

Nawilżanie powietrza w szpitalach – jakość wody jako klucz do jakości powietrza

Air humidification in hospitals – water quality as the key to air quality



Prof. dr hab. inż. Iwona Skoczko

ORCID ID: [0000-0002-7397-4231](https://orcid.org/0000-0002-7397-4231)

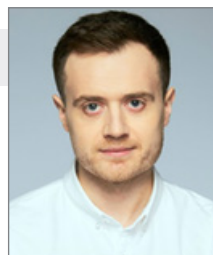
Wydział Budownictwa i Nauk
o Środowisku
Politechnika Białostocka
PZITS O. Białystok
iwona.skoczko@pzits.pl



Dr hab. inż. Agnieszka Malesińska

ORCID ID: [0000-0003-1554-2454](https://orcid.org/0000-0003-1554-2454)

Wydział Inżynierii Środowiska
Politechnika Warszawska
PZITS O. Warszawa
agnieszka.malesinska@pzits.pl



Dr hab. inż. Michał Kubrak

ORCID ID: [0000-0001-8097-3803](https://orcid.org/0000-0001-8097-3803)

Wydział Inżynierii Środowiska
Politechnika Warszawska
PZITS O. Warszawa
michal.kubrak@pzits.pl

Słowa kluczowe: nawilżanie powietrza, HVAC, jakość wody, szpitale, aerozol biologiczny, uzdatnianie wody

Streszczenie

Nawilżanie powietrza w obiektach ochrony zdrowia stanowi istotny element systemów HVAC, wpływający zarówno na komfort użytkowników, jak i na bezpieczeństwo mikrobiologiczne środowiska wewnętrznego. W praktyce projektowej i eksploatacyjnej zagadnienie to jest najczęściej analizowane z perspektywy parametrów powietrza (wilgotność względna, temperatura), natomiast rzadziej uwzględnia się jakość wody zasilającej instalacje nawilżania. Tymczasem w systemach generujących aerozol wodny skład fizykochemiczny i mikrobiologiczny wody może bezpośrednio oddziaływać na jakość powietrza w pomieszczeniach szpitalnych.

W artykule omówiono znaczenie wilgotności względnej w środowisku szpitalnym, przegląd technologii nawilżania oraz mechanizmy przenoszenia zanieczyszczeń wodnych do powietrza. Sformułowano wymagania jakościowe dla wody zasilającej systemy parowe i adiabaticzne oraz wskazano konsekwencje projektowe i eksploatacyjne niewłaściwego uzdatniania. Wykazano, że jakość wody powinna być traktowana jako krytyczny element bezpieczeństwa sanitarnego instalacji HVAC w obiektach ochrony zdrowia.

Keywords: air humidification, HVAC, water quality, hospitals, bioaerosol, water treatment

Abstract

Air humidification in healthcare facilities constitutes an important component of HVAC systems, affecting both occupant comfort and the microbiological safety of the indoor environment. In design and operational practice, this issue is most often analysed from the perspective of air parameters (relative humidity, temperature), while the quality of the water supplying humidification systems is less frequently considered. However, in systems generating water aerosols, the physicochemical and microbiological composition of the water may directly influence indoor air quality in hospital spaces.

This article discusses the significance of relative humidity in the hospital environment, provides an overview of humidification technologies, and describes the mechanisms by which waterborne contaminants can be transferred into the air. Quality requirements for water supplying steam and adiabatic systems are defined, and the design and operational consequences of inadequate water treatment are identified. It is demonstrated that water quality should be regarded as a critical element of sanitary safety in HVAC installations within healthcare facilities.

Wprowadzenie

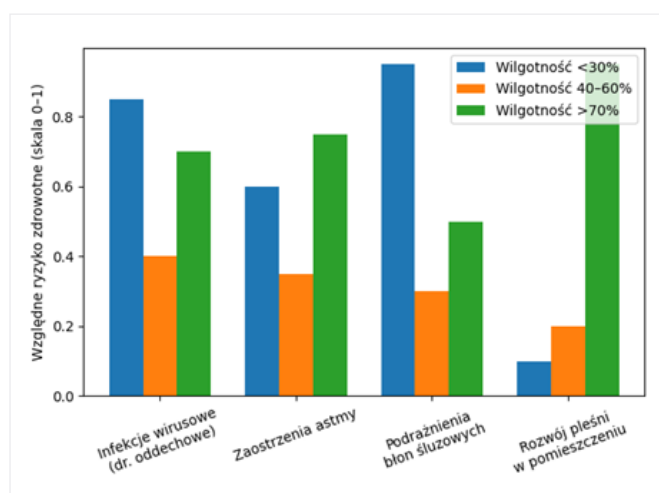
Systemy HVAC w obiektach ochrony zdrowia projektowane są w celu zapewnienia kontrolowanego środowiska powietrznego, ograniczającego transmisję patogenów oraz stabilizującego warunki mikroklimatyczne (Polski Komitet Normalizacyjny, 2016, 2019). W praktyce projek-

towej dominują zagadnienia filtracji powietrza, kontroli różnic ciśnień oraz liczby wymian powietrza na godzinę. Nawilżanie bywa traktowane jako funkcja komfortowa, szczególnie w sezonie grzewczym.

W systemach nawilżania woda zazwyczaj ulega dyspersji i wprowadzana jest do strumienia powietrza nawiewanego. Oznacza to, że jej skład chemiczny i mikrobiologiczny

ny wpływa bezpośrednio na jakość powietrza w pomieszczeniach. Ponieważ proces przenoszenia zanieczyszczeń z wody do powietrza ma charakter technologiczny, a nie przypadkowy, to w literaturze przedmiotu (Blachere i in., 2009; Noti i in., 2013; Pantelic i in., 2009) podkreśla się, że aerozolizacja wody może prowadzić do transmisji drobnoustrojów środowiskowych, w tym bakterii oportunistycznych, w sprzyjających warunkach eksploatacyjnych (Sehulster i in., 2003; World Health Organization, 2010). Problem ten jest szczególnie istotny w obiektach, w których przebywają pacjenci o obniżonej odporności. W kontekście epidemiologicznym szczególne znaczenie ma fakt, że w instalacjach o niskim przepływie lub okresowej pracy mogą powstawać warunki sprzyjające rozwojowi biofilmu. Oderwane fragmenty biofilmu lub mikroorganizmy zawieszone w wodzie mogą zostać wprowadzone do powietrza wraz z aerozolem (Sehulster i in., 2003; World Health Organization, 2010).

Rysunek 1 przedstawia zależność pomiędzy poziomem wilgotności względnej powietrza a względnym ryzykiem wybranych zagrożeń zdrowotnych w środowisku wewnętrznym. Przy wilgotności poniżej 30% obserwuje się wyraźny wzrost względnego ryzyka infekcji wirusowych dróg oddechowych oraz podrażnień błon śluzowych. Zjawisko to wiąże się z wysuszeniem nabłonka oddechowego, upośledzeniem mechanizmów śluzowo-rzęskowych oraz zwiększoną stabilnością niektórych wirusów w aerozolu. W zakresie wilgotności 40–60% ryzyko większości analizowanych zagrożeń osiąga wartości minimalne. Zakres ten uznawany jest w literaturze za optymalny kompromis pomiędzy komfortem użytkowników, fizjologią człowieka a ograniczeniem transmisji patogenów drogą powietrzną. Przy wilgotności przekraczającej 70% obserwuje się ponowny wzrost ryzyka zdrowotnego, szczególnie w odniesieniu do zaostrzeń astmy oraz rozwoju pleśni w środowisku wewnętrznym. Wysoka zawartość pary wodnej w powietrzu sprzyja utrzymywaniu podwyższonej wilgotności powierzchniowej przegród budowlanych oraz materiałów wykończeniowych, co może prowadzić do kolonizacji mi-



Rysunek 1. Wpływ poziomu wilgotności względnej na względne ryzyko wybranych zagrożeń zdrowotnych. Źródło: opracowanie własne na podstawie (ASHRAE, 2023; Dietrich i in., 2022, 2023; Marr i in., 2019; Noti i in., 2013)

Figure 1. Influence of relative humidity level on the relative risk of selected health hazards. Source: author's own elaboration based on (ASHRAE, 2023; Dietrich i in., 2022, 2023; Marr i in., 2019; Noti i in., 2013)

kroorganizmów i wtórnej emisji alergenów oraz bioaerozolu.

Z punktu widzenia inżynierii sanitarnej oznacza to konieczność traktowania jakości wody jako parametru równorzędnego wobec filtracji powietrza. Woda w systemie nawilżania nie jest medium użytkowym – jest medium procesowym, którego właściwości determinują bezpieczeństwo instalacji.

Znaczenie nawilżania powietrza w obiektach ochrony zdrowia

Wymagania dotyczące wilgotności względnej

Utrzymanie kontrolowanego poziomu wilgotności względnej w pomieszczeniach szpitalnych stanowi istotny element zapewnienia stabilnych warunków mikroklimatycznych oraz ograniczenia ryzyka transmisji drobnoustrojów drogą powietrzną. W praktyce projektowej przyjmuje się, że optymalny zakres wilgotności dla większości pomieszczeń medycznych mieści się w przedziale 40–60%. Wartości te wynikają zarówno z analiz fizjologicznych, jak i z badań dotyczących przeżywalności mikroorganizmów w aerozolu (Charkowska i in., 2016). Zakresy zalecane dla wybranych typów pomieszczeń przedstawiono w Tabeli 1. Należy podkreślić, że wymagania te wynikają nie tylko z kryteriów komfortu cieplnego, lecz także z konieczności ograniczenia zjawisk elektrostatycznych, stabilizacji parametrów środowiskowych w trakcie zabiegów oraz zapewnienia odpowiednich warunków dla pracy aparatury medycznej i laboratoryjnej.

Wilgotność względna a przeżywalność drobnoustrojów

W literaturze naukowej (Aganovic i in., 2022; Guarnieri i in., 2023) wykazano, że zależność pomiędzy wilgotnością względną a przeżywalnością drobnoustrojów w powietrzu ma charakter nieliniowy i jest uzależniona od rodzaju patogenu oraz warunków środowiskowych, w tym temperatury i promieniowania UV, przy czym w badaniach (Blachere i in., 2009; Pantelic i in., 2009) wskazano, że zarówno niska, jak i wysoka wilgotność mogą sprzyjać zwiększonej stabilności wybranych grup mikroorganizmów. Syntetyczne zestawienie zależności pomiędzy poziomem wilgotności a przeżywalnością wirusów i bakterii przedstawiono w Tabeli 2. Z danych tych wynika, że w warunkach niskiej wilgotności zwiększa się stabilność niektórych wirusów osłonkowych, natomiast przy wysokiej wilgotności wzrasta przeżywalność bakterii Gram-ujemnych oraz ryzyko tworzenia biofilmu. W zakresie pośrednim obserwuje się relatywnie najmniej sprzyjające warunki dla długotrwałej stabilności wielu patogenów. W systemach generujących aerozol wodny skład fizykochemiczny i mikrobiologiczny wody determinuje skład bioaerozolu wprowadzanego do pomieszczeń.

Technologie nawilżania powietrza w obiektach ochrony zdrowia

W obiektach ochrony zdrowia stosuje się trzy podstawowe grupy technologii nawilżania powietrza: systemy parowe, ewaporacyjne, adiabatyczne oraz ultradźwiękowe. Wybór technologii determinuje nie tylko parametry energetyczne i regulacyjne, lecz przede wszystkim po-

Tabela 1. Zalecane zakresy wilgotności względnej w wybranych pomieszczeniach szpitalnych. Źródło: opracowanie własne na podstawie (ASHRAE, 2023; VDI, 2016; Aganovic i in., 2022; Noti i in., 2013)

Table 1. Recommended relative humidity ranges in selected hospital rooms. Source: author's own elaboration based on (ASHRAE, 2023; VDI, 2016; Aganovic i in., 2022; Noti i in., 2013)

Rodzaj pomieszczenia	Zalecana wilgotność względna, %	Uzasadnienie technologiczne i medyczne	Konsekwencje wilgotności poniżej zakresu	Konsekwencje wilgotności powyżej zakresu
Blok operacyjny	40–60	Stabilność mikroklimatu; ograniczenie ładunków elektrostatycznych; kontrola aerozolu	Wzrost elektrostatyczności; wysuszenie śluzówek personelu; większa podatność na infekcje	Ryzyko kondensacji; rozwój mikroorganizmów na przegrodach i elementach instalacji
Oddział intensywnej terapii	40–60	Ochrona dróg oddechowych pacjentów wentylowanych; stabilność parametrów środowiska	Wysuszenie dróg oddechowych; zaburzenia komfortu oddechowego	Zwiększone ryzyko kolonizacji instalacji; rozwój pleśni
Sale chorych	40–60	Komfort pacjentów; profilaktyka infekcji sezonowych	Podrażnienie błon śluzowych; wzrost transmisji wirusów	Pogorszenie jakości powietrza; możliwość rozwoju alergenów
Pracownie diagnostyczne	40–55	Stabilność aparatury; ograniczenie kondensacji	Wzrost elektrostatyczności; wpływ na dokładność pomiarów	Kondensacja na elementach aparatury; ryzyko błędów pomiarowych
Laboratoria medyczne	40–60	Stabilność procesów analitycznych; kontrola warunków środowiskowych	Zmiana właściwości próbek; zakłócenia procesów analitycznych	Rozwój mikroorganizmów środowiskowych; wpływ na wyniki badań
Pomieszczenia administracyjne	30–60	Zakres komfortowy; brak wymagań klinicznych	Spadek komfortu pracy; podrażnienia dróg oddechowych	Pogorszenie komfortu; możliwy rozwój pleśni przy braku wentylacji

Tabela 2. Wilgotność względna powietrza a przeżywalność drobnoustrojów. Źródło: opracowanie własne na podstawie (Aganovic i in., 2022; Blachere i in., 2009; Guarnieri i in., 2023; Pantelic i in., 2009)

Table 2. Relative air humidity and microorganism survival. Source: author's own elaboration based on (Aganovic et al., 2022; Blachere et al., 2009; Guarnieri et al., 2023; Pantelic et al., 2009)

Zakres wilgotności względnej, %	Charakterystyka przeżywalności wirusów	Charakterystyka przeżywalności bakterii	Wpływ na środowisko wewnętrzne	Konsekwencje przebywania poza zakresem 40–60%
< 30	Zwiększona stabilność części wirusów osłonkowych w aerozolu	Obniżona przeżywalność bakterii Gram-ujemnych; efekt wysuszenia komórek	Wysuszenie błon śluzowych; wzrost unoszenia cząstek	Wzrost podatności na infekcje wirusowe; podrażnienia dróg oddechowych; zwiększona elektrostatyczność
30–40	Umiarkowana przeżywalność; zależna od temperatury	Umiarkowana stabilność środowiskowa	Ograniczone efekty środowiskowe	Początek pogorszenia komfortu; możliwa większa stabilność aerozolu
40–60	Obniżona stabilność większości wirusów oddechowych	Zakres ograniczający rozwój wielu bakterii środowiskowych	Zakres optymalny fizjologicznie	Zakres referencyjny – minimalizacja ryzyka biologicznego
60–70	Wzrost stabilności wybranych wirusów	Zwiększona przeżywalność bakterii Gram-ujemnych	Ryzyko lokalnej kondensacji	Wzrost ryzyka kolonizacji powierzchni; większa aktywność alergenów
> 70	Zmienna; możliwa dłuższa depozycja na powierzchniach	Warunki sprzyjające namnażaniu i tworzeniu biofilmu	Rozwój pleśni i roztoczy; wtórna emisja alergenów	Podwyższone ryzyko chorób

ziom bezpieczeństwa mikrobiologicznego instalacji oraz wymagania w zakresie jakości wody zasilającej. Zgodnie z wytycznymi projektowymi dla obiektów medycznych systemy HVAC powinny być analizowane w kontekście ograniczania transmisji patogenów oraz minimalizacji ryzyka wtórnej kontaminacji środowiska powietrznego (ASHRAE, 2020; Polski Komitet Normalizacyjny, 2016).

Nawilżanie parowe

W systemach parowych woda poddawana jest przemianie fazowej w wyniku doprowadzenia energii cieplnej, a do strumienia powietrza wprowadzana jest para wodna.

Z sanitarnego punktu widzenia istotne jest to, że podczas przemiany fazowej drobnoustroje obecne w wodzie ulegają dezaktywacji, a składniki mineralne pozostają w komorze parownika. W efekcie do powietrza wprowadzana jest para praktycznie wolna od cząstek stałych i mikroorganizmów (ASHRAE, 2020; Polski Komitet Normalizacyjny, 2016). Literatura branżowa wskazuje, że nawilżanie parowe charakteryzuje się najniższym ryzykiem emisji bioaerozolu spośród omawianych technologii, co czyni je rozwiązaniem preferowanym w blokach operacyjnych oraz pomieszczeniach o wysokim reżimie higienicznym (ASHRAE 2023, Polski Komitet Naukowy, 2016). Ograni-

cenieniem pozostaje jednak wysokie zużycie energii oraz konieczność okresowego usuwania osadów mineralnych. Wysoka przewodność i twardość wody prowadzą do odkładania kamienia, co obniża sprawność urządzeń i zwiększa koszty eksploatacyjne. Nie jest natomiast wymagane uzyskanie wody o parametrach wody ultra czystej, jak w przypadku systemów rozpylających.

Nawilżanie adiabatyczne

Systemy adiabatyczne obejmują rozwiązania rozpylające wodę w postaci drobnych kropli (wysokociśnieniowe dysze mgłowe), przez które przepływa strumień powietrza. W przeciwieństwie do systemów parowych woda nie ulega całkowitej przemianie fazowej przed wprowadzeniem do kanału wentylacyjnego. Do powietrza może zostać wprowadzony aerozol zawierający zarówno składniki mineralne, jak i mikroorganizmy obecne w wodzie. Badania dotyczące środowiskowych źródeł bioaerozolu wskazują, że aerolizacja wody stanowi potencjalny mechanizm transmisji bakterii oportunistycznych w warunkach sprzyjających rozwojowi biofilmu (Blachere i in., 2009; Pantelic i in., 2009). W systemach adiabatycznych ryzyko to jest bezpośrednio zależne od jakości wody oraz eksploatacji. Długie okresy stagnacji, brak cyrkulacji oraz niewystarczająca dezynfekcja sprzyjają powstawaniu biofilmu w przewodach i zbiornikach. Wytyczne dotyczące higieny instalacji wodnych w obiektach medycznych podkreślają konieczność ograniczania objętości stagnującej wody oraz zapewnienia możliwości okresowej dezynfekcji instalacji (Sehulster i in., 2003). W praktyce oznacza to konieczność stosowania wody demineralizowanej lub ultra czystej. W przeciwnym razie może dochodzić do emisji osadów mineralnych oraz wtórnego pogorszenia jakości powietrza. Zaletą systemów adiabatycznych jest niskie zużycie energii w porównaniu z nawilżaniem parowym, gdyż proces odparowania wykorzystuje ciepło zawarte w strumieniu powietrza.

Nawilżanie ultradźwiękowe

Nawilżacze ultradźwiękowe wykorzystują przetworniki generujące drgania o wysokiej częstotliwości, które powodują rozbicie warstwy wody na bardzo drobne krople o średnicy rzędu kilku mikrometrów. Wytworzona mgła wodna wprowadzana jest bezpośrednio do strumienia powietrza. Ze względu na bardzo małą średnicę kropli aerozol może być transportowany na znaczne odległości w instalacji wentylacyjnej. Oznacza to, że skład chemiczny i mikrobiologiczny wody jest niemal w całości przenoszony do powietrza. W przypadku niedostatecznej demineralizacji może dochodzić do emisji cząstek soli i krzemionki, co obserwowane jest jako osad na powierzchniach oraz elementach aparatury medycznej. Literatura wskazuje, że w systemach ultradźwiękowych wymagana jest bardzo niska przewodność wody oraz ścisła kontrola mikrobiologiczna, aby ograniczyć ryzyko emisji bioaerozolu (ASHRAE, 2023; Polski Komitet Normalizacyjny, 2016). Energetycznie systemy ultradźwiękowe są korzystniejsze od parowych, jednak wymagają zaawansowanego uzdatniania wody oraz częstych przeglądów serwisowych. W obiektach o wysokim reżimie sanitarnym ich zastosowanie jest ograniczone i wymaga indywidualnej analizy ryzyka.

Nawilżanie ewaporacyjne (naturalne)

Nawilżanie ewaporacyjne polega na przepływie powietrza przez zwilżone medium (matę celulozową lub syntetyczną), po którym woda spływa grawitacyjnie. Odparowanie zachodzi na powierzchni materiału kontaktowego, bez generowania aerozolu. Proces ma charakter adiabatyczny i powoduje jednocześnie obniżenie temperatury powietrza (efekt chłodzenia wyparnego). System ewaporacyjny różni się od rozpylających tym, że nie wprowadza do strumienia powietrza wolnych kropli, lecz wykorzystuje zjawisko parowania powierzchniowego. Ryzyko emisji cząstek mineralnych jest mniejsze niż w systemach ultradźwiękowych, jednak medium nawilżające stanowi potencjalne miejsce rozwoju biofilmu, szczególnie przy niekontrolowanej jakości wody, wysokiej temperaturze i niedostatecznym płukaniu. Zaletą technologii jest niższe zużycie energii w porównaniu z nawilżaniem parowym oraz brak konieczności pracy przy bardzo wysokim ciśnieniu. Ograniczeniem jest wrażliwość na jakość wody oraz ryzyko mikrobiologiczne w medium kontaktowym.

Porównanie technologii w kontekście obiektów ochrony zdrowia

Zestawienie porównawcze technologii przedstawiono w Tabeli 3. Analiza wykazuje, że systemy parowe zapewniają najwyższy poziom bezpieczeństwa mikrobiologicznego kosztem wyższego zużycia energii. Systemy adiabatyczne i ultradźwiękowe są bardziej efektywne energetycznie, lecz ich bezpieczna eksploatacja w warunkach szpitalnych wymaga wody o parametrach znacznie przekraczających jakość wody wodociągowej oraz wdrożenia procedur higienicznych i monitoringu. W świetle wytycznych dotyczących kontroli zakażeń w placówkach ochrony zdrowia (Sehulster i in., 2003) systemy generujące aerozol wodny powinny być traktowane jako potencjalne źródło ryzyka biologicznego, jeżeli nie zapewni się odpowiedniej jakości wody i nadzoru eksploatacyjnego.

Wymagania jakościowe wody dla systemów nawilżania w obiektach ochrony zdrowia

Bezpieczeństwo mikrobiologiczne i stabilność eksploatacyjna systemów nawilżania w obiektach ochrony zdrowia są bezpośrednio uzależnione od jakości wody zasilającej. W odróżnieniu od klasycznych instalacji wodociągowych, w których woda pełni funkcję medium użytkowego, w systemach HVAC stanowi ona medium procesowe, poddawane aerolizacji lub przemianie fazowej. Oznacza to, że jej właściwości fizykochemiczne i mikrobiologiczne determinują zarówno jakość powietrza nawiewanego, jak i trwałość urządzeń. Wytyczne międzynarodowe oraz literatura branżowa podkreślają, że w systemach generujących aerozol wodny jakość wody powinna być wyższa niż jakość wody wodociągowej, a parametry powinny być stabilne w czasie (ASHRAE, 2023; Dietrich i in., 2022; Polski Komitet Naukowy, 2016; W. Yao i in., 2020).

Parametry fizykochemiczne

Wymagania fizykochemiczne dla wody stosowanej w systemach nawilżania powinny być formułowane w odniesieniu do mechanizmu wprowadzania wilgoci do po-

Tabela 3. Porównanie technologii nawilżania powietrza w obiektach ochrony zdrowia. Źródło: opracowanie własne na podstawie (Aganovic i in., 2022; Balthazar & Ismail, 2018; Guarnieri i in., 2023; W. Yao i in., 2020; Y. Yao, 2016)

Table 3. Comparison of air humidification technologies in healthcare facilities. Source: author's own elaboration based on (Aganovic et al., 2022; Balthazar & Ismail, 2018; Guarnieri et al., 2023; W. Yao et al., 2020; Y. Yao, 2016)

Kryterium oceny	Nawilżanie parowe	Nawilżanie adiabatyczne wysokociśnieniowe	Nawilżanie ultradźwiękowe	Nawilżanie ewaporacyjne (kontaktowe)
Mechanizm działania	Odparowanie wody w generatorze pary (przemiana fazowa)	Rozpylanie wody pod wysokim ciśnieniem i jej odparowanie w strumieniu powietrza	Generowanie mgły wodnej przy użyciu przetworników ultradźwiękowych	Parowanie z powierzchni zwilżonego medium (mata, wkład celulozowy)
Forma wprowadzanej wilgoci	Para wodna	Aerozol drobnokropelkowy (10–30 µm)	Bardzo drobny aerozol (1–5 µm)	Parowanie powierzchniowe (bez wolnych kropli przy prawidłowej pracy)
Zużycie energii	Wysokie (energia przemiany fazowej)	Niskie	Niskie do umiarkowanego	Bardzo niskie
Wpływ na temperaturę powietrza	Brak istotnego efektu chłodzenia	Obniżenie temperatury (efekt adiabatyczny)	Minimalny	Wyraźny efekt chłodzenia wyparnego
Wymagana jakość wody	Zmiękczona, kontrolowana przewodność	Demineralizowana (RO), niskie TDS i SiO ₂	Bardzo niska mineralizacja (RO/DI)	Kontrolowana mineralizacja; zalecane RO w obiektach medycznych
Ryzyko emisji cząstek mineralnych	Niskie	Wysokie przy braku RO	Wysokie przy niedostatecznej demineralizacji	Umiarkowane; możliwe osadzanie w medium
Ryzyko mikrobiologiczne	Niskie (dezynfekcja termiczna)	Umiarkowane–wysokie przy stagnacji	Umiarkowane; zależne od jakości wody	Umiarkowane–wysokie w medium kontaktowym
Wrażliwość na stagnację wody	Niska w części parowej	Wysoka	Wysoka	Wysoka w obiegu zwilżającym
Wymagania serwisowe	Odkamienianie, kontrola elektrod	Kontrola dysz, płukanie, dezynfekcja	Częste czyszczenie komory	Regularna wymiana lub dezynfekcja wkładów
Zastosowanie w strefach wysokiego reżimu sanitarnego	Zalecane (bloki operacyjne)	Wymaga analizy ryzyka i pełnego uzdatniania wody	Ograniczone	Ograniczone; wymaga ścisłej kontroli higieny medium

wietrza oraz do wrażliwości instalacji na osady, korozję i emisję cząstek. W systemach parowych dominują zagrożenia odkładania kamienia i stabilności pracy generatorów, natomiast w systemach adiabatycznych i ultradźwiękowych krytyczne znaczenie ma ograniczenie mineralizacji i zawiesin, ponieważ skład wody (w tym sole i krzemiany) może być przenoszony do powietrza w postaci aerozolu i osadów powierzchniowych.

Podstawowym parametrem charakteryzującym mineralizację jest przewodność elektryczna, która koreluje z zawartością jonów rozpuszczonych. Stanowi ona wskaźnik operacyjny do ciągłego nadzoru jakości wody procesowej oraz do oceny skuteczności uzdatniania. Parametr ten należy rozpatrywać łącznie z całkowitym zasoleniem (TDS) oraz składem jonowym, gdyż dwa roztwory o zbliżonej przewodności mogą wykazywać odmienną skłonność do wytrącania osadów i odmienną agresywność. W systemach aerozolowych dąży się do możliwie niskiej przewodności i niskiego TDS, aby ograniczyć emisję cząstek mineralnych oraz depozycję osadów na powierzchniach i w kanałach.

Podwyższona barwa zwykle wskazuje obecność substancji humusowych i związków organicznych, które mogą stanowić pożywkę dla mikroorganizmów oraz pogarszać skuteczność dezynfekcji UV. Z kolei nawet niewielka mętność w systemach rozpylających zwiększa ryzyko zatykania dysz, niestabilności rozpylania, lokalnego zwilżania powierzchni oraz inicjacji biofilmu na elementach mokrych. Zatem woda do nawilżania aerozolowego powinna

cechować się bardzo niską mętnością, a układ uzdatniania powinien obejmować efektywną filtrację mechaniczną.

Dla oceny skłonności do wytrącania osadów kluczowe są jony wapnia i magnezu (Ca^{2+} , Mg^{2+}) determinujące twardość oraz parametry alkaliczności związane z obecnością wodorowęglanów, węglanów i dwutlenku węgla w równowadze węglanowej. Wysoka twardość i alkaliczność sprzyjają wytrącaniu węglanu wapnia, co w generatorach pary prowadzi do osadzania kamienia, a w systemach adiabatycznych i ultradźwiękowych do szybkiego niszczenia urządzeń rozpylania i wzrostu emisji cząstek. Równowaga węglanowa zależy nie tylko od stężeń Ca^{2+} i alkaliczności, lecz również od pH, temperatury i stężenia CO_2 rozpuszczonego. Z tego powodu w analizie wody procesowej należy uwzględnić łącznie pH, zasadowość oraz zawartość CO_2 .

Istotne znaczenie mają również żelazo i mangan (Fe, Mn), które nawet przy relatywnie niskich stężeniach mogą powodować odkładanie osadów tlenkowych/hydroksylowych, przebarwienia oraz zatykanie elementów precyzyjnych. Dodatkowo produkty utleniania Fe i Mn tworzą powierzchnie sprzyjające adhezji mikroorganizmów i rozwojowi biofilmu. W praktyce oznacza to konieczność zastosowania odżelaziania/odmanganiania oraz skutecznej filtracji końcowej.

W kontekście korozji instalacji oraz kompatybilności materiałowej krytyczne są jony chlorkowe i siarczanowe (Cl^- , SO_4^{2-}). Chlorki zwiększają ryzyko korozji wżerowej i szczelinowej stali nierdzewnych oraz przyspieszają ko-

Tabela 4. Zalecane parametry fizykochemiczne wody dla systemów nawilżania w obiektach ochrony zdrowia. Źródło: opracowanie własne na podstawie (Dietrich i in., 2022, 2023; W. Yao i in., 2020; Yildirim & Solmuş, 2014)

Table 4. Recommended physicochemical parameters of water for humidification systems in healthcare facilities. Source: author's own elaboration based on (Dietrich et al., 2022, 2023; W. Yao et al., 2020; Yildirim & Solmuş, 2014)

Parametr	Jednostka	Nawilżanie parowe	Nawilżanie adiabatyczne	Nawilżanie ultradźwiękowe	Znaczenie technologiczne
Przewodność	μS/cm	100–800 (kontrolowana)	< 50	< 20	Zawartość soli i osadów
TDS (zasolenie ogólne)	mg/L	< 500	< 30	< 15	Określa depozycję mineralną
Twardość ogólna	°mg CaCO ₃ /L	< 5	< 0,1	< 0,05	Cechuje wodę w zakresie kamienienia i zatykania dysz
Wapń (Ca ²⁺)	mg/L	< 50	< 5	< 2	Składnik kamienia kotłowego
Magnez (Mg ²⁺)	mg/L	< 30	< 2	< 1	Składnik kamienia kotłowego
Żelazo (Fe)	mg/L	< 0,1	< 0,05	< 0,02	Osady tlenkowe; inicjacja biofilmu
Mangan (Mn)	mg/L	< 0,05	< 0,02	< 0,01	Osady tlenkowe; zatykanie dysz
Chlorki (Cl ⁻)	mg/L	< 100	< 50	< 25	Ryzyko korozji wżerowej
Siarczany (SO ₄ ²⁻)	mg/L	< 100	< 50	< 25	Korozja ogólna; osady
Azot amonowy (N-NH ₄ ⁺)	mg/L	< 0,5	< 0,2	< 0,1	Wskaźnik zanieczyszczenia biologicznego
Krzemionka (SiO ₂)	mg/L	< 10	< 1	< 0,5	Emisja cząstek mineralnych
Alkaliczność	mval/L	50–150	< 30	< 20	Równowaga węglanowa
pH	–	6,5–8,5	6,5–8,0	6,5–7,5	Stabilność chemiczna i korozyjna
CO ₂ rozpuszczony	mg/L	kontrolowany	niski	niski	Agresywność wody
Mętność	NTU	< 1	< 0,2	< 0,1	Zatykanie dysz, brak stabilności aerozolu
Barwa	mg Pt/L	< 15	< 5	< 2	Wskaźnik pośredni materii organicznej
Temperatura wody	°C	5–25	< 20 (stabilna)	< 20 (stabilna)	Wpływ na namnażanie mikroorganizmów

rozję stopów miedzi w niekorzystnych warunkach elektrochemicznych, natomiast siarczany mogą intensyfikować korozję ogólną i tworzenie osadów w zależności od warunków redoks i obecności kationów. W przypadku systemów nawilżania, w których występują strefy okresowego zwilżania i wysychania, agresywność chlorkowa jest szczególnie istotna, ponieważ cykliczne zagęszczanie roztworu na powierzchniach może lokalnie zwiększać stężenia jonów i przyspieszać degradację materiałów.

Warto uwzględnić także jon amonowy (NH₄⁺), który może wskazywać na zanieczyszczenia pochodzenia biologicznego lub procesy zachodzące w sieci i instalacji. Amon może sprzyjać rozwojowi mikroorganizmów w określonych warunkach oraz wpływać na przebieg dezynfekcji i stabilność chemiczną wody. W obiektach ochrony zdrowia, gdzie dąży się do minimalizacji ładunku biologicznego wody procesowej, obecność NH₄⁺ powinna być traktowana jako sygnał diagnostyczny wymagający weryfikacji źródła i ryzyka wtórnej kontaminacji.

W systemach ultradźwiękowych i adiabatycznych szczególne znaczenie mają formy krzemianowe (SiO₂ lub SiO₃²⁻). Mogą być przenoszone do powietrza jako bardzo drobna frakcja i osadzać się na powierzchniach. Zjawisko to jest krytyczne w środowisku szpitalnym ze względu na wymagania czystości powierzchni i wrażliwość aparatury. Krzemiany są również istotne z punktu widzenia eksploatacji uzdatniania, gdyż ich usuwanie bywa mniej efektywne w standardowych procesach zmiękczenia, a w pewnych

warunkach może ograniczać skuteczność membran oraz wpływać na powstawanie osadów.

Uzupełniając, poza CO₂, w analizie wody procesowej warto uwzględnić gazy rozpuszczone i parametry redoks, ponieważ wpływają one na korozyjność i stabilność chemiczną. Dwutlenek węgla obniża pH i zwiększa agresywność korozyjną wody, szczególnie w układach o niskiej alkaliczności, natomiast warunki utleniająco-redukujące determinują przemiany Fe i Mn oraz tendencje do powstawania osadów. W instalacjach nawilżania znaczenie mają również warunki kontaktu wody z powietrzem, ponieważ odgazowanie i zmiana równowagi węglanowej mogą prowadzić do wtórnych zmian pH i wytrącania osadów.

Istotnym parametrem eksploatacyjnym jest temperatura wody (w punkcie zasilania oraz w całym obiegu). Temperatura determinuje zarówno równowagę chemiczną (w tym równowagę węglanową, rozpuszczalność CO₂ oraz tendencje do wytrącania węglanów), jak i dynamikę procesów biologicznych oraz ryzyko wtórnej kontaminacji instalacji. Wzrost temperatury wody sprzyja odgazowaniu CO₂, zmianie pH i przesunięciu równowagi węglanowej, co może inicjować wytrącanie osadów w strefach mieszania oraz na elementach o lokalnych spadkach ciśnienia i temperatury. Jednocześnie zakres temperatur około 20–45°C jest szczególnie niekorzystny z punktu widzenia bezpieczeństwa mikrobiologicznego, ponieważ sprzyja wzrostowi wielu bakterii środowiskowych i intensyfikacji tworzenia biofilmu w przypadku stagnacji lub niskich

przepływów. Z tego względu woda procesowa do nawilżania, zwłaszcza w systemach aerozolowych, powinna być utrzymywana w możliwie stabilnym reżimie temperaturowym, a projekt powinien minimalizować odcinki przewodów i zbiorniki, w których dochodzi do niekontrolowanego dogrzewania wody przez otoczenie techniczne (np. maszyny, przestrzenie stropowe). Projekt instalacji oraz zbiorników magazynujących wodę powinien uwzględniać krótki czas zatrzymania wody i temperaturę nie przekraczającą 15°C, przy jednoczesnym zapewnieniu możliwości higienicznego płukania i okresowej dezynfekcji. Zalecane parametry przedstawiono w Tabeli 4.

Parametry mikrobiologiczne wody procesowej

W odróżnieniu od instalacji wody pitnej, gdzie kryterium bezpieczeństwa odnosi się do spożycia, w systemach HVAC istotne jest ryzyko inhalacyjne oraz możliwość kolonizacji instalacji przez mikroorganizmy środowiskowe. Z tego względu wymagania mikrobiologiczne dla wody do nawilżania powinny być bardziej rygorystyczne niż minimalne wymagania dla wody wodociągowej.

Ogólna liczba mikroorganizmów

Podstawowym parametrem oceny czystości mikrobiologicznej jest ogólna liczba bakterii heterotroficznych (HPC – Heterotrophic Plate Count), oznaczana w jednostkach CFU/mL. Woda wodociągowa może zawierać niewielką liczbę drobnoustrojów nieszkodliwych w warunkach spożycia, jednak w systemach aerozolowych nawet niska koncentracja bakterii może stanowić punkt wyjścia do kolonizacji instalacji. W praktyce inżynierskiej przyjmuje się, że woda zasilająca systemy adiabaticzne i ultradźwiękowe powinna wykazywać bardzo niską ogólną liczbę drobnoustrojów, typowo poniżej 10–100 CFU/mL, przy czym w obiektach o podwyższonym reżimie sanitarnym dąży się do poziomów możliwie bliskich granicy wykrywalności metod rutynowych. Kluczowe jest nie tylko spełnienie wymogu jednorazowego, lecz utrzymanie stabilności mikrobiologicznej w czasie.

Bakterie oportunistyczne

Szczególne znaczenie mają bakterie oportunistyczne zdolne do kolonizacji instalacji wodnych i tworzenia biofilmu. Do najistotniejszych należą bakterie z rodzaju *Legionella*, *Pseudomonas* oraz niektóre bakterie atypowe z grupy *Mycobacterium*. W obiektach ochrony zdrowia, gdzie przebywają pacjenci o obniżonej odporności, obecność tych drobnoustrojów w wodzie procesowej stanowi istotne ryzyko epidemiologiczne. W systemach nawilżania, zwłaszcza adiabaticznych, warunki sprzyjające namnażaniu obejmują: temperaturę w zakresie 18–45°C, obecność związków organicznych oraz powierzchnie umożliwiające adhezję mikroorganizmów. Z tej przyczyny projekt instalacji powinien minimalizować stagnację wody, zapewniać możliwość okresowej dezynfekcji oraz ograniczać objętość zbiorników retencyjnych. W praktyce eksploatacyjnej zaleca się okresowe badania w kierunku *Legionella* spp. oraz kontrolę parametrów pośrednich wskazujących na potencjalny rozwój biofilmu.

Biofilm jako czynnik ryzyka

Kluczowym zagrożeniem mikrobiologicznym w systemach nawilżania jest powstawanie biofilmu na powierzchniach przewodów, zbiorników i dysz. Biofilm stanowi złożoną strukturę mikroorganizmów osadzonych w macie-

rzy polimerowej, która chroni bakterie przed działaniem środków dezynfekcyjnych i czynników środowiskowych. Nawet w przypadku wody o niskiej liczbie drobnoustrojów biofilm może być źródłem okresowego uwalniania komórek do wody, a następnie do aerozolu. Zapobieganie biofilmowi obejmuje utrzymanie niskiego poziomu materii organicznej w wodzie, ograniczenie mętności, stabilizację temperatury poniżej zakresu intensywnego wzrostu bakterii oraz zapewnienie odpowiednich prędkości przepływu w instalacji.

Parametry wskaźnikowe i monitoring operacyjny

Oprócz klasycznych oznaczeń mikrobiologicznych coraz częściej stosuje się szybkie metody oceny czystości biologicznej, takie jak pomiar całkowitej zawartości ATP w wodzie. Parametr ten pozwala na bieżącą ocenę aktywności biologicznej i może być wykorzystywany jako narzędzie wczesnego ostrzegania przed rozwojem biofilmu. W instalacjach wysokiego ryzyka zaleca się łączenie okresowych badań laboratoryjnych z monitoringiem operacyjnym parametrów takich jak temperatura, przewodność i stagnacja, które pośrednio wpływają na dynamikę wzrostu mikroorganizmów. Ważnym elementem kontroli mikrobiologicznej jest również ocena skuteczności zastosowanych metod dezynfekcji, takich jak promieniowanie UV czy okresowe płukanie instalacji. Należy podkreślić, że dezynfekcja punktowa nie zastępuje prawidłowego projektu hydraulicznego i utrzymania właściwych parametrów fizykochemicznych wody.

Wymagania w zależności od technologii nawilżania

W systemach parowych ryzyko mikrobiologiczne jest ograniczone dzięki działaniu wysokiej temperatury w komorze generacji pary, co prowadzi do dezaktywacji. W tych instalacjach zagrożenie dotyczy głównie części zasilającej przed generatorem pary. W systemach adiabaticznych i ultradźwiękowych wymagania mikrobiologiczne są istotnie bardziej rygorystyczne, ponieważ woda wprowadzana jest bezpośrednio do strumienia powietrza. W tych przypadkach niezbędne jest zapewnienie wody o bardzo niskiej liczbie drobnoustrojów, stabilnej temperaturze oraz ograniczonej zawartości związków pożywkowych (C,N,S) sprzyjających wzrostowi bakterii.

Parametry hydrauliczne instalacji wody do nawilżania

Parametry hydrauliczne instalacji zasilającej systemy nawilżania mają kluczowe znaczenie zarówno dla stabilności procesu technologicznego, jak i dla ograniczenia ryzyka mikrobiologicznego. W odróżnieniu od instalacji wodociągowych, gdzie dominującym kryterium jest zapewnienie strumienia użytkowego, w systemach nawilżania niezbędne jest równoczesne uwzględnienie czasu przebywania wody w instalacji, prędkości przepływu, stabilności ciśnienia roboczego oraz – w przypadku technologii aerozolowych – charakterystyki rozpylania i warunków odparowania.

Przepływ objętościowy wody powinien być dostosowany do nominalnej wydajności nawilżacza, przy jednoczesnym zapewnieniu regularnej wymiany całej objętości wody w przewodach i zbiornikach. Szczególne znaczenie ma czas zatrzymania wody w instalacji (HRT). W instalacjach szpitalnych zaleca się, aby pełna wymiana objętości wody następowała w czasie nie dłuższym niż 24 godziny, natomiast w strefach o podwyższonym reżimie sanitarnym, ta-

Tabela 5. Zalecane parametry hydrauliczne instalacji wody do systemów nawilżania w obiektach ochrony zdrowia. Źródło: opracowanie własne na podstawie (ASHRAE, 2023; VDI 2016; Bayvel & Orzechowski, 1993; Lefebvre & McDonell, 2017)

Table 5. Recommended hydraulic parameters of water installations for humidification systems in healthcare facilities. Source: author's own elaboration based on (ASHRAE, 2023; VDI 2016; Bayvel & Orzechowski, 1993; Lefebvre & McDonell, 2017)

Parametr	Jednostka	Nawilżanie parowe	Nawilżanie adiabatyczne (HP)	Nawilżanie ultradźwiękowe	Znaczenie sanitarno-technologiczne
Przepływ objętościowy	m ³ /h	Zgodny z wydajnością generatora	Zgodny z wydajnością sekcji	Zgodny z wydajnością urządzenia	Zapewnienie stabilnej pracy systemu
Wymiana objętości wody (HRT)	h	≤ 24	≤ 12 (strefy wysokiego ryzyka)	≤ 12	Ograniczenie stagnacji
Objętość stagnująca	% zużycia dobowego	< 5	< 3	< 3	Minimalizacja rozwoju biofilmu
Prędkość przepływu w przewodach	m/s	0,3–1,0	0,5–1,0	0,5–1,0	Ograniczenie sedymentacji i kolonizacji
Minimalna prędkość przepływu	m/s	≥ 0,3	≥ 0,5	≥ 0,5	Ograniczenie stagnacji hydraulicznej
Maksymalna prędkość dopuszczalna	m/s	≤ 1,5	≤ 1,5	≤ 1,5	Ograniczenie erozji materiałów
Ciśnienie zasilania	bar	2–6	50–100 (typowo 70–80)	1–3	Stabilność rozpylania
Tolerancja wahań ciśnienia	%	±10	±5	±10	Jednorodność pracy urządzeń
Prędkość wyrzutu z dyszy	m/s	–	80–120	–	Charakterystyka rozpylania
Średnica kropli (SMD)	µm	–	10–30 (zalecane ≤ 20)	1–5	Pełne odparowanie, ograniczenie zwilżania
Długość odcinka odparowania	m	–	≥ 1,5–2,5	≥ 1,0	Zapobieganie kondensacji
Temperatura wody	°C	5–25	5–20	5–20	Ograniczenie namnażania mikroorganizmów
Maksymalny czas postoju bez płukania	h	48	48 (zalecane < 24)	48 (zalecane < 24)	Kontrola higieny instalacji

kich jak oddziały intensywnej terapii czy bloki operacyjne, czas ten nie powinien przekraczać 8–12 godzin. Dłuższy czas przebywania wody, zwłaszcza w temperaturze 20–45°C, sprzyja namnażaniu mikroorganizmów środowiskowych oraz tworzeniu biofilmu. Z tego względu instalacja powinna być projektowana w sposób ograniczający objętości retencyjne (zbiorniki buforowe i przewody o przewymiarowanych średnicach), eliminujący martwe odcinki oraz umożliwiające automatyczne płukanie w przypadku przerwy w pracy systemu.

Objętość wody zalegającej w instalacji powinna być ograniczona do minimum i nie powinna przekraczać 3% dobowego zużycia wody przez system, natomiast w małych instalacjach lokalnych pojemność zbiorników roboczych nie powinna przekraczać 5–10 litrów. W praktyce projektowej częstym błędem jest przewymiarowanie średnic przewodów oraz stosowanie nadmiernie dużych zbiorników buforowych, co prowadzi do obniżenia prędkości przepływu poniżej 0,3 m/s oraz wydłużenia HRT powyżej 24 godzin, tworząc warunki sprzyjające rozwojowi biofilmu.

Prędkość przepływu wody w przewodach zasilających ma bezpośredni wpływ na odkładanie osadów i kolonizację mikrobiologiczną. W celu ograniczenia sedymentacji i tworzenia warstwy przyściennej sprzyjającej rozwojowi biofilmu zaleca się utrzymywanie prędkości przepływu w zakresie 0,5–1,0 m/s. Minimalna prędkość nie powinna być niższa niż 0,3 m/s, ponieważ wartości poniżej 0,2 m/s

sprzyjają stagnacji hydraulicznej oraz gromadzeniu się cząstek. Z drugiej strony prędkości przekraczające 1,5 m/s mogą prowadzić do erozyjnego zużycia materiałów instalacyjnych i elementów armatury, zwłaszcza w rejonach zwężeń, kolan i trójników.

Ciśnienie robocze w instalacji zależy od zastosowanej technologii nawilżania i powinno być utrzymywane w sposób stabilny, bez istotnych pulsacji. W systemach parowych typowe ciśnienie zasilania wody mieści się w zakresie 2–6 bar i powinno pozostawać stabilne, aby zapewnić prawidłową pracę generatora pary. W systemach adiabatywnych wysokociśnieniowych ciśnienie przed dyszami rozpylającymi wynosi zazwyczaj 50–100 bar, przy czym w obiektach medycznych najczęściej stosuje się zakres 70–80 bar. Spadek ciśnienia poniżej wartości projektowej powoduje wzrost średnicy kropli i zwiększa ryzyko niepełnego odparowania w kanale wentylacyjnym. W systemach ultradźwiękowych ciśnienie zasilania jest znacznie niższe i zwykle mieści się w przedziale 1–3 bar, jednak kluczowa pozostaje stabilność dopływu wody oraz brak wahań mogących zaburzać pracę urządzenia.

W systemach aerozolowych istotnym parametrem projektowym jest również długość odcinka odparowania. Dla średnicy kropli rzędu 15–25 µm i prędkości powietrza 2–3 m/s odcinek ten powinien wynosić co najmniej 1,5–2,5 m. Skracanie odcinka odparowania (np. z powodu ograniczeń przestrzennych) prowadzi do niepełnego odparowania aerozolu i lokalnego zwilżania kanałów, co

stanowi bezpośredni czynnik inicjujący rozwój biofilmu i wtórną emisję zanieczyszczeń biologicznych.

Parametry hydrauliczne powinny być analizowane łącznie z temperaturą wody, która w instalacjach nawilżania powinna być utrzymywana możliwie nisko (typowo 5–18°C) i nie powinna długotrwale przebywać w przedziale sprzyjającym wzrostowi mikroorganizmów. Odpowiednia izolacja przewodów, ograniczenie objętości zbiorników oraz zapewnienie wymuszonego przepływu stanowią podstawowe elementy projektowe minimalizujące ryzyko sanitarne. Zalecane wartości parametrów hydraulicznych dla wybranych technologii zestawiono w Tabeli 5.

Technologie uzdatniania wody dla systemów nawilżania powietrza w obiektach ochrony zdrowia

Woda przeznaczona do systemów nawilżania aerozolu powinna spełniać wymagania wykraczające poza standardy wody pitnej. Kryterium oceny stanowi nie tylko bezpieczeństwo konsumpcyjne, lecz zdolność wody do generowania aerozolu bez emisji cząstek mineralnych, bez tworzenia osadów i bez wspierania wzrostu mikroorganizmów. Z tego względu dobór technologii uzdatniania musi być oparty na analizie mineralizacji ogólnej, zawartości krzemionki, alkaliczności, zawiesin, potencjału korozyjnego oraz wskaźników biologicznych.

Filtracja mechaniczna i separacja zawiesin

Pierwszym etapem uzdatniania powinna być separacja cząstek stałych i koloidalnych. Zawiesiny (TSS), cząstki tlenków żelaza i manganu, produkty korozji oraz frakcje organiczne zwiększają mętność wody i stanowią substrat adhezyjny dla biofilmu. Filtracja wgłębna lub powierzchniowa pozwala na redukcję mętności do poziomu poniżej 0,5 NTU, co jest istotne zarówno dla ochrony membran, jak i dla skuteczności dezynfekcji promieniowaniem UV. Należy podkreślić, że cząstki koloidalne o średnicy poniżej 1 µm mogą przechodzić przez standardowe filtry mechaniczne, dlatego w wodach o podwyższonej zawartości krzemionki koloidalnej konieczne jest rozważenie procesów koagulacji lub ultrafiltracji.

Procesy adsorpcyjne

Adsorpcja na węglu aktywnym stosowana jest głównie w celu usunięcia chloru wolnego, chloramin oraz części rozpuszczonych związków organicznych. Redukcja chloru jest istotna w kontekście ochrony membran oraz ograniczenia reakcji utleniania materiałów instalacyjnych. Jednocześnie usunięcie chloru powoduje spadek tzw. resztkowego efektu dezynfekcyjnego, co wymaga wprowadzenia alternatywnej metody kontroli mikrobiologicznej. Adsorpcja nie wpływa istotnie na przewodność ani zawartość jonów mineralnych, dlatego powinna być traktowana jako proces uzupełniający.

Procesy wymiany jonowej

Wymiana jonowa opiera się na równowagowym mechanizmie zastępowania jonów rozpuszczonych jonami związanymi z żywicą. W przypadku zmiękczenia usuwane są jony Ca^{2+} i Mg^{2+} , które odpowiadają za wytrącanie węglanu wapnia w procesach odparowania. Skuteczność

usuwania twardości przekracza 99%, jednak całkowite zasolenie (TDS) pozostaje na poziomie zbliżonym do wody surowej, ponieważ jony wapnia i magnezu zastępowane są jonami sodu. W kontekście systemów rozpylających oznacza to, że przewodność elektryczna wody, często rzędu 500–800 µS/cm dla wód wodociągowych, nie ulega istotnemu obniżeniu. W rezultacie przy odparowaniu kropli do powietrza emitowane są drobne cząstki soli sodowych oraz krzemionki, co może prowadzić do osadzania się pyłu mineralnego w pomieszczeniach o podwyższonej klasie czystości. W układach mieszanych, obejmujących zarówno wymianę kationów oraz anionów, możliwe jest głębsze obniżenie zasolenia. Proces ten prowadzi do powstawania wody o przewodności poniżej 1–5 µS/cm, jednak wymaga precyzyjnego sterowania regeneracją i kontroli wycieku jonów.

Procesy separacji membranowej

Separacja membranowa wykorzystuje gradient ciśnienia do wymuszenia transportu cząsteczek wody przez półprzepuszczalną membranę, przy jednoczesnym zatrzymaniu większości jonów oraz cząsteczek organicznych. Mechanizm ten pozwala na redukcję TDS o 95–99%, obniżenie przewodności z poziomu kilkuset µS/cm do wartości rzędu 10–30 µS/cm oraz znaczną redukcję krzemionki rozpuszczonej. W kontekście systemów wysokociśnieniowych i ultradźwiękowych redukcja krzemionki poniżej 0,5–1 mg/L jest warunkiem ograniczenia emisji drobnych cząstek SiO_2 do powietrza. Należy jednak uwzględnić zjawisko koncentracji solnej w strumieniu retentatu oraz możliwość wtórnego wzrostu mikroorganizmów w zbiornikach magazynowych. Woda o bardzo niskiej mineralizacji, przy temperaturze powyżej 20°C i czasie przebywania przekraczającym 24 godziny, może stanowić środowisko podatne na kolonizację biologiczną mimo niskiej zawartości substancji odżywczych.

Dezynfekcja fizyczna

Skutecznym procesem jest dezynfekcja promieniowaniem UV o długości fali około 254 nm, która prowadzi do inaktywacji mikroorganizmów poprzez uszkodzenie ich materiału genetycznego. Efektywność procesu zależy od dawki promieniowania, mętności i przejrzystości wody i braku osłony cząstek zawieszonych. W wodach o mętności poniżej 0,5 NTU skuteczność redukcji bakterii może przekraczać 3–4 log jednostek. Proces ten nie usuwa jednak endotoksyn ani nie eliminuje biofilmu rozwiniętego w instalacji.

Metody hybrydowe i integracja wielostopniowa w uzdatnianiu wody dla systemów nawilżania

W warunkach obiektów ochrony zdrowia uzyskanie stabilnej jakości wody procesowej rzadko jest możliwe przy zastosowaniu pojedynczego procesu jednostkowego. Zmienność składu wody surowej, sezonowe wahania temperatury oraz wymogi bardzo niskiej mineralizacji i wysokiej stabilności mikrobiologicznej powodują, że najskuteczniejsze jest projektowanie układów hybrydowych, łączących kilka mechanizmów separacji w spójny ciąg technologiczny. Takie podejście znajduje potwierdzenie w wytycznych higienicznych dotyczących systemów HVAC w obiektach medycznych, gdzie zaleca się analizę całego

łańcucha przygotowania wody, a nie wyłącznie parametrów końcowych (VDI, 2008, 2016; Polski Komitet Normalizacyjny, 2016; Minister Zdrowia, 2022).

Metoda hybrydowa w kontekście nawilżania powietrza oznacza sekwencyjne połączenie procesów o odmiennym mechanizmie działania: filtracji mechanicznej, procesów jonowymiennych, separacji membranowej, adsorpcji oraz dezynfekcji fizycznej. Każdy z etapów odpowiada za redukcję określonej grupy zanieczyszczeń i jednocześnie chroni kolejne ogniwo technologiczne przed przeciążeniem. Typowy układ hybrydowy rozpoczyna się od filtracji mechanicznej, której zadaniem jest obniżenie mętności oraz ochrona elementów wrażliwych na zanieczyszczenia cząstkowe. Następnie stosowana jest redukcja twardości, co minimalizuje ryzyko wytrącania węglanów wapnia i magnezu w dalszych etapach procesu. Kolejnym ogniwem jest proces efektywnej demineralizacji, prowadzący do obniżenia przewodności i całkowitego zasolenia. W końcowej fazie wprowadza się dezynfekcję fizyczną, której zadaniem jest ograniczenie liczby drobnoustrojów w wodzie doprowadzanej bezpośrednio do sekcji nawilżania.

W układach przeznaczonych do systemów wysokociśnieniowych oraz ultradźwiękowych szczególne znaczenie ma kontrola krzemionki rozpuszczonej oraz frakcji koloidalnej. Połączenie separacji membranowej z etapem adsorpcyjnym i końcową dezynfekcją UV pozwala na uzyskanie wody o przewodności rzędu 10–20 $\mu\text{S}/\text{cm}$, zawartości SiO_2 poniżej 0,5–1 mg/L oraz stabilności mikrobiologicznej ograniczającej HPC do poziomów <10–50 CFU/mL. Jednak nawet przy takiej jakości wody kluczowe pozostaje ograniczenie czasu przebywania w instalacji oraz utrzymanie temperatury poniżej 20°C.

Metoda hybrydowa nie polega jedynie na sumowaniu kolejnych urządzeń, lecz na świadomym doborze procesów w celu osiągnięcia równowagi między redukcją mineralizacji, stabilnością mikrobiologiczną a minimalizacją stagnacji hydraulicznej. Należy uwzględnić, że nadmierna rozbudowa układu technologicznego zwiększa objętość retencyjną i czas przebywania wody, co może paradoksalnie zwiększać ryzyko biologiczne. Z tego względu projekt hybrydowy powinien minimalizować pojemności buforowe, unikać martwych stref przepływu oraz zapewniać możliwość okresowego płukania i dezynfekcji całego ciągu. Istotnym elementem tej metody jest integracja procesu uzdatniania z systemem monitoringu online. Pomiar przewodności, temperatury, przepływu oraz – w rozwiązaniach zaawansowanych – wskaźników aktywności biologicznej (np. ATP) umożliwia wczesne wykrycie odchył procesowych. Brak takiej integracji powoduje, że nawet poprawnie zaprojektowany układ technologiczny może ulec degradacji jakościowej w wyniku rozregulowania parametrów pracy.

W obiektach o najwyższym reżimie sanitarnym uzasadnione jest stosowanie konfiguracji wielostopniowych, w których redukcja mineralizacji sprzężona jest z kontrolą mikrobiologiczną na poziomie wody doprowadzanej bezpośrednio do sekcji nawilżania. Takie podejście pozwala ograniczyć emisję cząstek mineralnych do powietrza, zminimalizować osadzanie kamienia i jednocześnie zmniejszyć ryzyko powstawania biofilmu w instalacji. Zintegrowane metody hybrydowe stanowią obecnie najbar-

dziej racjonalne rozwiązanie technologiczne w systemach nawilżania stosowanych w szpitalach, gdzie wymagania energetyczne, sanitarne i eksploatacyjne muszą być rozpatrywane równocześnie, a nie rozdzielnie.

Determinanty bezpieczeństwa technologicznego systemów nawilżania w szpitalach

W praktyce projektowej i eksploatacyjnej systemów nawilżania w obiektach ochrony zdrowia powtarzają się określone schematy błędów, wynikające przede wszystkim z niedoszacowania znaczenia jakości wody oraz parametrów hydraulicznych instalacji. Najczęstszym błędem koncepcyjnym jest traktowanie nawilżania jako funkcji pomocniczej systemu wentylacyjnego, podporządkowanej wyłącznie utrzymaniu zadanej wilgotności względnej. Tymczasem, zgodnie z art. 5 ust. 1 ustawy – Prawo budowlane, obiekt budowlany powinien być projektowany i użytkowany w sposób zapewniający m.in. bezpieczeństwo użytkowania oraz odpowiednie warunki higieniczne i zdrowotne. Oznacza to, że instalacje techniczne wpływające na jakość powietrza w pomieszczeniach szpitalnych nie mogą być analizowane wyłącznie przez pryzmat komfortu, lecz również w kontekście ryzyka sanitarnego.

Brak integracji sekcji nawilżania z systemem uzdatniania wody oraz pominięcie analizy ryzyka mikrobiologicznego na etapie projektu pozostaje niezgodne z zasadą projektowania instalacji w obiektach ochrony zdrowia w sposób zapewniający bezpieczeństwo zdrowotne użytkowników. W obiektach leczniczych dodatkowo zastosowanie znajduje ustawa o działalności leczniczej, nakładająca obowiązek zapewnienia bezpiecznych warunków udzielania świadczeń zdrowotnych, co obejmuje także jakość środowiska wewnętrznego.

Często spotykanym problemem jest przyjmowanie jakości wody wodociągowej jako wystarczającej dla systemów aerozolowych, ewentualnie uzupełnionej jedynie o zmiękczenie jonowymiennie. Zmiękczenie usuwa wapń i magnez, lecz nie redukuje całkowitego zasolenia ani krzemionki, co w systemach adiabatycznych i ultradźwiękowych prowadzi do emisji cząstek mineralnych oraz odkładania osadów w kanałach wentylacyjnych i pomieszczeniach. W konsekwencji może dochodzić do pogorszenia jakości powietrza mimo formalnego spełnienia wymagań wilgotnościowych. Spełnienie parametrów komfortowych nie jest bowiem równoznaczne z zapewnieniem bezpieczeństwa sanitarnego instalacji.

W warstwie hydraulicznej typowym błędem jest przewymiarowanie średnic przewodów oraz stosowanie nadmiernie dużych zbiorników buforowych. Prowadzi to do obniżenia średniej prędkości przepływu poniżej 0,3 m/s oraz wydłużenia czasu przebywania wody w instalacji powyżej 24 godzin, co sprzyja powstawaniu biofilmu. Z punktu widzenia obowiązku utrzymania obiektu w należytym stanie technicznym i higienicznym, wynikającego z przepisów Prawa budowlanego, parametry te powinny być analizowane już na etapie projektu oraz kontrolowane w trakcie eksploatacji.

W wielu realizacjach nie uwzględnia się sezonowej zmienności obciążenia wilgotnościowego, przez co w okresach przejściowych system pracuje z minimalną

wydajnością, a woda pozostaje w stagnacji nawet przez 48–72 godziny. Tego rodzaju warunki eksploatacyjne mogą pozostawać w sprzeczności z zasadą minimalizacji ryzyka zdrowotnego w obiektach ochrony zdrowia.

Kolejnym niedoszacowanym aspektem projektowym jest długość odcinka odparowania w systemach wysokociśnieniowych. Przy średnicy kropli 15–25 µm i prędkości powietrza 2–3 m/s długość ta powinna wynosić co najmniej 1,5–2,5 m. Skrócenie tego odcinka, wynikające z ograniczeń przestrzennych, prowadzi do niepełnego odparowania aerozolu i lokalnego zwilżania kanałów, co zwiększa ryzyko wtórnego rozwoju biofilmu i degradacji higienicznej instalacji wentylacyjnej.

W warstwie eksploatacyjnej najczęstszym problemem pozostaje brak ciągłego monitoringu jakości wody. Parametry takie jak przewodność, temperatura, czas przebywania wody czy ogólna liczba mikroorganizmów są często kontrolowane sporadycznie, bez analizy trendów w czasie. Tymczasem zapewnienie bezpiecznych warunków użytkowania obiektu, wymagane przez przepisy prawa, wymaga działań prewencyjnych oraz systematycznego nadzoru technicznego.

Bariery systemowe mają również charakter organizacyjny i ekonomiczny. W procesie inwestycyjnym dominującym kryterium bywa koszt początkowy i efektywność energetyczna, natomiast aspekty sanitarne traktowane są jako drugorzędne. W wielu obiektach brak jest jednoznacznego przypisania odpowiedzialności za system nawilżania, mimo że zgodnie z zasadami utrzymania obiektu budowlanego odpowiedzialność za jego stan techniczny i bezpieczeństwo spoczywa na właścicielu lub zarządcy. Brak spójnej procedury nadzoru powoduje, że instalacja funkcjonuje bez jasno określonego reżimu higienicznego.

Podsumowanie i wnioski

Przedstawiona analiza potwierdza, że systemy nawilżania powietrza w obiektach ochrony zdrowia nie mogą być traktowane jako element komfortu cieplnego. Stanowią one instalacje procesowe, których działanie bezpośrednio wpływa na bezpieczeństwo mikrobiologiczne środowiska wewnętrznego. W szczególności w systemach generujących aerozol wodny skład fizykochemiczny i mikrobiologiczny wody jest czynnikiem determinującym jakość nawiewanego powietrza.

1. Zakres wilgotności względnej 40–60% pozostaje uzasadniony z punktu widzenia fizjologii i ograniczania transmisji patogenów. Systemy parowe zapewniają najwyższy poziom bezpieczeństwa mikrobiologicznego, natomiast systemy adiabatyczne, ultradźwiękowe i ewaporacyjne wymagają wody o niskiej mineralizacji oraz ścisłej kontroli parametrów eksploatacyjnych.
2. Zmiękczenie wody bez redukcji TDS i SiO₂ należy uznać za rozwiązanie niewystarczające. W systemach wysokociśnieniowych i ultradźwiękowych jakość wody powinna odpowiadać wodzie demineralizowanej, o niskiej przewodności, ograniczonej zawartości SiO₂ oraz bardzo niskiej liczbie drobnoustrojów.
3. Ograniczenie stagnacji, utrzymanie odpowiednich prędkości przepływu oraz kontrola czasu przebywania wody w instalacji są kluczowe dla zapobiegania tworzeniu biofilmu. Przewymiarowanie przewodów, nad-

mierna objętość zbiorników buforowych oraz brak

4. Układy hybrydowe, łączące filtrację, demineralizację oraz dezynfekcję, stanowią racjonalne rozwiązanie dla obiektów o wysokim reżimie sanitarnym. Skuteczność takiego układu zależy jednak od ograniczenia objętości retencyjnych oraz wdrożenia monitoringu online parametrów operacyjnych.
5. System nawilżania w szpitalu powinien być klasyfikowany jako instalacja krytyczna, wymagająca analizy ryzyka, jednoznacznego przypisania odpowiedzialności eksploatacyjnej oraz okresowej weryfikacji skuteczności technologicznej. Bez takiego podejścia istnieje ryzyko, że instalacja spełniająca wymagania wilgotnościowe stanie się źródłem wtórnego zanieczyszczenia biologicznego.

Podsumowując, bezpieczeństwo technologiczne systemów nawilżania wynika z równowagi pomiędzy trzema obszarami: jakością wody, parametrami hydraulicznymi instalacji oraz kontrolą parametrów powietrza. Tylko podejście zintegrowane, oparte na wiedzy procesowej i nadzorze eksploatacyjnym, pozwala traktować nawilżanie jako element wspierający bezpieczeństwo sanitarno-epidemiologiczne obiektów ochrony zdrowia.

Bibliografia

- ASHRAE (2023) *ASHRAE handbook. HVAC Applications* (SI edition). American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
- Aganovic, A., Bi, Y., Cao, G., Kurnitski, J., & Wargocki, P. (2022). Modeling the impact of indoor relative humidity on the infection risk of five respiratory airborne viruses. *Scientific Reports*, 12(1), 11481. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-15703-8>
- ASHRAE (2020) *ASHRAE Positions on Infectious Aerosols*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- Balthazar, P., & Ismail, M. A. (2018). *Ultrasonic Humidifier Applications in HVAC system. Evolutions in Mechanical Engineering*.
- Bayvel, L. P., & Orzechowski, Z. (1993). *Liquid atomization*. Taylor & Francis.
- Blachere, F. M., Lindsley, W. G., Pearce, T. A., Anderson, S. E., Fisher, M., Khakoo, R., Meade, B. J., Lander, O., Davis, S., Thewlis, R. E., Celik, I., Chen, B. T., & Beezhold, D. H. (2009). Measurement of Airborne Influenza Virus in a Hospital Emergency Department. *Clinical Infectious Diseases*, 48(4), 438–440. <https://doi.org/10.1086/596478>
- Charkowska, A., Różycki, A., Lenarski, R., & Sobierajska, A. (2016). Projekt wytycznych projektowania, wykonania, odbiorów i eksploatacji systemów wentylacji i klimatyzacji obiektów służby zdrowia – cz. 2. *Rynek Instalacyjny*, 9, 52–57.
- Dietrich, A. M., Yao, W., & Gallagher, D. L. (2022). Exposure at the indoor water–air interface: Fill water constituents and the consequent air emissions from ultrasonic humidifiers: A systematic review. *Indoor Air*, 32(11). <https://doi.org/10.1111/ina.13129>
- Dietrich, A. M., Yao, W., Gohlke, J. M., & Gallagher, D. L. (2023). Environmental risks from consumer products: Acceptable drinking water quality can produce unacceptable indoor air quality with ultra-

- sonic humidifier use. *Science of The Total Environment*, 856, 158787. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158787>
- Guarnieri, G., Olivieri, B., Senna, G., & Vianello, A. (2023). Relative Humidity and Its Impact on the Immune System and Infections. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(11), 9456. <https://doi.org/10.3390/ijms24119456>
- Lefebvre, A. H., & McDonell, V. G. (2017). Atomization and Sprays (2. wyd.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315120911>
- Marr, L. C., Tang, J. W., Van Mullekom, J., & Lakdawala, S. S. (2019). Mechanistic insights into the effect of humidity on airborne influenza virus survival, transmission and incidence. *Journal of The Royal Society Interface*, 16(150), 20180298. <https://doi.org/10.1098/rsif.2018.0298>
- Minister Zdrowia. (2022). Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 26 marca 2019 r. w sprawie szczególnych wymagań, jakim powinny odpowiadać pomieszczenia i urządzenia podmiotu wykonującego działalność leczniczą. <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=WDU20190000595>
- Noti, J. D., Blachere, F. M., McMillen, C. M., Lindsley, W. G., Kashon, M. L., Slaughter, D. R., & Beezhold, D. H. (2013). High Humidity Leads to Loss of Infectious Influenza Virus from Simulated Coughs. *PLoS ONE*, 8(2), e57485. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0057485>
- Pantelic, J., Sze-To, G. N., Tham, K. W., Chao, C. Y. H., & Khoo, Y. C. M. (2009). Personalized ventilation as a control measure for airborne transmissible disease spread. *Journal of The Royal Society Interface*, 6(suppl_6). <https://doi.org/10.1098/rsif.2009.0311.focus>
- Polski Komitet Normalizacyjny (2019) PN-EN 16798-1 Charakterystyka energetyczna budynków.
- Polski Komitet Normalizacyjny (2016) PN-EN ISO 14644 Pomieszczenia czyste i powiązane środowiska kontrolowane.
- Sehulster, L., Chinn, R. Y. W., CDC, & HICPAC. (2003). Guidelines for environmental infection control in health-care facilities. Recommendations of CDC and the Healthcare Infection Control Practices Advisory Committee (HICPAC). *MMWR. Recommendations and Reports: Morbidity and Mortality Weekly Report. Recommendations and Reports*, 52(RR-10), 1–42.
- VDI (2008) DIN 1946-4 Wentylacja i klimatyzacja w budynkach ochrony zdrowia.
- VDI (2016) VDI 6022 Wentylacja i klimatyzacja, technika budynków i urządzeń – Wymagania higieniczne dla urządzeń i instalacji klimatyzacyjnych.
- World Health Organization (2010). Who guidelines for indoor air quality: Selected pollutants. WHO.
- Yao, W., Dal Porto, R., Gallagher, D. L., & Dietrich, A. M. (2020). Human exposure to particles at the air-water interface: Influence of water quality on indoor air quality from use of ultrasonic humidifiers. *Environment International*, 143, 105902. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105902>
- Yao, Y. (2016). Research and applications of ultrasound in HVAC field: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 52–68. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.222>
- Yıldırım, C., & Solmuş, İ. (2014). A parametric study on a humidification–dehumidification (HDH) desalination unit powered by solar air and water heaters. *Energy Conversion and Management*, 86, 568–575. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.06.016>

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

Zastrzeżenie: Oświadczenia, opinie i dane przedstawione w publikacjach są wyłączną odpowiedzialnością ich autorów i nie odzwierciedlają stanowiska redakcji *Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja*. Redakcja nie ponosi odpowiedzialności za jakiegokolwiek szkody dotyczące osób lub mienia wynikające z idei, metod, zaleceń lub produktów omawianych w treści publikacji. Artykuł udostępniony na licencji Creative Commons CC BY 4.0.

Disclaimer: The statements, opinions, and data presented in the publications are the sole responsibility of their authors and do not necessarily reflect the views of the editorial board of *Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja*. The editorial board assumes no responsibility or liability for any injury to persons or damage to property resulting from any ideas, methods, instructions, or products referred to in the content of the publications. The article is distributed under the Creative Commons CC BY 4.0 license.

