



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



Politechnika Świętokrzyska
Wydział Inżynierii Środowiska Geodezji i Energetyki
Odnawialnej

Kierunek studiów:
Inżynieria Środowiska

Sylwia Wciślik

Materiały dydaktyczne do przedmiotu

INŻYNIERIA ŚRODOWISKA WEWNĘTRZNEGO

opracowane w ramach realizacji Projektu
**„Dostosowanie kształcenia
w Politechnice Świętokrzyskiej do potrzeb
współczesnej gospodarki”**
FERS.01.05-IP.08-0234/23

Kielce, 2025



Politechnika Świętokrzyska
Kielce University of Technology

Projekt „Dostosowanie kształcenia w Politechnice Świętokrzyskiej do potrzeb współczesnej gospodarki”
nr FERS.01.05-IP.08-0234/23



Spis treści

1. Wstęp	2
2. Pomieszczenia czyste – definicje i klasyfikacje	2
2.1. Obszary zastosowań pomieszczeń czystych.....	2
2.2. Klasyfikacja pomieszczeń czystych według PN-EN ISO 14644-1	6
2.3. Klasyfikacja pomieszczeń czystych według GMP.....	9
2.4. Inne regulacje normatywne	11
3. Wymagania stawiane systemom HVAC w pomieszczeniach czystych	11
3.1. Wymagania projektowe dla systemów HVAC.....	12
4. Studium przypadku	27
4.1. Wentylacja laboratorium chemicznego	27
4.1.1. Projekt koncepcyjny wentylacji dla laboratorium chemicznego	28
Spis literatury	38



Materiały dydaktyczne objęte licencją Creative Commons BY 4.0.

Licencja dostępna pod adresem: <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



1. Wstęp

Pomieszczenia czyste (z ang. *clean rooms*) odgrywają ważną rolę w wielu gałęziach medycyny i przemysłu, wszędzie tam, gdzie niezbędna jest kontrola zanieczyszczeń oraz parametrów powietrza wewnętrznego. Pomieszczenia takie są projektowane i eksploatowane w celu ograniczenia obecności mikroorganizmów, cząstek stałych, oparów chemicznych i innych patogennych czy potencjalnych zanieczyszczeń. Systemy i instalacje HVAC (z ang. *Heating, Ventilation and Air Conditioning*) są kluczowymi komponentami zapewniającymi odpowiednią klasę czystości oraz wymagane warunki termiczne i wilgotnościowe.

Celem niniejszego skryptu jest przybliżenie studentom zaawansowanych aspektów projektowania i eksploatacji systemów wentylacyjnych w pomieszczeniach czystych.

2. Pomieszczenia czyste – definicje i klasyfikacje

Pomieszczenie czyste definiuje się jako specjalistyczną przestrzeń technologiczną, w której utrzymywane są bardzo ściśle kontrolowane warunki środowiskowe [1]. Kluczowym parametrem jest stężenie zanieczyszczeń obecnych w powietrzu, takich jak cząstki pyłu, mikroorganizmy, opary chemiczne czy aerozole; mogą one negatywnie wpłynąć na prowadzone procesy produkcyjne, prace medyczne lub badawcze. W pomieszczeniach czystych kontroli podlega także temperatura, wilgotność, ciśnienie oraz kierunek i prędkość przepływu powietrza. Zapewnia to optymalne warunki pracy i minimalizuje ryzyko kontaminacji krzyżowej. Konstrukcja pomieszczeń obejmuje specjalne systemy wentylacyjne z filtracją powietrza (HEPA lub ULPA), bardzo szczelne przegrody, systemy nadciśnieniowe lub podciśnieniowe oraz systemy słuz i strefowania [1-17]. W zależności od przeznaczenia i wymaganego poziomu czystości powietrza, pomieszczenia te są klasyfikowane zgodnie z normami ISO [1-17] lub GMP [18].

2.1. Obszary zastosowań pomieszczeń czystych

Pomieszczenia czyste spotyka się w wielu gałęziach przemysłu, a także w sektorze ochrony zdrowia. Ich głównym zadaniem jest zapewnienie ściśle kontrolowanego środowiska, co umożliwia prowadzenie procesów wrażliwych na obecność zanieczyszczeń, zarówno biologicznych, chemicznych, a także mechanicznych. W zależności od wymagań dotyczących czystości, czy specyfiki branży projektuje się różne klasy pomieszczeń czystych. Poniżej przedstawiono najważniejsze obszary ich zastosowania wraz z ich ogólną charakterystyką.

- **Farmacja i biotechnologia**

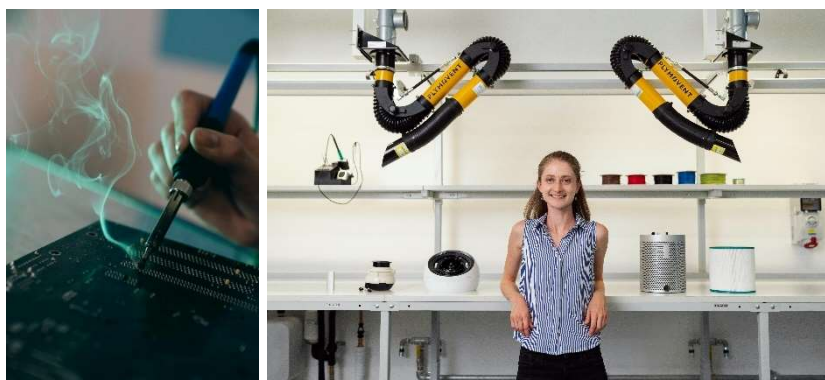
W tych branżach, pomieszczenia czyste (Rys. 1) są wykorzystywane do produkcji szczepionek, czy leków, ale także terapii genowych, gdzie konieczne jest zapewnienie środowiska wolnego od cząstek mogących zakłócić proces produkcji, mikroorganizmów lub też wpłynąć niekorzystnie na jakość wyrobu. Znajdują tu zastosowanie szczególnie klasy czystości Grade A i B zgodnie z wytycznymi GMP [18], które szczegółowo zdefiniowano w rozdziale 2.3.



Rys. 1. Przykład pomieszczenia czystego – farmacja i biotechnologia [zdjęcie do wykorzystania bezpłatnie z <https://pixabay.com/pl/>].

[Tekst alternatywny. Na rysunku pokazano przykładowe laboratorium farmaceutyczne lub biotechnologiczne ze szkłem laboratoryjnym rozstawionym na stołach, laptopem oraz mikroskopem.]

- **Przemysł elektroniczny** (np. produkcja mikroukładów, płytek PCB, itp.) Środowisko produkcji półprzewodników i elektroniki precyzyjnej wymaga bardzo czystego powietrza, gdyż nawet najmniejsze wtrącenia biologiczne mogą prowadzić do uszkodzenia komponentów elektronicznych. Zazwyczaj są to pomieszczenia klasy ISO 5 lub wyższej, w których przewidziano nawiew laminarny (Rys. 2).



Rys. 2. Przykład pomieszczenia czystego – przemysł elektroniczny [zdjęcia do wykorzystania bezpłatnie z <https://www.pexels.com>].

[Tekst alternatywny. Na zdjęciach (jest ich dwa) pokazano przykładowe laboratorium przemysłu elektronicznego; ręka badacza wypala układ scalony - widoczny jest dym; na drugim zdjęciu widać ramiona odciągające zanieczyszczenia stanowiące elementy instalacji odciągów miejscowych; są w kolorze czarno-żółtym. Na stołach widoczne są elementy badawcze, jak kamera oraz bęben prawdopodobnie do zapisu danych. Na środku stoi uśmiechnięta, młoda dziewczyna.]

- **Laboratoria biologii molekularnej**

W laboratoriach, gdzie analizuje się materiał genetyczny, prowadzone są badania nad klonowaniem lub prowadzi się diagnostykę molekularną, pomieszczenia czyste chronią próbki przed kontaminacją, ale też personel przed ekspozycją na niebezpieczne patogeny i wirusy (Rys. 3). Często stosuje się w takich przypadkach strefowanie przestrzeni wraz ze ścisłą kontrolą przepływu powietrza i ciśnienia.

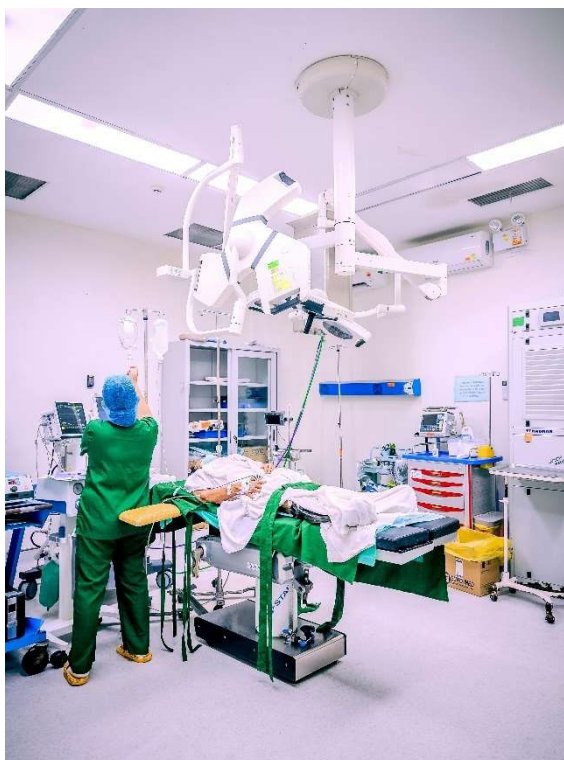


Rys. 3. Przykład pomieszczenia czystego – laboratorium biologiczne [zdjęcie do wykorzystania bezpłatnie z <https://www.pexels.com>].

[Tekst alternatywny. Na zdjęciu pokazano przykładowe laboratorium biologiczne ze stołem oraz elementami odciągów miejscowych; widać także zaszkłone mleczną szybą, osobne kabiny laboratoryjne; zdjęcie zrobione jest w kolorach sepii.]

- **Bloki operacyjne, oddziały intensywnej terapii**

W medycynie, pomieszczenia czyste mają bardzo istotne znaczenie dla zachowania bezpieczeństwa pacjentów, szczególnie podczas intensywnej terapii, czy zabiegów chirurgicznych. W salach operacyjnych stosuje się najczęściej sufity laminarne nawiewne i systemy filtracji HEPA, w celu ograniczenia ryzyka infekcji wewnątrzszpitalnych (Rys. 4).



Rys. 4. Przykład pomieszczenia czystego – blok operacyjny [zdjęcie do wykorzystania bezpłatnie z <https://www.pexels.com>].

[Tekst alternatywny. Na zdjęciu pokazano blok operacyjny; na stole operacyjnym leży pacjent; nie widać jego twarzy, tylko ręce, do których podłączone są wenflony; jest przykryty białym prześcieradłem; obok stoi osoba z personelu medycznego ubrana w zielony kitel oraz niebieski czepek ochronny, stoi tyłem, podłącza kroplówkę; w tle aparatura badawcza i pomiarowa, szafa prawdopodobnie na leki lub inny sprzęt medyczny oraz papierowe pudełko z żółtym workiem.]



2.2. Klasyfikacja pomieszczeń czystych według PN-EN ISO 14644-1

Ze względu na konieczność utrzymania określonej jakości i czystości powietrza, pomieszczenia czyste są klasyfikowane według standardu międzynarodowej normy PN-EN ISO 14644-1 [1]. Określa ona maksymalne dopuszczalne stężenie cząstek o różnych rozmiarach przypadające na jednostkę objętości powietrza. Klasa pomieszczenia determinuje jego przydatność do różnych procesów technologicznych, a także wpływa na wymagania dotyczące projektowania i wykonawstwa systemów HVAC, monitoringu oraz filtracji.

W Tabeli 1 przedstawiono uproszczoną systematykę maksymalnych stężeń cząstek stałych o średnicy od $\geq 0,2$ do $\geq 5,0$ μm dla zdefiniowanych wg standardu ISO klas czystości. Tabela 1 ilustruje, jak bardzo dopuszczalne zanieczyszczenie powietrza różni się

w odniesieniu do klasy – od niemal absolutnej czystości (ISO 1), gdzie liczba cząstek jest minimalna, po klasę ISO 8, gdzie dopuszczalna jest obecność milionów cząstek w 1m^3 powietrza. Dane te są kluczowe dla projektantów instalacji HVAC oraz dla użytkowników pomieszczeń czystych. Warunkują one konieczne parametry filtracji, ilości wymian powietrza oraz ciśnienie różnicowe pomiędzy strefami.

Tabela 1. Klasyfikacja pomieszczeń czystych zgodnie ze standardem PN-EN ISO 14644 [1].

Klasa ISO	Maks. liczba cząstek/ m^3 ($\geq 0,1 \mu\text{m}$)	($\geq 0,2 \mu\text{m}$)	($\geq 0,3 \mu\text{m}$)	($\geq 0,5 \mu\text{m}$)	($\geq 1,0 \mu\text{m}$)	($\geq 5,0 \mu\text{m}$)
ISO 1	10	2	–	–	–	–
ISO 2	100	24	10	4	–	–
ISO 3	1 000	237	102	35	8	–
ISO 4	10 000	2 370	1 020	352	83	–
ISO 5	100 000	23 700	10 200	3 520	832	29
ISO 6	1 000 000	237 000	102 000	35 200	8 320	293
ISO 7	–	–	–	352 000	83 200	2 930
ISO 8	–	–	–	3 520 000	832 000	29 300
ISO 9	–	–	–	35 200 000	8 320 000	293 000

Ze względu na to, że zbiór norm PN-EN ISO 14644 [1-17] uwzględnia tak szeroki zakres rozmiarów cząstek, pozwala to na bardzo precyzyjną ocenę czystości powietrza wewnętrznego. Klasyfikacja ta jest przydatna nie tylko dla celów projektowych, ale także w celu walidacji oraz okresowego monitoringu stanu środowiska wewnętrznego w pomieszczeniach czystych.

Dla przykładu, pomieszczenia klasy ISO 5 wymagają zastosowania nawiewu laminarnego i filtrów HEPA H14, podczas gdy klasy ISO 7 czy ISO 8 mogą być



wentylowane turbulentnie z zastosowaniem filtrów niższej klasy. Z kolei dla ISO 1 dozwolonych jest maksymalnie 10 cząstek o rozmiarze $\geq 0,1 \mu\text{m}$ na m^3 . Dla cząstek $\geq 0,3 \mu\text{m}$ i większych, limit wynosi zero czyli nie mogą być obecne w ogóle. To oznacza, że pomieszczenia klasy ISO 1 muszą być ekstremalnie czyste i są stosowane jedynie w najbardziej wrażliwych procesach, np. przy produkcji mikroprocesorów lub komponentów półprzewodnikowych.

Z uwagi na bardzo rozbudowane treści normy ISO 14644, w Tabeli 2 przedstawiono jak korzystać z poszczególnych części tej normy, w zależności od celu lub zastosowania. Tabela 2 pomoże przyszłemu projektantowi zorientować się, która część normy odpowiada na konkretne potrzeby – od projektowania pomieszczeń czystych, przez kontrolę czystości, aż po ocenę urządzeń oraz materiałów.

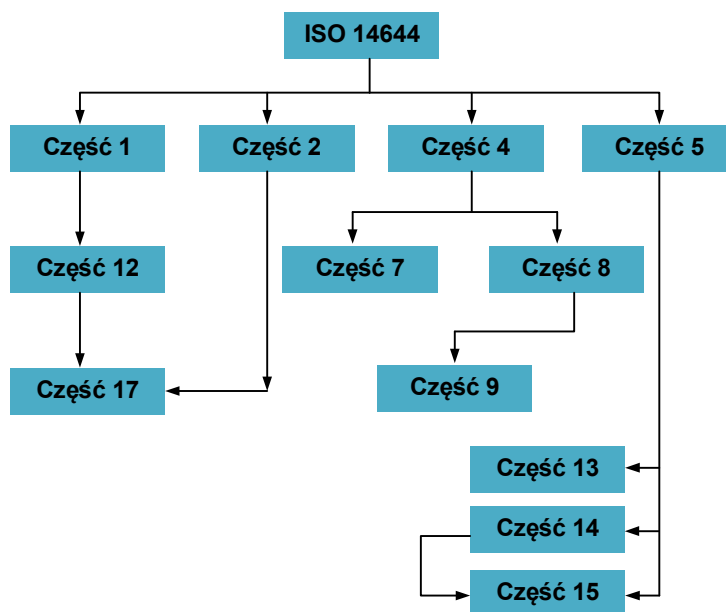
Tabela 2. Zastosowanie poszczególnych części normy PN-EN ISO 14644 [1].

Cel / zastosowanie	Odpowiednia część PN-EN ISO 14644	Opis zakresu poszczególnej części normy
Klasyfikacja czystości powietrza w pomieszczeniu	PN-EN ISO 14644-1 [1]	Determinuje klasy czystości powietrza na podstawie stężenia cząstek (od klasy ISO 1 do ISO 9), metody pomiaru i kryteria kwalifikacji.
Monitorowanie czystości w eksploatowanym pomieszczeniu	PN-EN ISO 14644-2 [2]	Zawiera wskazówki dot. monitorowania czystości powietrza (cząstek), częstości pomiarów, oceny zgodności i reakcji na odstępstwa.
Pomiary i testy kwalifikacyjne	PN-EN ISO 14644-3 [3]	Opisuje m.in. szczegółowe procedury testowe, np. szczelności filtrów HEPA, równomierności przepływu powietrza, czasu powrotu czystości.
Projektowanie i budowa pomieszczenia czystego	PN-EN ISO 14644-4 [4]	Zawiera wytyczne projektowe, konstrukcyjne i uruchomieniowe, podpowiada, co uwzględnić przy tworzeniu <i>cleanroomu</i> (m.in. materiały, systemy HVAC, układ funkcjonalny).
Organizacja pracy i zasady operacyjne w pomieszczeniu czystym	PN-EN ISO 14644-5 [5]	Opisuje dobre praktyki odnośnie personelu, stroju, procedur wejścia/wyjścia, czyszczenia, przenoszenia różnych materiałów oraz pracy w środowisku czystym.
Urządzenia typu LAF (m.in. komory laminarne, izolatki, rękawice ochronne)	PN-EN ISO 14644-7 [6]	Pokazuje klasyfikację oraz wymagania dotyczące urządzeń separujących, które zapewniają lokalną czystość (m.in. komory z przepływem laminarnym, tzw. <i>gloveboxy</i>).
Klasyfikacja czystości chemicznej powietrza (m.in. gazy i lotne zanieczyszczenia)	ISO 14644-8 [7]	Opisuje klasy czystości powietrza pod względem stężeń zanieczyszczeń chemicznych (ACC), szczególnie istotne w przemyśle półprzewodnikowym i elektronicznym.



Czystość powierzchni pod względem cząstek stałych	PN-EN ISO 14644-9 [8]	Określa metody klasyfikacji czystości powierzchni (m.in. podłóg, ścian, urządzeń) na podstawie stężenia osadzonych cząstek.
Czystość powierzchni pod względem zanieczyszczeń chemicznych	PN-EN ISO 14644-10 [9]	Determinuje klasyfikację powierzchni ze względu na obecność zanieczyszczeń chemicznych (m.in. metali, pozostałości po czyszczeniu, osadów).
Cząstki o rozmiarach nanometrycznych	ISO 14644-12 [10]	Wskazuje na metody i klasyfikację powietrza ze względu na cząstki o rozmiarach <100 nm – przydatne m.in. w nanotechnologii i nowoczesnych laboratoriach zaawansowanych.
Skuteczne czyszczenie powierzchni	ISO 14644-13 [11]	Wskazania odnośnie metod czyszczenia różnych powierzchni, w celu uzyskania wymaganych poziomów czystości cząstkowej i chemicznej.
Ocena urządzeń pod kątem emisji cząstek	ISO 14644-14 [12]	Wskazówki dotyczące testowania urządzenia (m.in. maszyn, robotów, wyposażenia), aby ocenić ich wpływ na klasę czystości w pomieszczeniu.
Ocena urządzeń pod kątem emisji zanieczyszczeń chemicznych	PN-EN ISO 14644-15 [13]	Podobna do części 14, ale skupia się na emisji chemicznej (m.in. par, czy gazów) z urządzeń i materiałów wewnątrz pomieszczenia czystego.
Optymalizacja efektywności energetycznej cleanroomów	ISO 14644-16 [14]	Opisuje dobre praktyki projektowania i zarządzania pomieszczeniami z uwzględnieniem efektywności energetycznej.
Ocena depozycji cząstek na powierzchniach	ISO 14644-17 [15]	Określa sposób pomiaru i analizy szybkości osadzania się cząstek (Particle Deposition Rate), co wpływa na jakość produktów.
Ocena zużywalnych materiałów eksploatacyjnych (np. ściereczki, opakowania, odzież)	ISO 14644-18 [16]	Wskazuje na kryteria oceny materiałów pomocniczych wykorzystywanych w pomieszczeniach czystych – czy spełniają wymagania czystości.
Metody poboru próbek cząstek w powietrzu	ISO/TR 14644-21 [17]	Zawiera raport techniczny (nie jest to norma) oraz dobre praktyki i metodyki pobierania próbek do analizy stężeń cząstek w powietrzu w środowiskach czystych.

Dla projektantów najistotniejszymi będą części 4 i 16, a dla osób odpowiedzialny za monitoring, kluczowe będą części 1, 2, 3, 17. Integralność poszczególnych części normy ISO 14644 przedstawiono w postaci mapy, na rysunku 5.



Rys. 5. Integralność poszczególnych części normy ISO 14644.

[Tekst alternatywny. Na rysunku pokazano schemat blokowy korzystania z normy ISO 14644; poszczególne sekcje są połączone ze sobą strzałkami, jak w drzewku decyzyjnym; w prostokątnych wypełnionych kolorem niebieskim blokach zapisano części normy, z których należy skorzystać w przypadku podjęcia danego problemu projektowego.]

2.3. Klasyfikacja pomieszczeń czystych według GMP

Dobra Praktyka Wytwarzania opisywana skrótowcem GMP (z ang. Good Manufacturing Practice), to zbiór zasad i wytycznych, które regulują procesy produkcji w branży biotechnologicznej, farmaceutycznej i kosmetycznej [18]. Celem metody GMP jest zapewnienie, że produkty są wyrabiane w sposób powtarzalny, kontrolowany i zgodnie z zasadami BHP, a ich jakość spełnia określone normy. W odniesieniu do pomieszczeń czystych, metoda GMP precyzuje standardy dotyczące liczby cząstek w powietrzu oraz klasy czystości mikrobiologicznej, ale także sposób projektowania przestrzeni, śluz, przepływu materiałów i personelu, a także monitorowania warunków środowiskowych.

W ramach GMP wyróżnia się cztery podstawowe klasy czystości powietrza, od A do D, które pokrótce scharakteryzowano poniżej.



- Grade A – reprezentuje najwyższy poziom czystości pomieszczeń, przeznaczony do aseptycznych operacji krytycznych, np. napełnianie jałowe, otwieranie pojemników, zamykanie fioł.
- Grade B – jest to zaplecze dla stref Grade A; czyli obszar, w którym przygotowuje się i obsługuje produkty wymagające aseptyki.
- Grade C – dotyczy strefy o średnim poziomie czystości; wykorzystywana jest do przygotowania surowców i półproduktów.
- Grade D – to najniższy poziom w klasyfikacji GMP, stosowany w przypadku mniej krytycznych procesów przygotowawczych.

Powyższa klasyfikacja łączy wymagania dotyczące czystości cząsteczkowej, ale również mikrobiologicznej, co powoduje, że jest kompleksowym narzędziem do projektowania środowisk aseptycznych. Instalacje i systemy HVAC w takich pomieszczeniach muszą zapewniać stabilne nadciśnienie, odpowiednią liczbę wymian powietrza (np. dla Grade B jest to ≥ 20 1/h) oraz zastosowanie filtrów HEPA w terminalach nawiewnych. Ponadto, GMP kładzie nacisk na dokumentację oraz możliwość śledzenia parametrów środowiskowych w czasie rzeczywistym.

W rzeczywistości, dla zapewnienia bezpieczeństwa produktów, pomieszczenia produkcyjne farmaceutyków projektuje się tak, aby między klasami występował odpowiedni gradient ciśnienia, co uniemożliwia migrację zanieczyszczeń z obszarów o niższej klasie do obszarów o wyższej klasie czystości. Ponadto, obowiązuje ścisła kontrola liczby wymian powietrza (np. 240–600 1/h dla Grade A), ścisła reżimowa procedura wejścia personelu oraz szczegółowa dokumentacja parametrów środowiskowych.

Przedstawione klasy GMP mogą być korelowane z klasami ISO. Przykładowo Grade A odpowiada warunkom zbliżonym do ISO 5, a Grade B do ISO 7; Grade C do ISO 8. Należy jednak pamiętać, że systemy te różnią się zakresem i podejściem. Systematyka ISO dotyczy głównie cząstek stałych, natomiast GMP skupia się na ochronie produktów farmaceutycznych i ryzyku mikrobiologicznym.

W artykule [19] Sharma analizuje wymagania stawiane systemom HVAC dla pomieszczeń czystych w przemyśle farmaceutycznym pod względem zgodności z GMP i zarządzania ryzykiem. Praca ta podkreśla znaczenie kwalifikacji urządzeń (DQ, IQ, OQ, PQ) jako etapu zapewnienia zgodności z cGMP (current Good Manufacturing Practice). Przykładowo, dla pomieszczeń klasy Grade B, autor [19] zaleca minimalną ilość wymian powietrza 20 1/h (ACH) przy zastosowaniu filtrów



HEPA klasy H13 lub H14 (o skuteczności $\geq 99,995\%$ dla cząstek $\geq 0,3 \mu\text{m}$). W celach zapobiegawczych wnikaniu zanieczyszczeń, wymagany gradient ciśnienia pomiędzy strefami powinien wynosić tu minimum 15 Pa. W obszarach klasy Grade A utrzymywana powinna być prędkość nawiewu laminarnie w zakresie 0,36–0,54 m/s, zgodnie z wymaganiami norm ISO 14644 [1-17] oraz Annex 1 GMP [18].

2.4. Inne regulacje normatywne

Jako uzupełnienie wymagań ISO i GMP stosuje się także normy ASHRAE 170 [20] oraz PN-EN 13779 [21], zwłaszcza w zakresie wentylacji komfortowej, zrównoważonego projektowania oraz integracji systemów HVAC w nowoczesnych obiektach. Nie mniej jednak wspominają one także o pomieszczeniach czystych i w pewnym zakresie ich wskazania uwzględnia się w dobrych praktykach projektowych w tym zakresie.

- ASHRAE 170 [20] – jest to amerykańska norma zawierająca szczegółowe wytyczne dotyczące wentylacji w placówkach ochrony zdrowia. Określa minimalne przepływy powietrza, wymagania filtracyjne, kierunek przepływu powietrza pomiędzy pomieszczeniami oraz wymaganą liczbę wymian powietrza na godzinę dla pomieszczeń takich jak sale operacyjne, laboratoria, izolatki itp.
- PN-EN 13779 [21] - jest to Europejska norma techniczna obejmująca wymagania dla systemów wentylacji i klimatyzacji w budynkach użyteczności publicznej i przemysłowych (poza czystością GMP). Uwzględnia aspekty jakości powietrza, poziomu hałasu, efektywności energetycznej oraz komfortu cieplnego.

3. Wymagania stawiane systemom HVAC w pomieszczeniach czystych

Systemy HVAC w pomieszczeniach czystych są najważniejszym elementem zapewniającym stabilność parametrów środowiskowych, wymaganych do utrzymania klasy czystości. Odpowiednie zaprojektowanie i eksploatacja systemów HVAC warunkuje skuteczność ochrony przed zanieczyszczeniem, komfort pracy, a także efektywność energetyczną obiektu.

Systemy HVAC muszą kontrolować szereg parametrów środowiskowych, takich jak:



- cząstki stałe – główny parametr klasyfikacyjny według PN-EN ISO 14644-1 [1]. System HVAC musi zapewniać odpowiednią filtrację (HEPA lub ULPA), aby spełnić wymagania określonej klasy pomieszczenia;
- mikroorganizmy – szczególnie istotne w medycynie i farmacji. HVAC nie tylko filtruje powietrze, ale też dba o odpowiedni układ przepływu, aby minimalizować ryzyko namnażania się drobnoustrojów;
- temperatura i wilgotność względna – wpływają na komfort pracy i stabilność procesów technologicznych. Standardowy zakres temperatury powietrza to 20–24°C, oraz wilgotności względnej 40–60%; wartości te mogą być jednak zawężane w zależności od wymagań technologii;
- ciśnienie różnicowe – zapewnia separację stref o różnej klasie czystości. Często nadciśnienie utrzymywane jest w strefie czystej, co zapobiega przedostawaniu się zanieczyszczeń z zewnątrz, chociaż w zależności od rodzaju odciągów miejscowych zastosowanych w danym pomieszczeniu może być wymagane podciśnienie względem korytarza;
- prędkość i kierunek przepływu powietrza – kontrolowane przez odpowiednią geometrię nawiewów i wyciągów oraz systemy nawiewu laminarnego (dla wyższych klas czystości).

W tym rozdziale przedstawione zostaną ogólne wymagania dotyczące projektowania systemów wentylacyjnych w pomieszczeniach czystych odnoszące się do wymienionych wyżej obszarów.

3.1. Wymagania projektowe dla systemów HVAC

Projektowanie systemów HVAC dla pomieszczeń czystych wymaga znacznie bardziej rygorystycznego podejścia niż w przypadku budynków typowych. Instalacje te powinny zapewniać nie tylko odpowiednią jakość powietrza, ale też odpowiednią ilość, kierunek przepływu, stabilność parametrów i odporność na awarie. Ponadto, trzeba uwzględnić także aspekty ergonomii, dostępności serwisowej oraz efektywności energetycznej. Poniżej omówiono kluczowe wymagania projektowe.

- **Dobór odpowiedniej klasy filtracji**

Filtracja powietrza jest jednym z najważniejszych elementów systemów HVAC w pomieszczeniach czystych. Jej głównym celem jest usunięcie zanieczyszczeń stałych, mikroorganizmów oraz innych cząstek, które mogą zakłócać procesy produkcyjne lub laboratoryjne oraz zagrażać bezpieczeństwu pacjentów czy jakości wyrobów farmaceutycznych. Skuteczna filtracja jest warunkiem niezbędnym



do osiągnięcia i utrzymania wymaganej klasy czystości powietrza zgodnie z normami ISO 14644 [1-17] oraz GMP [18].

Systemy filtracyjne w pomieszczeniach czystych najczęściej składają się z kilku stopni filtracji, aby efektywnie usuwać cząstki o różnych rozmiarach:

- **Filtry wstępne**

Ich zadaniem jest zatrzymanie większych zanieczyszczeń takich jak kurz, włosy czy większe cząstki pyłu. Filtry wstępne zabezpieczają droższe i bardziej efektywne filtry końcowe, przedłużając ich żywotność. Zazwyczaj mają klasy filtracji od G3 do G4 według normy PN-EN 13779 [21].

- **Filtry dokładne (średnie)**

Umieszczane po filtrach wstępnych, zatrzymują mniejsze cząstki i chronią filtry HEPA/ULPA przed zbyt szybkim zabrudzeniem. Klasy filtrów to zwykle F7-F9.

- **Filtry HEPA (High Efficiency Particulate Air)**

Są to filtry o bardzo wysokiej skuteczności, zatrzymujące co najmniej 99,97% cząstek o wielkości 0,3 μm . Filtry HEPA są kluczowym elementem nawiewu powietrza w pomieszczeniach czystych, zwłaszcza w klasach ISO 5 i wyższych oraz w strefach Grade A i B w GMP. Zapewniają one laminarne, jednorodne strumienie powietrza o bardzo niskim poziomie zanieczyszczeń.

- **Filtry ULPA (Ultra Low Penetration Air)**

Jeszcze bardziej efektywne niż HEPA, zatrzymują minimum 99,999% cząstek o wielkości 0,12 μm . Stosowane są w najwyższych klasach czystości (ISO 3-4) oraz w bardzo specjalistycznych aplikacjach, gdzie wymagana jest niemal absolutna czystość powietrza.

Kluczowymi parametrami filtrów są:

- skuteczność filtracji – procentowa skuteczność usuwania cząstek określonego rozmiaru;
- opór przepływu powietrza (spadek ciśnienia) – wpływa na wymaganą moc wentylatorów i efektywność energetyczną;
- żywotność – czas pracy filtra do momentu konieczności wymiany;
- wytrzymałość mechaniczna i chemiczna – odporność na warunki środowiskowe i czynniki dezynfekujące.



Poprawny montaż filtrów jest niezbędny, aby uniknąć nieszczelności i utrzymać efektywność filtracji. Filtry HEPA i ULPA powinny być instalowane w szczelnych kasetach z uszczelkami, a ich prawidłowe działanie wymaga regularnej kontroli i certyfikacji.

Systemy filtracyjne powinny być projektowane z uwzględnieniem łatwej wymiany filtrów, bez ryzyka kontaminacji pomieszczenia podczas obsługi. Procedury serwisowe muszą być rygorystycznie przestrzegane i dokumentowane, co jest szczególnie ważne w farmacji i ochronie zdrowia.

Odpowiednio dobrana i eksploatowana filtracja powietrza jest fundamentem utrzymania wymagań dotyczących czystości powietrza w pomieszczeniach czystych. Filtry HEPA i ULPA są niezbędne do spełnienia rygorystycznych norm ISO 14644 [1-17] oraz standardów GMP [18] dotyczących zarówno czystości cząsteczkowej, jak i mikrobiologicznej.

Niewłaściwie dobrany system filtracji lub zaniedbania w utrzymaniu filtrów mogą prowadzić do wzrostu ryzyka kontaminacji, co w konsekwencji zagraża jakości wyrobów, bezpieczeństwu pacjentów oraz ważności badań naukowych.

W zależności od zastosowanej wymaganej klasy czystości (ISO lub GMP), należy przewidzieć odpowiednie filtry końcowe – najczęściej HEPA (High Efficiency Particulate Air) klasy H13 lub H14, a w niektórych przypadkach ULPA (Ultra Low Penetration Air). Filtry te powinny być instalowane w końcowym etapie nawiewu, a najlepiej tuż przed dopływem powietrza do pomieszczenia wentylowanego. W Tabeli 3 zamieszczono odniesienia do normy ISO 14644 [1-17], które ułatwią przyszłemu projektantowi zastosowanie odpowiednich filtrów (szczególnie HEPA/ULPA) w pomieszczeniach czystych.



Tabela 3. Odniesienie poszczególnych części normy ISO 14644 do filtrów.

Część	Zakres związany z filtrami	Dla kogo?
PN-EN ISO 14644-3:2019 [3]	Podstawowa norma w zakresie testów filtrów HEPA i ULPA; zawiera procedury ich testowania (m.in. test integralności, test przecieków, testy końcowe po instalacji).	inżynierowie HVAC, walidatorzy, audytorzy – testowanie i kwalifikacja filtrów HEPA/ULPA
PN-EN ISO 14644-1:2015 [1]	Tylko wspomina filtry; omawia klasyfikację czystości powietrza i zakłada obecność odpowiednich filtrów (HEPA/ULPA), ale nie opisuje sposobu ich testowania.	
PN-EN ISO 14644-4:2001 [4]	Opisuje wybór i lokalizację filtrów w projekcie pomieszczenia czystego; gdzie i jak powinny być zainstalowane (np. sufity laminarne, centrale wentylacyjne).	projektanci – projektowanie instalacji, rozmieszczenie filtrów
PN-EN ISO 14644-5:2004 [5]	Mówi o procedurach eksploatacyjnych i konserwacji filtrów jako elementach utrzymania danej klasy czystości.	Zarządcy - monitoring eksploatacji filtrów
ISO 14644-14:2016 [12]	Dotyczy emisji cząstek, czyli wydajności filtracji urządzenia i stanowi opis dla testerów danego urządzenia.	Zarządcy - monitoring eksploatacji filtrów, ocena sprawności całego urządzenia z filtrem

Warto wspomnieć, że norma PN-EN ISO 14644-3 [3] nie klasyfikuje filtrów (patrz Tabela 4), ale zakłada, że zainstalowano je zgodny np. z PN-EN 1822 [22] lub PN-EN ISO 29463 [23]. Porównanie parametrów PN-EN 1822 [22] oraz ISO 29463 [23] podano w Tabeli 5, a podręczny schemat stosowalności danej metody w Tabeli 6.

Tabela 4. Klasyfikacja filtrów według różnych standardów.

Norma	Cel	Zakres filtrów	Typowe klasy
PN-EN 1822:2019 [22]	Klasyfikacja filtrów wg skuteczności	HEPA, EPA, ULPA	E10–E12, H13–H14, U15–U17
PN-EN ISO 29463 [23]	Odpowiednik PN-EN 1822 (ISO globalnie)	HEPA/ULPA (high-efficiency filters)	ISO 15E, 20H, 25U itd. (porównywalne)
PN-EN ISO 14644-3:2019 [3]	Testy działania filtra po jego instalacji	Filtry w kontekście systemu HVAC	nie klasyfikuje, tylko testuje

Tabela 5. Porównanie parametrów filtrów dla PN-EN 1822 [22]
oraz PN-EN ISO 29463 [23].

PN-EN 1822	PN-EN ISO 29463	Minimalna skuteczność (MPPS)
H13	ISO 35 H	$\geq 99.95\%$
H14	ISO 45 H	$\geq 99.995\%$
U15	ISO 55 U	$\geq 99.9995\%$

MPPS- Most Penetrating Particle Size

Tabela 6. Podręczny schemat stosowalności danej metody dotyczącej filtrów
w pomieszczeniach czystych.

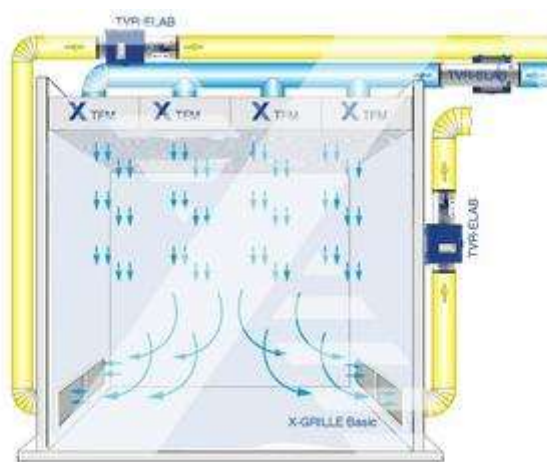
Problem	Norma	Cel
W jaki sposób przetestować filtr	PN-EN ISO 14644-3 [3]	Test integralności, spadek ciśnienia
Jak dobrać filtr wg skuteczności	PN-EN 1822 [22] / PN-EN ISO 29463 [23]	Klasyfikacja HEPA/ULPA
Jak i gdzie zamontować filtr	PN-EN ISO 14644-4 [4]	Projektowanie systemów HVAC
Jak określić, czy urządzenie emituje cząstki	ISO 14644-14 [12]	Walidacja wpływu urządzeń na czystość

▪ Zachowanie przepływu powietrza laminarnego lub turbulentnego

W pomieszczeniach o wysokiej czystości (np. ISO 5, Grade A) konieczne jest zastosowanie przepływu jednokierunkowego – laminarnego, o prędkości ok. 0,45 m/s $\pm 20\%$. Zapewnia on ciągłe „zamiatanie” zanieczyszczeń z obszaru roboczego.

W pomieszczeniach niższych klas dopuszcza się przepływ turbulentny, pod warunkiem spełnienia wymagań liczby wymian powietrza.

Nawiew laminarny (Rys. 6) - charakteryzuje się jednokierunkowym, laminarnym przepływem powietrza o niskiej turbulencji (tzw. LF – Rys. 6a) lub ukierunkowanej niskiej turbulencji (PCD – Rys. 6b), który zapobiega mieszaniu się stref powietrznych i skutecznie wypycha zanieczyszczenia z przestrzeni roboczej. Przepływ powietrza odbywa się zwykle pionowo z sufitu w dół lub poziomo, tworząc „zasłonę” powietrzną, która skutecznie wypycha zanieczyszczenia z przestrzeni roboczej. Zazwyczaj stosowany w pomieszczeniach o najwyższej klasie czystości.



a)



b)

Rys. 6. Nawiew laminarny powietrza w pomieszczeniach czystych a) o niskiej turbulencji (tzw. LF), b) o ukierunkowanej niskiej turbulencji (PCD) [24].

[Tekst alternatywny. Na rysunkach (jest ich dwa) pokazano symulacje strugi powietrza wydostającej się z nawiewników zlokalizowanych w strefie sufitowej; powietrze ma kolor niebieski, a kierunek przepływu zaznaczony jest niebieskimi strzałkami; kanały wentylacji mechanicznej nawiewnej są także koloru niebieskiego o nieco innym odcieniu; kanały wywiewne są żółte.]

Zastosowanie przepływu powietrza o ograniczonej turbulencji umożliwia jednocześnie dostarczanie dużych ilości powietrza przy umiarkowanych różnicach temperatury między nawiewem a pomieszczeniem. Nawiewniki PCD, dzięki nachyleniu strumienia pod kątem 30° , eliminują zjawisko przylegania strugi do sufitu (efekt Coandy), co pozwala uzyskać równomierną, dzwonową dystrybucję powietrza, wolną



od zawirowań. Takie rozwiązanie wspiera skuteczną wentylację w laboratoriach i ogranicza ryzyko cofania się powietrza z dygestoriów do przestrzeni roboczej.

Nawiew laminarny z ograniczoną turbulencją (LF) cechuje się równomiernym rozkładem prędkości oraz niemal równoległym układem linii przepływu powietrza. W tego typu układzie strumień powietrza szybko wytraca swoją prędkość, tworząc stabilną, niskoturbulentną warstwę przepływu – swoistą kurtynę powietrzną. Technologia ta znajduje zastosowanie w środowiskach o najwyższych wymaganiach czystości, takich jak obszary produkcji urządzeń pomiarowych o wyjątkowej czułości, np. precyzyjnych wag.

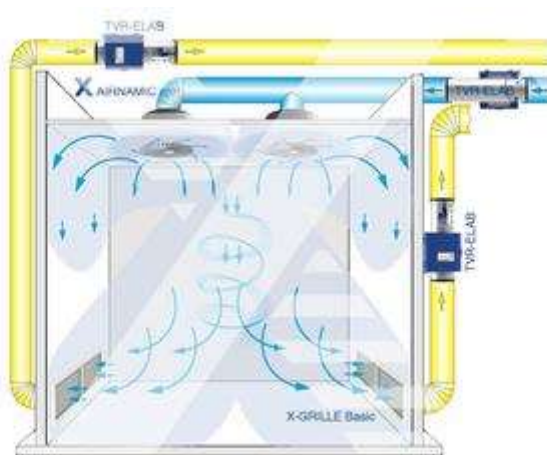
Zalety nawiewu laminarnego:

- minimalizacja turbulencji powietrza, co ogranicza unoszenie cząstek z powierzchni i zapobiega mieszaniu się stref o różnej czystości;
- umożliwia utrzymanie bardzo wysokich klas czystości, np. ISO 5 lub Grade A w GMP;
- idealny do pomieszczeń krytycznych, takich jak bloki operacyjne, stanowiska aseptyczne czy produkcja mikroelektroniki.

Wady i wyzwania:

- wymaga dużej powierzchni nawiewnej i precyzyjnego rozmieszczenia elementów wentylacyjnych;
- wyższe koszty instalacji i eksploatacji ze względu na dużą liczbę wymian powietrza i zaawansowaną filtrację;
- konieczność regularnej konserwacji systemu filtracji, by zachować skuteczność.

Nawiew turbulentny – charakteryzuje się mieszaniem się powietrza w pomieszczeniu, co powoduje równomierne rozproszenie temperatury i wilgotności, ale nie kontroluje kierunku przepływu powietrza tak dokładnie jak nawiew laminarny. Powietrze jest dostarczane przez dyfuzory umieszczone w suficie lub ścianach, a wyciąg znajduje się zwykle na przeciwległej ścianie lub podłodze. Tu powietrze jest dostarczane i mieszane w sposób bardziej chaotyczny, co jest dopuszczalne w pomieszczeniach o niższej klasie czystości. Systemy takie są prostsze i mniej kosztowne, ale mniej skuteczne w utrzymaniu bardzo wysokich standardów.



Rys. 7. Nawiew turbulentny powietrza w pomieszczeniach czystych [24].

[Tekst alternatywny. Na rysunku pokazano symulację strugi powietrza wydostającej się z nawiewników zlokalizowanych w strefie sufitowej; powietrze ma kolor niebieski, a kierunek przepływu zaznaczony jest niebieskimi strzałkami; w odróżnieniu od rysunku 6, strzałki wskazują na większe turbulencje powietrza, które sięgają aż do stref przyściennych; widoczne są zawirowania, które zaznaczono przy pomocy strzałek oraz „zakręcanej” linii; kanały wentylacji mechanicznej nawiewnej są także koloru niebieskiego o nieco innym odcieniu; kanały wywiewne są żółte.]

W systemach wentylacji mieszającej, opartych na turbulentnym przepływie powietrza, skuteczna kontrola warunków środowiskowych w laboratorium jest możliwa dzięki odpowiedniemu rozmieszczeniu i doborowi nawiewników. Turbulentny charakter strumienia nawiewanego powoduje intensywne mieszanie się powietrza świeżego z tym już obecnym w pomieszczeniu. Takie rozwiązanie sprzyja szybkiemu wyrównaniu temperatury w całej strefie przebywania ludzi, co przekłada się na poprawę komfortu cieplnego użytkowników.

Zastosowanie nawiewu turbulentnego:

- pomieszczenia o niższych wymaganiach dotyczących czystości, np. klasy ISO 7 i 8;
- laboratoria badawcze, niektóre obszary produkcyjne o mniejszym ryzyku kontaminacji;
- miejsca, gdzie ważniejsza jest kontrola temperatury i wilgotności niż precyzyjny przepływ powietrza.

Zalety zastosowania nawiewu turbulentnego:



- mniejsze koszty inwestycyjne i eksploatacyjne w porównaniu z nawiewem laminarnym;
- łatwiejsza konstrukcja systemu i mniejsza powierzchnia nawiewna.

Wady zastosowania nawiewu turbulentnego:

- wyższe ryzyko mieszania się zanieczyszczeń i potencjalnego przenikania ich między strefami;
- niższa skuteczność w utrzymaniu bardzo wysokich klas czystości.

Nawiew mieszany (hybrydowy) – łączy nawiew laminarny w obszarach krytycznych z nawiewem turbulentnym w pozostałej części pomieszczenia. Pozwala to na optymalizację kosztów i skuteczności systemu HVAC. Stosuje się go np. w salach operacyjnych, gdzie w centralnej strefie pacjenta stosuje się nawiew laminarny, a na obrzeżach – nawiew turbulentny.

Szczególnym przypadkiem jest produkcja farmaceutyczna, gdzie obszary aseptyczne wymagają laminarnego nawiewu, a magazyny i zaplecza – turbulentnego.

- **Liczba wymian powietrza na godzinę (ACH)**

Jest to jeden z kluczowych parametrów wpływających na klasę czystości.

W pomieszczeniach klasy ISO 5 lub Grade A wymagana jest liczba wymian nawet rzędu 240–600 razy na godzinę, podczas gdy dla klasy ISO 8 może to być 10–20 wymian. Liczba ta powinna być dobierana z uwzględnieniem powierzchni, aktywności personelu oraz rodzaju procesów technologicznych.

Systemy dystrybucji powietrza w laboratoriach muszą spełniać wyjątkowo rygorystyczne wymagania. W celu ochrony użytkowników przed ekspozycją na zanieczyszczenia, konieczne jest zapewnienie intensywnej wymiany powietrza — zgodnie z odpowiednimi normami [1,25-30]; zazwyczaj zakłada się minimum 8 wymian na godzinę. Z uwagi na znaczne zyski ciepła generowane przez wyposażenie laboratoryjne, potrzeba chłodzenia pomieszczeń pojawia się nie tylko w sezonie letnim, ale również w okresie zimowym. Jednocześnie należy zadbać o to, by uniknąć przeciągów oraz gwałtownych wahań temperatury, co ma kluczowe znaczenie dla komfortu pracy personelu. Spełnienie tych wymagań wymaga starannie zaprojektowanego, inteligentnego systemu nawiewu, dostosowanego do specyfiki konkretnego laboratorium.

W polskich i europejskich dokumentach normatywnych nie ma jednolitej liczby wymian powietrza dla wszystkich typów laboratoriów – wartości te są zazwyczaj zależne od rodzaju laboratorium, klasy czystości, poziomu zagrożenia biologicznego lub chemicznego oraz specyfiki procesu. Poniżej, w Tabeli 7 przedstawiono



podsumowanie najczęściej cytowanych dokumentów i ich zaleceń. Podane wartości mają charakter orientacyjny i powinny być dostosowane do indywidualnych wymagań procesu oraz oceny ryzyka. W warunkach polskich często stosuje się wytyczne niemieckie (DIN 1946-7) [25] oraz międzynarodowe (ISO, WHO [27]), ponieważ krajowe regulacje są bardziej ogólne.

Tabela 7. Zalecana liczba wymian powietrza (ACH) w różnych typach laboratoriów.

Typ laboratorium	Zalecane wymiany powietrza (ACH)	Źródło / norma
Laboratorium chemiczne	8–15	DIN 1946-7 [25]; NFPA 45 [26]
Laboratorium biologiczne poziomu BSL-1/BSL-2	6–12	WHO Laboratory Biosafety Manual (4th ed.) [27]
Laboratorium biologiczne poziomu BSL-3	≥12	WHO Laboratory Biosafety Manual [27]; CDC guidelines [28]
Pomieszczenie z dygestorium	≥12	DIN 1946-7 [25]; PN-B-03434 (Polska) [29]
Laboratorium czyste klasy ISO 8	10–20	PN-EN ISO 14644-1 [1]
Laboratorium czyste klasy ISO 7	15–30	PN-EN ISO 14644-1 [1]
Laboratorium farmaceutyczne klasy Grade B (GMP)	≥20	EU GMP Annex 1 [30]

▪ Dobór nawiewników

Dobór odpowiednich nawiewników oraz ich rozmieszczenie w przestrzeni laboratorium to kluczowe elementy projektowania systemu wentylacji, mające bezpośredni wpływ na komfort cieplny użytkowników, efektywność wentylacji rozcieńczającej oraz bezpieczeństwo pracy.

Pomimo dużej ilości wymian powietrza w laboratoriach, nawiewniki i wywiewniki powinny być jak najcichsze. Oznacza to, że mimo potrzeby silnego przepływu powietrza, należy projektować te elementy tak, by nie przekraczały dopuszczalnego poziomu hałasu – typowo 35–45 dB(A) w pomieszczeniach laboratoryjnych.

W praktyce oznacza to konieczność stosowania nawiewników o dużej powierzchni (niższa prędkość powietrza to mniejszy hałas), tłumików akustycznych w kanałach, odpowiedniej regulacji przepływu powietrza. Przy dużej liczbie wymian powietrza zalecane są nawiewniki szczelinowe z dużą powierzchnią redukującą prędkość nawiewu i poziom hałasu.

W laboratoriach, w których występuje ryzyko emisji niebezpiecznych substancji (np. oparów chemicznych, pyłów biologicznych), rozmieszczenie nawiewników powinno zapobiegać recyrkulacji i efektowi zasysania zanieczyszczonego powietrza z miejsc takich jak dygestoria, komory laminarne czy stanowiska otwartego dozowania.

Przykładowo:



- nawiewy sufitowe z nawiewem ustawionym pod kątem 30° (jak np. w systemach PCD) tworzą dzwonowy rozkład przepływu powietrza, eliminując tzw. efekt Coandy i minimalizując zawirowania;
- nawiewy boczne umieszczone wysoko przy ścianach mogą być stosowane w laboratoriach o niższych wymaganiach czystości, gdzie istotna jest kontrola gradientów temperatury i przeciwdziałanie przeciągom.

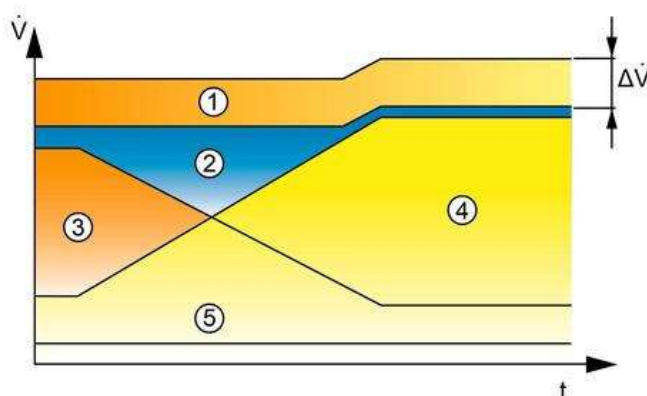
W zależności od typu laboratorium proponuje się następujące komponenty i konfiguracje:

- laboratoria chemiczne [31]: zalecany nawiew sufitowy laminarny oraz wyciągi blisko podłogi; unika się nawiewów bocznych, które mogłyby powodować cofanie zanieczyszczeń;
- laboratoria biologiczne klasy II i III: wymagana filtracja HEPA oraz przepływy kierunkowe od stref czystych do brudnych;
- laboratoria wagowe i precyzyjne (metrologiczne): zastosowanie laminarnych przepływów niskoturbulentnych (LF) z nawiewnikami sufitowymi centralnymi – eliminują mikrowibracje powietrzne, wpływające na dokładność pomiarów.
- **Zachowanie gradientu ciśnień między strefami**

System wentylacji w pomieszczeniach czystych musi zapewniać odpowiednią różnicę ciśnień pomiędzy strefami o różnej klasie czystości. Dzięki temu możliwy jest przepływ powietrza w kierunku od „czystego” do „brudnego” oraz zapewniona jest ochrona stref krytycznych przed skażeniem.

Gradient ciśnienia jest to różnica ciśnienia powietrza pomiędzy dwoma sąsiednimi pomieszczeniami lub strefami, utrzymywana zwykle na poziomie od 10 do 30 Pa, (typowo 10–15 Pa, rzadziej do 50 Pa), co determinują indywidualne wymagania technologiczne i normy. Pomieszczenie o wyższej klasie czystości (np. Grade A lub ISO 5) jest utrzymywane pod nadciśnieniem względem pomieszczeń o niższej klasie (np. Grade B, C lub ISO 7, 8). Dzięki temu powietrze przepływa zawsze z obszaru czystszej do mniej czystego, co minimalizuje ryzyko migracji zanieczyszczeń.

Na Rys. 8. Pokazano wykres przepływów objętościowych powietrza w czasie, który jest typowy dla analizy bilansu powietrza i gradientu ciśnień w pomieszczeniach czystych lub laboratoriach. Wyróżnione tam obszary 1 – 5 odpowiadają różnym komponentom systemu wentylacyjnego.



Rys. 8. Zmiana udziału objętościowych strumieni powietrza w czasie przy regulacji różnicy ciśnień w pomieszczeniu; $\Delta \dot{V}$ – różnica między nawiewem a wywiewem [24].

[Tekst alternatywny. Na wykresie pokazano jak zmienia się strumień powietrza (oś rzędnych) w czasie (oś odciętych) przy regulacji różnicy ciśnień w pomieszczeniu; pokazano pięć obszarów, które zaznaczono na kolory: żółty i jego odcienie oraz niebieski; granica obszarów jest zaznaczona czarnymi liniami demarkacyjnymi.]

Przedstawiony na Rys. 8 wykres pozwala zobrazować jak zmienia się udział poszczególnych strumieni powietrza w czasie oraz jak osiąga się równowagę lub przewagę nawiewu lub wywiewu, co przekłada się na kontrolę ciśnienia oraz jak planować odpowiednie strefowanie i funkcję BMS (sterowanie objętościami nawiewu lub wywiewu). Jeśli nawiew jest większy od wywiew, wówczas tworzy się nadciśnienie, co chroni pomieszczenie przed zanieczyszczeniami z zewnątrz odwrotnym przypadkiem, gdy nawiew jest mniejszy od wywiew, powstaje podciśnienie, co powoduje zasysanie powietrza z otoczenia (np. w laboratoriach chemicznych, strefach brudnych). Projektując system nawiewno-wyciągowy, należy unikać sytuacji, w których zanieczyszczone powietrze mogłoby powrócić do obszaru czystego. Wskazane są dedykowane kanały wyciągowe oraz systemy jednorazowego przelotu powietrza (100% świeże powietrze), szczególnie w klasach aseptycznych.

Pod numerem (1) kryje się całkowity strumień powietrza nawiewanego, czyli całkowita ilość powietrza wprowadzanego do pomieszczenia, co może obejmować zarówno powietrze świeże, jak i recyrkulowane. Pod (2) zaznaczony jest strumień powietrza usuwanego przez wentylację technologiczną, np. przez digestoria, ssawki, czy też okapy. Najczęściej jest to stały lub delikatnie zmienny przepływ, który zależy od danego procesu technologicznego. Pod numerem (3) nakreślony jest obszar recyrkulacji powietrza czyli ewentualne powietrze wracające do obiegu po procesie filtracji. Pole (4) stanowi wywiew ogólny (czyli z wentylacji ogólnej). Odpowiedzialny jest za usuwanie nadmiaru powietrza z pomieszczenia i za utrzymywanie



prawidłowego bilansu. Obszar (5) stanowi dopływ powietrza świeżego, który ze względów higienicznych i kontroli stężeń zanieczyszczeń jest bardzo istotny. Najczęściej jest on niższy niż nawiew całkowity, gdyż pozostała część to ewentualne powietrze recyrkulowane.

Biorąc pod uwagę powyższe, znaczenie gradientu ciśnienia jest decydujące i umożliwia:

- zapobieganie kontaminacji krzyżowej – chroni krytyczne obszary produkcji lub medycyny przed dostaniem się drobnoustrojów, pyłów i innych cząstek;
- zachowanie bezpieczeństwa personelu i produktu – właściwe ciśnienie pozwala na zachowanie aseptyki i bezpieczeństwa biologicznego, np. w laboratoriach mikrobiologicznych;
- zachowanie stabilności środowiskowej – ułatwia utrzymanie określonych parametrów powietrza, takich jak wilgotność i temperatura.

Do metod utrzymania gradientu ciśnienia w pomieszczeniach czystych zalicza się:

- systemy HVAC – projektuje się je tak, aby nawiew powietrza do stref o wyższej klasie czystości był większy niż wyciąg, co generuje właściwe nadciśnienie;
- uszczelnienia i przegrody – drzwi, śluzy, uszczelki i odpowiednia konstrukcja pomieszczeń minimalizują nieszczelności i zapewniają różnicę ciśnień;
- sterowanie i monitoring – czujniki ciśnienia i automatyczne regulatory pozwalają na ciągłe kontrolowanie i utrzymanie właściwego zadanego gradientu;
- strefowanie powietrza - podział przestrzeni na obszary o różnej klasie czystości;
 - strefy czyste i mniej czyste – np. strefy produkcji aseptycznej (Grade A/B) oddzielone od magazynów lub stref technicznych (Grade C/D);
 - strefowanie przepływu personelu i materiałów – osobne drogi wejścia lub wyjścia, śluzy materiałowe i powietrzne;
 - strefy różniące się wymaganiami mikrobiologicznymi i cząsteczkowymi – każda strefa ma przypisane normy ISO lub GMP.



Dobrze zaprojektowane strefowanie w połączeniu z odpowiednim gradientem ciśnienia stanowi fundament skutecznej kontroli zanieczyszczeń i bezpieczeństwa w pomieszczeniach czystych.

- **Minimalizacja hałasu i wibracji**

Hałas mechaniczny oraz wibracje mogą nie tylko pogarszać komfort pracy, ale również wpływać negatywnie na niektóre procesy laboratoryjne. Stosowanie tłumików akustycznych, elastycznych połączeń oraz montażu antywibracyjnego jest konieczne w strefach czystych.

Wszystkie powyższe elementy powinny być analizowane w fazie koncepcyjnej oraz zweryfikowane za pomocą symulacji CFD (Computational Fluid Dynamics), co pozwala na ocenę rzeczywistego rozkładu przepływu powietrza, stref martwych oraz skuteczności filtracji.

- **Dostępność do serwisowania i czyszczenia**

Elementy instalacji HVAC muszą być tak zaprojektowane, aby możliwe było ich okresowe czyszczenie, inspekcja oraz wymiana filtrów bez naruszania reżimu czystości. Dotyczy to zwłaszcza filtrów końcowych i kanałów w strefach aseptycznych.

- **Monitoring parametrów środowiskowych**

W pomieszczeniach czystych niezwykle istotne jest nie tylko prawidłowe zaprojektowanie i wykonanie systemu HVAC, ale także jego ciągła kontrola i okresowa walidacja. Monitoring i walidacja zapewniają, że parametry środowiskowe utrzymują się na wymaganym poziomie, a system działa zgodnie z założeniami projektowymi. W kontekście farmacji, medycyny czy przemysłu elektronicznego, gdzie jakość powietrza ma krytyczne znaczenie, procesy te są niezbędne do spełnienia wymagań norm i przepisów prawnych (np. GMP [18], ISO 14644 [1-17]).

Zapewnienie właściwych parametrów środowiskowych w pomieszczeniach czystych jest kluczowe dla utrzymania wymaganej klasy czystości oraz bezpieczeństwa procesów technologicznych i medycznych. Kontrola obejmuje przede wszystkim monitorowanie temperatury, wilgotności, ciśnienia oraz czystości powietrza. Stała kontrola tych parametrów pozwala na szybkie reagowanie na ewentualne odchylenia i zapobiega ryzyku kontaminacji.

- **Temperatura i wilgotność**

Stałe utrzymywanie temperatury i wilgotności zapewnia stabilność chemiczną i fizyczną produktów oraz optymalne warunki dla pracy urządzeń i personelu. Czujniki umieszczone w pomieszczeniach pozwalają na kontrolę i utrzymanie



parametrów klimatycznych w zadanych granicach, co ma wpływ na komfort pracy oraz stabilność procesów technologicznych. W pomieszczeniach czystych najczęściej utrzymuje się temperaturę w zakresie 20–23°C oraz wilgotność względną powietrza na poziomie 40–60%. Są to wartości optymalne z punktu widzenia komfortu pracy personelu oraz stabilności procesów technologicznych. Wilgotność na odpowiednim poziomie jest kluczowa nie tylko dla komfortu, ale również dla ograniczenia wzrostu i namnażania drobnoustrojów. Wilgotność zbyt wysoka sprzyja rozwojowi bakterii i pleśni, natomiast zbyt niska może powodować elektryzowanie się powierzchni, co jest niekorzystne zwłaszcza w przemyśle elektronicznym.

- **Czujniki ciśnienia, temperatury i wilgotności (RH)**

Te czujniki zapewniają stały monitoring kluczowych parametrów, umożliwiając kontrolę gradientów ciśnienia między strefami oraz stabilizację mikroklimatu w pomieszczeniu.

- **Liczniki cząstek powietrza (particle counters)**

Urządzenia te umożliwiają ciągły pomiar liczby i wielkości cząstek unoszących się w powietrzu, co jest podstawowym wskaźnikiem jakości środowiska w pomieszczeniach czystych. Dane z liczników są wykorzystywane do weryfikacji, czy spełniane są normy ISO lub GMP.

- **Poziom mikrobiologiczny**

Pobierane są próbki powietrza, powierzchni oraz urządzeń, które następnie są badane pod kątem obecności bakterii, grzybów i innych mikroorganizmów. Wyniki te pomagają ocenić skuteczność filtracji oraz higienę pomieszczenia.

- **Ciśnienie różnicowe między strefami**

Monitoring różnicy ciśnień (przy użyciu czujników ciśnienia statycznego) jest kluczowy dla zapobiegania migracji zanieczyszczeń między strefami o różnych klasach czystości.

- **Prędkość i kierunek przepływu powietrza**

W niektórych systemach stosuje się czujniki do pomiaru parametrów przepływu, co pozwala na bieżącą ocenę funkcjonowania nawiewów laminarnego lub turbulentnego.

- **Systemy SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) i BMS (Building Management System)**

Zintegrowane systemy automatyki i zarządzania budynkiem, które pozwalają na centralne monitorowanie oraz sterowanie systemami HVAC. Umożliwiają szybkie wykrywanie nieprawidłowości, generowanie alarmów w przypadku



odchyień oraz archiwizację danych do celów audytorskich, raportowych i walidacyjnych (szczególnie wg GMP).

▪ **Walidacja systemu HVAC**

Walidacja to formalny proces potwierdzający, że system HVAC spełnia wszystkie wymagania określone w dokumentacji projektowej oraz normach branżowych. Obejmuje ona kilka etapów, które pokrótce omówiono poniżej.

1. Kwalifikacja instalacji (IQ – Installation Qualification) - sprawdzenie, czy system HVAC został zainstalowany zgodnie z założeniami projektowymi oraz wymogami technicznymi; uwzględnia się tu prawidłowy montaż filtrów, kanałów, czujników i urządzeń sterujących.
2. Kwalifikacja działania (OQ – Operational Qualification) - testy działania systemu pod różnymi warunkami obciążenia, pomiary przepływu powietrza, ciśnień, temperatury oraz liczby wymian powietrza, w celu potwierdzenia, że system funkcjonuje poprawnie.
3. Kwalifikacja wydajności (PQ – Performance Qualification) - okresowe badania środowiska pomieszczenia w warunkach rzeczywistej pracy, w tym pomiary czystości powietrza, mikrobiologiczne i klimatyczne, które potwierdzają, że wymagania jakościowe są utrzymane podczas normalnej eksploatacji.

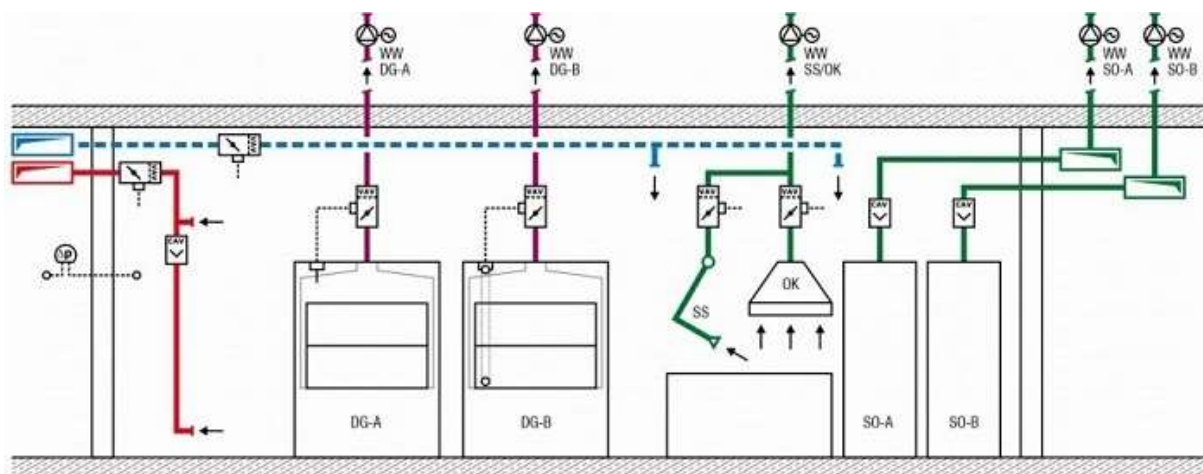
4. Studium przypadku

4.1. Wentylacja laboratorium chemicznego

Przykładowy schemat ideowy wentylacji dla laboratorium chemicznego pokazano na Rys. 9 [31]. W nowoczesnych obiektach laboratoriów chemicznych stosuje się zintegrowane systemy wentylacji mechanicznej: ogólnej i technologicznej.

Wentylacja ogólna nawiewno-wywiewna odpowiada za stałe utrzymywanie bilansu powietrza w pomieszczeniu, a często także za regulację jego temperatury.

Natomiast wentylacja technologiczna (procesowa) ma na celu lokalne usuwanie zanieczyszczeń u źródła i obejmuje elementy takie jak: digestoria (DG), ssawki punktowe (SS), okapy laboratoryjne (OK), szafy do przechowywania odczynników (SO) oraz szafy gazowe z butlami sprężonymi (SGT), co zilustrowano na Rys. 9.



Rys. 9. Wentylacja laboratorium chemicznego [31].

[Tekst alternatywny. Na rysunku pokazano schemat wentylacji laboratorium chemicznego; znajdują się tu dwa digestoria, ssawka odciągająca zużyte powietrze, okap, szafy do przechowywania odczynników; zaznaczono podłogę oraz strop pomieszczenia; linie ciągłe w kolorze czerwonym to instalacja powietrza wyciągowego, w kolorze zielonym to instalacja odciągów miejscowych; linie przerywane niebieskie to nawiewna instalacja ogólna nawiewna; zaznaczono także przepustnice powietrza oraz zawory regulacyjne.]

Poniżej przedstawiono przykładowe wielkości doborowe systemu wentylacji ogólnej i technologicznej dla typowego laboratorium chemicznego.

4.1.1. Projekt koncepcyjny wentylacji dla laboratorium chemicznego

Dane wyjściowe i założenia projektowe:

- powierzchnia laboratorium: 60 m²,
- wysokość pomieszczenia: 3,0 m,
- objętość pomieszczenia: $V = 180 \text{ m}^3$,
- liczba użytkowników: 4 osoby,
- obciążenie cieplne (urządzenia + oświetlenie): 40 W/m²,
- pomieszczenie klimatyzowane, wymagane chłodzenie również zimą,
- wymagana liczba wymian powietrza: 8–12/h [25],
- wentylacja ogólna: nawiewno-wywiewna,
- wentylacja technologiczna: lokalna (digestoria, okapy, ssawki).



1. Obliczenie strumienia powietrza dla wentylacji ogólnej

Założenie

$n = 10 \text{ 1/h}$ – liczba wymian powietrza na godzinę,

$$\dot{V}_{ogólna} = n \cdot V = 10 \cdot 180 = 1800 \text{ m}^3/\text{h}.$$

Zalecane jest zrównoważenie nawiewu i wywiewu w systemie ogólnym;

- nawiew: $1800 \text{ m}^3/\text{h}$,
- wywiew: $1800 \text{ m}^3/\text{h}$ (częściowo wspólny z procesowym).

2. Wentylacja technologiczna (lokalna)

Digestoria (DG)

- liczba: 2 sztuki,
- minimalne wymagane wyciągi: $250 \text{ m}^3/\text{h/szt.}$ (w trybie czuwania), $700 \text{ m}^3/\text{h/szt.}$ (w trybie pracy),
- zabezpieczenie chemiczne: okna frontowe, czujnik przepływu.

Suma przepływu powietrza dla dwóch digestoriów: $\dot{V}_{DG} = 2 \times 700 = 1400 \text{ m}^3/\text{h}.$

Ssawki punktowe (SS)

- liczba: 2 sztuki,
- wydajność każdej ssawki: $100 \text{ m}^3/\text{h}$,

Suma przepływu powietrza dla dwóch ssawek: $\dot{V}_{SS} = 2 \times 100 = 200 \text{ m}^3/\text{h}.$

Okapy (OK)

- liczba: 1 sztuka,
- wydajność: $\dot{V}_{OK} = 300 \text{ m}^3/\text{h}.$

Szafy na odczynniki (SO)

- liczba: 1 sztuka z aktywnym wyciągiem,
- wydajność: $\dot{V}_{SO} = 150 \text{ m}^3/\text{h}.$

Szafa gazowa (SGT)

- liczba: 1 sztuka (dla butli ze sprężonym gazem),
- wydajność: $\dot{V}_{SGT} = 100 \text{ m}^3/\text{h}$ - przepływ ciągły.

3. Suma przepływu dla wentylacji technologicznej

Suma przepływu dla wentylacji technologicznej będzie sumą dla wszystkich urządzeń technologicznych pracujących w laboratorium chemicznym, czyli:

$$\dot{V}_{tech} = \dot{V}_{DG} + \dot{V}_{SS} + \dot{V}_{OK} + \dot{V}_{SO} + \dot{V}_{SGT} = 1400 + 200 + 300 + 150 + 100 = 2150 \text{ m}^3/\text{h}$$



4. Bilans powietrza i strategia ciśnień (z komentarzem)

Dobrze zaprojektowany bilans powietrza i strategia ciśnień to klucz do zapewnienia bezpieczeństwa procesów technologicznych, ochrony zdrowia personelu oraz zachowania wymaganej klasy czystości powietrza.

Bilans powietrza polega na kontrolowanym zrównoważeniu ilości powietrza nawiewanego i wywiewanego w danym pomieszczeniu lub strefie. W praktyce oznacza to, że system HVAC musi być tak zaprojektowany, aby utrzymywać określone warunki przepływu powietrza – nadciśnienie lub podciśnienie – zależnie od funkcji pomieszczenia.

Wyróżnia się trzy podstawowe przypadki bilansu:

1. bilans zerowy – ilość powietrza nawiewanego równa jest ilości powietrza wywiewanego. Taki bilans stosuje się w pomieszczeniach neutralnych (np. korytarze techniczne);
2. nadciśnienie – powietrza nawiewa się więcej niż się wywiewa. Stosowane tam, gdzie należy chronić wnętrze pomieszczenia przed wnikaniem zanieczyszczeń z zewnątrz, np. w salach operacyjnych, aseptycznych laboratoriach farmaceutycznych;
3. podciśnienie – powietrze wywiewane jest większe od powietrza nawiewanego. Wykorzystywane w laboratoriach chemicznych lub pomieszczeniach izolatkowych (np. dla chorób zakaźnych), gdzie istotne jest zapobieganie przedostawaniu się szkodliwych lub zakaźnych substancji na zewnątrz.

Strategia ciśnień to sposób projektowania systemu wentylacyjnego w budynku lub kompleksie pomieszczeń, który opiera się na celowym tworzeniu gradientów ciśnienia pomiędzy pomieszczeniami. Umożliwia to sterowanie kierunkiem przepływu powietrza – z czystych do brudnych stref (w przypadku nadciśnienia) lub odwrotnie – z zanieczyszczonych do bezpiecznych stref (w przypadku podciśnienia).

Dla zapewnienia skuteczności zakłada się:

- różnice ciśnień zazwyczaj wynoszą od 5 do 20 Pa,
- drzwi pomiędzy strefami muszą być uszczelnione i kontrolowane (np. śluzy powietrzne),
- monitoring różnic ciśnień realizowany jest przez czujniki i systemy BMS.

W laboratorium chemicznym z podciśnieniem projektuje się zwykle następujące parametry:

- pokój główny laboratorium: -10 Pa względem korytarza,



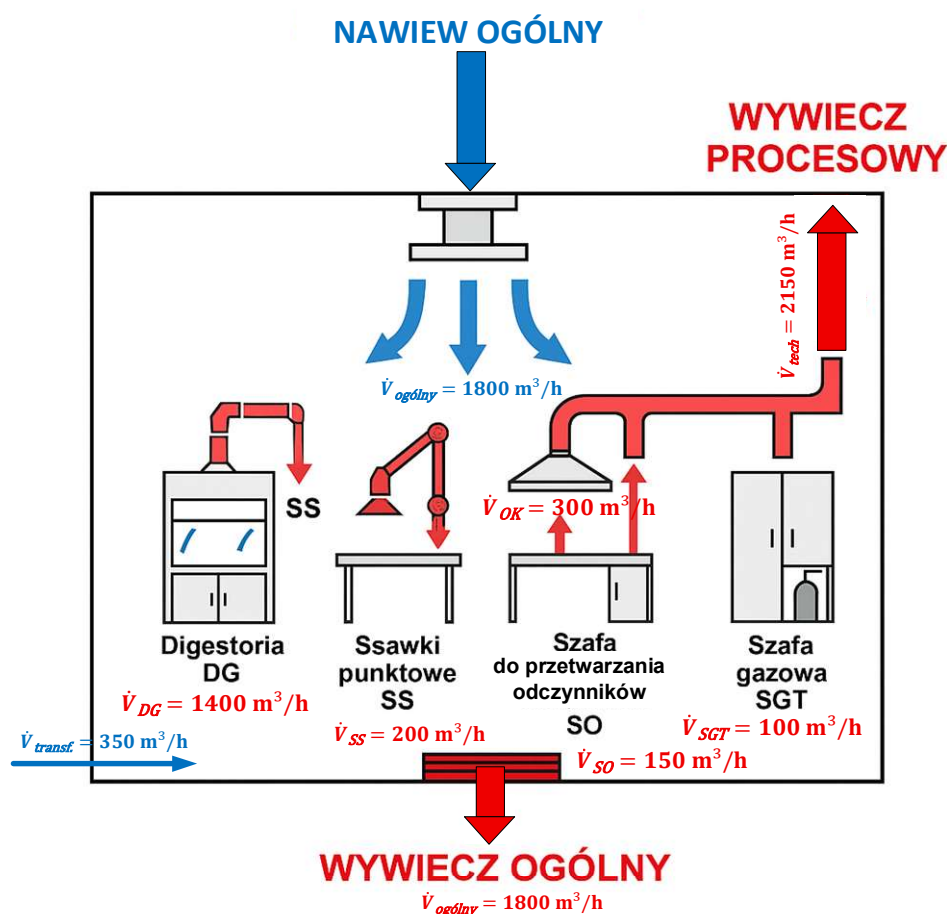
- digestoria i pomieszczenie magazynowe: -15 Pa,
- korytarz techniczny: 0 Pa (punkt odniesienia).

Dzięki takim założeniom zanieczyszczenia nie przedostają się do innych stref. Dobrze zaprojektowany bilans powietrza i strategia ciśnień to klucz do zapewnienia bezpieczeństwa procesów technologicznych, ochrony zdrowia personelu oraz zachowania wymaganej klasy czystości powietrza.

Dla analizowanego studium przypadku prawdziwe są następujące wielkości:

- nawiew ogólny: $1800 \text{ m}^3/\text{h}$,
- wywiew ogólny + technologiczny: $1800 + 2150 = 3950 \text{ m}^3/\text{h}$,
- bilans ujemny: laboratorium powinno pracować z lekkim podciśnieniem ($\sim 10\text{--}15 \text{ Pa}$),
- możliwe źródła uzupełnienia powietrza (nawiew wspomagający z korytarza, kratki transferowe).

Na Rys. 10 pokazano bilans powietrza wentylacyjnego dla analizowanego laboratorium chemicznego.



Rys. 10. Bilans powietrza wentylacyjnego dla laboratorium chemicznego.

[Tekst alternatywny. Na rysunku pokazano schemat wentylacji laboratorium chemicznego, jak wyżej na Rys. 9; do każdego elementu odciągów miejscowych przypisano odpowiednią ilość powietrza wyciąganego – zaznaczono kolorem czerwonym tak, jak instalację odciągową; zaznaczono także powietrze nawiewane i wywiewane przy pomocy wentylacji ogólnej, odpowiednio kolorami niebieskim oraz czerwonym.]

5. Chłodzenie i komfort cieplny

- obciążenie cieplne: $2,4 \text{ kW}$ ($2400 \text{ W} / 60 \text{ m}^2 = 40 \text{ W/m}^2$),
- współpraca z klimakonwektorami lub centralą wentylacyjną z chłodnicą.

6. Lokalizacja nawiewników i wyciągów

- nawiewy sufitowe z laminarno-turbulentnym rozplywem,
- wyciągi przy digestoriach, blatach i nisko przy podłodze,
- wyciągi technologiczne prowadzone niezależnymi kanałami (chemoodporne).



7. Zalecenia projektowe

- system powinien być rozdzielony funkcjonalnie na dwie części: ogólną i procesową,
- całkowity wymagany przepływ powietrza to 3950 m³/h,
- należy zastosować wydajny system filtracji (co najmniej F7 + F9 przed odzyskiem) oraz odzysk ciepła,
- system monitorowania: czujniki przepływu, czujniki CO₂, sygnalizacja pracy DG.

4.1.2. Dyskusja

Ze względu na istotną kwestię dotyczącą stosowania podciśnienia w laboratoriach chemicznych oraz bilansowania takich pomieszczeń, w tym rozdziale wyjaśniono, w jaki sposób osiąga się normowo zalecane wartości podciśnienia w stosunku do korytarza (od -10 do -15 Pa) lub stref wewnątrz laboratorium (od -5 do -10 Pa) [18,25,32].

Zalecana wartość podciśnienia w laboratoriach chemicznych wynika z następujących kwestii:

- ochrony środowiska zewnętrznego i korytarzy - podciśnienie zapobiega wydostawaniu się oparów, cząstek i gazów z laboratorium do sąsiadujących z nim pomieszczeń (np. korytarzy, biur, przedsionków);
- ochrona personelu i innych stref budynku przed potencjalnym skażeniem - w razie nieszczelności w digestorium czy okapie, zanieczyszczenia i tak będą „wciągane” do środka (powietrze napływa do laboratorium, nie w przeciwnym kierunku);
- zgodność z normami i dobrymi praktykami - zgodnie z normatywnymi wymaganiami [18,25,32,20] ale również przepisami BHP, laboratoria z chemikaliami i oparami powinny posiadać ujemny bilans powietrza (wyciąg większy od nawiew), a zalecany poziom podciśnienia to np. -10 do -15 Pa w stosunku do korytarza.

W praktyce projektanci oraz inżynierowie zakładają docelową różnicę ciśnienia (np. -10 lub -15 Pa). W kolejnym kroku dobierają oraz obliczają odpowiednie gabarytowo szczeliny drzwiowe lub kratki transferowe. Następnie sprawdzają, czy przepływ powietrza odpowiada zakładanej różnicy ciśnienia (lub odwrotnie – jaką różnicę ciśnienia wygeneruje konkretny nad- lub niedobór powietrza przy danej geometrii przejścia).

Dla analizowanego w rozdziale 4.1.1. przypadku laboratorium chemicznego całkowity wymagany przepływ powietrza wynosił 3950 m³/h, co wynika z sumy powietrza nawiewanego przez wentylację ogólną – odpowiedzialną za utrzymanie warunków



temperaturowo-wilgotnościowych oraz bilansu ciśnienia – oraz powietrza wyciąganego przez wentylację procesową (digestoria, ssawki, okapy, szafy).

Jednakże, należy zauważyć, że nie cała ta objętość powietrza musi być nawiewana przez wentylację ogólną.

W przypadku analizowanego laboratorium chemicznego należy utrzymać podciśnienie względem korytarza lub przedsionka, co zapobiega ucieczce zanieczyszczeń chemicznych poza pomieszczenie. Bilans powietrza przedstawia się następująco:

Nawiew ($1800 \text{ m}^3/\text{h}$) < Wyciąg ($2150 \text{ m}^3/\text{h}$) z pomieszczenia $\rightarrow \Delta \dot{V} = -350 \text{ m}^3/\text{h}$,
zatem laboratorium ma ujemny bilans, czyli następuje ciągła strata powietrza, a więc powietrze nie wydostaje się na zewnątrz pomieszczenia.

Należałoby jednak przeliczyć ten ujemny strumień objętości powietrza $\Delta \dot{V} = 350 \text{ m}^3/\text{h}$ na zalecaną różnicę ciśnień, czyli od -10 do -15 Pa . Do tego celu należy skorzystać ze wzoru orientacyjnego dla przepływu powietrza przez otwór przy różnicy ciśnień, czyli z uproszczonej zależności Bernoulliego:

$$\dot{V} = C \cdot A \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta P / \rho} \quad (1)$$

gdzie: $\dot{V}$ oznacza przepływ, m^3/s , C to współczynnik przepływu, który w przypadku szczeliny przyjmuje się z zakresu $0,6-0,65$, A odnosi się do powierzchni otworu/szczeliny, m^2 , ΔP to różnica ciśnień, Pa , a ρ oznacza gęstość powietrza i wynosi ok. $1,2 \text{ kg}/\text{m}^3$.

Dane wejściowe do analizy są następujące:

- strumień powietrza generujący podciśnienie: $\Delta \dot{V} = 350 \text{ m}^3/\text{h} = 0,097 \text{ m}^3/\text{s}$,
- zakładana wielkość szczeliny pod drzwiami: $A = 0,02 \text{ m}^2$ (np. $1 \text{ m} \times 2 \text{ cm}$),
- $C = 0,65$.

Po przekształceniu wzoru (1) otrzymuje się zależność na wartość podciśnienia:

$$\Delta P = \left(\frac{\dot{V}}{C \cdot A} \right)^2 \cdot \frac{\rho}{2} \quad (2)$$

$$\Delta P = \left(\frac{0,097}{0,65 \cdot 0,02} \right)^2 \cdot \frac{1,2}{2} \approx (7,46)^2 \cdot 0,6 \approx 55,6 \cdot 0,6 = 33,4 \text{ Pa}.$$



Wnioskuję się zatem, że przez taką szczelinę pod drzwiami o powierzchni $A = 0,02 \text{ m}^2$, przepływ powietrza, w ilości $\sim 350 \text{ m}^3/\text{h}$ wygeneruje różnicę ciśnień wynoszącą ok. 33 Pa, co jest wartością zawyżoną w odniesieniu do wymaganego podciśnienia 10–15 Pa. Należy zatem zwiększyć powierzchnię przepływu przez zastosowanie np. większej kratki transferowej lub nieszczelności w drzwiach. Wielkość podciśnienia można zatem regulować, zmieniając pole czynne szczeliny np. przez zastosowanie uszczelek lub krątek szczelinowych. W celu uzyskania docelowej różnicy ciśnień pomiędzy wnętrzem laboratorium, a korytarzem wynoszącej 10–15 Pa, szczelina powinna mieć powierzchnię ok. 0,03–0,035 m^2 , czyli np. 3–3,5 cm wysokości na 1 m szerokości. W Tabeli 8 dla przepływu $350 \text{ m}^3/\text{h}$ i różnych powierzchni szczeliny pod drzwiami, dla celów porównawczych przedstawiono uzyskaną różnicę ciśnień.

Tabela 8. Zależność wielkości podciśnienia w analizowanym laboratorium chemicznym od wielkości kratki transferowej.

Powierzchnia szczeliny A, m^2	Różnica ciśnień $\Delta P, \text{Pa}$
0,005	536,9
0,010	134,2
0,015	59,7
0,020	33,6
0,025	21,5
0,030	14,9
0,035	11,0
0,040	8,4

W celu większej kontroli nad ilością powietrza nawiewanego oraz utrzymania odpowiedniego podciśnienia, w systemie takim warto też zastosować:

- regulatory VAV/VRP, które automatycznie bilansują nawiew i wyciąg,
- system nadzoru (BMS) kontrolujący różnice ciśnień,
- odzysk ciepła z wywiewu ogólnego (jeśli dozwolony); wyciąg procesowy nie nadaje się do rekuperacji (ze względu na zanieczyszczenia).

Jako uzupełnienie należy wspomnieć, że podciśnienia nie stosuje się w:



- pomieszczeniach czystych (np. aseptycznych o klasie czystości ISO 5–7; tu stosuje się nadciśnienie, aby chronić produkt przed zanieczyszczeniem;
- w laboratoriach biologicznych z patogenami, klasy 3 lub 4, gdzie stosuje się podciśnienie kaskadowe z przedsionkami (izolacja personelu i otoczenia).



Na etapie opracowywania niniejszych materiałów dydaktycznych wykorzystana zostało wiedza i doświadczenie nabyte w ramach wizyt studyjnych w Instytucie Maszyn Przepływowych im. R. Szewalskiego Polskiej Akademii Nauk w Gdańsku, Centrum Badawczym Polskiej Akademii Nauk - Konwersja Energii i Źródła Odnawialne KEZO w Jabłonnej oraz w Instytucie Technologii Paliw i Energii w Zabrzu, zrealizowanych w ramach projektu „Dostosowanie kształcenia w Politechnice Świętokrzyskiej do potrzeb współczesnej gospodarki” FERS.01.05-IP.08-0234/23. W szczególności dotyczy to zagadnień odnoszących się do najnowszych technologii, trendów badawczych oraz rozwiązań praktycznych stosowanych w obszarze energetyki rozproszonej ważnych dla studentów kierunków inżynierii środowiska oraz odnawialnych źródeł energii, pozwalających na lepsze zrozumienie zagadnień z jakimi spotykają się w pracy zawodowej jako inżynierowie, a także na świadome stosowanie innowacyjnych i prośrodowiskowych rozwiązań na każdym etapie procesu inwestycyjnego, zgodnych z ideą zrównoważonego rozwoju i zielonej transformacji.

Sylwia Wciślik



Spis literatury

1. PN-EN ISO 14644-1:2016-03 Pomieszczenia czyste i związane środowiska kontrolowane – Część 1: Klasyfikacja czystości powietrza w odniesieniu do stężenia cząstek zawieszonych (ISO 14644-1:2015). Warszawa: Polski Komitet Normalizacyjny.
2. PN-EN ISO 14644-2:2016-03 Pomieszczenia czyste i związane środowiska kontrolowane – Część 2: Monitorowanie, które zapewnia dowody zgodności pomieszczenia czystego z wymaganiami dotyczącymi czystości powietrza w odniesieniu do stężenia cząstek (ISO 14644-2:2015). Warszawa: Polski Komitet Normalizacyjny.
3. PN-EN ISO 14644-3:2020-06 Pomieszczenia czyste i związane środowiska kontrolowane – Część 3: Metody badań (ISO 14644-3:2019). Warszawa: PKN.
4. PN-EN ISO 14644-4:2023-03 Pomieszczenia czyste i związane środowiska kontrolowane – Część 4: Projektowanie, budowa i odbiór (ISO 14644-4:2022). Warszawa: PKN.
5. PN-EN ISO 14644-5:2005 Pomieszczenia czyste i związane środowiska kontrolowane – Część 5: Eksploatacja (ISO 14644-5:2004). Warszawa: PKN.
6. PN-EN ISO 14644-7:2008 Pomieszczenia czyste i związane środowiska kontrolowane – Część 7: Urządzenia separujące (komory laminarne, izolatki, minipomieszczenia) (ISO 14644-7:2004). Warszawa: PKN.
7. ISO 14644-8:2022, Cleanrooms and associated controlled environments – Part 8: Classification of air cleanliness by chemical concentration (ACC).
8. PN-EN ISO 14644-9:2022-12 Pomieszczenia czyste i związane środowiska kontrolowane – Część 9: Klasyfikacja czystości powierzchni w odniesieniu do cząstek zawieszonych (ISO 14644-9:2012). Warszawa: PKN.
9. PN-EN ISO 14644-10:2023-02 Pomieszczenia czyste i związane środowiska kontrolowane – Część 10: Klasyfikacja czystości powierzchni w odniesieniu do stężenia chemikaliów (ISO 14644-10:2013). Warszawa: PKN.
10. ISO 14644-12:2018, Cleanrooms and associated controlled environments – Part 12: Classification of air cleanliness by nanoscale particle concentration.
11. ISO 14644-13:2017, Cleanrooms and associated controlled environments – Part 13: Cleaning of surfaces to achieve defined levels of cleanliness in terms of particle and chemical classifications.
12. ISO 14644-14:2016, Cleanrooms and associated controlled environments – Part 14: Assessment of suitability for use of equipment by airborne particle concentration.
13. PN-EN ISO 14644-15:2018-03 Pomieszczenia czyste i związane środowiska kontrolowane – Część 15: Ocena przydatności urządzeń i materiałów



- w odniesieniu do stężenia zanieczyszczeń chemicznych w powietrzu (ISO 14644-15:2017). Warszawa: PKN.
14. ISO 14644-16:2019, Cleanrooms and associated controlled environments – Part 16: Energy efficiency in cleanrooms and separative devices.
 15. ISO 14644-17:2021, Cleanrooms and associated controlled environments – Part 17: Particle deposition rate applications.
 16. ISO 14644-18:2023, Cleanrooms and associated controlled environments – Part 18: Assessment of suitability of consumables.
 17. ISO/TR 14644-21:2023, Cleanrooms and associated controlled environments – Part 21: Airborne particle sampling techniques (Technical Report).
 18. Komisja Europejska. EudraLex – Tom 4: Wytoczne Unii Europejskiej dotyczące Dobrej Praktyki Wytwarzania Produktów Leczniczych. Aneks 1 – Wytwarzanie produktów sterylnych. Bruksela: Komisja Europejska, 2022. Dostępny w Internecie: https://health.ec.europa.eu/system/files/2022-08/annex1_en_2022.pdf [dostęp: 20.07.2025].
 19. Sharma RB. Risk Management of HVAC System in Pharma Industries. Int J Pharm Res Scholars. 2015; (wydanie).
 20. ASHRAE 170-2021, Ventilation of Health Care Facilities. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE), 2021.
 21. PN-EN 13779:2008, Wentylacja budynków niemieszkalnych – Wymagania dotyczące właściwości instalacji wentylacyjnych i klimatyzacyjnych. Warszawa: Polski Komitet Normalizacyjny (PKN), 2008.
 22. PN-EN 1822:2020-06. Filtry powietrza o wysokiej skuteczności (EPA, HEPA i ULPA) – Część 1: Klasyfikacja, badanie skuteczności działania, oznakowanie. Część 4: Metoda badania szczelności elementów filtracyjnych (metoda skanowania). Warszawa: Polski Komitet Normalizacyjny.
 23. PN-EN ISO 29463-1:2018-02. Filtry i materiały filtracyjne o wysokiej skuteczności do usuwania cząstek z powietrza – Część 1: Klasyfikacja, badania skuteczności działania, oznakowanie. Część 3: Badanie płaskich materiałów filtracyjnych. Warszawa: Polski Komitet Normalizacyjny.
 24. TROX GmbH. (2021). Laboratory Air Management: Engineering Design Guidelines. Retrieved from <https://www.trox.pl> [dostęp 28.07.2025]
 25. DIN 1946-7:2009-05. Ventilation and air conditioning – Part 7: Ventilation systems in laboratories. Deutsches Institut für Normung (DIN), Berlin.
 26. NFPA 45: Standard on Fire Protection for Laboratories Using Chemicals. National Fire Protection Association (NFPA), 2023.



27. World Health Organization. Laboratory Biosafety Manual, 4th edition. Geneva: WHO, 2020.
28. U.S. Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention (CDC), National Institutes of Health (NIH). Biosafety in Microbiological and Biomedical Laboratories (BMBL), 6th ed. Washington, DC: U.S. Government Printing Office, 2020.
29. PN-EN ISO 14644-1:2020-07. Cleanrooms and associated controlled environments – Part 1: Classification of air cleanliness by particle concentration. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa.
30. European Commission. EU Guidelines for Good Manufacturing Practice for Medicinal Products for Human and Veterinary Use. Annex 1: Manufacture of Sterile Medicinal Products. Brussels, 2022.
31. Michał Szymański, Radosław Górzeński, Kamil Szkarłat, Instalacje HVAC laboratoriów chemicznych – projektowanie. Rynek Instalacyjny 4/2015.
32. PN-EN 14175-4:2004, Dygestoria — Część 4: Wymagania dotyczące wentylacji i dopływu powietrza, Polski Komitet Normalizacyjny.