN + ISO 14644 – tylko świeże powietrze, brak recyrkulacji | NN + ISO 14644; tylko powietrze zewnętrzne |
| USA | ✅ Dopuszczalna lokalnie na specjalnych zasadach | ≥ 20 ACH | +15–25 Pa | ASHRAE 170 + FGI: dopuszczalna lokalna recyrkulacja w tej samej sali z HEPA, ≥ 20 ACH, nadciśnienie, brak mieszania między pomieszczeniami | ASHRAE 170; HEPA; zamknięty obieg; ≥20 ACH; nadciśnienie; brak mieszania między strefami |

ACH (ang. air changes per hour) – krotność wymian powietrza na godzinę, $h^{-1}$.

TechMedis – wersja do konsultacji

W odniesieniu do sal hybrydowych w normach nie występują szczególne wymagania, które przewyższałyby wymagania stawiane salom operacyjnym.

W Polsce wykorzystywane jest opracowanie „Wytyczne projektowania, wykonania, odbioru i eksploatacji systemów wentylacji i klimatyzacji dla podmiotów wykonujących działalność leczniczą" (Charkowska i in., 2018), które choć nie ma statusu normy, jednak w znacznym stopniu powiela rozwiązania zapisane w normie DIN 1946-4. Pod kątem recyrkulacji wskazane jest dopuszczenie do stosowania w obrębie jednej sali lub zespołu pomieszczeń o identycznych wymaganiach i zbliżonej charakterystyce wprowadzanych i emitowanych zanieczyszczeń. W dokumencie tym przedstawiono następujące wskazania do uwzględnienia w przypadku chęci zastosowania recyrkulacji: *powietrze recyrkulacyjne pobierane z sali operacyjnej poddane było filtracji o klasie minimum F7, a przed ponownym wprowadzeniem do sali operacyjnej filtracji o klasie minimum H13 bezpośrednio na nawiewniku, kratki wywiewne zasysające powietrze recyrkulacyjne z pomieszczenia były wyposażone w separatory kłaczków o oczkach < 0,8 mm, w przypadku zastosowania rozwiązań z chłodzeniem, w modułach recyrkulacyjnych stosowane były chłodnice pracujące powyżej temperatury punktu rosy dla powietrza recyrkulacyjnego (chłodnice stosuje się w przypadku, kiedy zaprojektowany strumień powietrza zewnętrznego nie jest w stanie usunąć wewnętrznych zysków ciepła i wymagane jest dochłodzenie powietrza), system recyrkulacji posiadał możliwość płynnego regulowania prędkości obrotowej wentylatorów recyrkulacyjnych, moduły recyrkulacyjne były równomiernie rozłożone wokół nawiewnika, w module recyrkulacyjnym przed i za wentylatorem zastosowane były tłumiki w wykonaniu higienicznym, konstrukcja systemu nawiewnego spełniała warunek, że nawet w razie awarii, powietrze nawiewane do sali operacyjnej będzie poddane filtracji na wysokoskutecznym filtrze powietrza (np. poprzez zastosowanie przepustnic zwrotnych) – niedopuszczalny jest przepływ wsteczny przez wentylatory recyrkulacyjne.*

## 3. Oszczędność energii

Sale operacyjne należą do najbardziej energochłonnych pomieszczeń w budynkach ochrony zdrowia. W badaniu śladu węglowego bloków operacyjnych w trzech systemach ochrony zdrowia wykazano, że są one 3–6 razy bardziej energochłonne niż szpital jako całość, przede wszystkim z powodu wymagań stawianych instalacjom ogrzewania, wentylacji i klimatyzacji (MacNeill i in., 2017). Według biuletynu technicznego NHS England instalacje HVAC odpowiadają za ok. 90% zużycia energii w blokach operacyjnych, a samo ograniczenie pracy wentylacji w okresach nieużytkowania sal pozwala zaoszczędzić 132–286 MWh rocznie na jedną salę operacyjną (NHS England, 2026).

W literaturze wskazuje się kilka grup działań ograniczających zużycie energii w salach operacyjnych: obniżanie strumienia powietrza w okresach nieużytkowania sal (tryb czuwania), regulację nastaw temperatury i wilgotności, sterowanie strumieniem powietrza na podstawie stężenia cząstek oraz zwiększenie udziału powietrza recyrkulowanego (Cubí i in., 2015; Zarzycka i in., 2019). W analizie symulacyjnej Cubí i in. (2015) najkorzystniejsze kombinacje tych strategii pozwoliły ograniczyć zużycie energii pierwotnej, emisję $CO_2$ i koszty energii nawet o 86% w porównaniu z praktyką standardową, przy zachowaniu wymagań dotyczących jakości środowiska wewnętrznego i kontroli zakażeń. Recyrkulacja jest przy tym powszechnie wykorzystywana w systemach o dużych strumieniach powietrza: w salach z nawiewem jednokierunkowym (ang. Unidirectional Airflow, UDAF) udział powietrza recyrkulowanego wynosi ok. 70%, a w salach z nawiewem sterowanym różnicą temperatur (TcAF) ok. 45%. Oba typy systemów utrzymywały w trakcie zabiegów stężenie bakterii w powietrzu poniżej 10 jtk/m$^3$, a system TcAF zużywał o 28% mniej energii niż UDAF (Alsved i in., 2018; Zarzycka i in., 2019).

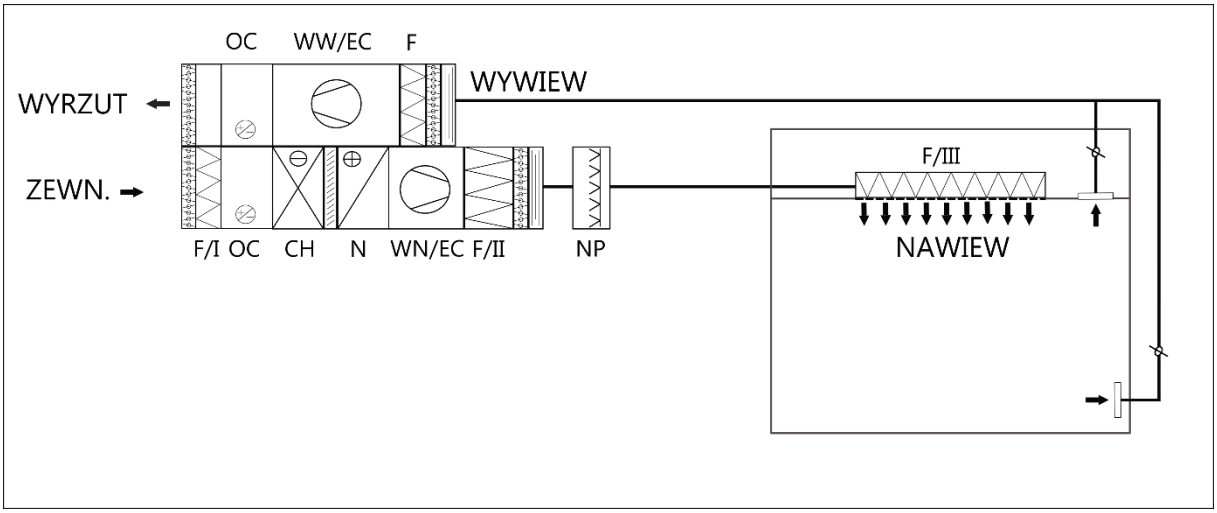
W celu określenia różnic w zapotrzebowaniu na energię niezbędną do ogrzewania, ochładzania, osuszania i nawilżania oraz transportu powietrza na potrzeby tego opracowania

wykonano analizę dotyczącą instalacji obsługującej pomieszczenie o wysokich wymaganiach czystości.

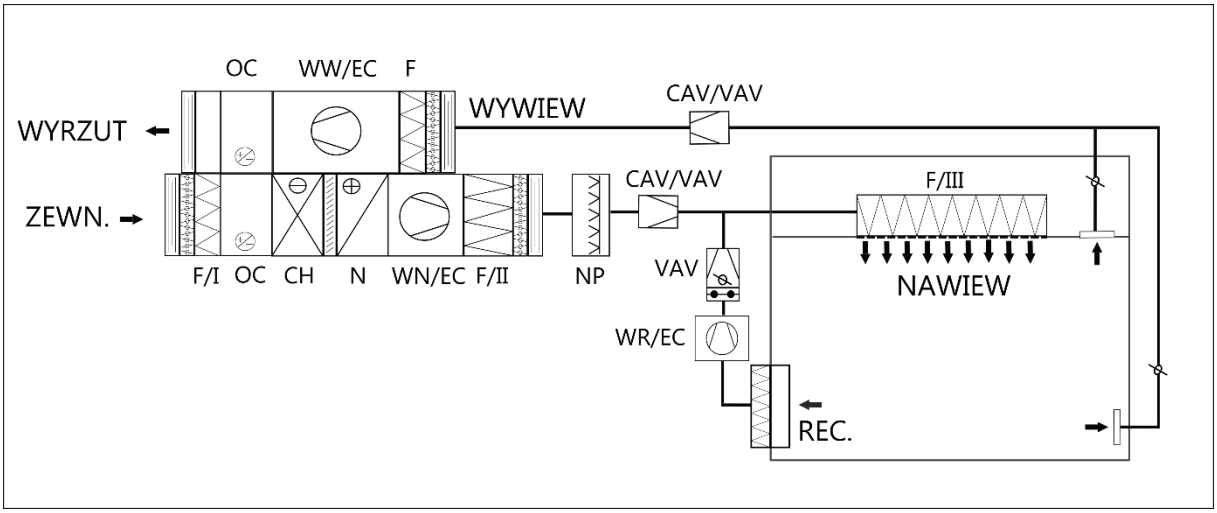
Analizie poddano salę operacyjną, zlokalizowaną wewnątrz budynku (brak przegród zewnętrznych), w której temperatura powietrza w pomieszczeniu ($t_p$) powinna być na poziomie 20°C natomiast wilgotność względna ($\varphi_p$) nie powinna być niższa niż 40% i wyższa niż 50%. Dla porównania całorocznego zapotrzebowania na energię niezbędną do zapewnienia wymaganych parametrów powietrza w sali operacyjnej rozpatrzono trzy możliwe konfiguracje układu klimatyzacyjnego i charakterystyczne dla nich modele ich sterowania i regulacji. Schematy poszczególnych układów przedstawiono na Rysunkach 3–5. Na Rysunku 3 przedstawiono schemat typowego układu klimatyzacyjnego bez recyrkulacji powietrza obiegowego ze stropem laminarnym i z pompą ciepła wykorzystywaną w celu odzysku ciepła z powietrza wywiewanego (Case 1). Na Rysunku 4 przedstawiono układ klimatyzacyjny ze stropem laminarnym, z pompą ciepła wykorzystywaną w celu odzysku ciepła z powietrza wywiewanego oraz lokalną recyrkulacją powietrza obiegowego, jaką stosuje się w rozwiązaniach dla sal szpitalnych (Case 2). Na Rysunku 5 przedstawiono układ klimatyzacyjny ze stropem laminarnym i lokalną recyrkulacją powietrza obiegowego, w którym w centrali wentylacyjnej nie wykorzystano odzysku ciepła z powietrza wywiewanego (Case 3), czyli układ pracuje wg starszych rozwiązań, które są jeszcze spotykane w funkcjonujących szpitalach

Analizie poddano salę operacyjną o kubaturze 258,7m$^3$, dla której obliczeniowy strumień powietrza wentylującego (V) wynosi 6800m$^3$/h, minimalny strumień powietrza zewnętrznego w przypadku zastosowania recyrkulacji ($V_z$) wynosi 2400m$^3$/h, a minimalny strumień powietrza recyrkulowanego ($V_r$) przyjęty zgodnie z kartą katalogową producenta wynosi 4400 m$^3$/h. Odpowiada to ogólnej krotności wymian powietrza ok. 26 h$^{-1}$, natomiast krotność wymian powietrza zewnętrznego wynosi od 9,3 do 26 h$^{-1}$. Minimalny udział powietrza zewnętrznego wynosi ok. 35%. Obciążenie cieplne pomieszczenia wyznaczono na podstawie istniejącej sali operacyjnej zlokalizowanej w jednym z projektowanych szpitali w Polsce. Przyjęto pełne wyposażenie techniczne niezbędne dla przeprowadzenia operacji.

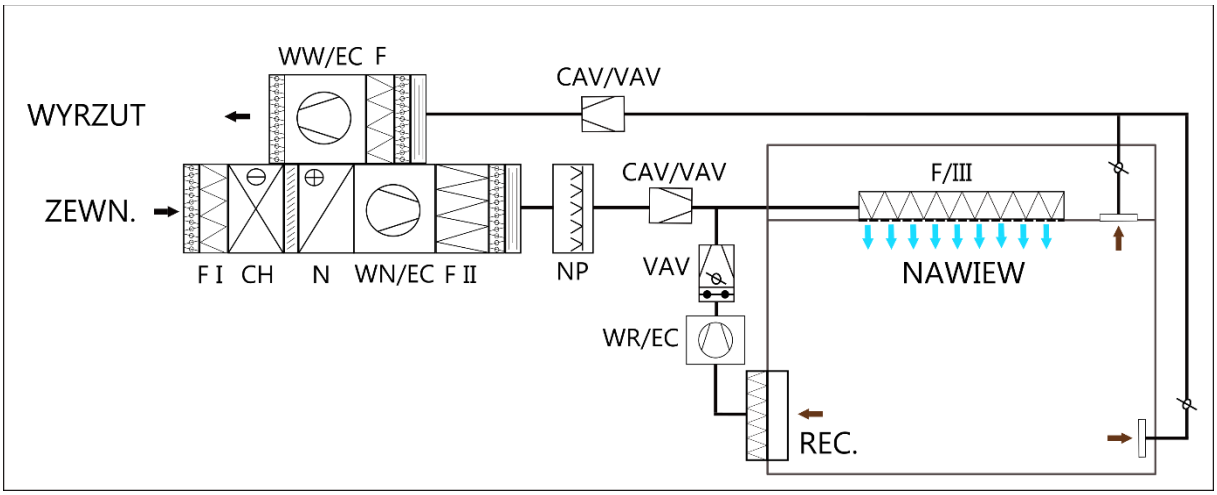
Obliczenia wykonano dla założenia, że sala operacyjna jest wykorzystywana w godzinach od 8.00 do 18.00. Przygotowanie sali przed operacją trwa w godz. 6.00÷8.00 a po operacji w godz. 18.00-20.00. Przyjęto także, że w okresie nocnym część sprzętu działa w trybie podtrzymania i uruchomiona jest dezynfekcja z wykorzystaniem lamp UVC (tzw. Upper UV-C).




*Rysunek 3. Schemat układu klimatyzacji sali operacyjnej z trzema stopniami filtracji i odzyskiem ciepła z powietrza wywiewanego – Case 1. Oznaczenia na rysunku: F/I, F/II, F/III – filtracja odpowiednio pierwszego, drugiego i trzeciego stopnia; F – filtr powietrza wywiewanego; OC – wymiennik do odzysku ciepła z powietrza wywiewanego; CH – chłodnica; N – nagrzewnica; WN/EC, WW/EC – wentylator odpowiednio nawiewny i wywiewny z płynną regulacją obrotów; NP – nawilżacz parowy*



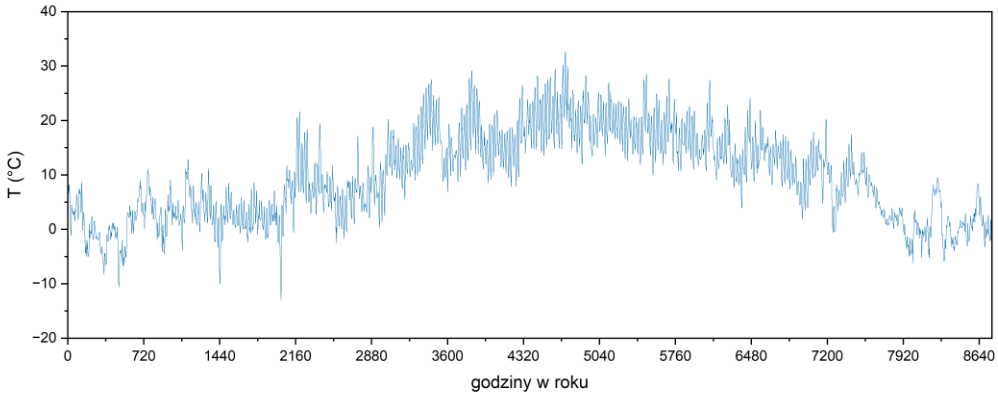

*Rysunek 4. Schemat układu klimatyzacji sali operacyjnej z trzema stopniami filtracji i odzyskiem ciepła z powietrza wywiewanego oraz modułem recyrkulacyjnym – Case 2. Oznaczenia jak na Rysunku 3; REC – moduł recyrkulacyjny, WR/EC – wentylator układu wywiewnego z płynną regulacją obrotów, VAV – regulator zmiennego wydatku ze szczelną przepustnicą zamykającą, CAV/VAV – regulator stałego wydatku z możliwością nastawy wartości brzegowych punktów pracy.*



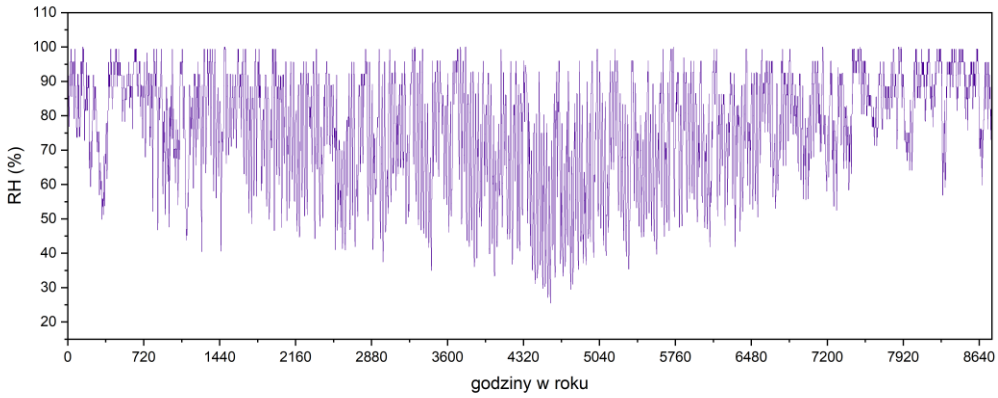

*Rysunek 5. Schemat układu klimatyzacji sali operacyjnej z trzema stopniami filtracji i z modułem recyrkulacyjnym i bez odzysku ciepła z powietrza wywiewanego – Case 3. Oznaczenia jak na Rysunku 3; REC – moduł recyrkulacyjny, WR/EC – wentylator układu wywiewnego z płynną regulacją obrotów, VAV – regulator zmiennego wydatku ze szczelną przepustnicą zamykającą, CAV/VAV – regulator stałego wydatku z możliwością nastawy wartości brzegowych punktów pracy.*

*Metoda przyjęta w analizach*

Parametry powietrza zewnętrznego: Dla wyznaczenia całorocznego zapotrzebowania na energię przyjęto typowy rok meteorologiczny (TMY) określony dla lat 2005-2023 (https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/#TMY). Zmienność temperatury i wilgotności względnej powietrza przedstawiono na Rysunku 6 i Rysunku 7.




*Rysunek 6. Przebieg temperatury powietrza zewnętrznego dla przyjętego do obliczeń TMY 2005-2023 dla Warszawy*




*Rysunek 7. Przebieg wilgotności względnej powietrza zewnętrznego dla przyjętego do obliczeń TMY 2005-2023 dla Warszawy*

Procesy cieplno-wilgotnościowe uzdatniania powietrza: Procesy cieplne i wilgotnościowe zależą najczęściej od temperatury i wilgotności powietrza zewnętrznego oraz od wymaganych parametrów powietrza nawiewanego zależnych od chwilowego obciążenia cieplnego. Całoroczne zapotrzebowanie energii do uzdatniania cieplnego powietrza w procesach uzdatniania można obliczyć ze wzoru:

$$E_Q^a = \sum_{i=1}^{8760} (Q_i^a \cdot \tau_i) \quad (1)$$

gdzie: $E_Q^a$ – energia niezbędna do cieplnego uzdatnienia powietrza, kWh; $a$ – proces uzdatniania powietrza – ogrzewanie (nag), chłodzenie (chł), nawilżanie parowe (np), osuszanie (os); $n$ – liczba godzin, dla których urządzenie (nagrzewnica, chłodnica, nawilżacz) pracuje ze stałą mocą, h; $Q_i^a$ – określona chwilowa moc wymagana do uzdatnienia powietrza, kW; $\tau_i$– czas trwania i-tego przedziału temperatury powietrza zewnętrznego, dla którego moc urządzenia wynosi $Q_i$, 1h.

Przyjęto, że moc urządzeń uzdatniania powietrza jest stała w ciągu godziny. Dzięki temu energię potrzebną do ogrzewania, chłodzenia, osuszania i nawilżania powietrza w danej godzinie wyznacza się bezpośrednio z mocy wymaganej w tej godzinie (τ = 1 h). Krok godzinowy to standardowe podejście w obliczeniach rocznego zapotrzebowania na energię, stosowane między innymi w metodzie godzinowej normy PN-EN ISO 52016-1 (PKN, 2017a). Cieplne i wilgotnościowe uzdatnianie powietrza związane jest z koniecznością określenia mocy nagrzewnicy, chłodnicy (uwzględniając moc niezbędną do ochładzania i osuszania) oraz nawilżacza parowego. W rozpatrywanym przypadku poszczególne moce określano na podstawie następujących wzorów:

- Mocy nagrzewnicy: $Q^{nag}=V \cdot \rho \cdot c_p \cdot (t_2-t_1)$ (2)
- Obliczenie mocy chłodnicy polega na wyznaczeniu wartości zależności:

$$Q^{chłm}=V \cdot \rho \cdot (h_1-h_2) \quad (3)$$

- Obliczenie mocy cieplnej nawilżacza parowego polega na wyznaczeniu wartości zależności:

$$Q^{np}=V \cdot \rho \cdot (h_2-h_1)=V \cdot \rho \cdot (x_2-x_1) \cdot r \quad (4)$$

gdzie: V – strumień powietrza uzdatnianego, $m^3/s$; $\rho$ – gęstość powietrza, $kg/m^3$; $c_p$ – ciepło właściwe powietrza, kJ/kgK; $t_1$, $t_2$ – temperatura powietrza odpowiednio przed i za procesem uzdatniania, °C; $h_1$, $h_2$ – entalpia właściwa powietrza odpowiednio przed i za procesem uzdatniania, $kJ/kg_{ps}$ ; $x_1$, $x_2$ – zawartość wilgoci w powietrzu odpowiednio przed i za nawilżaczem parowym, $kg/kg_{ps}$ ; $r$ – ciepło parowania; kJ/kg.

Dla nawilżacza parowego i chłodnicy moc obliczeniową przeliczano na moc elektryczną zgodnie z danymi dobranych urządzeń (nawilżacz parowy wraz z wytwornicą pary i pośredni agregat chłodniczy). Moc silnika do napędu wentylatorów odczytywano z dobranych kart katalogowych. Dobory korygowano dla odpowiednich wartości strumienia powietrza wentylującego i zewnętrznego.

Transport powietrza: Całoroczne zapotrzebowanie energii niezbędnej do transportu strumienia powietrza można wyznaczyć ze wzoru:

$$E_t^j=\frac{V^j \cdot \Delta P^j}{\eta^j \cdot \eta_p^j \cdot \eta_s^j} \cdot \tau \cdot 10^{-3}=N^j \cdot \tau \cdot 10^{-3} \quad (6)$$

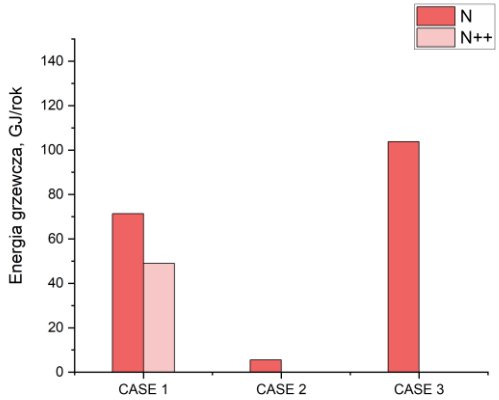
gdzie: $j$ – instalacja nawiewna (n) lub wywiewna (w) lub moduł recyrkulacji (r); $E_t$ – energia niezbędna do transportu powietrza, kWh; V – strumień powietrza transportowanego przez wentylator, $m^3/s$; $\Delta P$ – całkowity sprężw wentylatora, Pa; ηw, ηp, ηs, - sprawność odpowiednio wentylatora, przekładni, silnika, $\tau$ - czas pracy wentylatora [h]; $N$ – *moc niezbędna* do transportu powietrza, W.

W przypadku Case 1 działają dwa wentylatory: nawiewny (n) i wywiewny (w). W przypadku Case 2 i Case 3 działają trzy wentylatory: nawiewny (n) i wywiewny (w) oraz w module recyrkulacji (r). Wszystkie wentylatory pracują przez wszystkie 8760 godzin w roku. W każdym przypadku energię niezbędną do ogrzewania powietrza przeliczano na GJ zakładając, że ciepło dostarczane jest do budynku z sieci ciepłowniczej. W przypadku energii potrzebnej do chłodzenia przyjęto urządzenie chłodnicze o wskaźniku ESEER na poziomie 3,6. Założono, że energia elektryczna dostarczana jest w całości z sieci energetycznej.

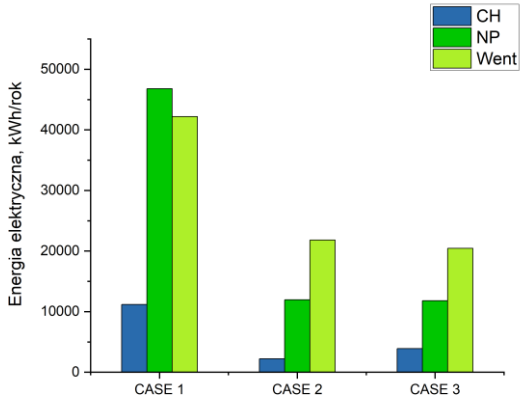
*Wyniki przeprowadzonych analiz*

Na Rysunku 8 przedstawiono energię niezbędną do ogrzewania powietrza, która zapewnia uzyskanie wymaganej temperatury powietrza w pomieszczeniu. N – oznacza działanie nagrzewnicy w okresach zimowym i przejściowym. N++ - oznacza działanie nagrzewnicy, gdy chłodnica pracuje w trybie osuszania, który wymaga dogrzania powietrza po wcześniejszym przechłodzeniu. Ten tryb pracy pojawia się w okresie wysokiej wilgotności względnej powietrza zewnętrznego, co ma miejsce w okresach letnich i przejściowych. W przypadku zastosowania recyrkulacji powietrza obiegowego zarówno w przypadku Case 2 jak i Case 3 osuszanie powietrza nie jest wymagane, co jest potwierdzone brakiem działania nagrzewnicy N++. Redukcja sumarycznej energii niezbędnej do ogrzewania powietrza dla Case 2 i Case 3 w porównaniu do Case 1 jest odpowiednio na poziomie 92% i 45%.

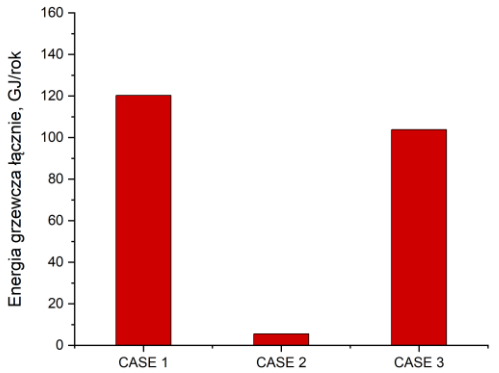
Na Rysunku 9 przedstawiono energię elektryczną niezbędną do ochładzania (w tym przechładzania w trybie osuszania), nawilżania i transportu powietrza. Jak wynika z wykresów wykorzystanie recyrkulacji powietrza ogranicza energię niezbędną do ochładzania powietrza o 80% i 60% odpowiednio dla Case 2 i Case 3 względem Case 1. W przypadku nawilżania ograniczenie to jest na poziomie 74% i 75%. Natomiast w przypadku transportu powietrza zużycie energii ograniczone zostało o ok. 48% i 52%.




*Rysunek 8. Zestawienie energii cieplnej niezbędnej do ogrzewania powietrza z podziałem na ogrzewanie w okresie zimowym (N) oraz ogrzewanie wymagane w procesie osuszania (N++)*

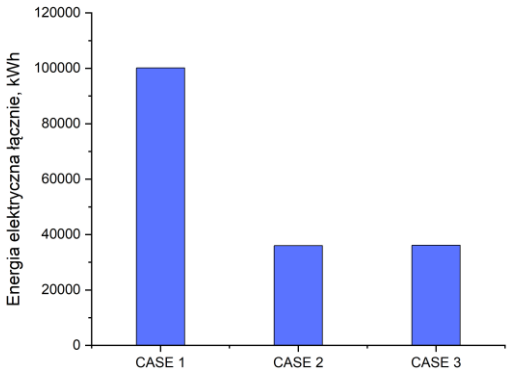



*Rysunek 9. Zestawienie energii elektrycznej niezbędnej do realizacji ochładzania i osuszania (CH), nawilżania parowego (NP) oraz transportu powietrza (Went)*



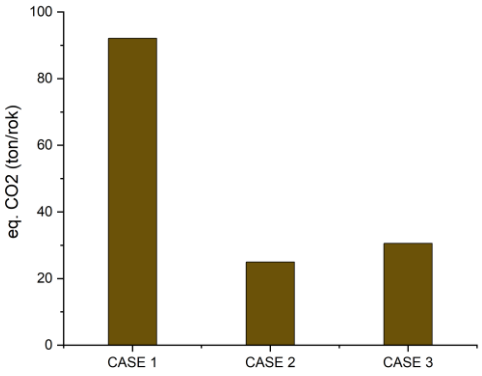

*Rysunek 10. Zestawienie zapotrzebowania na energię grzewczą sumarycznie dla układów*

Na Rysunku 10 przedstawiono energię grzewczą sumarycznie, a na Rysunku 11 sumaryczną energię elektryczną niezbędną dla prawidłowego działania trzech omawianych układów. W przypadku energii grzewczej zdecydowaną oszczędność (na poziomie 95% ) widać dla układu z recyrkulacją powietrza obiegowego i odzyskiem ciepła na wymienniku do odzysku ciepła, w porównaniu do układu tylko z odzyskiem ciepła. Zastosowanie recyrkulacji powietrza obiegowego i układu otwartego dla uzdatniania powietrza zewnętrznego skutkuje ograniczeniem energii względem układu z odzyskiem ciepła bez recyrkulacji na poziomie 15%. W przypadku energii elektrycznej układ Case 1 także jest tym, który dla prawidłowej pracy wymaga jej najwięcej. Najmniej energii elektrycznej wymaga rozwiązanie Case 2 – o 64% mniej niż Case 1; rozwiązanie Case 3 zużywa jej o 63% mniej niż Case 1.




*Rysunek 11. Zapotrzebowanie na energię elektryczną sumarycznie dla układów*

Na Rysunku 12 przedstawiono ekwiwalent emisji $CO_2$ obliczony tylko dla zapotrzebowania na energię użytkową. Ponownie rozwiązanie z wykorzystaniem tylko odzysku ciepła jest rozwiązaniem o najbardziej niekorzystnym wpływie na środowisko. Zastosowanie recyrkulacji powietrza obiegowego z racjonalnym sterowaniem pracą ogranicza emisję o prawie 67% i 59% odpowiednio dla rozwiązania Case 2 i Case 3 względem Case 1.




*Rysunek 12. Emisja $CO_2$ związana z pracą systemu klimatyzacji obsługującego salę operacyjną dla omawianych przypadków*

*Wnioski z analizy energetycznej*

Analizując zapotrzebowanie na energię niezbędną do pracy systemów obsługujących salę operacyjną w szpitalu wyraźnie widać, że stosowanie recyrkulacji jest uzasadnione i zawsze powinno być rozważane. Niewątpliwie prawidłowe wykorzystanie recyrkulacji daje wymierne i

znaczące efekty zarówno w odniesieniu do energii (a przez to kosztów utrzymania instalacji w ruchu) jak i emisji $CO_2$ do atmosfery. Nie ma innego rozwiązania, które tak znacząco ograniczałoby konieczność osuszania i nawilżania powietrza w naszej strefie klimatycznej.

Uzyskane wyniki są spójne z danymi literaturowymi, według których to instalacje HVAC decydują o energochłonności bloku operacyjnego (MacNeill i in., 2017; NHS England, 2026), a zwiększenie udziału powietrza recyrkulowanego należy do podstawowych sposobów ograniczania zużycia energii w salach operacyjnych (Cubí i in., 2015; Zarzycka i in., 2019). Dodatkowe oszczędności można uzyskać, łącząc recyrkulację z trybem czuwania. W 55 salach operacyjnych obniżenie krotności wymian powietrza w salach niezajętych do 4–6 $h^{-1}$ (wobec 21 $h^{-1}$ w trakcie użytkowania) zmniejszyło zużycie energii elektrycznej o ok. 1,35 GWh rocznie (Alipouriani i in., 2026).

Nie można zapominać o konieczności zachowania odpowiedniej jakości i czystości powietrza w sali operacyjnej, ale wydaje się, że w przypadku aktualnych możliwości i rozwiązań technicznych dotyczących metod dezynfekcji powietrza i powierzchni wykorzystanie obu rozwiązań da wymierne rezultaty i pozwoli na znaczące ograniczenie energii jak i emisji $CO_2$. Należy również zwrócić uwagę na fakt, że recyrkulacja z wykorzystaniem modułów recyrkulacyjnych nie powoduje skażenia instalacji powietrza wywiewanego w systemach z większą liczbą pomieszczeń.

## 4. Aspekty sanitarne

*Zagrożenia mikrobiologiczne*

Biorąc pod uwagę szereg aspektów sanitarnych mających wpływ na zdrowie osób przebywających w pomieszczeniach sal operacyjnych i bloku operacyjnego, najbardziej istotne są te, powiązane z zanieczyszczeniami mikrobiologicznymi powietrza. W obliczu stale rosnącej oporności drobnoustrojów na antybiotyki, problem ten nabiera dodatkowego wymiaru i konieczne jest uwzględnianie rozwiązań mających na celu zapobieganie mikrobiologicznemu zanieczyszczeniu powietrza we wszystkich działaniach technicznych i technologicznych, które usprawniają lub optymalizują funkcjonowanie systemów wentylacji w salach operacyjnych.

Źródłem zanieczyszczeń biologicznych w tego typu środowisku są przede wszystkim (Alexander i in., 2013; Brock-Utne i in., 2021; Dreikausen i in., 2023; ECDC, 2024; Edmiston i in., 2005; Kolasiński, 2019; Kowalski, 2012; Letts i Doermer, 1983; Mufarrih i in., 2019; Napoli i in., 2012; Otter i in., 2013; Whyte i Eaton, 2015; WHO, 2016; Zhao i in., 2022):

- ludzie (personel medyczny i pacjenci) - dłonie, inne obszary skóry lub błony śluzowe (np. nosa i jamy ustnej) oraz drogi oddechowe,
- powierzchnie sprzętu medycznego,
- elementy systemów wentylacyjnych, szczególnie nieprawidłowo serwisowane filtry powietrza lub powierzchnia kanałów powrotnych,
- wtórne zanieczyszczenie powietrzem pochodzącym z nieszczelności systemu przy braku właściwych parametrów nadciśnienia powietrza wewnątrz sali operacyjnej,
- wtórne zanieczyszczenie powietrzem nawiewanym w systemach z recyrkulacją.

Istotne jest przy tym, że w klasycznym badaniu endoprotezoplastyk stawu biodrowego i kolanowego wykonywanych w sali z wentylacją konwencjonalną autorzy oszacowali, że ok. 98% bakterii obecnych w ranie operacyjnej pochodziło – bezpośrednio lub pośrednio (np. przez narzędzia i dłonie) – z powietrza (Whyte i in., 1982). Zależność między poziomem skażenia mikrobiologicznego powietrza a częstością głębokich zakażeń po endoprotezoplastykach potwierdzili Lidwell i in. (1983). W chirurgii ogólnej udział drogi powietrznej w skażeniu rany okazał się mniejszy i ujawniał się głównie wtedy, gdy skażenie z innych źródeł było niewielkie; szacowano, że ok. 13-krotne zmniejszenie liczby bakterii w powietrzu sali zmniejsza skażenie rany o ok. 50% (Whyte i in., 1992). Według danych ECDC najczęściej izolowanymi drobnoustrojami w

zakażeniach miejsca operowanego były w 2017 r. *Staphylococcus aureus* (21,5%) i *Escherichia coli* (13,9%) (ECDC, 2019), a w latach 2018–2020 – *Enterococcus* spp. (17,6%), *E. coli* (17,2%) i *S. aureus* (15,2%) (ECDC, 2023). W przeglądach literatury wskazuje się również na znaczenie gronkowców koagulazo-ujemnych (Kolasiński, 2019; Spagnolo i in., 2013). Drobnoustroje obecne w powietrzu wewnętrznym obiektów szpitalnych charakteryzują się zwykle zróżnicowanym składem. W analizach dotyczących oceny morfologicznej bakterii i grzybów zidentyfikowano poszczególne gatunki występujące w różnych oddziałach szpitalnych. Najczęściej spotykanymi gatunkami drobnoustrojów związanych z zakażeniami nabytymi w placówkach ochrony zdrowia, a także identyfikowanymi w zakładach opieki długoterminowej, są: *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Clostridium difficile*, a także gatunki z rodzajów *Enterococcus*, *Enterobacter*, *Klebsiella* i *Candida* oraz *Aspergillus spp. i Penicillium spp.* (ECDC, 2024; Furmenti i in., 2019). Ich stężenie w powietrzu zależy od intensywności jego wymian, stopnia filtracji, wilgotności względnej i lokalnych przepływów turbulencyjnych. Nie należy też zapominać o zanieczyszczeniach i zagrożeniach związanych z cząstkami wirusów przenoszonymi drogą powietrzną. Doświadczenia wynikające z różnych lokalnych epidemii oraz pandemii wirusa SARS-CoV-2 dostarczają stosunkowo dużo danych, których wykorzystanie może przyczynić się do zwiększenia bezpieczeństwa zdrowotnego również w tym obszarze.

*Zagrożenia chemiczne*

Powietrze wewnętrzne m.in. sal operacyjnych zawierać może różne substancje chemiczne, takie jak gazy medyczne stosowane do procedur znieczulenia pacjenta, środki dezynfekujące i sterylizujące oraz inne związki chemiczne.

Powszechnie stosowane anestetyki wziewne obejmują: halotan, enfluran, izofluran, lotne środki znieczulające, takie jak desfluran i sewofluran, oraz podtlenek azotu ($N_2O$). Gazy anestetyczne, które przedostają się z układu ich dozowania, uwalniane są do powietrza w pomieszczeniu i mogą być wdychane przez personel pracujący na salach operacyjnych. Gazy te są powszechnie określane jako WAG (ang. waste anaesthetic gases – resztkowe gazy anestetyczne). W celu zmniejszenia oddziaływania czynników chemicznych na zdrowie i komfort pacjentów oraz zespołu operacyjnego powszechnie stosowane są systemy usuwania gazów anestetycznych (AGSS). Są to najczęściej kompletne systemy przeznaczone do wychwytywania gazów anestetycznych wydostających się z układu oddechowego pacjenta, wykorzystywanych do podawania znieczulenia. Następnie gazy są usuwane bezpośrednio na zewnątrz budynku lub do miejsca, z którego mogą zostać bezpiecznie odprowadzone, na przykład poprzez wentylację wyciągową bez recyrkulacji. Związki aldehydowe (np. formaldehyd i glutaraldehyd), które są stosowane jako środki dezynfekujące do zimnej sterylizacji, również mogą wywoływać niekorzystne skutki zdrowotne. Zgodnie z informacjami WHO oraz Administracji Bezpieczeństwa i Higieny Pracy (OSHA), stosowanie formaldehydu lub narażenie na jego działanie może powodować ostre skutki zdrowotne, w tym podrażnienie oczu, bóle głowy, nudności, trudności w oddychaniu, podrażnienia skóry oraz inne objawy (OSHA; WHO, 2010). Wysokie stężenia par wdychanych przez dłuższy czas mogą powodować przewlekłe skutki zdrowotne, takie jak zapalenie krtani, zapalenie oskrzeli lub zapalenie płuc o podłożu oskrzelowym. Długotrwała ekspozycja może prowadzić do zapalenia spojówek, a formaldehyd został zaklasyfikowany przez Międzynarodową Agencję Badań nad Rakiem (IARC) jako substancja rakotwórcza dla ludzi (grupa 1), a w UE – jako substancja rakotwórcza kategorii 1B (rozporządzenie Komisji (UE) nr 605/2014). Glutaraldehyd może powodować astmę zawodową, wysypki skórne, podrażnienia oczu, duszność, ból lub dyskomfort w klatce piersiowej, kaszel, zmęczenie, nudności oraz bóle głowy.

Większość współczesnych aparatów stosowanych do procedur anestezjologicznych wyposażona jest we własny system wentylacyjny, połączony z systemem ogólnej wentylacji sali operacyjnej, który odprowadza wydychane gazy anestetyczne poza obieg oddechowy pacjenta. Urządzenia te posiadają także często system odprowadzania gazów anestetycznych, który

wychwytuje i usuwa gazy z powietrza. Minimalizuje to stężenie resztkowych gazów anestetycznych w powietrzu wewnętrznym, chroniąc personel medyczny i pacjenta przed zatruciem oraz zagrożeniami zdrowotnymi wynikającymi z długotrwałej ekspozycji na te substancje. Problemem pozostaje jednak zastosowanie recyrkulacji w kontekście ewentualnego zawracania gazów anestetycznych wraz z powietrzem wywiewanym i ponownie nawiewanym do sali operacyjnej. Z tego powodu, w przypadku planowania wykorzystania tego rozwiązania, rozważyć należy dodatkowe elementy zabezpieczające powietrze zawracane przed zanieczyszczeniem w tym zakresie. Badania nad adsorpcją lotnych anestetyków, prowadzone głównie w układach oddechowych i aparatach do znieczulenia, wskazują, że najlepszą efektywność w zakresie ich selektywnego usuwania wykazują aktywne węgle, zeolity, żel krzemionkowy, struktury metaloorganiczne (MOF), aerożele, nanorurki węglowe oraz aktywowany tlenek glinu (Ang i in., 2019; Doyle i in., 2002; Martin i Welliver, 2013; Song i in., 2015); struktury MOF wykazują również dużą pojemność adsorpcyjną wobec innych lotnych związków organicznych (Yang i in., 2011). Opracowano też liczne technologie służące do usuwania zanieczyszczeń organicznych z fazy gazowej lub parowej, takie jak adsorpcja, absorpcja, kondensacja kriogeniczna, technologie membranowe oraz technologie dekompozycji. Spośród nich, trzy pierwsze są uznane za możliwe do zastosowania w usuwaniu anestetyków wziewnych (VAs). Adsorpcja umożliwia wykorzystanie odpowiednio dostosowanych adsorbentów w celu zwiększenia skuteczności usuwania VAs, a następnie nasycony materiał może zostać zregenerowany i ponownie użyty. Chociaż absorpcja jest stosunkowo prosta, to utylizacja nasyconego ciekłego rozpuszczalnika stanowi istotny problem, a jego regeneracja jest ekonomicznie nieopłacalna. Pozostałe technologie – takie jak kondensacja kriogeniczna, technologie membranowe czy technologie dekompozycji – nie cieszą się większym zainteresowaniem wg danych w literaturze (Ang i in., 2019), ze względu na wysokie koszty inwestycyjne i operacyjne. Oprócz tych wad wdrożenie takich rozwiązań wymaga odpowiedniego planowania przestrzennego w szpitalach, co jest często niewykonalne. Dlatego też dobór właściwej metody usuwania zanieczyszczeń z powietrza powinien obejmować analizę ryzyka zdrowotnego i zestawienie kosztów inwestycji w stosunku do uzyskanych efektów oraz możliwości technicznych i technologicznych.

*Wpływ systemów wentylacyjnych na czystość mikrobiologiczną*

Właściwie zaprojektowany i nadzorowany system wentylacji stanowi główny czynnik kontroli zanieczyszczeń powietrza w obiektach szpitalnych. W systemach bez recyrkulacji, całe powietrze nawiewane do pomieszczeń pochodzi z zewnątrz, po jego uzdatnieniu w systemie filtracji wielostopniowej (zwykle $ePM_{2.5}$ 50% + $ePM_1$ ≥90% + HEPA H13/H14). W większości przypadków jest to system skuteczny i zapewniający odpowiednią czystość powietrza, zwłaszcza powietrza nawiewanego do pomieszczeń o podwyższonych wymaganiach higienicznych. Pamiętać należy jednak o tym, że źródłem mikroorganizmów oraz zanieczyszczeń pyłowych może być sam system, który utrzymywany jest w złych warunkach technicznych oraz środowiskowych. Stopień zanieczyszczenia i ostatecznie ilość cząstek zanieczyszczeń powietrza wewnątrz przewodów wentylacyjnych i w centralach wentylacyjnych (AHU) oraz w powietrzu nawiewanym jest jednak zależna nie tylko od stanu powietrza czerpanego do instalacji, pory roku, lokalizacji obiektu, konfiguracji AHU i układu filtracji powietrza, ale także od możliwości zasiedlania elementów systemu przez określone mikroorganizmy. Przez instalacje wentylacji i klimatyzacji przepływa powietrze o parametrach cieplno-wilgotnościowych sprzyjających rozwojowi drobnoustrojów. Powierzchnie wewnętrzne przewodów wentylacyjnych i powierzchnie elementów systemu wentylacji i klimatyzacji (filtry, wymienniki ciepła) stanowią dogodne środowisko do wzrostu drobnoustrojów (bakterie, pleśnie i grzyby), szczególnie przy sprzyjających warunkach wilgotności i w obecności pyłu, zawierającym m.in. substancje organiczne. W pracach Totaro i in. (2019) oraz Ohsaki i in. (2007) wykazano, że filtry, elementy nawilżające powietrze i same przewody

wentylacyjne mogą być idealnymi miejscami do zasiedlania, namnażania, co w konsekwencji prowadzi do zjawiska wtórnego zanieczyszczania instalacji przez drobnoustroje w instalacji i ich transmisji wraz z powietrzem wentylacyjnym do pomieszczeń danego obiektu budowlanego.

Należy przy tym podkreślić, że sam typ systemu wentylacji nie przesądza o ryzyku zakażeń. W wieloośrodkowym badaniu GISIO-ISChIA (28 sal operacyjnych, 1228 zabiegów endoprotezoplastyki) wskazano na potrzebę rzeczywistych pomiarów jakości mikrobiologicznej powietrza, ponieważ nie można zakładać, że dany typ wentylacji zawsze zapewnia wymagany poziom czystości (Agodi i in., 2015). Na liczbę drobnoustrojów w powietrzu sali istotnie wpływają też czynniki organizacyjne: etap zabiegu, rodzaj procedury, liczba osób w sali (ok. 5 jtk/$m^3$ na każdą dodatkową osobę) oraz temperatura powietrza (Fu Shaw i in., 2018). Kompleksowy przegląd badań dotyczących wentylacji sal operacyjnych, obejmujący m.in. systemy rozdziału powietrza oraz wpływ ruchu personelu i źródeł ciepła na ochronę pola operacyjnego, przedstawili Sadrizadeh i in. (2021). Dla oceny recyrkulacji oznacza to, że sam udział powietrza zewnętrznego nie przesądza o bezpieczeństwie mikrobiologicznym, a czystość powietrza należy potwierdzać pomiarami mikrobiologicznymi w trakcie zabiegów; na podstawie przytoczonych badań nie można jednak ustalić, które czynniki mają największy wpływ na bezpieczeństwo samej recyrkulacji.

W systemach recyrkulacyjnych cząstki biologiczne mogą być transportowane przez: strumień powietrza powrotnego (jeśli nie zostanie on skutecznie oczyszczony), kanały wentylacyjne, w których może dojść do kolonizacji biofilmu na powierzchni przewodów przy nieprawidłowym utrzymaniu higienicznym lub nieszczelności filtrów lub tzw. by-pass powietrza, umożliwiający obejście medium filtracyjnego. Kluczowe zatem jest, oprócz dodatkowej, wysoko skutecznej filtracji powietrza, dochowanie pozostałych parametrów technicznych samej instalacji oraz jej stała kontrola w zakresie parametrów higieny.

**Metody oczyszczania powietrza**

*Filtracja mechaniczna*

Instalacje wentylacji mechanicznej ogólnej oraz urządzenia wentylacji mechanicznej miejscowej stanowią w obszarze sal operacyjnych podstawowe środki ochrony zbiorowej przed aerozolami powietrznymi. Szczególnie istotne są w tym zakresie układy oczyszczające jedno- lub wielostopniowe, zdeterminowane wymaganiami higienicznymi lub technologicznymi. Podstawowymi parametrami opisującymi pracę układu włóknin filtracyjnych są opory przepływu powietrza i sprawność filtracyjna w stosunku do różnych frakcji aerozoli.

Aktualna klasyfikacja filtrów powietrza (odnosząca się do frakcji pyłu) zgodnie z PN-EN ISO 16890-1:2017 (PKN, 2017b) uzależniona została od wymiarów cząstek odkładających się w kolejnych częściach układu oddechowego i w płucach człowieka (do 1 µm – w pęcherzykach płucnych, do 2–3 µm – w oskrzelach i oskrzelikach, do 10 µm – w nosie i w gardle). Frakcje pyłu oznaczono symbolami $PM_{10}$, $PM_{2,5}$, $PM_1$ (PM – Particulate Matter). Filtry do zastosowań ogólnych zostały podzielone na klasy ISO związane z ich skutecznością w odniesieniu do frakcji cząstek w pyle testowym: $ePM_1$, $ePM_{2,5}$, $ePM_{10}$ oraz ISO Coarse (tzw. filtry zgrubne). Podział przedstawiono w Tabeli 6.

Tabela 6. Klasyfikacja filtrów powietrza zgodnie z PN-EN ISO 16890-1:2017 (PKN, 2017b)

| **Oznaczenie grupy filtrów** | **Wymagania** | | | **Wartość odniesienia do klasy** |
|---|---|---|---|---|
| | **$ePM_1$,min** | **$ePM_{2,5}$, min** | **$ePM_{10}$** | |
| ISO coarse | –- | –- | < 50% | początkowe, grawimetryczne zatrzymanie |
| ISO ePM10 | –- | –- | ≥50% | $ePM_{10}$ |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| ISO ePM2,5 | –- | ≥50% | –- | $ePM_{2,5}$ |
| ISO ePM1 | ≥50% | –- | –- | $ePM_1$ |

Ze względu na ocenę zdolności filtra do zatrzymania cząstek o określonym zakresie wymiarowym należy stosować termin: „skuteczność (lub efektywność) frakcyjna". Wszelkie zanieczyszczenia powietrza mają określoną wielkość i pod tym względem można je sklasyfikować. Zarówno zanieczyszczenia mikrobiologiczne jak i niektóre chemiczne związane są bardzo często z cząstkami stałymi, które stanowią dla nich specyficzny nośnik. Filtracja w obrębie tak zagregowanych cząstek odnosi się zwykle do ich aglomeratów, a nie do pojedynczych cząstek np. wirusa czy komórki bakteryjnej lub grzybowej. Szczegóły dot. zakresu wielkości cząstek stałych w kontekście oceny skuteczności filtracji przedstawiono w Tabeli 7.

Tabela 7. Zakresy wielkości cząstek pyłu stosowane do oceny skuteczności filtracji według PN-EN ISO 16890-1:2017-01E

| **Zakres wielkości cząstek** | **Przykładowe rodzaje zanieczyszczenia powietrza** |
|---|---|
| $PM_1$: 0,3 ≤ x ≤ 1 µm | Wirusy, nanocząstki, gazy wylotowe |
| $PM_{2,5}$: 0,3 ≤ x ≤ 2,5 µm | Wszystkie powyższe oraz bakterie, grzyby pleśniowe i ich zarodniki, pył z tonera drukarki |
| $PM_{10}$: 0,3 ≤ x ≤ 10 µm | Wszystkie powyższe oraz pyłki kwiatowe, pył pustynny |

Poza ww. grupami filtrów, bardzo istotne, szczególnie z punktu widzenia stosowania recyrkulacji są filtry wysokoskuteczne – HEPA (ang. High Efficiency Particulate Air). Ich obecna klasyfikacja oparta jest o normę EN 1822-1 (CEN, 2019c). Zgodnie z przedmiotową normą, filtry te dzieli się w zależności od ich minimalnej skuteczności na:

– H13 ≥ 99,95% - stosowane standardowo w salach operacyjnych;
– H14 ≥ 99,995% - stosowane w salach o podwyższonym rygorze higienicznym.

Kryterium podziału stanowi skuteczność filtrów określana dla tzw. najbardziej penetrującej wielkości cząstek (MPPS – Most Penetrating Particle Size). HEPA są filtrami powietrza o bardzo wysokiej skuteczności usuwania cząstek stałych i aerozoli, stosowanymi jako element filtracji końcowej w systemach wentylacyjno-klimatyzacyjnych pomieszczeń o najwyższych wymaganiach czystości powietrza, w szczególności w salach operacyjnych, w tym salach hybrydowych. Filtry tej klasy skutecznie usuwają z powietrza cząstki biologiczne i niebiologiczne, w tym bakterie, aerozole wirusowe związane z nośnikami cząstek, zarodniki grzybów oraz drobne frakcje pyłów. Mechanizm filtracji opiera się na jednoczesnym działaniu dyfuzji, przechwycenia i bezwładności cząstek, a nie na prostym efekcie „sita". Należy podkreślić, że filtry HEPA nie są w swym działaniu uniwersalne. Nie usuwają one zanieczyszczeń gazowych, takich jak dwutlenek węgla, hel czy gazy anestetyczne, co wymaga uwzględnienia odpowiednich rozwiązań wentylacyjnych i eksploatacyjnych, niezależnie od klasy filtracji cząstek.

Warto zauważyć, że w literaturze międzynarodowej w obszarze filtracji powietrza spotyka się nadal klasyfikację filtrów opartą na wskaźniku MERV (ang. Minimum Efficiency Reporting Value – minimalna raportowana wartość skuteczności) wg ASHRAE 52.2 (ASHRAE, 2017). System ten wykazuje przybliżoną korelację z klasyfikacją ISO 16890, jednak ze względu na różnice metodologiczne nie jest możliwe bezpośrednie przeliczenie klas między tymi systemami. W dokumentacji technicznej i sanitarnej na terenie UE właściwym odniesieniem pozostaje norma ISO 16890 (PKN, 2017b) oraz EN 1822 (CEN, 2019c) dla filtrów wysoko skutecznych. Ponadto, w niektórych doniesieniach nadal funkcjonuje nomenklatura z nieaktualnej już klasyfikacji wg EN

779:2012 (CEN, 2012). W celu porównania skuteczności filtrów ujętych wg różnych klasyfikacji podjęto się zatem zestawienia ich klas w Tabeli 8. W opracowaniu stosuje się klasyfikację wg PN-EN ISO 16890; tam, gdzie przytaczane źródła lub praktyka projektowa posługują się klasami wg wycofanej normy EN 779:2012 (np. F7, F9), podano je w brzmieniu oryginalnym lub w nawiasie.

Tabela 8. Porównanie różnych klas filtrów, w zależności od metody ich klasyfikacji

| **EN 779:2012 (norma wycofana)** | **MERV** | **Przybliżony odpowiednik ISO 16890** | **Przykładowe zastosowanie** |
|---|---|---|---|
| G4 | MERV 6 | ISO Coarse 50–60% | filtr wstępny |
| G4 / M5 | MERV 8 | ISO Coarse / ePM10 50% | filtr wstępny |
| M5 / F6 | MERV 10 | ePM10 50–65% | filtr pośredni |
| F6 | MERV 11 | ePM2.5 50% | filtr pośredni |
| F7 | MERV 12 | ePM2.5 65% | filtr pośredni |
| F7 / F8 | MERV 13 | ePM1 50–65% | filtr dokładny |
| F8 | MERV 14 | ePM1 70–80% | filtr dokładny |
| F9 | MERV 15 | ePM1 ≥80% | filtr bardzo dokładny |
| F9 | MERV 16 | ePM1 95% | filtr bardzo dokładny |
| Filtry wysoko skuteczne wg EN 1822:2019 | MERV 17–20* | HEPA H13–H14 | obszar filtrów HEPA |

*MERV >16 nie jest formalną częścią skali tej klasyfikacji – to już obszar filtrów absolutnych

Dane w Tabeli 8 mają charakter orientacyjny i poglądowy, ponieważ nie istnieje oficjalna norma przeliczeniowa pozwalająca na powyższe porównanie w stosunku 1:1.

W centralach wentylacyjnych ogólnego zastosowania zwykle stosuje się filtr wstępny o niskiej lub średniej skuteczności, tzw. filtr zgrubny/wstępny, określany jako filtr ogólnego przeznaczenia (klasy ISO Coarse 50–60%). Usuwa on duże cząstki stałe i część mikroorganizmów, osiągając skuteczność do 70% dla cząstek ≥ 10 µm. Jego zadaniem jest zatrzymywanie największych frakcji zanieczyszczeń powietrza, takich jak włókna, włosy i kurz. Po filtrze wstępnym i częściowym lub pełnym uzdatnieniu termiczno-wilgotnościowym powietrze przechodzi przez drugi stopień filtracji – filtry dokładne o skuteczności 99% dla cząstek do 5 µm, przy spadku ciśnienia nieprzekraczającym ok. 200 Pa. Są to tzw. filtry dokładne, klasy od $ePM_{2.5}$ 50% do $ePM_1$ 70–80% i w uzasadnionych przypadkach filtry bardzo dokładne klasy $ePM_1$ ≥80%-≥90%. Następnie, szczególnie w przypadku pomieszczeń bloku operacyjnego i innych pomieszczeń o wysokich wymaganiach septycznych powietrze kierowane jest na filtr HEPA lub ULPA o skuteczności 99,97% i większej dla cząstek o średnicy 0,3 µm (definicja stosowana w USA; w klasyfikacji EN 1822-1 skuteczność określa się dla cząstek MPPS – por. klasy H13 i H14). Spadek ciśnienia na tym etapie nie powinien przekraczać ok. 500 Pa. Dla cząstek o rozmiarze 0,3 µm filtry wstępne osiągają skuteczność 30–35%, a filtry końcowe (HEPA) – 99,97%. W celu wydłużenia żywotności filtrów HEPA stosowanych w układach innych niż centralne z klasycznym 3 stopniowym systemem filtracji, czyli np. w układach recyrkulacji lokalnej przed filtrem HEPA stosuje się dodatkowo filtry wstępne jednorazowego użytku (bez możliwości regeneracji). Taka koncepcja filtracji znacząco zwiększa trwałość filtrów HEPA i wpływa na redukcję kosztów serwisowania instalacji. Filtracja końcowa z użyciem filtrów HEPA jest powszechnie uznawana za skuteczne zabezpieczenie w obszarach o podwyższonych wymaganiach higienicznych, choć nie zastępuje pozostałych elementów kontroli zakażeń. Wspomnieć dodatkowo należy, że choć, że pojedyncze cząstki wielu wirusów oddechowych (np. SARS-CoV-2, wirusa grypy czy RSV) mieszczą się w zakresie < 0,3 µm, w środowisku powietrznym nie występują one w postaci wolnej. Są przenoszone głównie jako składniki kropelek oddechowych i aerozoli o typowych średnicach 0,5–10 µm, a także w agregatach białkowo-śluzowych i na cząstkach kurzu biologicznego.

Struktury te mieszczą się w zakresie wielkości cząstek skutecznie wychwytywanym przez filtry HEPA. Ze względu na dominację mechanizmu dyfuzji skuteczność filtrów HEPA wobec cząstek mniejszych od 0,1 µm jest wyższa niż wobec cząstek o wielkości MPPS, można więc oczekiwać skutecznego zatrzymywania także najdrobniejszych aerozoli zawierających wirusy. Z tego względu filtry HEPA stanowią standardową metodę kontroli skażenia powietrza w salach operacyjnych, izolatkach powietrznych oraz laboratoriach klasy BSL-3.

Należy jednak podkreślić, że sama filtracja powietrza – mimo wysokiej skuteczności – nie zapewnia pełnej eliminacji ryzyka transmisji wirusów, wskazywanych jako najmniejsze cząstki istotne z punktu widzenia bezpieczeństwa zdrowotnego pacjentów i personelu. Optymalne bezpieczeństwo epidemiologiczne wymaga zintegrowanego podejścia, obejmującego odpowiednią krotność wymian powietrza (≥ 12/h), właściwy kierunek przepływu powietrza i kontrolę ciśnienia wewnątrz i na zewnątrz pomieszczeń, kontrolę źródeł aerozoli, a także stosowanie środków ochrony indywidualnej. Filtracja HEPA stanowi jednak jedno z najbardziej efektywnych narzędzi w ograniczaniu rozprzestrzeniania się patogenów przenoszonych drogą powietrzną w środowisku klinicznym.

*Urządzenia stosowane w zakresie poprawy jakości powietrza wewnątrz pomieszczeń*

W systemach HVAC w obiektach ochrony zdrowia, w tym w salach operacyjnych i hybrydowych, stosuje się przede wszystkim filtry mechaniczne HEPA jako podstawowy element filtracji końcowej. W celu dalszego ograniczenia obciążenia zanieczyszczeniami powietrza recyrkulowanego, mogą być wdrażane dodatkowe technologie oczyszczania powietrza wspomagające filtrację mechaniczną, w tym fotokataliza, filtry elektrostatyczne czy promieniowanie UVC (Liu i in., 2017; Szczotko i in., 2022, 2023). Pełnią one funkcję uzupełniającą, zwiększając skuteczność eliminacji mikroorganizmów, w odpowiednich warunkach poprawiają jakość powietrza pod względem chemicznym oraz ograniczać mogą rozwój biofilmu na powierzchniach filtrów i kanałów wentylacyjnych. Nie zastępują one jednak filtrów HEPA, zwłaszcza w zakresie zatrzymywania i unieszkodliwiania cząstek biologicznych. Poniżej przedstawiono przegląd wybranych rozwiązań dostępnych rynkowo:

– Urządzenia wykorzystujące generatory zimnej plazmy: działanie polega na zastosowaniu plazmy, silnie zjonizowanego gazu wytwarzanego w wyniku wyładowań elektrycznych (np. koronowych) wysokiego napięcia, składającego się z elektronów, jonów dodatnich i cząstek obojętnych (cząsteczek atomów). Posiada ona właściwości pozwalające na wytrącanie cząstek w wyniku zjawisk elektrostatycznych, wytwarza promieniowanie UV, a tym samym sprzyja utlenianiu cząsteczek oraz usuwaniu cząstek wirusów i komórek bakterii i innych drobnoustrojów (Gallagher i in., 2007; Korachi i in., 2009; Liang i in., 2012; Luengas i in., 2015). Szczegółowy mechanizm dezaktywacji drobnoustrojów nie został jednak do końca przebadany. Ponadto sam proces generuje też wolne rodniki i inne utleniacze, które powodują zrywanie wiązań chemicznych i rozkład substancji, takich jak lotne związki organiczne, do $CO_2$ i $H_2O$. Urządzenia wytwarzające wolne rodniki in situ podlegają przepisom o produktach biobójczych (rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) nr 528/2012). Substancja ta jest objęta programem przeglądu substancji czynnych, a wprowadzenie takich produktów do obrotu w Polsce wymaga pozwolenia wydanego w procedurze krajowej przez Urząd Rejestracji Produktów Leczniczych, Wyrobów Medycznych i Produktów Biobójczych; przed zastosowaniem urządzenia w placówce ochrony zdrowia należy sprawdzić, czy je posiada.
– Urządzenia wykorzystujące procesy fotokatalityczne: jednym z najbardziej znanych i najczęściej stosowanych w praktyce fotokatalizatorów jest dwutlenek tytanu ($TiO_2$), zwłaszcza w formie nanocząsteczkowej. W przypadku urządzeń wykorzystujących procesy fotokatalityczne wymagane jest promieniowanie aktyniczne z zakresu UV-A. Światło ultrafioletowe (UV) padające na nanocząstki powoduje, że na powierzchni $TiO_2$ powstają

wolne elektrony, które łącząc się z tlenem z powietrza tworzą jego aktywne formy oraz dziury elektronowe. Te z kolei po połączeniu z parą wodną oraz wodą tworzą rodniki wodorotlenowe. Powstające rodniki wodorotlenowe posiadają bardzo silne właściwości utleniające, dzięki czemu mogą przyczyniać się do reakcji rozkładu różnego rodzaju zanieczyszczeń organicznych, takich jak lotne związki organiczne (LZO, ang. VOC), oleje, tłuszcze, spaliny samochodowe, wonne i bezwonne gazy, a także redukować liczbę drobnoustrojów obecnych w powietrzu wewnątrz pomieszczeń. Największymi problemami związanymi z zastosowaniem procesów fotokatalitycznych jest znacząco niższa efektywność urządzeń w warunkach rzeczywistych, potencjalne wytwarzanie szkodliwych dla zdrowia produktów ubocznych jak formaldehyd, acetaldehyd czy ozon (w przypadku stosowania lamp UV-C) oraz ograniczona żywotność fotokatalizatora (Aghighi i Haghighat, 2015; Mamaghani i in., 2017). Istotny jest też sam fakt potencjalnego negatywnego wpływu nanocząstek wykorzystywanych w procesie fotokatalizy na zdrowie ludzi (Baranowska-Wójcik i in., 2020).

– Urządzenia działające na zasadzie promieniowania UV-C: Procesy dezynfekcji z wykorzystaniem promieniowania UV-C stosuje się powszechnie od szpitali i placówek opieki zdrowotnej po centra handlowe, obiekty biurowe, szkolno-wychowawcze, mieszkalne i środki transportu zbiorowego. W procesie promieniowania wykorzystywane jest najczęściej widmo fali UV między 200 a 280 nm, tak zwane widmo UV-C. Powoduje ono krytyczne uszkodzenia genomu drobnoustrojów uniemożliwiając im właściwą replikację DNA czy RNA, a w efekcie znacząco zmniejsza ich przeżywalność (Abshire i Dunton, 1981; Ko i in., 2000). Dlatego wpływ promieniowania UV-C na drobnoustroje nazywany jest prawidłowo ich „inaktywacją", a nie „zabijaniem". Problemem związanym z zastosowaniem tego typu oczyszczaczy powietrza jest też uwalnianie do powietrza ozonu (w zależności od widma fali UV-C) i wolnych rodników tlenowych (Claus, 2021; Kowalski, 2009; Raeiszadeh i Adeli, 2020). Alternatywą rozważaną dla pomieszczeń z obecnością ludzi są lampy dalekiego UV-C (ok. 222 nm), mniej szkodliwe dla skóry i oczu; one również wytwarzają jednak ozon, dlatego ich stosowanie wymaga oceny wpływu na jakość powietrza (Peng i in., 2023).

– Urządzenia działające na zasadzie filtracji elektrostatycznej: Łączą procesy elektrostatyczne, filtrację mechaniczną, a do tego w większości są przystosowane do okresowego ich czyszczenia oraz mycia. Mechanizm działania opiera się na wykorzystaniu silnego pola elektrycznego, zjawiska wyładowania koronowego jonizującego powietrze oraz przyciągania elektrostatycznego naładowanych cząstek. Cząstki unoszące się w powietrzu są przyciągane i wychwytywane przez ładunek statyczny, podczas gdy powietrze przepływa przez usieciowaną strukturę włókien filtra podatnych na ładunki elektrostatyczne. Skuteczność filtrów elektrostatycznych waha się w szerokim zakresie (ok. 60–98%) w zależności od wielkości cząstek, prędkości przepływu powietrza i stopnia zabrudzenia elektrod (Afshari i in., 2020). Wadą tego rodzaju rozwiązania jest fakt, że sposób działania filtrów elektrostatycznych wymusza silną jonizację cząstek, a to wiąże się bezpośrednio z emisją ozonu ($O_3$) oraz tlenków azotu (NOx) (Katatani i in., 2010). Obie substancje jako szkodliwe dla zdrowia człowieka są powszechnie uznawane za zanieczyszczenia powietrza wewnątrz pomieszczeń. W nowszych urządzeniach emisję ozonu ogranicza się m.in. przez stosowanie filtrów z węglem aktywnym, dlatego przy doborze urządzenia należy sprawdzić deklarowaną emisję ozonu. Filtry tego rodzaju stosowane są najczęściej jako jeden z połączonych etapów oczyszczania powietrza w urządzeniach stosowanych w tym celu, np. w połączeniu z filtracją mechaniczną lub procesami opartymi o zjawisko fotokatalizy (Lin i in., 2011; Waring i in., 2008).

Ostatnie publikacje wskazują także na rozwiązania poprawiające jakość mikrobiologiczną powietrza w salach operacyjnych. Mullen i Wieser (2024) opisali trwałe zmniejszenie częstości zakażeń miejsca operowanego w szpitalu ortopedycznym po wdrożeniu w salach operacyjnych urządzeń łączących filtrację HEPA i promieniowanie UV. Wagner i in. (2022) opisali z kolei, że po zmianach rozdziału powietrza w 14 salach operacyjnych, wprowadzonych na podstawie oceny wskaźników jakości środowiska (ang. Environmental Quality Index, EQI), odsetek zakażeń miejsca operowanego spadł z 8,4% do 5,7% w ciągu 39 miesięcy obserwacji, podczas gdy w salach kontrolnych nie odnotowano istotnej zmiany. W obu przypadkach jest to wynik obserwowany po wdrożeniu zmian, a udział samej recyrkulacji pozostaje nieustalony.

W kontekście stosowania recyrkulacji powietrza m.in w salach operacyjnych, technologie wspomagające mają szczególne znaczenie, ale wyłącznie jako uzupełnienie klasycznej filtracji z wykorzystaniem filtrów klasy HEPA. Ich prawidłowa integracja w systemie wentylacyjnym wymaga instalacji w strefach przed filtrami końcowymi lub bezpośrednio w kanałach recyrkulacyjnych. Takie zastosowanie pozwoli na redukcję mikroorganizmów w powietrzu recyrkulowanym i ogranicza kolonizację biofilmu w instalacji. Podkreślić jednak trzeba, że wdrożenie takich technologii musi być poparte potwierdzeniem ich skutecznego działania, procedurami monitorowania i kontroli parametrów eksploatacyjnych, w tym spadku ciśnienia na filtrach HEPA, integralności filtrów, natężenia promieniowania UV-C oraz generowanego ozonu, aby zapewnić bezpieczeństwo pacjentów i personelu medycznego. Zastosowanie w praktyce technologii wspomagających należy traktować strategicznie: ich celem jest zwiększenie bezpieczeństwa mikrobiologicznego i chemicznego powietrza recyrkulowanego, a nie zastąpienie filtrów HEPA czy podstawowych zasad projektowania systemów wentylacyjnych. W związku z tym sugeruje się ich zastosowanie w sposób kontrolowany, w powiązaniu z filtracją mechaniczną i monitoringiem jakości powietrza, co pozwala na szersze możliwości rozważenia recyrkulacji powietrza w zakresie wentylacji sal operacyjnych, przy zachowaniu wysokiego poziomu bezpieczeństwa sanitarnego.

**Hybrydowe sale operacyjne w kontekście zawracania powietrza obiegowego**

Hybrydowe sale operacyjne stanowią wyspecjalizowaną kategorię pomieszczeń medycznych, łączącą funkcje klasycznej sali operacyjnej z zaawansowanymi systemami diagnostyki obrazowej umożliwiającymi obrazowanie śródoperacyjne w czasie rzeczywistym. Rozwiązania te zostały opracowane w odpowiedzi na dynamiczny rozwój procedur małoinwazyjnych, endowaskularnych oraz zabiegów wymagających precyzyjnej kontroli anatomicznej i funkcjonalnej w trakcie interwencji chirurgicznej. W tego typu salach integrowane są urządzenia obrazujące, takie jak angiografy, tomografy komputerowe, systemy fluoroskopowe, aparaty ultrasonograficzne, a w wybranych przypadkach także rezonans magnetyczny (MRI). Jednoczesne spełnienie wymagań stawianych salom operacyjnym oraz pracowniom diagnostyki obrazowej skutkuje istotnym wzrostem złożoności projektowej, eksploatacyjnej i regulacyjnej tych pomieszczeń.

Hybrydowe sale operacyjne charakteryzują się przede wszystkim dużą kubaturą i powierzchnią użytkową w porównaniu do standardowych sal operacyjnych, wysokim nasyceniem aparaturą medyczną oraz urządzeniami elektronicznymi, które stanowią dodatkowe źródła ciepła, a w konsekwencji zwiększonym zapotrzebowaniem na energię elektryczną oraz stabilne warunki środowiskowe. W odróżnieniu od klasycznych sal operacyjnych, w salach hybrydowych czas trwania procedur jest często dłuższy, a liczba osób przebywających w pomieszczeniu – większa. Skutkuje to podwyższonym obciążeniem systemów wentylacji i klimatyzacji, zarówno w zakresie zapewnienia odpowiedniej jakości powietrza, jak i komfortu cieplnego personelu oraz pacjenta. Zagrożenia zdrowotne w przypadku tego typu pomieszczeń łączą zagrożenia występujące w standardowych salach operacyjnych, tj. ryzyko zakażeń mikrobiologicznych czy ekspozycji na anestetyki, poszerzone o zagrożenia wynikające z urządzeń i procedur diagnostyki

obrazowej stosowanych w trakcie procedur chirurgicznych. Inaczej zatem rozważać należy stosowanie recyrkulacji w przypadku sal hybrydowych stosujących rezonans magnetyczny, tomografię komputerową czy też wykorzystujących aparaturę do RTG czy USG. O ile w większości sal hybrydowych zastosowanie recyrkulacji nie powinno być znacząco utrudnione, to wyjątek stanowią tu sale z wykorzystaniem procedur MRI.

O ile aparatura stosowana w tego typu salach nie zawiera otwartych źródeł promieniowania ani radioizotopów, to generuje ona promieniowanie jonizujące. Przepisy w zakresie ochrony radiologicznej w tym obszarze wynikają wprost z rozporządzenia Ministra Zdrowia z dnia 11 stycznia 2023 r. w sprawie warunków bezpiecznego stosowania promieniowania jonizującego dla wszystkich rodzajów ekspozycji medycznej (Dz.U. 2023 poz. 195; t.j. Dz.U. 2025 poz. 1288) oraz z ustawy z dnia 29 listopada 2000 r. – Prawo atomowe (t.j. Dz.U. 2026 poz. 1). Szczególny nacisk położono w nich na optymalizację ochrony radiologicznej pacjenta: zgodnie z art. 33d ust. 2 Prawa atomowego dawki w badaniach diagnostycznych ogranicza się do możliwie najniższego poziomu, przy uwzględnieniu czynników ekonomicznych i społecznych, zapewniającego uzyskanie wyniku o zamierzonej jakości diagnostycznej. Ze względu na brak możliwości skażenia promieniotwórczego powietrza, w niniejszej analizie pominięto ten czynnik ryzyka.

W przypadku MRI natomiast pojawia się ryzyko potencjalnego zanieczyszczenia powietrza helem, który stosowany jest jako czynnik chłodzący. W standardowych warunkach eksploatacyjnych hel zamknięty jest w układzie kriogenicznym, jednak jego przypadkowe lub awaryjne uwolnienie stanowi istotne zagrożenie środowiskowe i zdrowotne. Hel nie jest źródłem promieniowania jonizującego — problemem jest jego fizyczna własność jako gazu obojętnego (niepalny, bez zapachu), który przy dużym stężeniu wypiera tlen z powietrza (ryzyko niedotlenienia/asfiksji). Po odparowaniu objętość helu wzrasta ok. 750-krotnie, stąd nawet niewielka ilość ciekłego helu może spowodować istotne „rozcieńczenie" tlenu w zamkniętej przestrzeni sali operacyjnej. Tradycyjne parowanie jest faktycznie istotnym problemem technicznym w starszych systemach MRI, gdzie dzienna utrata gazu wynosi 0,075 l ciekłego helu na godzinę z całkowitej objętości helu w kriostacie (Hanzelka i Horký, 1999). Nowoczesne systemy MRI, stosowane po 2005 r. często wykorzystują układy Zero Boil-Off, które mają wbudowane kriogeniczne kompresory i re-kondensatory wychwytujące parujący hel, a następnie ponownie go skraplają i zwracają do kriostatu. Zapewnia to dość efektywną redukcję strat helu do bardzo niskich wartości, często praktycznie bliskich zeru podczas standardowej eksploatacji. Przy takich rozwiązaniach w normalnej eksploatacji do otoczenia trafiają jedynie śladowe ilości helu, dlatego częściowa recyrkulacja powietrza w salach hybrydowych z aparatem MRI wiąże się z mniejszym ryzykiem niż w przypadku starszych systemów (Manso Jimeno i in., 2023; Wang, 2005). Można zatem założyć, że ryzyko związane z wyciekami helu powinno być dobrze zidentyfikowane i uwzględnione w odpowiednich procedurach awaryjnych w obiekcie. Natomiast z punktu widzenia systemu wentylacji, który zawiera elementy recyrkulacji, bardzo ważnym faktem jest to, że nawet zastosowanie filtrów HEPA nie pozwoli na redukcję helu w powietrzu, zatem zastosowanie systemu recyrkulacji powietrza w instalacji doprowadzającej powietrze do sali hybrydowej powinno wymagać zastosowania dodatkowych zabezpieczeń, np. w postaci czujników stężenia tlenu, dodatkowych odciągów helu umieszczonych w przestrzeni przysufitowej i sufitowej oraz bezwzględnie wdrożonych procedur awaryjnych.

## 5. Wskazówki ograniczające ryzyko sanitarne (mikrobiologiczne i chemiczne) związane z recyrkulacją powietrza w salach operacyjnych i hybrydowych

Jak wynika z przedstawionych wcześniej informacji, recyrkulacja powietrza w salach operacyjnych może być rozwiązaniem technicznie dopuszczalnym i uzasadnionym energetycznie, pod warunkiem spełnienia rygorystycznych wymagań higienicznych, projektowych i eksploatacyjnych. Ryzyko mikrobiologiczne zależy od konkretnych czynników projektowych i

eksploatacyjnych: szczelności obiegu, integralności filtracji, rozdziału powietrza, wielkości strumienia powietrza zewnętrznego oraz skuteczności miejscowego odciągu gazów anestetycznych. Z tej przyczyny jej stosowanie wymaga podwyższonej kontroli eksploatacyjnej oraz systemowego podejścia do zarządzania jakością powietrza. Poniżej przedstawiono zestaw wskazówek minimalizujących ryzyko.

1. Wymagania projektowe

W procesie projektowanie systemów z lokalną recyrkulacją pomieszczeń wymagających konieczności i dozoru gradacji ciśnień należy przewidzieć naddatek ciśnienia dyspozycyjnego centrali wentylacyjnej (czyli nie wolno dobierać wentylatorów na tzw. styk). Zwyczajowe 10% naddatku jest zwykle niewystarczające, ponieważ należy uwzględnić także nieszczelności całej instalacji i pomieszczeń oraz ciśnienia (nadciśnienia) w poszczególnych pomieszczeniach.

1.1. Separacja systemów

- Każda sala operacyjna powinna posiadać indywidualny, niezależny system recyrkulacji.
- System powinien być wykonany w wersji higienicznej (czystej i suchej), uniemożliwiającej powrót nieoczyszczonego powietrza do pomieszczenia (konieczność zastosowania 1) szczelnej przepustnicy na regulatorze VAV, której zadaniem jest zabezpieczenie przed powrotem powietrza do pomieszczenia po wyłączeniu wentylatora recyrkulacji oraz 2) chłodnicy zasilanej czynnikiem chłodniczym gwarantującym utrzymanie średniej temperatury powierzchni wymiennika wyższej od temperatury punktu rosy powietrza uzdatnianego.

1.2. Filtracja powietrza

- Całość powietrza recyrkulowanego musi przechodzić przez filtrację końcową klasy co najmniej HEPA H13 (zgodnie z DIN, 2018, i Charkowska i in., 2018; w salach o podwyższonym rygorze higienicznym zaleca się H14), montowaną bezpośrednio na nawiewniku.
- Powietrze wywiewane z pomieszczenia i skierowane do ponownego uzdatnienia przed ponownym wprowadzeniem do niego powinno być wstępnie filtrowane minimum na poziomie ePM1 ≥ 50% (dawniej F7), a kratki wywiewne należy wyposażyć w separatory kłaczków (siatki o oczkach < 0,8 mm).

1.3. Udział powietrza zewnętrznego

- Recyrkulacja nie może zastępować wymaganego udziału powietrza zewnętrznego.
- Minimalna ilość powietrza zewnętrznego powinna spełniać wymagania dla klasy pomieszczenia (np. min. 4 wymiany powietrza zewnętrznego na godzinę wg ANSI/ASHRAE/ASHE 170 (ASHRAE, 2021) lub ≥ 1200 $m^3$/h wg DIN 1946-4 (DIN, 2018)).
- Recyrkulacja może zwiększać całkowitą liczbę wymian powietrza, lecz nie może redukować wymaganego strumienia świeżego powietrza.
- Udział powietrza zewnętrznego w wentylującym powinien być zmienny w funkcji minimum zapotrzebowania na energię niezbędną do uzdatniania termicznego i wilgotnościowego.

1.4. Rozkład przepływów

- Zachowany musi być stabilny gradient ciśnień (nadciśnienie w sali operacyjnej min. 10–15 Pa względem pomieszczeń otaczających).

2. Monitoring i zabezpieczenia techniczne

2.1. Stały monitoring:

- spadku ciśnienia na filtrach HEPA,
- strumienia powietrza nawiewanego, wywiewanego i recyrkulowanego (przetworniki ciśnienia lub przepływu powinny być zamontowane w magistralnym kanale

nawiewnym oraz na kanale powietrza recyrkulowanego, tak, aby spełnione było wymaganie dotyczące utrzymania krotności wymian powietrza w pomieszczeniu,
- ciśnienia lub przepływu w kanale recyrkulacji po stronie ssawnej wentylatora, co zabezpieczy przed „cofaniem" powietrza do pomieszczenia (montaż szczelnych przepustnic w układzie regulacyjnym VAV),
- różnicy ciśnień między wyznaczonymi strefami,
- parametrów mikroklimatu (T, RH, $CO_2$).

2.2. Instalacja czujników:
- gazów anestetycznych,
- helu (w salach hybrydowych),
- innych gazów medycznych stosowanych w danej jednostce.

2.3. Lokalny odciąg gazów anestetycznych z możliwością kontroli skuteczności.

2.4 System powinien posiadać możliwość płynnego przełączenia w tryb 100% powietrza zewnętrznego i powinien być sprzężony z automatyką całego układu wentylacyjnego.

2.5 W okresach nieużytkowania sali zaleca się stosowanie trybu czuwania (ang. set-back) z obniżonym strumieniem powietrza. Na takie rozwiązanie pozwala także ANSI/ASHRAE/ASHE 170 - dla sal operacyjnych dopuszcza obniżenie liczby wymian powietrza w okresie nieużytkowania (unoccupied turndown), pod warunkiem utrzymania wymaganej relacji ciśnień względem pomieszczeń sąsiednich i przywrócenia minimalnych parametrów, gdy tylko sala zostanie ponownie uruchomiona (ASHRAE, 2021). Ograniczenie pracy wentylacji w okresach nieużytkowania **sali nie pogarsza jakości powietrza w trakcie zabiegu**, jeżeli system zostanie ponownie uruchomiony z odpowiednim wyprzedzeniem przed zabiegiem (Dettenkofer i in., 2003; Traversari i in., 2017), a w badaniu porównującym 30 i 6 wymian powietrza na godzinę w salach w stanie spoczynku utrzymywanie ok. 6 wymian/h zapewniało stężenie bakterii poniżej wartości zalecanych dla sali w stanie spoczynku przy ok. 70% niższych kosztach energii niż przy 30 wymianach/h (Lee i in., 2018). Obniżenie krotności wymian w nieużytkowanych salach nie wiązało się z istotnym wzrostem częstości zakażeń miejsca operowanego (badanie typu przed–po; Alipouriani i in., 2026). Również według wytycznych R3 Nordic tryb czuwania jest zalecany w okresach, gdy sala nie jest używana do zabiegów - **w trybie czuwania można ograniczyć strumień powietrza zewnętrznego i/lub recyrkulowanego oraz wyłączyć chłodzenie i nawilżanie, przy utrzymaniu nadciśnienia w sali**; należy przy tym zapobiec napływowi niefiltrowanego powietrza przez kanały powietrza zewnętrznego i powrotnego (R3 Nordic, 2023). W trybie czuwania warunki w sali mogą odbiegać od wymagań dla stanu spoczynku (at-rest), jednak po przełączeniu systemu w tryb pracy wymagania te powinny zostać osiągnięte w ciągu maksymalnie 30 min. Czas ten weryfikuje się pomiarem stężenia cząstek, przy docelowym czasie oczyszczania wynoszącym 15 min (R3 Nordic, 2023). Według NHS England czas przywrócenia pełnych parametrów po dłuższym wyłączeniu wynosi ok. 25 min dla sal z nawiewem ultraczystym i ok. 30 min dla sal z wentylacją konwencjonalną (NHS England, 2026).

2.6 Urządzenia nie mogą generować dodatkowego hałasu przekraczającego wymagania dla sal operacyjnych.

3. Zarządzanie i eksploatacja

Wdrożenie procedur serwisowych obejmujących:
- harmonogram wymiany filtrów,
- okresowe testy szczelności filtrów HEPA,
- dokumentowanie parametrów pracy systemu.
- badania odbiorcze i okresowe: test integralności filtrów HEPA zgodnie z PN-EN ISO 14644-3 (CEN, 2019b), klasyfikację czystości powietrza zgodnie z PN-EN ISO 14644-1 (PKN, 2016) oraz pomiar czasu odzysku czystości (ang. recovery time),

- okresową ocenę czystości mikrobiologicznej powietrza i powierzchni zgodnie z zasadami PN-EN 17141:2021-02 (PKN, 2021), w stanie spoczynku i w trakcie zabiegów,
- przegląd, czyszczenie lub dezynfekcję instalacji nie rzadziej niż co 12 miesięcy (§ 40 rozporządzenia Ministra Zdrowia z dnia 26 marca 2019 r.).

Nadzór techniczny powinien być prowadzony przez wykwalifikowany personel.
Każde odstępstwo od parametrów projektowych wymaga natychmiastowej reakcji.

4. Sytuacje wymagające wyłączenia recyrkulacji
System powinien umożliwiać natychmiastowe przejście na tryb bez recyrkulacji w przypadku:

- procedur o bardzo wysokim ryzyku zakażeń (szczególnie przy drobnoustrojach wieloopornych) – decyzję należy powiązać z drogą transmisji drobnoustroju i oceną ryzyka procedury,
- incydentów skażenia biologicznego lub chemicznego,
- przekroczenia dopuszczalnych stężeń cząstek, aerozoli lub gazów,
- awarii modułu recyrkulacyjnego (REC) lub utraty integralności filtrów; uszkodzenie wspólnego filtra końcowego F/III wymaga osobnej procedury, ponieważ po przejściu na 100% powietrza zewnętrznego nawiew nadal przechodzi przez ten filtr.

5. Sale hybrydowe – wymagania dodatkowe
Dopuszczalność recyrkulacji w salach hybrydowych zależy od rodzaju zintegrowanej aparatury:

- sale z angiografem, tomografem komputerowym, aparatem RTG lub USG – aparatura nie powoduje skażenia promieniotwórczego powietrza, dlatego recyrkulację lokalną można stosować na zasadach jak dla sal operacyjnych; przy doborze modułów recyrkulacyjnych należy uwzględnić zwiększone zyski ciepła od aparatury, a ochronę radiologiczną zapewnia się osłonami stałymi, a nie wentylacją,
- sale z rezonansem magnetycznym – recyrkulację należy ograniczyć do systemów z kriostatem typu Zero Boil-Off, z ciągłym pomiarem stężenia tlenu, automatycznym wyłączeniem recyrkulacji i przejściem na 100% powietrza zewnętrznego po wykryciu spadku stężenia tlenu lub zdarzenia typu quench, z rurą wyrzutową helu wyprowadzoną na zewnątrz budynku i oddaloną od czerpni powietrza,
- pomieszczenia, w których stosuje się otwarte źródła promieniotwórcze (diagnostyka izotopowa) – wymagania § 15 pkt 4 rozporządzenia Rady Ministrów z dnia 12 lipca 2006 r. (ukierunkowany przepływ powietrza, wyrzut powietrza ponad kalenicą) oraz § 151 ust. 3 rozporządzenia w sprawie warunków technicznych w praktyce wykluczają zawracanie powietrza wywiewanego; recyrkulacji nie należy stosować.

## 6. Podsumowanie

Przeprowadzona analiza wskazuje, że przepisy stosowane w Polsce (w tym rozporządzenie w sprawie warunków technicznych z 2002 r., stosowane w okresie przejściowym na zasadach art. 102a–102c Prawa budowlanego) nie zakazują stosowania recyrkulacji powietrza w salach operacyjnych czy innych pomieszczeniach ochrony zdrowia, lecz uzależniają ją od zgody i warunków określonych przez właściwego państwowego inspektora sanitarnego. Brak szczegółowych kryteriów technicznych powoduje, że w praktyce projektowej recyrkulacja jest najczęściej pomijana, mimo że normy i wytyczne stosowane w wielu krajach europejskich oraz w Stanach Zjednoczonych dopuszczają ją na ściśle określonych warunkach.

Kluczowe dla oceny ryzyka jest rozróżnienie recyrkulacji centralnej, w której powietrze z różnych pomieszczeń jest mieszane w centrali, oraz recyrkulacji lokalnej, w której powietrze wraca wyłącznie do pomieszczenia, z którego zostało pobrane. Recyrkulacja lokalna eliminuje przenoszenie zanieczyszczeń między pomieszczeniami przez wspólną pętlę recyrkulacji (nie

eliminuje innych dróg, np. przez drzwi i nieszczelności) i w świetle przeglądu norm może być rekomendowana dla sal operacyjnych.

Analiza energetyczna wykonana dla sali operacyjnej o kubaturze 258,7 $m^3$ (strumień powietrza 6800 $m^3$/h, w tym 2400 $m^3$/h powietrza zewnętrznego) wykazała, że połączenie recyrkulacji lokalnej z odzyskiem ciepła (Case 2) pozwala ograniczyć zapotrzebowanie na energię grzewczą o ok. 95%, na energię elektryczną o ok. 64%, a emisję eq. $CO_2$ o ok. 67% w porównaniu z układem wyłącznie z odzyskiem ciepła (Case 1). Istotnym efektem jest wyeliminowanie osuszania powietrza przez przechłodzenie i ponowne dogrzewanie.

Z punktu widzenia sanitarnego ryzyko związane z recyrkulacją zależy od szczelności obiegu i integralności filtracji (nieszczelności i obejścia filtrów), rozdziału powietrza w sali, wielkości strumienia powietrza zewnętrznego, kolonizacji elementów instalacji przez drobnoustroje oraz skuteczności miejscowego odciągu gazów anestetycznych, które mogą być zawracane do sali. Filtracja końcowa HEPA skutecznie zatrzymuje cząstki biologiczne, ale nie usuwa zanieczyszczeń gazowych, dlatego warunkiem bezpiecznej recyrkulacji jest skuteczny miejscowy odciąg gazów anestetycznych, a w salach hybrydowych z MRI – także monitorowanie stężenia tlenu. Technologie wspomagające (UV-C, fotokataliza, filtry elektrostatyczne, plazma) mogą jedynie uzupełniać filtrację HEPA i wymagają kontroli emisji produktów ubocznych, w tym ozonu. Brakuje przy tym badań bezpośrednio porównujących częstość zakażeń miejsca operowanego w salach o tym samym systemie wentylacji podstawowej, pracujących z recyrkulacją i bez niej, a dostępne dowody pochodzą głównie z badań innych pomieszczeń szpitalnych.

Rekomenduje się, aby recyrkulacja w salach operacyjnych była stosowana wyłącznie jako recyrkulacja lokalna, w indywidualnym obiegu dla każdej sali, z filtracją końcową HEPA bezpośrednio na nawiewniku, przy zachowaniu co najmniej minimalnego strumienia powietrza zewnętrznego wymaganego dla sali operacyjnej (ze względu na potrzeby higieniczne, rozcieńczanie gazów anestetycznych i utrzymanie nadciśnienia), z ciągłym monitoringiem parametrów pracy, możliwością natychmiastowego przejścia na 100% powietrza zewnętrznego oraz udokumentowanymi procedurami eksploatacyjnymi i badaniami odbiorczymi.

## 7. Bibliografia


Abshire, R. L., & Dunton, H. (1981). Resistance of selected strains of Pseudomonas aeruginosa to low-intensity ultraviolet radiation. *Applied and Environmental Microbiology, 41*(6), 1419–1423. https://doi.org/10.1128/aem.41.6.1419-1423.1981

Afshari, A., Ekberg, L., Forejt, L., Mo, J., Rahimi, S., Siegel, J., Chen, W., Wargocki, P., Zurami, S., & Zhang, J. (2020). Electrostatic precipitators as an indoor air cleaner—A literature review. *Sustainability, 12*(21), Artykuł 8774. https://doi.org/10.3390/su12218774

Aghighi, A., & Haghighat, F. (2015). Evaluation of nano-titanium dioxide (TiO2) catalysts for ultraviolet photocatalytic oxidation air cleaning devices. *Journal of Environmental Chemical Engineering, 3*(3), 1622–1629. https://doi.org/10.1016/j.jece.2015.05.019

Agodi, A., Auxilia, F., Barchitta, M., Cristina, M. L., D'Alessandro, D., Mura, I., Nobile, M., & Pasquarella, C. (2015). Operating theatre ventilation systems and microbial air contamination in total joint replacement surgery: Results of the GISIO-ISChIA study. *Journal of Hospital Infection, 90*(3), 213–219. https://doi.org/10.1016/j.jhin.2015.02.014

Alexander, J. W., Van Sweringen, H., Vanoss, K., Hooker, E. A., & Edwards, M. J. (2013). Surveillance of bacterial colonization in operating rooms. *Surgical Infections, 14*(4), 345–351. https://doi.org/10.1089/sur.2012.134

Alipouriani, A., Bennett, W. C., Deverakonda, D. L., Gross, A. R., Woo, K. P., Steele, S. R., Gordon, I. O., Asfaw, S. H., & Miller, B. T. (2026). Air change setbacks and surgical outcomes and energy use in operating rooms. *JAMA Surgery, 161*(6), 651–652. https://doi.org/10.1001/jamasurg.2026.1033

Alsved, M., Civilis, A., Ekolind, P., Tammelin, A., Erichsen Andersson, A., Jakobsson, J., Svensson, T., Ramstorp, M., Sadrizadeh, S., Larsson, P.-A., Bohgard, M., Šantl-Temkiv, T., & Löndahl, J. (2018). Temperature-controlled airflow ventilation in operating rooms compared with laminar airflow and turbulent mixed airflow. *Journal of Hospital Infection, 98*(2), 181–190. https://doi.org/10.1016/j.jhin.2017.10.013

ASHRAE. (2017). Method of testing general ventilation air-cleaning devices for removal efficiency by particle size (ANSI/ASHRAE Standard 52.2-2017). *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.*

*ASHRAE*. (2021). Ventilation of health care facilities (ANSI/ASHRAE/ASHE Standard 170-2021). *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.*

*ASHRAE*. (2022). Errata sheet for ANSI/ASHRAE/ASHE Standard 170-2021: Ventilation of health care facilities. *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.*

Ang, T. N., Baroutian, S., Young, B. R., Hyland, M. M., Taylor, M., & Burrell, R. (2019). Adsorptive separation of volatile anaesthetics: A review of current developments. *Separation and Purification Technology, 211*, 491–503. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.10.012

AFNOR. (2013). Établissements de santé – Zones à environnement maîtrisé – Exigences relatives à la maîtrise de la contamination aéroportée (NF S90-351). *Association Française de Normalisation.*

AFNOR. (2019). Global French best practice guide for hospital construction and operation (AFNOR SPEC S99-120). *Association Française de Normalisation.*

Baranowska-Wójcik, E., Szwajgier, D., Oleszczuk, P., & Winiarska-Mieczan, A. (2020). Effects of titanium dioxide nanoparticles exposure on human health – A review. *Biological Trace Element Research, 193*(1), 118–129. https://doi.org/10.1007/s12011-019-01706-6

Brock-Utne, J. G., Ward, J. T., & Jaffe, R. A. (2021). Potential sources of operating room air contamination: A preliminary study. *Journal of Hospital Infection, 113*, 59–64. https://doi.org/10.1016/j.jhin.2021.04.020

Charkowska, A., Różycki, A., Lenarski, R., & Sobierajska, A. (2018). Wytyczne projektowania, wykonania, odbioru i eksploatacji systemów wentylacji i klimatyzacji dla podmiotów wykonujących działalność leczniczą. *Pracodawcy Rzeczypospolitej Polskiej*. https://www.gov.pl/web/zdrowie/materialy-pomocnicze

Claus, H. (2021). Ozone generation by ultraviolet lamps. *Photochemistry and Photobiology, 97*(3), 471–476. https://doi.org/10.1111/php.13391

Cubí, E., Salom, J., & Garrido, N. (2015). Energy-efficient ventilation control strategies for surgery rooms. *Science and Technology for the Built Environment, 21*(2), 228–237. https://doi.org/10.1080/23744731.2014.992708

Dettenkofer, M., Scherrer, M., Hoch, V., Glaser, H., Schwarzer, G., Zentner, J., & Daschner, F. D. (2003). Shutting down operating theater ventilation when the theater is not in use: Infection control and environmental aspects. *Infection Control & Hospital Epidemiology, 24*(8), 596–600. https://doi.org/10.1086/502260

DIN. (2008). Raumlufttechnik – Teil 4: Raumlufttechnische Anlagen in Gebäuden und Räumen des Gesundheitswesens (DIN 1946-4:2008-12). *Deutsches Institut für Normung.*

DIN. (2018). Raumlufttechnik – Teil 4: Raumlufttechnische Anlagen in Gebäuden und Räumen des Gesundheitswesens (DIN 1946-4:2018-09). *Deutsches Institut für Normung.*

Doyle, D. J., Byrick, R., Filipovic, D., & Cashin, F. (2002). Silica zeolite scavenging of exhaled isoflurane: A preliminary report. *Canadian Journal of Anesthesia, 49*(8), 799–804. https://doi.org/10.1007/BF03017411

Dreikausen, L., Blender, B., Trifunovic-Koenig, M., Salm, F., Bushuven, S., Gerber, B., & Henke, M. (2023). Analysis of microbial contamination during use and reprocessing of surgical instruments and sterile packaging systems. *PLOS ONE, 18*(1), Artykuł e0280595. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0280595

Edmiston, C. E., Jr., Seabrook, G. R., Cambria, R. A., Brown, K. R., Lewis, B. D., Sommers, J. R., Krepel, C. J., Wilson, P. J., Sinski, S., & Towne, J. B. (2005). Molecular epidemiology of microbial contamination in the operating room environment: Is there a risk for infection? *Surgery, 138*(4), 573–582. https://doi.org/10.1016/j.surg.2005.06.045

ECDC. (2019). Healthcare-associated infections: Surgical site infections. Annual epidemiological report for 2017. *European Centre for Disease Prevention and Control.* https://www.ecdc.europa.eu/en/publications-data/healthcare-associated-infections-surgical-site-infections-annual-1

ECDC. (2023). Healthcare-associated infections: Surgical site infections. Annual epidemiological report for 2018–2020. *European Centre for Disease Prevention and Control.* https://www.ecdc.europa.eu/en/publications-data/healthcare-associated-infections-surgical-site-annual-2018-2020

ECDC. (2024). Point prevalence survey of healthcare-associated infections and antimicrobial use in European acute care hospitals 2022–2023. *European Centre for Disease Prevention and Control.* https://www.ecdc.europa.eu/en/publications-data/PPS-HAI-AMR-acute-care-europe-2022-2023

CEN. (2012). Particulate air filters for general ventilation – Determination of the filtration performance (EN 779:2012) [Norma wycofana, zastąpiona przez EN ISO 16890]. *European Committee for Standardization.*

CEN. (2019a). Cleanrooms and associated controlled environments – Part 16: Energy efficiency in cleanrooms and separative devices (EN ISO 14644-16:2019). *European Committee for Standardization.*

CEN. (2019b). Cleanrooms and associated controlled environments – Part 3: Test methods (EN ISO 14644-3:2019). *European Committee for Standardization.*

CEN. (2019c). High efficiency air filters (EPA, HEPA and ULPA) – Part 1: Classification, performance testing, marking (EN 1822-1:2019). *European Committee for Standardization.*

Fu Shaw, L., Chen, I. H., Chen, C. S., Wu, H. H., Lai, L. S., Chen, Y. Y., & Wang, F. D. (2018). Factors influencing microbial colonies in the air of operating rooms. *BMC Infectious Diseases, 18*, 4. https://doi.org/10.1186/s12879-017-2928-1

Furmenti, M. F., Rossello, P., Bianco, S., Olivero, E., Thomas, R., Emelurumonye, I. N., Zotti, C. M., & HALT3 Italian Collaborating Group. (2019). Healthcare-associated infections and antimicrobial use in long-term care facilities (HALT3): An overview of the Italian situation. *Journal of Hospital Infection, 102*(4), 425–430. https://doi.org/10.1016/j.jhin.2019.02.007

Gallagher, M. J., Jr., Vaze, N., Gangoli, S., Vasilets, V. N., Gutsol, A. F., Milovanova, T. N., Anandan, S., Murasko, D. M., & Fridman, A. A. (2007). Rapid inactivation of airborne bacteria using atmospheric pressure dielectric barrier grating discharge. *IEEE Transactions on Plasma Science, 35*(5), 1501–1510. https://doi.org/10.1109/TPS.2007.905209

Hanzelka, P., & Horký, J. (1999). Problems of measurement of the helium boil off rate of tomographic magnets. *Cryogenics, 39*(7), 647–649. https://doi.org/10.1016/S0011-2275(99)00082-X

Katatani, A., Yahata, H., & Mizuno, A. (2010). Reduction of NOx generation from electrostatic precipitators. *International Journal of Plasma Environmental Science & Technology, 4*(1), 13–17.

Ko, G., First, M. W., & Burge, H. A. (2000). Influence of relative humidity on particle size and UV sensitivity of Serratia marcescens and Mycobacterium bovis BCG aerosols. *Tubercle and Lung Disease, 80*(4–5), 217–228. https://doi.org/10.1054/tuld.2000.0249

Kolasiński, W. (2019). Surgical site infections – review of current knowledge, methods of prevention. *Polish Journal of Surgery, 91*(4), 41–47. https://doi.org/10.5604/01.3001.0012.7253

Korachi, M., Turan, Z., Şentürk, K., Şahin, F., & Aslan, N. (2009). An investigation into the biocidal effect of high voltage AC/DC atmospheric corona discharges on bacteria, yeasts, fungi and algae. *Journal of Electrostatics, 67*(4), 678–685. https://doi.org/10.1016/j.elstat.2009.03.002

Kowalski, W. (2009). *Ultraviolet germicidal irradiation handbook: UVGI for air and surface disinfection*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-01999-9

Kowalski, W. J. (2012). *Hospital airborne infection control*. CRC Press. https://doi.org/10.1201/b11288

Lee, S.-T., Liang, C.-C., Chien, T.-Y., Wu, F.-J., Fan, K.-C., & Wan, G.-H. (2018). Effect of ventilation rate on air cleanliness and energy consumption in operation rooms at rest. *Environmental Monitoring and Assessment, 190*(3), Artykuł 178. https://doi.org/10.1007/s10661-018-6556-z

Letts, R. M., & Doermer, E. (1983). Conversation in the operating theater as a cause of airborne bacterial contamination. *The Journal of Bone and Joint Surgery. American Volume, 65*(3), 357–362.

Liang, Y., Wu, Y., Sun, K., Chen, Q., Shen, F., Zhang, J., Yao, M., Zhu, T., & Fang, J. (2012). Rapid inactivation of biological species in the air using atmospheric pressure nonthermal plasma. *Environmental Science & Technology, 46*(6), 3360–3368. https://doi.org/10.1021/es203770q

Lidwell, O. M., Lowbury, E. J. L., Whyte, W., Blowers, R., Stanley, S. J., & Lowe, D. (1983). Airborne contamination of wounds in joint replacement operations: The relationship to sepsis rates. *Journal of Hospital Infection, 4*(2), 111–131. https://doi.org/10.1016/0195-6701(83)90041-5

Lin, W. Y., Chang, Y. Y., Lien, C. T., & Kuo, C. W. (2011). Separation characteristics of submicron particles in an electrostatic precipitator with alternating electric field corona charger. *Aerosol Science and Technology, 45*(3), 393–400. https://doi.org/10.1080/02786826.2010.541530

Liu, G., Xiao, M., Zhang, X., Gal, C., Chen, X., Liu, L., Pan, S., Wu, J., Tang, L., & Clements-Croome, D. (2017). A review of air filtration technologies for sustainable and healthy building ventilation. *Sustainable Cities and Society, 32*, 375–396. https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.04.011

Luengas, A., Barona, A., Hort, C., Gallastegui, G., Platel, V., & Elias, A. (2015). A review of indoor air treatment technologies. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, 14*(3), 499–522. https://doi.org/10.1007/s11157-015-9363-9

MacNeill, A. J., Lillywhite, R., & Brown, C. J. (2017). The impact of surgery on global climate: A carbon footprinting study of operating theatres in three health systems. *The Lancet Planetary Health, 1*(9), e381–e388. https://doi.org/10.1016/S2542-5196(17)30162-6

Mamaghani, A. H., Haghighat, F., & Lee, C.-S. (2017). Photocatalytic oxidation technology for indoor environment air purification: The state-of-the-art. *Applied Catalysis B: Environmental, 203*, 247–269. https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2016.10.037

Manso Jimeno, M., Vaughan, J. T., & Geethanath, S. (2023). Superconducting magnet designs and MRI accessibility: A review. *NMR in Biomedicine, 36*(9), Artykuł e4921. https://doi.org/10.1002/nbm.4921

Martin, J. W., & Welliver, M. D. (2013). Activated charcoal adsorption of volatile anesthetic agents for anesthesia machine preparation of malignant hyperthermia susceptible patients. *AANA Journal, 81*(3), 169–171.

Mufarrih, S. H., Qureshi, N. Q., Rashid, R. H., Ahmed, B., Irfan, S., Zubairi, A. J., & Noordin, S. (2019). Microbial colonization of pneumatic tourniquets in the orthopedic operating room. *Cureus, 11*(8), Artykuł e5308. https://doi.org/10.7759/cureus.5308

Mullen, A. N., & Wieser, E. (2024). Improvement of operating room air quality and sustained reduction of surgical site infections in an orthopedic specialty hospital. *American Journal of Infection Control, 52*(2), 183–190. https://doi.org/10.1016/j.ajic.2023.05.018

Napoli, C., Marcotrigiano, V., & Montagna, M. T. (2012). Air sampling procedures to evaluate microbial contamination: A comparison between active and passive methods in operating theatres. *BMC Public Health, 12*, 594. https://doi.org/10.1186/1471-2458-12-594

NIOSH. (1977). Criteria for a recommended standard: Occupational exposure to waste anesthetic gases and vapors (National Institute for Occupational Safety and Health) Publication No. 77-140). *U.S. Department of Health, Education, and Welfare.*

NHS England. (2021). *Specialised ventilation for healthcare buildings* (Health Technical Memorandum 03-01).

NHS England. (2026). *Generating energy efficiency savings through controlling theatre ventilation* (NHS Estates Technical Bulletin No. 2026/1, PRN02301). https://www.england.nhs.uk/wp-content/uploads/2026/07/PRN02301-netb-2026-1-energy-savings-in-theatres-v1.1.pdf

Occupational Safety and Health Administration. (b.d.). *Formaldehyde* (Standard No. 1910.1048). U.S. Department of Labor. https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1910/1910.1048

Odoom, A., Tetteh-Quarcoo, P. B., & Donkor, E. S. (2025). Prevalence of hospital-acquired infections in low- and middle-income countries: Systematic review and meta-analysis. *Asia-Pacific Journal of Public Health, 37*(5), 448–466. https://doi.org/10.1177/10105395251338002

Ohsaki, Y., Koyano, S., Tachibana, M., Shibukawa, K., Kuroki, M., Yoshida, I., & Ito, Y. (2007). Undetected Bacillus pseudo-outbreak after renovation work in a teaching hospital. *Journal of Infection, 54*(6), 617–622. https://doi.org/10.1016/j.jinf.2006.10.049

Otter, J. A., Yezli, S., Salkeld, J. A. G., & French, G. L. (2013). Evidence that contaminated surfaces contribute to the transmission of hospital pathogens and an overview of strategies to address contaminated surfaces in hospital settings. *American Journal of Infection Control, 41*(5, Suppl.), S6–S11. https://doi.org/10.1016/j.ajic.2012.12.004

Peng, Z., Day, D. A., Symonds, G. A., Jenks, O. J., Stark, H., Handschy, A. V., de Gouw, J. A., & Jimenez, J. L. (2023). Significant production of ozone from germicidal UV lights at 222 nm. *Environmental Science & Technology Letters, 10*(8), 668–674. https://doi.org/10.1021/acs.estlett.3c00314

PKN. (2016). Pomieszczenia czyste i związane z nimi środowiska kontrolowane – Część 1: Klasyfikacja czystości powietrza na podstawie stężenia cząstek (PN-EN ISO 14644-1:2016). *Polski Komitet Normalizacyjny*.

PKN. (2017a). Energetyczne właściwości użytkowe budynków – Zapotrzebowanie na energię do ogrzewania i chłodzenia, wewnętrzne temperatury oraz jawne i utajone obciążenia cieplne – Część 1: Procedury obliczania (PN-EN ISO 52016-1:2017). *Polski Komitet Normalizacyjny*.

PKN. (2017b). Filtry powietrza do wentylacji ogólnej – Część 1: Specyfikacje techniczne, wymagania i system klasyfikacji oparty na skuteczności frakcyjnej (ePM) (PN-EN ISO 16890-1:2017). *Polski Komitet Normalizacyjny*.

PKN. (2021). Cleanrooms and associated controlled environments – Biocontamination control (PN-EN 17141:2021-02). *Polski Komitet Normalizacyjny*.

R3 Nordic. (2023). R3 Nordic guideline for hospital ventilation: General requirements, operating suites, and isolation rooms. https://r3nordic.org/wp-content/uploads/R3-Nordic-Guideline-for-Hospital-Ventilation_20092023.pdf

Raeiszadeh, M., & Adeli, B. (2020). A critical review on ultraviolet disinfection systems against COVID-19 outbreak: Applicability, validation, and safety considerations. *ACS Photonics, 7*(11), 2941–2951. https://doi.org/10.1021/acsphotonics.0c01245

Sadrizadeh, S., Aganovic, A., Bogdan, A., Wang, C., Afshari, A., Hartmann, A., Croitoru, C., Khan, A., Kriegel, M., Lind, M., Liu, Z., Melikov, A., Mo, J., Rotheudt, H., Yao, R., Zhang, Y., Abouali, O., Langvatn, H., Sköldenberg, O., & Cao, G. (2021). A systematic review of operating room

ventilation. *Journal of Building Engineering, 40*, Artykuł 102693. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102693

SWKI. (2015). Raumlufttechnische Anlagen in medizinisch genutzten Räumen (Planung, Realisierung, Qualifizierung, Betrieb) (SWKI VA105-01). *Schweizerischer Verein von Gebäudetechnik-Ingenieuren*.

Song, S. Y., Lim, B. R., & Ryu, T. (2015). Adsorption of desflurane by the silica gel filters in breathing circuits: An in vitro study. *Korean Journal of Anesthesiology, 68*(3), 274–280. https://doi.org/10.4097/kjae.2015.68.3.274

Spagnolo, A. M., Ottria, G., Amicizia, D., Perdelli, F., & Cristina, M. L. (2013). Operating theatre quality and prevention of surgical site infections. *Journal of Preventive Medicine and Hygiene, 54*(3), 131–137.

Suetens, C., Latour, K., Kärki, T., Ricchizzi, E., Kinross, P., Moro, M. L., Jans, B., Hopkins, S., Hansen, S., Lyytikäinen, O., Reilly, J., Deptula, A., Zingg, W., Plachouras, D., Monnet, D. L., & the Healthcare-Associated Infections Prevalence Study Group. (2018). Prevalence of healthcare-associated infections, estimated incidence and composite antimicrobial resistance index in acute care hospitals and long-term care facilities: Results from two European point prevalence surveys, 2016 to 2017. *Eurosurveillance, 23*(46), Artykuł 1800516. https://doi.org/10.2807/1560-7917.ES.2018.23.46.1800516

Szczotko, M., Orych, I., Mąka, Ł., & Solecka, J. (2022). A review of selected types of indoor air purifiers in terms of microbial air contamination reduction. *Atmosphere, 13*(5), Artykuł 800. https://doi.org/10.3390/atmos13050800

Szczotko, M., Orych, I., Mąka, Ł., & Solecka, J. (2023). Ocena skuteczności różnych typów urządzeń przeznaczonych do oczyszczania powietrza w zakresie redukcji bakterii i grzybów w powietrzu wewnętrznym w warunkach rzeczywistych. *Instal, 1*, 18–26. https://doi.org/10.36119/15.2023.1.3

Totaro, M., Costa, A. L., Casini, B., Profeti, S., Gallo, A., Frendo, L., Porretta, A., Valentini, P., Privitera, G., & Baggiani, A. (2019). Microbiological air quality in heating, ventilation and air conditioning systems of surgical and intensive care areas: The application of a disinfection procedure for dehumidification devices. *Pathogens, 8*(1), Artykuł 8. https://doi.org/10.3390/pathogens8010008

Traversari, A. A. L., Bottenheft, C., van Heumen, S. P. M., Goedhart, C. A., & Vos, M. C. (2017). Effect of switching off unidirectional downflow systems of operating theaters during prolonged inactivity on the period before the operating theater can safely be used. *American Journal of Infection Control, 45*(2), 139–144. https://doi.org/10.1016/j.ajic.2016.07.019

VDI. (2018). Raumlufttechnik, Raumluftqualität – Hygieneanforderungen an raumlufttechnische Anlagen und Geräte (VDI-Lüftungsregeln) (VDI 6022 Blatt 1). *Verein Deutscher Ingenieure*.

Wagner, J., Gormley, T., Markel, T. A., & Greeley, D. (2022). Operating room improvements based on environmental quality index risk prediction can help reduce surgical site infections. *Medical Research Archives, 10*(10). https://doi.org/10.18103/mra.v10i10.3179

Wang, C. (2005). Efficient helium recondensing using a 4K pulse tube cryocooler. *Cryogenics, 45*(12), 719–724. https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2005.06.010

Waring, M. S., Siegel, J. A., & Corsi, R. L. (2008). Ultrafine particle removal and generation by portable air cleaners. *Atmospheric Environment, 42*(20), 5003–5014. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.02.011

Whyte, W., & Eaton, T. (2015). Microbial transfer by surface contact in cleanrooms. *European Journal of Parenteral and Pharmaceutical Sciences, 20*(4), 127–131.

Whyte, W., Hambraeus, A., Laurell, G., & Hoborn, J. (1992). The relative importance of the routes and sources of wound contamination during general surgery. II. Airborne. *Journal of Hospital Infection, 22*(1), 41–54. https://doi.org/10.1016/0195-6701(92)90129-a

Whyte, W., Hodgson, R., & Tinkler, J. (1982). The importance of airborne bacterial contamination of wounds. *Journal of Hospital Infection, 3*(2), 123–135. https://doi.org/10.1016/0195-6701(82)90004-4

World Health Organization. (2010). *WHO guidelines for indoor air quality: Selected pollutants*. WHO Regional Office for Europe.

World Health Organization. (2016). *Global guidelines for the prevention of surgical site infection*.

World Health Organization. (2022). *Global report on infection prevention and control*.

Yang, K., Sun, Q., Xue, F., & Lin, D. (2011). Adsorption of volatile organic compounds by metal–organic frameworks MIL-101: Influence of molecular size and shape. *Journal of Hazardous Materials, 195*, 124–131. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.08.020

Zarzycka, A., Maassen, W., & Zeiler, W. (2019). Energy saving opportunities in operating theatres: A literature study. *REHVA Journal*, (2), 25–31. https://www.rehva.eu/rehva-journal/chapter/energy-saving-opportunities-in-operating-theatres-a-literature-study

Zhao, W., Libera, M., Prysak, M., Katz, J., & De Stefano, L. (2022). An in vitro model of microbial contamination in the operating room. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials, 110*(11), 2472–2479. https://doi.org/10.1002/jbm.b.35104

**Akty prawne**

Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Socjalnej z dnia 26 września 1997 r. w sprawie ogólnych przepisów bezpieczeństwa i higieny pracy (Dz.U. 1997 nr 129 poz. 844 z późn. zm.).

Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (t.j. Dz.U. 2022 poz. 1225 z późn. zm.).

Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 12 lipca 2006 r. w sprawie szczegółowych warunków bezpiecznej pracy ze źródłami promieniowania jonizującego (Dz.U. 2006 nr 140 poz. 994; t.j. Dz.U. 2022 poz. 967).

Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 21 sierpnia 2006 r. w sprawie szczegółowych warunków bezpiecznej pracy z urządzeniami radiologicznymi (Dz.U. 2006 nr 180 poz. 1325).

Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 11 stycznia 2023 r. w sprawie warunków bezpiecznego stosowania promieniowania jonizującego dla wszystkich rodzajów ekspozycji medycznej (Dz.U. 2023 poz. 195; t.j. Dz.U. 2025 poz. 1288).

Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 26 marca 2019 r. w sprawie szczegółowych wymagań, jakim powinny odpowiadać pomieszczenia i urządzenia podmiotu wykonującego działalność leczniczą (t.j. Dz.U. 2022 poz. 402).

Ustawa z dnia 31 lipca 2026 r. o zmianie ustawy o samorządach zawodowych architektów oraz inżynierów budownictwa oraz ustawy – Prawo budowlane (Dz.U. 2026 poz. 1161).

Ustawa z dnia 29 listopada 2000 r. – Prawo atomowe (t.j. Dz.U. 2026 poz. 1).

TechMedis – wersja do konsultacji

# POLSKIE ZRZESZENIE INŻYNIERÓW I TECHNIKÓW SANITARNYCH

Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego

NAUKA DLA SPOŁECZEŃSTWA