
Paulina Choluta*

WENTYLACJA, KLIMATYZACJA, TRANSPLANTACJA – KSZTAŁTOWANIE MIKROKLIMATU W JEDNOSTKACH ONKOLOGICZNYCH

Historia aseptyki opowiada o ewolucji praktyk higieny medycznej, w tym także o momentach przełomowych, które doprowadziły do powstania aktualnych standardów zapobiegania zakażeniom w środowisku medycznym. Prerażające statystyki ilustrują skutki braku należytej higieny w placówkach onkologicznych. Ocena czystości pomieszczeń czystych wymaga monitorowania liczby cząsteczek i mikroorganizmów w powietrzu, a także ścisłej kontroli parametrów środowiskowych, takich jak wilgotność, temperatura, oświetlenie, różnica ciśnień oraz poziom elektryczności statycznej. Te parametry są rygorystycznie regulowane i nadzorowane, tak aby utrzymać je w granicach określonych przez odpowiednie normy i standardy dotyczące zachowania aseptyki w placówkach medycznych. Badanie stabilności przepływu powietrza w placówkach onkologicznych, w których wymagane jest utrzymanie najwyższej klasy czystości powietrza, obejmuje m.in. testowanie i optymalizację systemów wentylacyjnych i filtracyjnych w kontekście zapewnienia bezpieczeństwa pacjentów. Transplantacja odgrywa istotną rolę w onkologii, ponieważ umożliwia przeszczepienie narządów lub komórek, co może być częścią terapii nowotworowej, zwłaszcza w przypadku chorób hematologicznych.

VENTILATION, AIR CONDITIONING, TRANSPLANTATION – SHAPING THE MICROCLIMATE IN ONCOLOGY UNITS

The history of aseptic practices recounts the evolution of medical hygiene practices, including pivotal moments that led to the establishment of current standards for preventing infections in the medical environment. Alarming statistics illustrate the consequences of inadequate hygiene in oncology facilities. Evaluating the cleanliness of clean rooms requires monitoring the number of particles and microorganisms in the air, as well as strict control of environmental parameters such as humidity, temperature, lighting, pressure differentials, and static electricity levels. These parameters are rigorously regulated and monitored to maintain them within the limits specified by relevant norms and standards regarding the preservation of aseptic conditions in medical facilities. Examining the stability of airflow in oncology facilities, where maintaining the highest air cleanliness class is required, includes testing and optimizing ventilation and filtration systems to ensure patient safety. Transplantation plays a significant role in oncology as it enables the transplantation of organs or cells, which may be part of cancer therapy, especially in hematological diseases.

* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Lądowej i Gospodarki Zasobami, Koło Naukowe „Kliwent”.

1. WSTĘP – KRÓTKA HISTORIA ASEPTYKI

Aseptyka to dziedzina nauki i praktyki medycznej oraz farmaceutycznej, która zajmuje się zapobieganiem zakażeniom mikroorganizmami, takimi jak bakterie, wirusy, grzyby czy pierwotniaki, przez utrzymanie odpowiednich parametrów środowiskowych [1].

Aseptyka odgrywa kluczową rolę w operacjach chirurgicznych, zabiegach medycznych, opiece nad pacjentami oraz przy produkcji i przechowywaniu leków. Jej celem jest minimalizacja ryzyka zakażeń krzyżowych oraz zapewnienie bezpieczeństwa pacjentów i personelu medycznego przez stosowanie środków dezynfekcyjnych, czystych technik pracy, a także odpowiednich procedur i wyposażenia.

W farmacji aseptyka jest istotna przy produkcji leków, szczególnie tych, które będą podawane wewnętrznie, wstrzykiwane lub aplikowane na skórę. Zapewnienie czystości podczas procesu produkcyjnego jest kluczowe dla uniknięcia zanieczyszczeń i zachowania skuteczności oraz bezpieczeństwa leków.

Osoby, które doznały złamania kończyny, zdają sobie sprawę z istotności specjalistycznego leczenia i długotrwałej rekonwalescencji, związanej z intensywnym bólem i ograniczeniem funkcji ruchowej. Około 150 lat temu złamane kończyny często wymagały interwencji amputacyjnej, co z kolei niosło za sobą poważne ryzyko śmiertelnych powikłań, zwłaszcza związanych z infekcjami spowodowanymi przez patogeny przenoszone drogą powietrzną.

Florence Nightingale (rys. 1) (ur. 12 maja 1820 roku we Florencji, zm. 13 sierpnia 1910 roku w Londynie) [1], uznawana za pionierkę pielęgniarstwa, zdawała sobie doskonale sprawę z kluczowego znaczenia czystości środowiska dla skuteczności leczenia. Uważała, że nawet najbardziej precyzyjny zabieg chirurgiczny może być nieskuteczny, jeśli nie zapewni się odpowiednich warunków sanitarnych.



Rys. 1. Fotografia przedstawiająca Florence Nightingale

Źródło: [2]

W ramach starań o utrzymanie czystości powietrza wewnątrz szpitali Nightingale sięgała po różne środki, włączając w to rozpylanie karbolu, który – z powodu nieprzyjemnego zapachu – miał zmusić personel medyczny do otwierania okien i zapewnienia właściwej wentylacji, szczególnie w okresach zimowych, gdy zamykano okna.

W tamtych latach problem braku wentylacji był utożsamiany z nieprzyjemnym zapachem. Pojawiał się w okresie zimowym, kiedy zamykano okna, które umożliwiały napływ zimnego powietrza zewnętrznego, celem ograniczenia strat ciepła. W efekcie brakowało wymiany powietrza w pomieszczeniu. Nightingale miała nadzieję, że rozpylanie karbolu w sali operacyjnej zmusi chirurgów do otwierania okien z powodu towarzyszącego rozpylaniu nieprzyjemnego zapachu. Sama proponowała następującą metodę wentylowania pomieszczeń zimą: wlot powietrza do pomieszczenia przez okno uchylone tuż przy suficie, zaś wylot – na poziomie podłogi, przez ciąg kominkowy dostarczający powietrza potrzebnego do spalania [1]. Warto zaznaczyć, że w Anglii i Szkocji w tamtych czasach najpopularniejszym sposobem ogrzewania pomieszczeń było właśnie korzystanie z kominków. Propozycja Florence Nightingale, opierająca się na wykorzystaniu kominkowego ciągu powietrza do wentylacji, może być uznana za pionierskie podejście do organizacji wymiany powietrza w salach operacyjnych.

2. STATYSTYKI WHO

Dane statystyczne WHO (World Health Organization) wskazują na znaczący problem związany z czystością powietrza w szpitalach, zwłaszcza w salach operacyjnych, co stanowi istotne zagrożenie dla pacjentów. Szacuje się, że na całym świecie co najmniej 10% operowanych pacjentów doświadcza zakażeń, z których 3–5% prowadzi bezpośrednio do zgonu, a kolejne 8% stanowi przyczynę zgonów wtórnych. W Polsce rocznie liczba zgonów z tego powodu wynosi prawdopodobnie między 74 tys. a 88 tys. [3].

W krajach takich jak Francja od 6% do 10% pacjentów doznaje infekcji podczas pobytu w szpitalu, co stanowi między 60 tys. a 100 tys. przypadków rocznie. Te dane alarmująco przypominają o skali problemu, porównywalnej z liczbą ofiar śmiertelnych wypadków samochodowych. W raporcie brytyjskiego rządu z 2000 roku podkreślono, że rocznie w Szkocji więcej osób umiera z powodu infekcji pooperacyjnych niż w wypadkach samochodowych. W USA dane z tego samego roku pokazują, że 1,8 mln Amerykanów doświadcza infekcji w wyniku zabiegów operacyjnych, z czego 5% kończy się zgonem (co daje około 88 tys. osób) [4].

Oprócz licznych regulacji dotyczących systemów zapobiegających przenoszeniu zakażeń obecnie coraz większe znaczenie przypisuje się urządzeniom, które mają bezpośredni wpływ na mikroklimat w pomieszczeniach szpitalnych, zwłaszcza systemom wentylacyjnym i klimatyzacyjnym. Klimatyzacja sal operacyjnych oraz całościowych bloków operacyjnych jest uważana za niezbędną infrastrukturę technologiczną.

3. CLEANROOM – MIKROKLIMAT POMIESZCZEŃ CZYSTYCH

Cleanroom, znany także jako pomieszczenie czyste (rys. 2), to specjalnie zaprojektowane i utrzymane miejsce, gdzie kontrola liczby cząsteczek oraz mikroorganizmów w powietrzu, a także parametry środowiskowe, takie jak wilgotność powietrza, temperatura, oświetlenie,

różnica ciśnień oraz poziom elektryczności statycznej, są surowo regulowane i monitorowane w celu zapewnienia, że pozostają one w granicach dopuszczalnych określonych przez normy takie jak ISO 14644 [5, 6].



Rys. 2. Pracownicy na stanowisku do sterylizowania odzieży medycznej (firma Bardush)

Źródło: [7]

Pomieszczenia czyste pełnią ważną rolę w ochronie produktów znajdujących się w ich wnętrzu przed zanieczyszczeniami pochodzącymi z powietrza, które mogą mieć postać cząstek stałych, mikroorganizmów czy też innych substancji, co wpływa na jakość produktów. Ważną cechą cleanroomów jest także ich zdolność do utrzymania stabilnego mikroklimatu, który jest istotny dla zachowania czystości i kontrolowanych warunków produkcyjnych. Przez precyzyjną kontrolę parametrów takich jak wilgotność, temperatura, oświetlenie, różnica ciśnień oraz poziom elektryczności statycznej cleanroomy zapewniają optymalne warunki dla procesów produkcyjnych oraz zachowanie czystości środowiska [6].

Stabilny mikroklimat w cleanroomach ma istotne znaczenie dla zapobiegania zanieczyszczeniom i utrzymania wysokiej jakości produkowanych artykułów. Dodatkowo kontrolowane warunki mikroklimatyczne sprzyjają również komfortowi pracy personelu oraz efektywności procesów produkcyjnych. Dlatego też, oprócz kontroli liczby cząstek i mikroorganizmów w powietrzu, utrzymanie odpowiedniego mikroklimatu jest bardzo ważne dla zapewnienia skuteczności cleanroomów oraz osiągnięcia zamierzonych celów produkcyjnych. W cleanroomach wszelkie działania i procesy są realizowane w kontrolowanych, wolnych od zanieczyszczeń warunkach, co jest kluczowe dla branż, gdzie czystość i jakość produktu są niezwykle istotne, takich jak przemysł farmaceutyczny, elektroniczny czy produkcja żywności [8].

Dzięki rygorystycznej kontroli środowiska w cleanroomach możliwe jest zapewnienie wysokiej jakości produktów oraz minimalizacja ryzyka zanieczyszczeń, co ma duże znaczenie dla bezpieczeństwa konsumentów oraz spełnienia wymagań regulacyjnych i standardów branżowych. Pomieszczenia czyste w jednostkach onkologicznych są niezbędne dla utrzymania sterylnego środowiska w celu minimalizacji ryzyka infekcji, zwłaszcza u pacjentów z osłabionym układem odpornościowym poddawanych leczeniu bądź transplantacji. Tego rodzaju środowiska zapewniają ścisłą kontrolę cząstek unoszących się w powietrzu i mikroorganizmów, aby chronić zdrowie i dobrostan pacjentów.

4. TRANSPLANTACJA I WARUNKI ŚRODOWISKOWE

Transplantacja narządów to złożony proces medyczny, który wymaga precyzyjnie kontrolowanych warunków środowiskowych w celu zapewnienia sukcesu zabiegu oraz minimalizacji ryzyka infekcji i odrzutu przeszczepu (rys. 3). Istotną rolę w tym procesie odgrywają czyste powietrze oraz efektywna wentylacja i klimatyzacja, które mają istotny wpływ zarówno na stan pacjenta, jak i przeszczepiany narząd.

Czyste powietrze jest istotnym czynnikiem w zapobieganiu zakażeniom podczas procesu transplantacji. Wysoka jakość powietrza wolnego od zanieczyszczeń, pyłów oraz drobnoustrojów jest niezbędna dla zapewnienia optymalnych warunków sanitarnych w salach operacyjnych i oddziałach transplantacyjnych. W związku z tym stosuje się zaawansowane filtry, takie jak filtry HEPA (*high efficiency particulate air*) lub ULPA (*ultra-low penetration air*), które skutecznie eliminują drobnoustroje i alergenów z powietrza. W tabelach 1 i 2 zamieszczono klasyfikację filtrów zaproponowaną przez Eurovent.

Tabela 1. Porównanie klasyfikacji filtrów przeciwpyłowych dla wentylacji ogólnej

Klasa filtra (PN-EN 779:2012E)	Skuteczność filtracji dla klas filtrów od M5 do F9 na podstawie testów opisanych w PN-EN ISO 16890-1:2017E [%]		
	test dla cząstek		
	ePM ₁ (0,3–1,0 μm)	ePM _{2,5} (0,3–2,5 μm)	ePM ₁₀ (0,3–10 μm)
M5	5–35	10–45	40–70
M6	10–40	20–50	60–80
F7	40–65	65–75	80–90
F8	65–90	75–95	90–100
F9	80–90	85–95	90–100

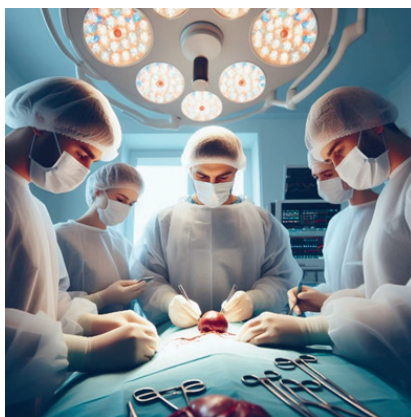
Źródło: [7]

Skuteczna wentylacja i klimatyzacja są nieodłącznym elementem zapewnienia bezpieczeństwa i komfortu podczas zabiegów transplantacji. Odpowiednia cyrkulacja powietrza zapewnia równomierne rozprowadzenie czystego powietrza w całym pomieszczeniu, minimalizując ryzyko przeniesienia drobnoustrojów oraz utrzymując optymalną temperaturę i wilgotność, co jest kluczowe dla kondycji pacjenta oraz zachowania prawidłowej funkcji przeszczepionego narządu.

Tabela 2. Klasyfikacja skutecznych i wysoko skutecznych filtrów powietrza

Grupa filtrów	Klasa filtra				Wartość całkowita [%]		Wartość miejscowa [%]	
	PN-EN 1822-1 2009		ISO 29463-1		skuteczność dla cząstek MPPS	penetracja dla cząstek MPPS	skuteczność dla cząstek MPPS	penetracja dla cząstek MPPS
	klasa	test	klasa	test	ISO 29463-1			
EPA	E10	–	–	–	≥ 85	≤ 15	–	–
	E11	–	ISO 15E	MPPS	≥ 95	≤ 5	–	–
	–	–	ISO 20E	MPPS	≥ 99	≤ 1	–	–
	E12	–	ISO 25E	MPPS	$\geq 95,5$	$\leq 0,5$	–	–
	–	–	ISO 30E	MPPS	$\geq 95,9$	$\leq 0,1$	–	–
HEPA	H13	MPPS	ISO 35E	MPPS	$\geq 99,95$	$\leq 0,05$	$\geq 99,5$	$\leq 0,25$
	–	MPPS	ISO 40E	MPPS	$\geq 99,99$	$\leq 0,01$	$\geq 99,95$	$\leq 0,05$
	H14	MPPS	ISO 45E	MPPS	$\geq 99,995$	$\leq 0,005$	$\geq 99,975$	$\leq 0,025$
	–	MPPS	ISO 50E	MPPS	$\geq 99,999$	$\leq 0,001$	$\geq 99,995$	$\leq 0,005$
ULPA	U15	MPPS	ISO 55E	MPPS	$\geq 99,9995$	$\leq 0,0005$	$\geq 99,9975$	$\leq 0,0025$
	–	MPPS	ISO 60E	MPPS	$\geq 99,9999$	$\leq 0,0001$	$\geq 99,9995$	$\leq 0,0005$
	U16	MPPS	ISO 65E	MPPS	$\geq 99,99995$	$\leq 0,00005$	$\geq 99,99975$	$\leq 0,00025$
	–	MPPS	ISO 70E	MPPS	$\geq 99,99999$	$\leq 0,00001$	$\geq 99,9999$	$\leq 0,0001$
	U17	MPPS	ISO 75E	MPPS	$\geq 99,999995$	$\leq 0,000005$	$\geq 99,9999$	$\leq 0,0001$

Źródło: [7]

**Rys. 3.** Zabieg przeszczepu narządu

Źródło: zdjęcie wygenerowane przez sztuczną inteligencję (Microsoft Bing)

Pomieszczenia przeznaczone do przeprowadzania zabiegów transplantacji muszą być ściśle kontrolowane pod względem czystości powietrza, wilgotności i temperatury. Systemy monitorujące parametry środowiskowe pozwalają na ciągłą ocenę warunków i natychmiastowe reagowanie w przypadku ich odchylenia od normy. Dzięki temu minimalizowane jest ryzyko zakażeń i zapewniana jest optymalna jakość opieki dla pacjentów poddających się transplantacji.

Niezwykle istotne są również innowacyjne rozwiązania technologiczne, które wspierają proces transplantacji przez udoskonalenie systemów wentylacji i klimatyzacji. Przykładowo rozwój inteligentnych systemów sterowania pozwala na automatyczną regulację parametrów środowiskowych w czasie rzeczywistym, co zwiększa efektywność i bezpieczeństwo przeprowadzanych zabiegów.

W procesie transplantacji narządów istotne są czynniki środowiskowe: czyste powietrze, wentylacja i klimatyzacja. Środowisko operacyjne musi być starannie kontrolowane, aby zapewnić optymalne warunki zarówno dla pacjenta, jak i przeszczepianego narządu. Eliminacja zanieczyszczeń i drobnoustrojów z powietrza przy użyciu zaawansowanych filtrów jest kluczowa dla zapobiegania infekcjom i minimalizacji ryzyka odrzutu przeszczepu. Skuteczna wentylacja i klimatyzacja pomagają utrzymać stabilną temperaturę i wilgotność, co jest istotne dla powodzenia zabiegu. Wdrażanie nowoczesnych rozwiązań technologicznych, które umożliwiają monitorowanie i kontrolę warunków środowiskowych w czasie rzeczywistym, przyczynia się do poprawy bezpieczeństwa i efektywności procesu transplantacji.

5. PERSPEKTYWY ROZWOJU KONTROLI MIKROKLIMATU W ONKOLOGII

Współczesne badania nad mikroklimatem w kontekście leczenia onkologicznego wyznaczają nowe kierunki rozwoju w zakresie zapewnienia optymalnych warunków środowiskowych pacjentom poddawanych terapii przeciwnowotworowej. Dążenie do poprawy mikroklimatu w onkologii obejmuje zarówno aspekty fizyczne, takie jak kontrola temperatury i wilgotności, jak i eliminację potencjalnych czynników zakaźnych z otoczenia pacjentów.

Technologie oczyszczania powietrza

Wdrażane są zaawansowane systemy wentylacji i klimatyzacji, wyposażone w filtry wysokiej jakości, które skutecznie eliminują cząstki zanieczyszczeń z powietrza w salach onkologicznych. Wykorzystanie nowoczesnych filtrów HEPA zapewnia redukcję ilości pyłów, wirusów i bakterii, co jest kluczowe dla zapobiegania infekcjom u pacjentów z osłabionym układem odpornościowym.

Kontrola temperatury i wilgotności

Niezmiennie istotnym aspektem jest utrzymanie stabilnych warunków temperaturowych i wilgotnościowych. Badania sugerują, że może to wpływać na samopoczucie pacjentów oraz skuteczność terapii. W związku z tym rozwijane są systemy monitorowania i automatycznej regulacji temperatury oraz wilgotności, które pozwalają na precyzyjne dostosowanie warunków do indywidualnych potrzeb pacjentów.

Innowacyjne materiały budowlane

W budownictwie szpitalnym coraz częściej stosuje się innowacyjne materiały o właściwościach antybakteryjnych i antyalergicznym, które minimalizują ryzyko zakażeń krzyżowych oraz reakcji alergicznych u pacjentów. Powierzchnie łatwe do dezynfekcji oraz ochrona przed rozwojem pleśni i grzybów stanowią istotny czynnik poprawy mikroklimatu w onkologii.

Integracja z terapią farmakologiczną

Perspektywy rozwoju mikroklimatu w onkologii obejmują również integrację innowacyjnych rozwiązań z terapią farmakologiczną. Badania na przykład nad terapią fotodynamiczną wykorzystującą światło w celu niszczenia komórek nowotworowych wskazują na ścisły związek między optymalnymi warunkami środowiskowymi a skutecznością terapii [9].

6. PODSUMOWANIE

Podsumowując przedstawione rozważania, można stwierdzić, że czyste powietrze, skuteczna wentylacja i klimatyzacja odgrywają kluczową rolę w procesie transplantacji, wpływając zarówno na bezpieczeństwo pacjenta, jak i sukces zabiegu. Wdrażanie zaawansowanych technologii oraz ścisła kontrola warunków środowiskowych w pomieszczeniach transplantacyjnych są niezbędne dla zapewnienia optymalnych warunków i maksymalnej skuteczności tego skomplikowanego procesu medycznego.

Zagadnienie pomieszczeń czystych jest bardzo złożone. Nie ma jednej konkretnej reguły ani tym bardziej schematu prac. Każdy przeszczep niesie bardzo wysokie ryzyko powikłań, dlatego trzeba zapewnić jak najlepsze warunki, w których planowana operacja ma się odbywać. W Polsce powstaje nowe Dolnośląskie Centrum Onkologii, Pulmonologii i Hematologii we Wrocławiu, gdzie zaprojektowano około 15 sal typu cleanroom. Należy pamiętać, że każdy cleanroom może być salą operacyjną, lecz nie każda sala operacyjna jest cleanroomem.

Podziękowania

Artykuł powstał na podstawie wygłoszonego podczas 64. Barbórkowej Konferencji Studenckich Kół Naukowych AGH referatu, który zajął pierwsze miejsce w sekcji X – Wentylacja, Klimatyzacja, Ogrzewnictwo. Serdeczne podziękowania kierujemy do firmy inżynierskiej I.K.A-Technik Inżynieria Przemysłu oraz firmy farmaceutycznej Teva.

LITERATURA

- [1] Nightingale F., *Notes on Nursing. What It Is and What It Is Not*, Churchill Livingstone, Edinburgh 1980.
- [2] Usidus M., *Panteon bohaterów medycyny: Florence Nightingale*, <https://oczymbokarze.pl/styl-zycia/swiat-wokol-nas/4099-panteon-bohaterow-medycyny-florence-nightingale> [dostęp: 19.03.2024].

- [3] Kulik A., *Zaraza*, Wprost, nr 37, 1996, s. 65–66.
- [4] Hughes S.P.F., Anderson F.M., *Infection in the operating room*, The Journal of Bone & Joint Surgery (Br), vol. 81-B, no. 5, 1999, s. 754–755, <https://doi.org/10.1302/0301-620X.81B5.0810754>.
- [5] PN-EN ISO 14644-1:2016-03, *Pomieszczenia czyste i związane z nimi środowiska kontrolowane – Część 1: Klasyfikacja czystości powietrza na podstawie stężenia cząstek*.
- [6] Chołota P., *Cleanroom – Istota wentylacji i klimatyzacji w pomieszczeniach czystych i sterylnych*, [w:] Bogacz P. (red.), *Artykuły Laureatów 63. Barbórkowej Konferencji Studenckich Kół Naukowych AGH*, Wydawnictwa AGH, Kraków 2023, s. 7–19.
- [7] Charkowska A., *Nowa klasyfikacja wysokoskutecznych filtrów powietrza*, <https://www.rynekinstalacyjny.pl/artukul/centrale-wentylacyjno-klimatyzacyjne/37488,nowa-klasyfikacja-wysokoskutecznych-filtrow-powietrza> [dostęp: 11.02.2024].
- [8] Jackiewicz B., *Dokumentacja sanitarna według zasad Dobrej Praktyki Produkcyjnej (GMP) i Dobrej Praktyki Higienicznej (GHP). Instrukcje, zapisy. Zakłady żywienia zbiorowego*, Ośrodek Doradztwa i Doskonalenia Kadr, Gdańsk.
- [9] Krzakowski M., Potemski P., Warzocha K., Wysocki P. (red.), *Onkologia kliniczna. Tom 1*, Via Medica, Gdańsk 2014.