

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

**Kaskady ciśnienia w pomieszczeniach czystych**

***Dlaczego i jak?***



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



# Co to jest cleanroom?



Pomieszczenie czyste (z ang. cleanroom) to specjalnie zaprojektowana przestrzeń i kontrolowane środowisko, w którym utrzymuje się określoną jakość powietrza i minimalizuje obecność zanieczyszczeń takich jak pyły, mikroorganizmy, cząstki. Pomieszczenia czyste możemy znaleźć w takich branżach jak: medycyna, farmacja, elektronika czy badania naukowe, a ich kluczowym zadaniem jest minimalizacja wprowadzania, generowania i zatrzymywania zanieczyszczeń mających wpływ na prowadzone w nich procesy technologiczne, bezpieczeństwo i zdrowie pacjentów lub jakość wytwarzanych produktów.

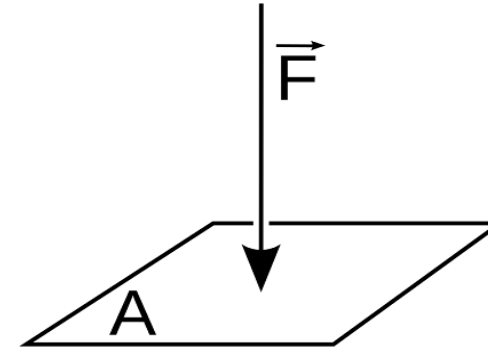
W środowisku tym utrzymuje się z dużą precyzją określone normami i ściśle kontrolowane parametry takie jak: temperatura, wilgotność, ilość cząstek, ilości strumieni objętości powietrza dostarczanego i usuwanego, prędkości powietrza, krotności wymian, hałas, a jednym z kluczowych parametrów jest utrzymanie odpowiedniego ciśnienia w pomieszczeniu.

# A co to te ciśnienie? - czyli odrobina teorii



Ciśnienie to fizyczna wielkość skalarna określająca siłę działającą prostopadle na jednostkową powierzchnię.

$$P = \frac{F}{A} \quad 1 \text{ Pa} = \frac{1 \text{ N}}{1 \text{ m}^2}$$



gdzie:  $P$  – ciśnienie [Pa],  
 $F$  – siła działająca prostopadle do powierzchni [N],  
 $A$  – powierzchnia, na którą działa siła [ $\text{m}^2$ ].

$$1 \text{ Pa} \approx 0.102 \text{ kg/m}^2, \quad 10 \text{ Pa} \approx 1.02 \text{ kg/m}^2, \quad 100 \text{ Pa} \approx 10.2 \text{ kg/m}^2$$

# A co to te ciśnienie? - czyli odrobina teorii

Do opisu ciśnienia, wykorzystuje się równanie Bernoulliego, które opisuje zasadę zachowania energii dla płynów idealnych w ruchu. Mówi, że suma ciśnienia, energii kinetycznej i energii potencjalnej pozostaje stała dla pojedynczej cząstki płynu poruszającej się wzdłuż konkretnej trajektorii przepływu (czyli linii prądu) i jest wyrażana wzorem:

$$p + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho gh = \text{const.}$$

gdzie:  $p$  – ciśnienie statyczne [Pa],  
 $\rho$  – gęstość płynu [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ],  
 $v$  – prędkość płynu [m/s],  
 $g$  – przyspieszenie ziemskie ( $9.81 \text{ m}/\text{s}^2$ ),  
 $h$  – wysokość nad poziomem odniesienia [m],



Daniel Bernoulli (1700-1782),  
matematyk i fizyk

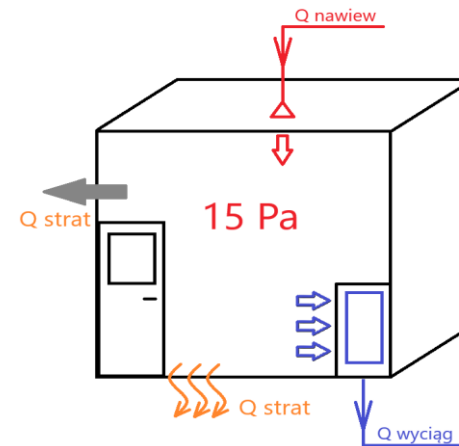


# Co można zobaczyć przez dziurkę od klucza?

Aby wytworzyć nadciśnienie w pomieszczeniu musimy dostarczyć do niego więcej powietrza niż z niego odbierzemy i spełnić warunek:

$$Q_{\text{Nawiew}} > Q_{\text{Wyciąg}} + Q_{\text{Strat}}$$

gdzie:  $Q_{\text{nawiew}}$  – strumień objętości powietrza doprowadzanego [ $\text{m}^3/\text{h}$ ],  
 $Q_{\text{wyciąg}}$  – strumień objętości powietrza usuwanego [ $\text{m}^3/\text{h}$ ],  
 $Q_{\text{strat}}$  – strumień objętości powietrza traconego [ $\text{m}^3/\text{h}$ ],



Dla pomieszczeń pracujących w trybie podciśnienia:  $Q_{\text{Nawiew}} < Q_{\text{Wyciąg}} + Q_{\text{Strat}}$



# Co można zobaczyć przez dziurkę od klucza?

Dla pomieszczeń czystych wyróżniamy trzy główne rodzaje strat ciśnienia:

**Straty liniowe** – wynikają z tarcia powietrza o ściany kanału, zależą od długości, przekroju, chropowatości powierzchni oraz prędkości przepływu powietrza. Wartość to: Pa/m i jest proporcjonalna do długości kanału.

**Straty miejscowe** -  $\zeta$  (zeta) – występują na elementach systemu, takich jak kolana, rozgałęzienia, zwężki, kratki wentylacyjne, filtry HEPA, tłumiki czy przepustnice. Wywołane są zmianą kierunku lub prędkości przepływu.

**Straty przez otwory** - związane z nieszczelnościami konstrukcyjnymi i technologicznymi – przejścia kablowe przez ściany, gniazdka elektryczne, oprawy oświetleniowe, konstrukcję ścianek czystych i sufitu podwieszanego, nieszczelności drzwi, nieszczelności na łączeniu wykładzin podłogowych, okien podawczych, portów gazów, itp.

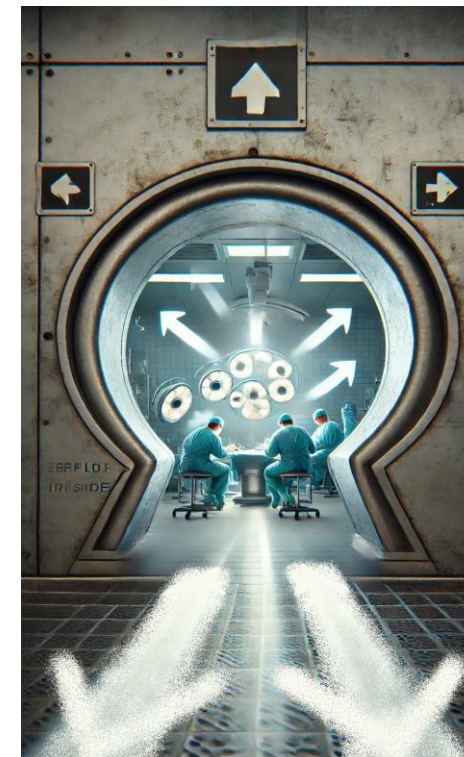
To ile powietrza przepłynie przez „dziurkę od klucza” o powierzchni  $1\text{cm}^2$  pomiędzy dwoma pomieszczeniami, gdzie w jednym jest utrzymywane 15 Pa, w drugim 5Pa, dla temperatury  $22\text{ }^\circ\text{C}$  i wilgotności 55 %?

$$v = \sqrt{\frac{2 \Delta p}{\rho}} \quad Q = v * A$$

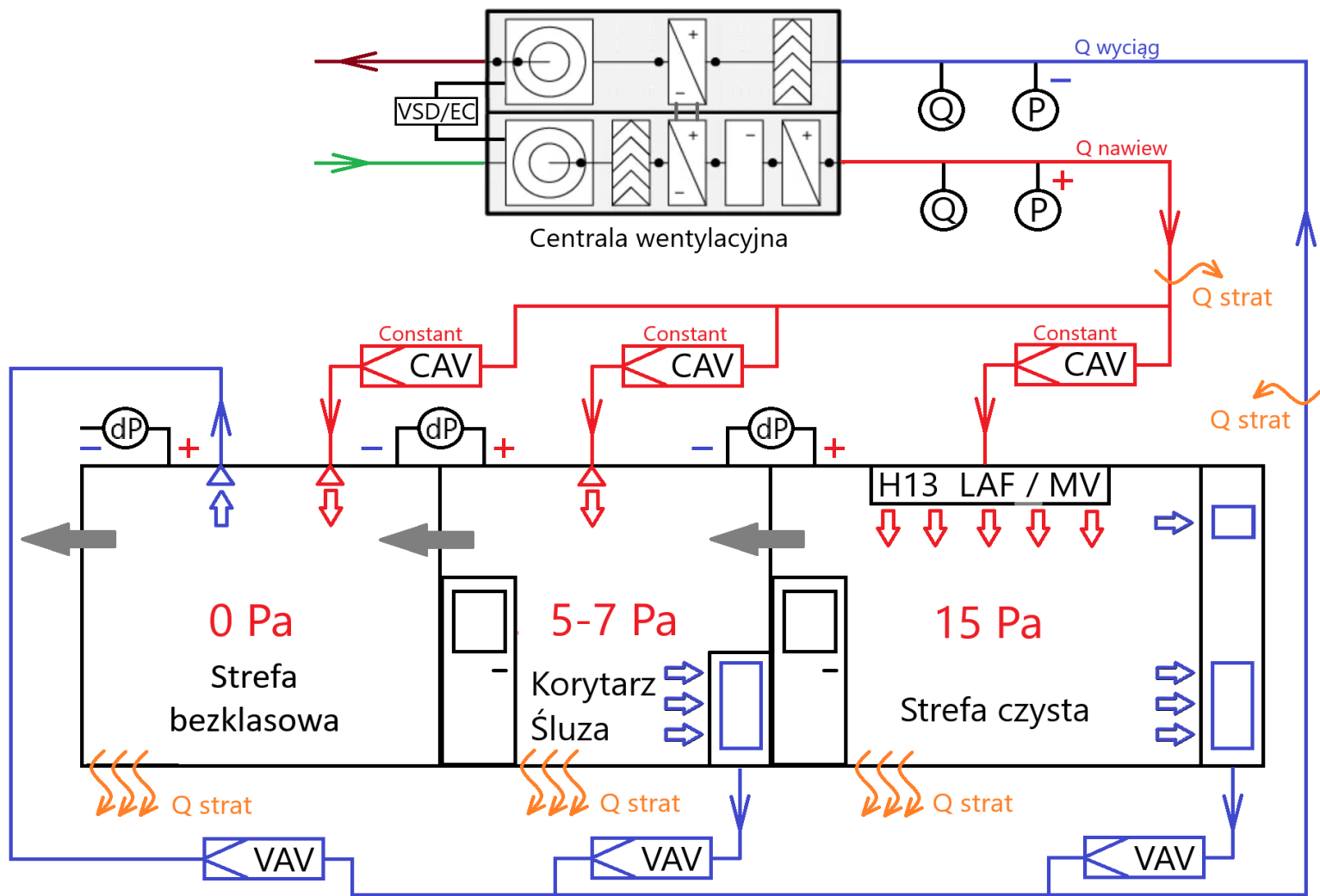
$$Q = \sqrt{\frac{2 * (15 - 5)}{1.19}} * 0.0001 * 3600 = 4.0996 * 1 * 3600 = 1,47 \text{ m}^3/\text{h}$$

To ponad  $35 \text{ m}^3$  w ciągu 24 godzin pracy cleanroomu i ponad  $12.000 \text{ m}^3$  w ciągu roku.

....a przecież to tylko taka „mała dziurka od klucza”.



# Jak to zrobić?



$$Q \text{ Nawiew} > Q \text{ Wyciąg} + Q \text{ Strat}$$

Przykładowy schemat rozwiązania systemu HVAC dla zbudowania kaskady ciśnień.

# Ale czego użyć?

## Regulatory CAV i VAV:

Z cyfrowym siłownikiem przepustnicy i połączeniem do układu automatyki centrali

Możliwość dopasowania do instalacji – programowania zakresów, kalibracji

Możliwość odczytu aktualnego przepływu, ciśnień, stopnia otwarcia, duża dokładność

Regulatory CAV pracujące na stały wydatek z możliwością zmiany nastawy w czasie

Regulatory VAV pracujące na utrzymanie różnicy ciśnień pomiędzy pomieszczeniami

## Falowniki wentylatorów nawiewu i wyciągu lub silniki EC

Sterowanie względem sumy przepływów z regulatorów CAV dla nawiewu

Sterowanie względem sumy przepływów z regulatorów VAV dla wyciągu

Uwzględnienie strat liniowych, miejscowych i przez otwory w bilansie powietrza

Uwzględnienie wzrostu oporów w czasie – zapychanie się filtrów – zmiana ciśnienia

## Przetworniki różnicy małych ciśnień dla powietrza:

Odpowiednie zakresy pomiarowe (np. -50 do 50 Pa, -100 do 100 Pa)

Rozdzielczość pomiaru od 0.1 do max. do 1 Pa

Pomiar różnicy ciśnień realizowany pomiędzy strefami

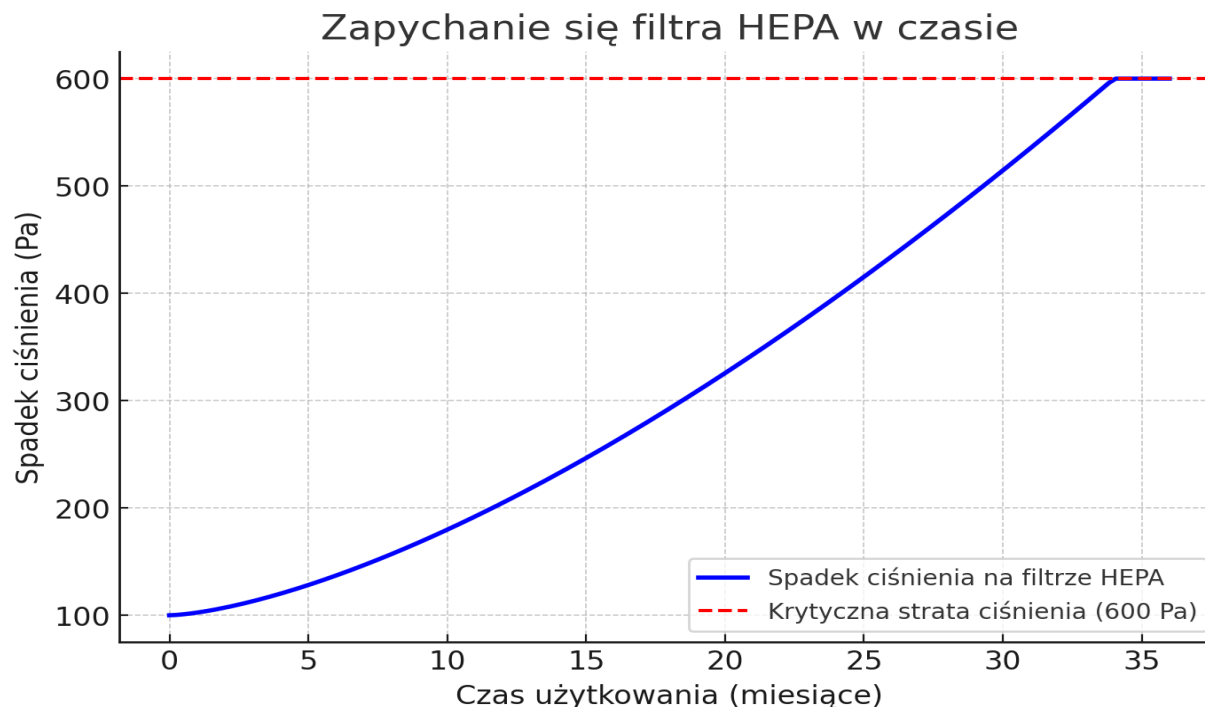
Rurki pomiarowe umieszczane w najbardziej niekorzystnych miejscach – blisko drzwi, otworów

Świadectwa wzorcowania, kalibracji

Odpowiednie IP, wyświetlacz lokalny, błąd pomiarowy najmniejszy, z funkcją autokalibracji



# A co z filtrami HEPA?



Zwróćmy uwagę na:

- Filtry HEPA lub ULPA mają bardzo wysoki końcowy spadek ciśnienia,
- Zapychanie się filtrów następuje w długim okresie czasu (lata),
- Regulatory CAV i centrala wentylacyjna muszą pokonać opory filtrów w czasie – zmiana ciśnienia i wydatku powietrza na centrali w trakcie eksploatacji.

# Czy drzwi mają znaczenie?

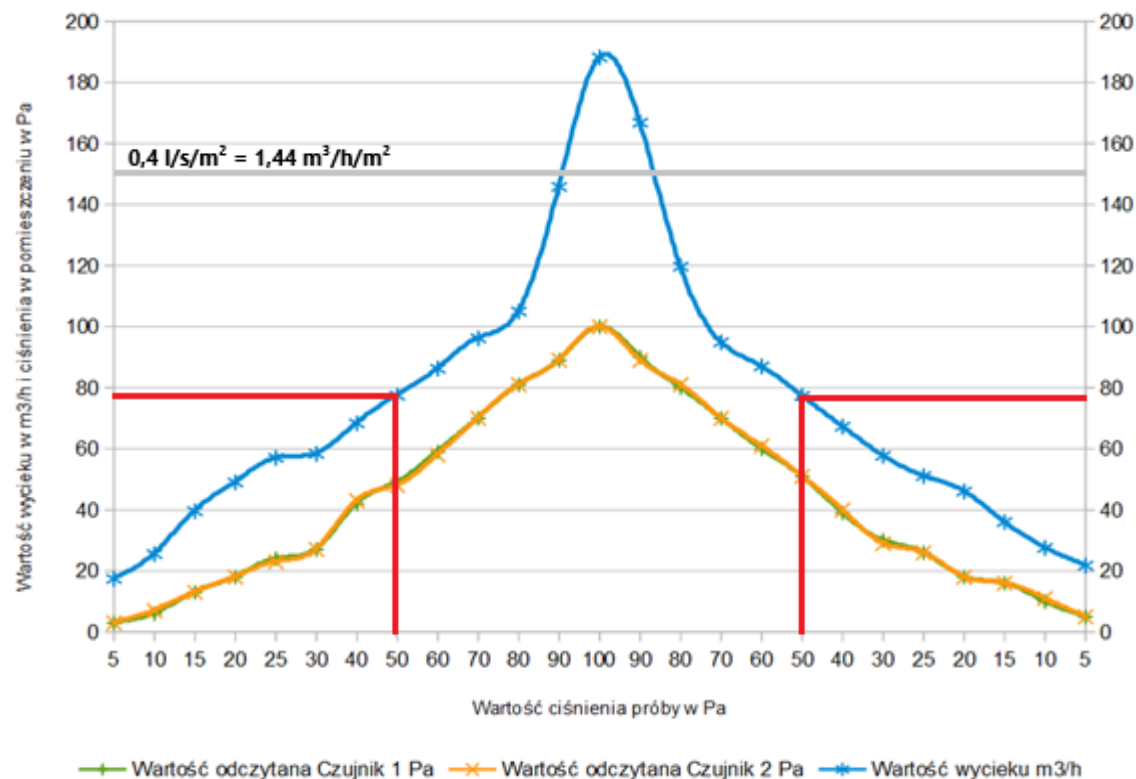
- Każde otwarcie drzwi wprowadza zakłócenia w utrzymaniu nadciśnienia w pomieszczeniu, zmienia kierunki przepływów, zwiększa możliwość kontaminacji pomieszczenia
- Drzwi przesuwne są lepsze od uchylnych – mniejsze opory, większa funkcjonalność
- Stosujemy drzwi automatyczne, szczelne, z domykaniem, łatwe do dezynfekcji
- Sprawdzamy stan uszczelek i wykonujemy okresowe przeglądy, regulacje
- Minimalizujemy liczby wejść/wyjść personelu w trakcie użytkowania pomieszczenia
- Monitorujemy ciśnienie, stosujemy alarmy optyczno-akustyczne w razie spadku ciśnienia
- Rozważmy stosowanie blokad krzyżowych lub alarmu o otwarciu wielokrotnym
- Stosujemy funkcję częściowego otwierania i krótkie czasy otwarcia
- Zapewniamy szkolenie personelu w zakresie procedur i kontroli dostępu.



# Laboratorium PW – przykładowe pomiary szczelności



Wykres nieszczelności pomieszczenia  
dla ciśnień od 0 do 100 Pa



Dla  $P = 50$  Pa, wartość nieszczelności wyniosła:

**$L_s \approx 0,18-0,19$  l/s/m<sup>2</sup>**

$L_s \leq 0,4$  l/s/m<sup>2</sup> - dwukrotnie mniejsze

Test 2 Szczelność pomieszczenia i kanału nawiewnego od centrali do pomieszczenia								
Data	29 11 2023	g 11.30	Tzew = -3stC	P atm=993,1hPa	Włg. Zew 85,8%			
Nr. pomiaru	Wartość nastawiona	Wartość odczytana Czujnik 1	Wartość odczytana Czujnik 2	Wartość wycieku	Wartość wycieku przyrząd	Wartość wycieku obliczona	Wartość wycieku obliczona	Sprawdzenie warunku:
	Pa	Pa	Pa	m <sup>3</sup> /h	l/s	l/s / m <sup>2</sup>	m <sup>3</sup> /h / m <sup>2</sup>	$L_s \leq 0,4$ [l/s / m <sup>2</sup> ]
1	5	3	3	17,41	4,84	0,041612	0,149619	Akceptowane
2	10	6	7	25,53	7,12	0,061180	0,219402	Akceptowane
3	15	13	13	39,57	10,77	0,092556	0,340059	Akceptowane
4	20	18	18	49,00	13,21	0,113525	0,421100	Akceptowane
5	25	24	23	57,03	14,96	0,128564	0,490108	Akceptowane
6	30	27	27	58,35	16,92	0,145408	0,501452	Akceptowane
7	40	42	43	68,34	18,85	0,161994	0,587305	Akceptowane
8	50	49	48	77,42	21,56	0,185284	0,665337	Akceptowane
9	60	59	58	86,24	23,71	0,203761	0,741135	Akceptowane
10	70	70	70	96,21	26,55	0,228167	0,826816	Akceptowane
11	80	81	81	105,00	29,09	0,249996	0,902356	Akceptowane
12	90	89	89	145,80	40,29	0,346247	1,252986	Akceptowane
13	100	100	100	188,20	50,18	0,431240	1,617366	Nieakceptowane
14	90	90	89	166,80	46,12	0,396349	1,433458	Akceptowane
15	80	80	81	119,70	33,42	0,287207	1,028686	Akceptowane
16	70	70	70	94,93	26,68	0,229284	0,815816	Akceptowane
17	60	60	61	87,01	24,07	0,206854	0,747753	Akceptowane
18	50	51	51	77,30	22,23	0,191042	0,664306	Akceptowane
19	40	39	40	67,29	19,04	0,163627	0,578282	Akceptowane
20	30	30	29	57,75	15,99	0,137416	0,496296	Akceptowane
21	25	26	26	51,10	14,33	0,123150	0,439147	Akceptowane
22	20	18	18	46,05	12,68	0,108970	0,395748	Akceptowane
23	15	16	16	36,02	10,48	0,090064	0,309551	Akceptowane
24	10	10	11	27,57	8,92	0,076632	0,236933	Akceptowane
25	5	5	5	21,77	6,25	0,053720	0,187089	Akceptowane



## Reasumując:

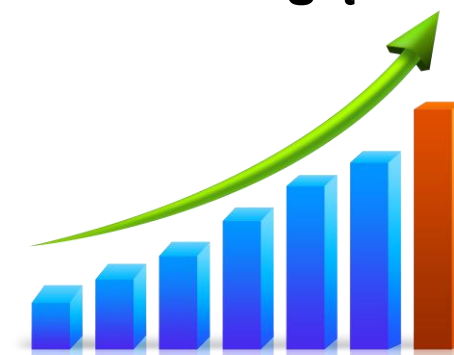
1. Uszczelniamy kanały wentylacyjne i pomieszczenia oraz dbamy o ich szczelność w trakcie eksploatacji - oszczędzamy energię. Rewalidujemy pomieszczenia czyste.

2. W procesie projektowania uwzględniamy w bilansach spadki ciśnienia na filtrach HEPA dla początku i końca ich eksploatacji oraz oczekiwane wartości nadciśnienia i przepływów w pomieszczeniach – zostawmy zapas wydatku na centralach. Spróbujemy oszacować i uwzględnić nieszczelności.

3. Regulatory CAV i VAV dobieramy na maksymalne wydatki. Pamiętajmy o podłączeniu ich do układów automatyki i możliwości ich konfiguracji. Algorytm sterowania powinien uwzględniać współpracę wszystkich czystych pomieszczeń pomiędzy sobą.

4. Zadbajmy o poprawny dobór, lokalizację i algorytm pracy przetworników różnicy ciśnień. Pamiętajmy o ich corocznej recalibracji.

5. Zwróćmy uwagę na drzwi do pomieszczeń – ich szczelność i funkcjonowanie. Starajmy się ograniczyć ich nadmierne używanie i zbyt długie otwarcia.



Obraz od  
Freemages.com



**NAUKA DLA  
SPOŁECZEŃSTWA**





# Dziękuję za uwagę.

Kontakt:  
Marcin Michalski  
e-mail: [marcin.michalski@pzits.pl](mailto:marcin.michalski@pzits.pl)

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

