POLITECHNIKA POZNAŃSKA

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska
INSTYTUT INŻYNIERII ŚRODOWISKA
Zakład Ogrzewnictwa, Klimatyzacji i Ochrony Powietrza

mgr inż. Alicja PIOTROWSKA

Wpływ sposobu uzdatniania wody i układu wentylacyjnego na obecność THM-ów w środowisku basenów krytych

(*Impact of the type of water treatment systems and ventilation systems on the presence of THMs in the indoor swimming pool environment)*

ROZPRAWA DOKTORSKA

Promotor:

prof. dr hab. inż. Edward Szczechowiak

Poznań, 2019

Składam serdeczne podziękowania Promotorowi

Profesorowi Edwardowi Szczechowiakowi

za okazaną pomoc, cenne wskazówki, wyrozumiałość,

oraz czas poświęcony podczas realizacji niniejszej pracy.

Składam serdeczne podziękowania Prezesowi firmy

Instal Warszawa S.A. - Ryszardowi Wasiakowi

za okazane wsparcie i udostępnienie pomieszczenia modelowego,

w którym zostały przeprowadzane badania doświadczalne

w ramach niniejszej pracy.

Dziękuję również ***mojej rodzinie***

za wsparcie, wyrozumiałość i motywację.

SPIS TREŚCI

Streszczenie 6
Summary 6
1. Wstęp 7
1.1 Technologie środowiska wewnętrznego w krytych basenach 7
1.2 Teza, cel i zakres pracy 10
2. Ocena środowiska wewnętrznego w halach basenowych - stan wiedzy 11
2.1 Opis parametrów środowiska wewnętrznego 11
2.2 Parametry termiczne i wilgotnościowe 12
2.2.1 Temperatura wody 12
2.2.2 Temperatura powietrza 13
2.2.3 Wilgotność względna powietrza 14
2.2.4 Prędkość przepływu powietrza 17
2.3 Jakość wody i powietrza w basenach 17
2.3.1 Podstawowe parametry oceny jakości wody 17
2.3.2 Podstawowe parametry oceny jakości powietrza 24
2.3.3 Zawartość ditlenku węgla (CO_2) 29
2.3.4 Substancje związane z reakcjami ubocznymi dezynfekcji wody (THM i inne) 33
2.3.5 Oddziaływanie THM-ów na organizm człowieka 37
2.4 Zawartość THM-ów w wodzie i powietrzu 39
2.4.1 THM w wodzie 39
2.4.2 THM w powietrzu 47
3. Obciążenie środowiska basenów krytych THM-ami i sposoby ich redukcji 50
3.1 Równowaga chemiczna THM-ów w wodzie i powietrzu – model fugatywności 51
3.2 Kierunki działań dla obniżenia stężenia THM-ów w środowisku basenowym 57
4. Uzdatnianie wody basenowej w aspekcie redukcji THM-ów 60
4.1 Istniejące rozwiązania technologiczne 60
4.2 Możliwości korekty technologii dla redukcji zawartości THM-ów 67

5. Układy wentylacyjne w aspekcie redukcji THM-ów 75
5.1 Istniejące rozwiązania wentylacyjne dla basenów krytych 75
5.2 Możliwości korekty układów wentylacyjnych dla redukcji stężenia THM-ów w powietrzu 79
6. Badania doświadczalne proponowanych rozwiązań w basenie modelowym 84
6.1 Postawienie problemu 84
6.2 Doświadczalna instalacja uzdatniania wody basenowej 88
6.3 Doświadczalna instalacja wentylacji mechanicznej 89
6.4 Zakres badań 91
6.4.1 Badania na doświadczalnej instalacji uzdatniania wody basenowej 91
6.4.2 Badania na doświadczalnej instalacji wentylacji mechanicznej 95
6.5 Parametry cieplno-wilgotnościowe 97
6.5.1 Pomiary dla wariantu klasycznego (I) 98
6.5.2 Pomiary dla wariantu klasycznego z odciągami brzegowymi (II) 106
6.5.3 Pomiary dla wariantu góra-dół z układem obiegowym (III) 114
6.6 Test zastąpienia THM-ów ditlenkiem węgla 123
6.6.1 Badanie występowania związków znacznikowych w powietrzu dla wybranych układów wentylacji 125
7. Symulacje numeryczne przepływu powietrza 127
7.1 Założenia i struktura modelu matematycznego 127
7.2 Wykorzystane oprogramowanie 132
7.2.1 Budowa modelu i siatki obliczeniowej 132
7.2.2 Zdefiniowanie warunków brzegowych 134
7.2.3 Wybór metody obliczeniowej i przeprowadzenie obliczeń 135
7.2.4 Opracowanie wyników obliczeń w postaci pól temperatury, wilgotności względnej, prędkości powietrza 136
7.2.5 Rewizja wyników i ewentualna modyfikacja modelu geometrycznego lub siatki obliczeniowej 137
7.3 Symulacje numeryczne dla wybranego układu wentylacyjnego i przyjętego standardu uzdatniania wody 137
8. Porównanie wyników badań doświadczalnych i symulacji 140
9. Podsumowanie i wnioski końcowe 144

9.1 Podsumowanie 144
9.2 Wnioski końcowe 146
10. Literatura 147
11. Załączniki 153
Spis tabel 160
Spis rysunków 162

Streszczenie

Rozprawa przedstawia zagadnienia związane z występowaniem trihalometanów (THM-ów) w środowisku basenów krytych. Głównym procesem, który warunkuje ich powstawanie w obiekcie basenowym jest proces uzdatniania wody basenowej wykorzystujący chlor, który jest najczęściej stosowanym dezynfektantem w technice basenowej w Polsce. Trihalometany należą do halogenowych związków organicznych traktowanych jako substancje toksyczne, dlatego z uwagi na zdrowie użytkowników ważna jest ich możliwie największa redukcja w środowisku basenowym. W pracy przeprowadzono studium literaturowe w celu określenia poziomu zawartości THM-ów w wodzie i powietrzu na pływalniach oraz poddano analizie czynniki wpływające na ich występowanie w środowisku basenowym. Przeprowadzono badania doświadczalne w pomieszczeniu modelowym, będącym odwzorowaniem typowej pływalni przyszkolnej w skali 1:5. Badania obejmowały pomiar parametrów powietrza wewnętrznego i wody basenowej przy różnym rozdziale powietrza wentylacyjnego. W celu uzyskania szerokiego spektrum wyników pomieszczenie modelowe wyposażono w system uzdatniania wody ze zmiennymi modułami oraz wariantowy system kanałów wentylacyjnych. Otrzymane dane podczas badań przeprowadzonych w pomieszczeniu modelowym zostały wykorzystane jako dane źródłowe do przeprowadzenia symulacji numerycznych. Symulacje numeryczne posłużyły do opracowania rozwiązań technicznych ograniczających stężenie THM-ów w środowisku basenowym. Rekomendowane rozwiązania obejmują system uzdatniania wody basenowej oraz system wentylacyjny. Opracowane rozwiązania mają potencjał do zastosowania w skali technicznej w obiekcie basenowym.

Summary

This PhD thesis presents issues related to the occurrence of trihalogenomethans (THMs) in the indoor swimming pool environment. The main process that determines their formation in the pool facility is the water treatment using chlorine, which is the most commonly used disinfectant in swimming pool technology in Poland. Trihalometans belong to halogen organic compounds treated as toxic substances, therefore, due to the health of users, it is important to reduce them as much as possible in the pool environment. The literature study was conducted in order to determine the level of THMs in the water and ambient air of an indoor swimming pool and factors influencing their occurrence in the pool environment were analyzed. Experimental research was conducted in the model room, which is a model in the scale one to five of the standard swimming pool. The tests included measurement of indoor air and pool water parameters with different ventilation air distribution. In order to obtain a wide range of results, the model room was equipped with a water treatment system with variable modules and a variant ventilation duct system. Achieved results were used as primary data for conducting numerical simulations. Numerical simulations were used for developing solutions reducing the concentration of THMs in the indoor swimming pool environment. Recommended solutions include a pool water treatment system and a ventilation system. Developed solutions have the potential for applying in the technical scale in a swimming pool facility.

1. Wstęp

W Polsce wybudowanych jest blisko 850 publicznych pływalni krytych, pełniących funkcję rekreacyjną, sportową oraz rehabilitacji. Profil użytkowników obejmuje pełen zakres wiekowy, a znaczną część stanowią dzieci oraz seniorzy. Dlatego też jakość wody i powietrza wewnętrznego powinna spełniać najwyższe standardy. Dla ochrony wody basenowej przed rozwojem i rozprzestrzenianiem się różnorodnych organizmów patogennych stosowany jest proces chlorowania, jako ostatni etap w instalacji uzdatniania wody. W wyniku procesu chlorowania zachodzi szereg procesów i reakcji chemicznych, za przyczyną których powstają uboczne produkty dezynfekcji (DBPs) będące prekursorami m.in. trihalometanów (THM-ów). Z uwagi na potencjalną kancerogenność tych związków powinno dążyć się do ich redukcji w środowisku basenowym. Ze względu na specyficzne właściwości fizyczne (lotność, gęstość większą od powietrza) związki te wydzielają się z tafli wodnej i kumulują tuż nad nią. Dlatego też działania w kierunku zmniejszenia obecności THM-ów w środowisku basenów krytych powinny obejmować zarówno sposób uzdatniania wody jak i sposób rozdziału powietrza wentylacyjnego w hali basenowej.

1.1 Technologie środowiska wewnętrznego w krytych basenach

Kryte baseny kąpielowe są wielkokubaturowymi obiektami sportowymi wymagającymi stosowania znacznie bardziej kompleksowych rozwiązań budowlanych i instalacyjnych w porównaniu z innymi halami sportowymi. Z uwagi na obecność zwierciadła wody wewnątrz pomieszczenia, hala basenowa musi być chroniona przed nadmierną wilgotnością, która w szybkim tempie doprowadziłaby do istotnego naruszenia konstrukcji nawet mimo zastosowania specjalistycznych materiałów budowlanych (drewno klejone w konstrukcji dachu, odporne farby ścienne, izolacje przeciwwilgociowe). Za utrzymanie właściwych parametrów powietrza (temperatury, wilgotności względnej i jakości) odpowiada indywidualnie zaprojektowany system grzewczo-wentylacyjny.

Rozdział powietrza wentylacyjnego w hali basenowej powinien zapewniać utrzymanie komfortowych parametrów cieplno-wilgotnościowych dla użytkowników, zabezpieczać konstrukcję budynku przed kondensacją pary wodnej oraz usuwać zanieczyszczenia gazowe (m.in. THM-y) ze strefy przebywania ludzi. Przeprowadzone badania [3, 4, 5, 101] wskazują, że w wielu obiektach w Polsce i na świecie temperatura, wilgotność oraz jakość powietrza nie są utrzymywane na właściwym poziomie. Zazwyczaj główną przyczynę stanowi błędnie zaprojektowany system wentylacyjny, pełniący wyłącznie funkcję zabezpieczenia przed

wykropleniem wilgoci na elementach konstrukcyjnych budynku, a utrzymanie odpowiednich parametrów cieplno-wilgotnościowych oraz jakości powietrza w strefie przebywania ludzi jest wynikowe. Dobór odpowiedniej bryły budynku oraz materiałów budowlanych, dostosowanych do wilgotnego klimatu panującego wewnątrz krytego basenu jest również istotnym aspektem przy projektowaniu pływalni. Gdyż często dochodzi do sytuacji, że hale basenowe po krótkim okresie użytkowania wymagają remontu lub modernizacji.

W Polsce nie wprowadzono odrębnych przepisów, regulujących wymagania stawiane instalacjom grzewczo-wentylacyjnym. Projektanci wspomagają się materiałami pomocniczymi opracowanymi przez ekspertów basenowych oraz niemieckie wytyczne VDI [9, 43, 103]. Na ich podstawie za optymalne warunki cieplno-wilgotnościowe uznaje się zakres temperatury wewnętrznej na poziomie $28 \div 32^0$C oraz wilgotności względnej 50÷60%.

Na jakość środowiska wewnętrznego w hali basenowej ma również zasadniczy wpływ system uzdatniania i dezynfekcji wody basenowej, który zapewnia odpowiednią jakość i temperaturę wody. Obecnie stosowanych jest wiele rozwiązań technologicznych, które uzdatniają i dezynfekują wodę zgodnie z obowiązującymi przepisami [130]. Bez względu na zastosowany układ technologiczny w końcowym procesie uzdatniania do wody podawany jest chlor, który zapewnia długotrwałe bezpieczeństwo mikrobiologiczne wody basenowej. Wprowadzony do wody chlor wchodzi w reakcje ze związkami w niej zawartymi, m.in. z materią organiczną, generując uboczne produkty uzdatniania (trihalometany, kwasy halogenooctowe oraz wiele innych). Zjawisko to wpływa negatywnie na jakość wody i powietrza, gdyż trihalometany mając gęstość większą od powietrza, kumulują się nad taflą wody tj. w obszarze gdzie użytkownicy najbardziej narażeni są na ich ekspozycję.

Dla zapewnienia komfortu użytkowników temperatura wody basenowej utrzymywana jest zwykle w zakresie $28\text{-}32^0$C. Tak wysoka temperatura wody oraz znaczny ładunek biozanieczyszczeń wprowadzany przez użytkowników sprawiają, że woda basenowa stanowi dogodne warunki dla rozwoju i rozprzestrzeniania się różnorodnych mikroorganizmów chorobotwórczych wśród, których epidemiologiczne znaczenie mają: bakterie (*Shigella spp., Salmonella spp., Escherichia coli, Staphylococcus aureus, Legionella pneumophila, Pseudomonas aeruginosa, Streptococcus spp., Pneumococcus spp.*), wirusy (norowirus, poliomyelitis, coxsackie, adenowirus, echo, żółtaczki zakaźnej), a także grzyby i pierwotniaki (*Cryptosporidium, Giardia*) czy pasożyty jelitowe [27, 47, 63, 102]. Poważne zagrożenie dla zdrowia stanowią też patogeny rozprzestrzeniające się drogą wodną, takie jak *Vibrio cholerae O139* oraz pałeczki okrężnicy *Escherichia coli O157:H7*. Przenoszenie chorób drogą wodną

może nastąpić przez picie wody zanieczyszczonej mikroorganizmami, bądź wdychanie aerozoli wodnych podczas kąpieli w basenie.

Zgodnie z wytycznymi zawartymi w Rozporządzeniu Ministra Środowiska ws. wymagań jakimi powinna odpowiadać woda na pływalniach [130] dla zapewnienia bezpieczeństwa użytkowników parametry wody basenowej są badane regularnie. Zatem podstawowe wskaźniki fizykochemiczne wody basenowej (poziom pH, potencjał redox, chlor wolny) powinny być badane 4 razy dziennie. Dodatkowo chlor związany - z częstotliwością raz na dobę, a zawartość chloroformu i ∑THM-ów raz na kwartał. Natomiast wskaźniki bakteriologiczne kontrolowane są raz w miesiącu. Z uwagi na zdrowie użytkowników w przypadku przekroczenia kluczowych parametrów regulowanych przepisami basen może zostać nawet zamknięty.

Obecność wody w hali basenowej w znaczący sposób wpływa na środowisko wewnętrzne obiektu i determinuje stosowanie odpowiednio dobranych rozwiązań technologicznych, w celu zapewnienia bezpieczeństwa konstrukcji oraz użytkowników. Dobór układu grzewczo-wentylacyjnego oraz sposobu uzdatniania wody w istotny sposób wpływa na komfort cieplny, jakość wody i powietrza oraz na bezpieczeństwo użytkowania obiektu.

Trihalometany są związkami chemicznymi, które w pierwszej kolejności wykryto w wodzie wodociągowej przeznaczonej do picia. Po stwierdzeniu ich toksycznego działania na organizm ludzki wprowadzono obowiązek ich kontroli oraz wyznaczono stężenia graniczne. W Polsce dla wody wodociągowej i wody basenowej jest to ta sama wartość wynosząca 0,1 mg/m^3. Badanie trihalometanów w basenach krytych ma tym większe znaczenie, gdyż występują one zarówno w wodzie jak i w powietrzu, za przyczyną specyficznych właściwości fizycznych (lotność, gęstość większa od powietrza).

Obecności THM-ów w obszarze pływalni nie da się wyeliminować całkowicie ze względu na konieczność chlorowania wody, w celu jej zabezpieczenia pod kątem sanitarno-higienicznym. Ale poprzez analizę przyczyn ich powstawania i rozprzestrzeniania mogą zostać podjęte działania, celem jak największej redukcji tych związków chemicznych ze środowiska basenowego.

1.2 Teza, cel i zakres pracy

Celem pracy jest wskazanie jak znaczący wpływ ma wybór sposobu uzdatniania wody i układu wentylacyjnego na obecność THM-ów w środowisku basenów krytych. Głównym czynnikiem determinującym konieczność zajęcia się tematyką jakości środowiska wewnętrznego w obiekcie basenowym jest szkodliwe oddziaływanie trihalometanów na zdrowie użytkowników. W pracy przeprowadzono studium literaturowe w celu określenia poziomu zawartości THM-ów w wodzie i powietrzu na pływalniach oraz poddano analizie czynniki wpływające na ich występowanie w środowisku basenowym. Przeprowadzono badania doświadczalne w pomieszczeniu modelowym, które obejmowały pomiar parametrów powietrza wewnętrznego i wody basenowej przy różnym rozdziale powietrza wentylacyjnego. Otrzymane dane zostały wykorzystane jako dane źródłowe do przeprowadzenia symulacji numerycznych, które posłużyły do opracowania rozwiązań technicznych ograniczających stężenie THM-ów w środowisku basenowym. Rekomendowane rozwiązania obejmują system uzdatniania wody basenowej oraz system wentylacyjny. Opracowane rozwiązania mają potencjał do zastosowania w skali technicznej w obiekcie basenowym.

Zakres pracy obejmuje:

- ocenę środowiska wewnętrznego w halach basenowych,
- charakterystykę trihlometanów wraz z wyznaczeniem równowagi chemicznej THM w wodzie i powietrzu,
- studium literaturowe występowania trihalometanów w wodzie i powietrzu na pływalniach, wraz z czynnikami wpływającymi na ich występowanie w środowisku basenowym,
- analizę wpływu wyboru systemu uzdatniania wody i układu wentylacyjnego na występowanie THM-ów w wodzie i powietrzu na pływalni,
- badania doświadczalne proponowanych rozwiązań w basenie modelowym,
- symulacje numeryczne proponowanych rozwiązań w basenie modelowym,
- walidację obliczeń numerycznych badaniami doświadczalnymi,
- podsumowanie wyników i wnioski końcowe.

Przeprowadzenie badań doświadczalnych w pomieszczeniu modelowym oraz symulacji numerycznych przepływu powietrza będzie miało na celu udowodnienie **tezy**, że:

„Właściwy dobór sposobu uzdatniania wody oraz układu wentylacyjnego pozwala na istotne zmniejszenie występowania THM-ów w środowisku basenów krytych”.

2. Ocena środowiska wewnętrznego w halach basenowych - stan wiedzy

2.1 Opis parametrów środowiska wewnętrznego

Środowisko wewnętrzne obiektów sportowych jest kształtowane przez wiele czynników związanych głównie z parametrami powietrza wewnętrznego, ale też wynikających ze specyfiki danego pomieszczenia.

Na komfort cieplny użytkowników pływalni mają wpływ:

- temperatura powietrza wewnętrznego,
- wilgotność względna powietrza wewnętrznego,
- prędkość przepływu powietrza wewnętrznego,
- temperatura promieniowania powierzchni,
- asymetria rozkładu temperatury powietrza w pomieszczeniu,
- temperatura wody.

Dodatkowo na odbiór środowiska wewnętrznego przez użytkowników pływalni mają wpływ następujące czynniki:

- jakość wody i powietrza,
- komfort akustyczny,
- komfort wizualny,
- czas przebywania.

Wymienione parametry komfortu cieplnego przyjmują odmienne wartości w zależności od funkcji pomieszczenia i najczęściej są kształtowane przez system wentylacyjny i grzewczy. Dostępne normy i rozporządzenia m in. [131, 137] stosowane przy projektowaniu budynków odnoszą się głównie do pomieszczeń biurowych, magazynowych, technologicznych, mieszkalnych itp. Aktami prawnymi uwzględniającymi parametry środowiska wewnętrznego w basenach sportowych i rekreacyjnych są dokumenty wydane przez: Ministra Środowiska [130], Głównego Inspektora Sanitarnego [145] oraz projektanci posiłkują się też niemiecką normą DIN [125].

Określając parametry środowiska wewnętrznego krytej pływalni należy mieć na uwadze jej specyficzny charakter. Pływalnia jest miejscem, gdzie użytkownicy ubrani są w kostiumy kąpielowe i wykazują co najmniej średnią aktywność fizyczną. Dodatkowo część osób porusza się po brzegu basenu ze zwilżoną skórą. Ponadto w hali basenowej znajduje się zwierciadło wody, które w sposób ciągły oddaje ciepło, wilgoć i zanieczyszczenia do

powietrza wewnętrznego. Wszystkie te czynniki wpływają na konieczność szczególnej dbałości przy doborze parametrów dla instalacji wentylacji, ogrzewania i uzdatniania wody basenowej.

Dobór materiałów budowlanych, w szczególności przeszkleń oraz konstrukcji ścian i dachu ma również istotny wpływ na parametry środowiska wewnętrznego hali basenowej. Zastosowanie materiałów budowlanych o niskich współczynnikach przenikania ciepła oraz odpowiedniego przeszklenia w zdecydowany sposób może zmniejszyć zapotrzebowanie na ciepło obiektu basenowego.

2.2 Parametry termiczne i wilgotnościowe

Do głównych parametrów cieplno-wilgotnościowych w krytych pływalniach zalicza się temperaturę powietrza i wody basenowej oraz wilgotność względną powietrza wewnętrznego. Równie istotnym parametrem jest prędkość przepływu powietrza w strefie przebywania ludzi. Powyższe parametry są powiązane ze sobą i mają zasadniczy wpływ na odczucie komfortu osób korzystających z basenu oraz bezpieczeństwo konstrukcji obiektu.

2.2.1 Temperatura wody

Temperatura wody basenowej ma istotny wpływ na wielkość zysków wilgoci w pomieszczeniu krytej pływalni. Z jej wzrostem obserwuje się wzrost zysków wilgoci, stąd dąży się do jej obniżenia. Zasadniczym jednak kryterium określającym wartość temperatury wody jest odczuwanie komfortu cieplnego przez kąpiące się osoby w basenie. W zależności od przeznaczenia basenu (rekreacyjny, sportowy, dla dzieci), zalecane zakresy temperatury wody podano w Tab. 2.1

Tab. 2.1 Zalecane zakresy temperatury wody basenowej w zależności od przeznaczenia

Zalecenia	Basen rekreacyjny	Basen sportowy	Basen dla dzieci	Źródło
	Temperatura wody [^{0}C]			
polskie	26÷30	24÷28	28÷32	[9]
	26÷28	22÷24	32	[46]
	24÷26	24÷26	28	[39]
VDI	24÷28	24÷28	30÷34	[142]
ASHRAE	24÷29	24÷28	24÷29	[124]

Przy doborze temperatury wody można się również kierować wielkością basenu. Większe baseny np. z nieckami o wymiarach olimpijskich 25x50m, dają możliwość rozwijania większej aktywności ruchowej co może przekładać się na dobór niższej temperatury z podanych zakresów. Międzynarodowe przepisy pływania FINA [135] zalecają nawet, aby w basenach olimpijskich podczas zawodów utrzymywać stałą temperaturę wody na poziomie 25^0C.

2.2.2 Temperatura powietrza

Przy wyborze optymalnej temperatury powietrza w hali basenu decydującym kryterium powinno być zapewnienie komfortu cieplnego użytkownikom. Należy jednak zwrócić uwagę, iż wartość temperatury powietrza ściśle wiąże się z temperaturą wody i wilgotnością powietrza. Zaleca się przyjmowanie temperatury powietrza wyższej od temperatury wody, gdyż zapobiega to sytuacji nadmiernego parowania z mokrej skóry użytkowników, co mogłoby skutkować zbyt dużą utratą ciepła oddawanego przez parowanie.

W Polsce nie wprowadzono do tej pory jednolitych przepisów dotyczących temperatury powietrza w hali basenowej, zatem określając jej wartość można jedynie kierować się zaleceniami z przepisów zagranicznych i danych literaturowych. Większość źródeł podaje, że temperatura powietrza powinna być wyższa o 2÷4K od temperatury wody [124].

Tab. 2.2 Zakresy zalecanej temperatury powietrza wg różnych źródeł

Zalecenia	Temperatura powietrza [^{0}C]		Źródło
polskie	26÷34	$t_p=t_w+$ (2÷4)	[9]
	28	-	[39]
	-	$t_p=t_w+$ (3÷5)	[28, 43]
VDI	30÷34	$t_p=t_w+$ (2÷4)	[142]
ASHRAE	24÷29	$t_p=t_w+$ (2÷4)	[124]

gdzie: t_w-temp. wody basenowej; t_p-temp. powietrza

Zestawione wartości zalecanej temperatury powietrza (Tab. 2.2) w hali basenowej nie odbiegają znacząco od siebie i oscylują w przedziale 28÷30°C.

2.2.3 Wilgotność względna powietrza

Wilgotność względna powietrza określa procentowo w jakim stopniu jest ono nasycone parą wodną, wskazuje na zdolność jej przyjęcia w danej temperaturze.

Wartość wilgotności względnej powietrza w krytej pływalni ustala się rozważając:

- Zapewnienie warunków komfortu cieplnego osób korzystających z basenu (względy klimatyczno-fizjologiczne).
- Ochronę konstrukcji budowlanej obiektu (problemy konstrukcyjno-budowlane).
- Zyski wilgoci (względy ekonomiczno-eksploatacyjne).

Ustalenie odpowiedniej wilgotności względnej powietrza jest bardzo istotne z punktu widzenia osób korzystających z pływalni, gdyż wpływa na przebieg termoregulacji organizmu człowieka.

Przyjęcie zbyt wysokiej wilgotności względnej może prowadzić do przegrzania organizmu, gdyż zmniejsza się możliwość parowania wydzielonego potu (szczególnie przy wyższych wartościach temperatury). W warunkach wysokiej wilgotności zmniejsza się ilość ciepła oddawanego przez parowanie.

Przyjęcie zbyt niskiej wilgotności względnej może z kolei prowadzić do wychłodzenia na skutek nadmiernego i niekontrolowanego przez organizm odprowadzania ciepła w przypadku zwilżenia skóry wodą. W warunkach niskiej wilgotności zwiększa się ilość ciepła oddawanego przez parowanie.

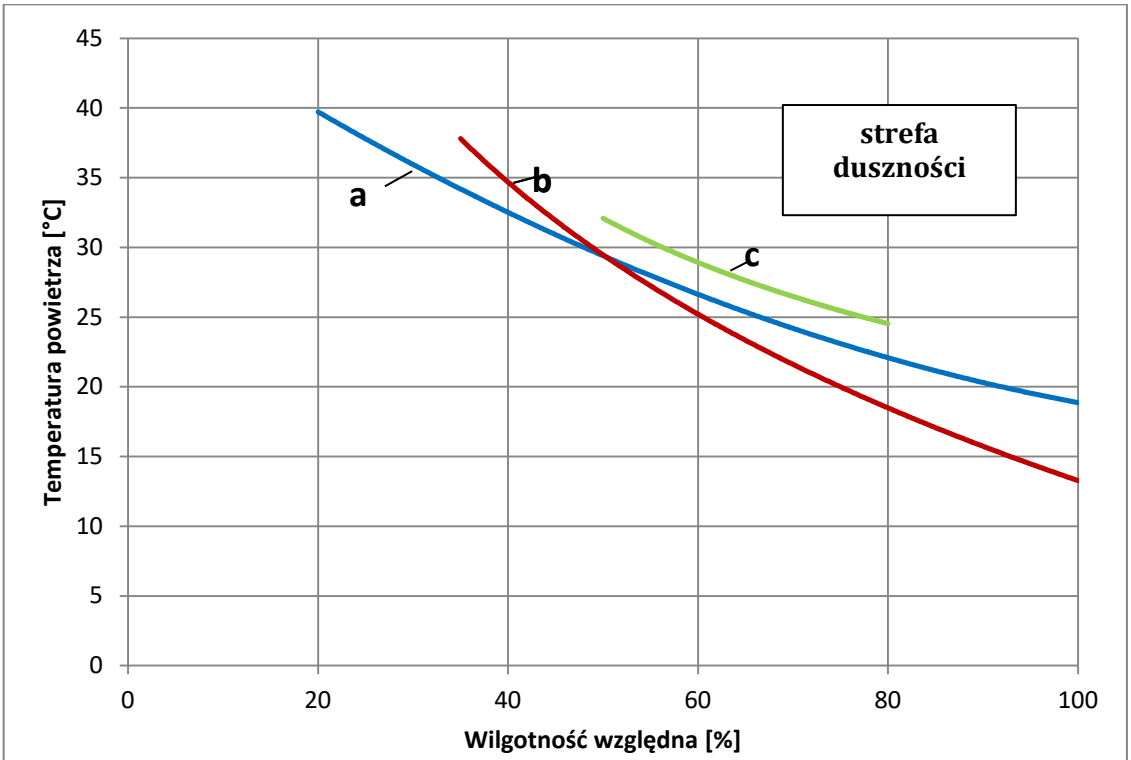
Zalecane dla hali basenowej zakresy wilgotności względnej powietrza zestawiono w Tab. 2.3.

Tab. 2.3 Zakresy zalecanej wilgotności względnej powietrza wg różnych źródeł

Zalecenia	Wilgotność względna powietrza [%]	Źródło
polskie	45÷65	[39]
	50÷60	[43]
VDI	40÷64	[142]
ASHRAE	40÷60	[124]

Zestawione zakresy zalecanej wilgotności względnej powietrza wewnętrznego w hali basenowej nie odbiegają znacząco od siebie i oscylują w przedziale 45÷60%.

Osoby korzystające z basenu mają w dużym stopniu zwilżoną skórę, co prowadzi do zachwiania procesu termoregulacji. W takiej sytuacji organizm jest pozbawiony mechanizmu samoregulacji temperatury na drodze wydzielania potu. Proces parowania wody z powierzchni ciała i związana z nią ilość odprowadzonego z organizmu ciepła, ściśle zależą od dwóch parametrów: przyjętej temperatury i wilgotności względnej powietrza. Zależność miedzy tymi parametrami powietrza przedstawia m.in. krzywa duszności wg Lancastera-Castensa-Ruge.



***a**.krzywa największej wilgotności względnej powietrza zewnętrznego, dla różnych wartości temperatury,*
***b**.krzywa duszności ogólna,*
***c**.krzywa duszności dla pływalni.*

Rys. 2.1 Krzywa duszności wg Lancastera-Castensa-Ruge (z powiększonym dla pływalni zakresem wynikającym z lekkiego odzienia kąpiących się osób) [20]

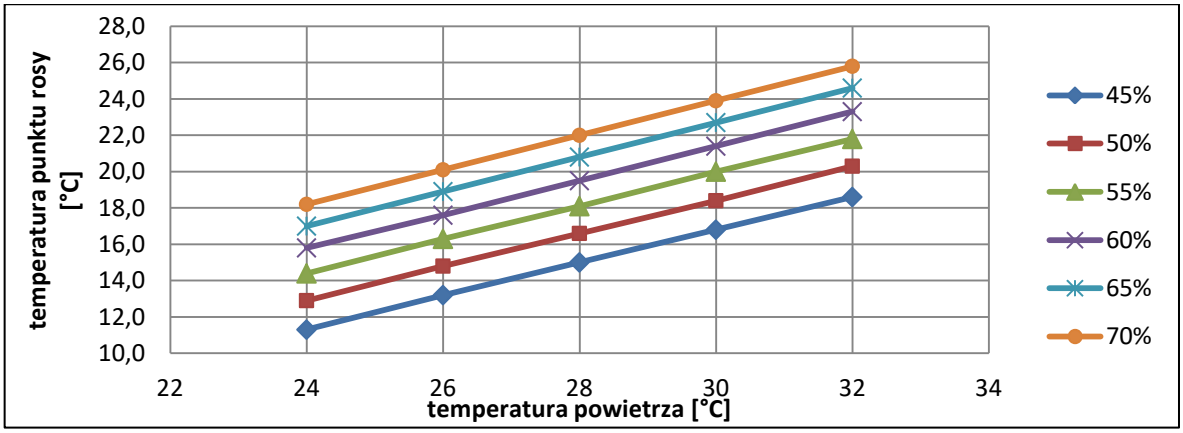
Powyższe krzywe określają zalecaną wilgotność względną dla danej temperatury, powyżej której ograniczona jest możliwość oddawania ciepła przez parowanie. Krzywa „b" dotyczy człowieka normalnie ubranego, będącego w spoczynku. Krzywa „c" dopuszcza wyższe graniczne wartości temperatury powietrza i wilgotności względnej, gdyż uwzględnia ludzi znajdujących się na basenie, a więc rozebranych, o mokrej powierzchni ciała, którzy przebywają w nim krótki okres czasu i mają odmienne odczucia cieplne.

Analiza krzywej duszności dla pływalni („c") :

- krzywa w wyraźny sposób wskazuje , że ze wzrostem temperatury wewnętrznej w pływalni powinien następować spadek wilgotności względnej, dla zapewnienia komfortowych warunków dla kąpiących się osób,
- obszar nad krzywą to przyjęcie zbyt wysokiej temperatury i wilgotności powietrza, które powodują uczucie duszności u osób przebywających w pomieszczeniu, co wpływa na obniżenie odczucia komfortu,
- obszar pod krzywą to przyjęcie zbyt niskiej temperatury i wilgotności powietrza, co prowadzi do odczucia chłodu przez osoby przebywające w pomieszczeniu i obniża odczucie komfortu. Poza tym powoduje szybsze odparowanie wody i determinuje większe zyski wilgoci do pomieszczenia, co skutkuje zwiększeniem zużycia energii na osuszanie powietrza. Podwyższone parowanie wpływa również na stygnięcie wody basenowej i większe zużycie ciepła na jej podgrzanie by utrzymać jej stałą temperaturę. Około 80-90% ciepła z niecki traci się na skutek parowania [116],

Na podstawie wykresu można określić wąski zakres optymalnych parametrów powietrza dla utrzymania komfortu użytkowników. Dla najczęściej przyjmowanej na basenie temperatury powietrza w przedziale 28÷30°C, wilgotność względna nie powinna przekraczać 55-60%, by nie wkroczyć w warunki strefy duszności.

Traktując obiekt basenowy kompleksowo, dobór parametrów powietrza powinien również uwzględniać bezpieczeństwo konstrukcji. Poniżej zamieszczono wykres przedstawiający zależność temperatury punktu rosy w funkcji temperatury powietrza i wilgotności względnej dla zakresu parametrów panujących w obiekcie basenowym (Rys. 2.2).



Rys. 2.2 Temperatura punktu rosy w funkcji temp. powietrza wewn. i wilgotności względnej [105]

Rozpatrując wspomniany komfortowy zakres temperatury 28÷30°C i wilgotności względnej na poziomie 55÷60%, ryzyko wykroplenia pary wodnej na elementach konstrukcji będzie występować już przy temperaturze ok. 20÷21°C. Dlatego istotnym jest aby system wentylacyjny zapewniał parametry powietrza komfortowe dla użytkowników oraz bezpieczne dla konstrukcji. Powinno to być realizowane przez odpowiedni rozdział powietrza w hali, co zostało przeanalizowane w dalszej części pracy w Rozdziale 4.

2.2.4 Prędkość przepływu powietrza

Prędkość przepływu powietrza w znaczący sposób wpływa na odczucie komfortu osób przebywających w pomieszczeniu, dlatego ważny jest właściwy jej dobór. Zgodnie z normą PN-EN 7730:2006 [139] w pomieszczeniach zamkniętych zalecane są różne wartości prędkości przepływu powietrza w zależności od pory roku. Dla sezonu grzewczego v_{max}=0,18÷0,25 m/s, dla sezonu chłodniczego v_{max}=0,15÷0,21 m/s. Dla pomieszczeń basenowych w strefie przebywania ludzi zaleca się nie przekraczanie prędkości v_{max}=0,15÷0,30 m/s [43], a nawet utrzymywanie prędkość poniżej 0,13 m/s [124]. Przekroczenie progowej wartości prędkości powietrza może skutkować odczuciem przeciągu przez użytkowników, w szczególności na pływalni gdzie osoby wychodzące z wody mają zwilżoną skórę.

Tab. 2.4 Zakresy zalecanej wilgotności względnej powietrza wg różnych źródeł

Zalecenia	Prędkość przepływu powietrza [m/s]	Źródło
polskie	0,15÷0,30	[43]
	0,18÷0,25 dla sezonu grzewczego 0,15÷0,21 dla sezonu chłodniczego	[139]
ASHRAE	≤ 0,13	[124]

2.3 Jakość wody i powietrza w basenach

2.3.1 Podstawowe parametry oceny jakości wody

Obiekty basenowe w przeważającej większości należą do kategorii obiektów użyteczności publicznej, co sprawia że woda basenowa powinna spełniać wymagania

mikrobiologiczne i fizykochemiczne regulowane właściwymi przepisami. Jeszcze do niedawna w prawodawstwie polskim brakowało wymagań prawnych w zakresie oceny jakości wody basenowej. Ze względu na sposób jej użytkowania, przyjmowało się, że powinna ona spełniać wymagania jakościowe wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi. A zatem, najczęściej wykorzystywanym aktem prawnym odnoszącym się do wymagań jakim powinna odpowiadać woda basenowa było Rozporządzenie Ministra Zdrowia z 29 marca 2007 r. (wraz ze zmianami z 2010 r.) w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi [130]. Ponadto na bazie niemieckiej normy DIN 19643 [125] określającej parametry jakościowe wody w basenach oraz wymagania projektowe i eksploatacyjne opracowano wymagania sanitarno-higieniczne dla krytych pływalni [144]. Wymagania te zostały zaakceptowane przez Departament Zdrowia Publicznego Ministerstwa Zdrowia i Opieki Społecznej i przeznaczono je, jako materiał pomocniczy dla projektantów, inwestorów, wykonawców oraz eksploatatorów. Jednak opracowane wytyczne nie stanowiły przepisów prawa, więc w praktyce przy projektowaniu systemów uzdatniania wody i późniejszej ich eksploatacji stosowane były również inne przepisy i zalecenia.

W zakresie właściwości mikrobiologicznych wody w okresie przed wprowadzeniem obecnie obowiązującego rozporządzenia [130] woda basenowa badana była przez powiatowe stacje sanitarno-epidemiologiczne. Na podstawie zaleceń wydanych przez Narodowy Instytut Zdrowia Publicznego [146] dokonywano raz w miesiącu jedynie oznaczenia liczby jednostek tworzących kolonie *Escherichia coli*, ogólnej liczby bakterii w temp. 36±2°C i gronkowców koagulazododatnich. W przypadku nieprawidłowej jakości wody pod względem bakteriologicznym wydawana była decyzja zarządzająca podjęcie działań naprawczych z rygorem natychmiastowej wykonalności.

Jednak do kompleksowej oceny jakości mikrobiologicznej wody basenowej powyższe wskaźniki były niewystarczające. Obecnie kompleksy basenowe wyposażone są w liczne baseny rekreacyjne oraz atrakcje wodne, które są miejscami podatnymi na tworzenie się aerozoli wodno-powietrznych. W tych obszarach kompleksów basenowych istnieje ryzyko kontaktu użytkowników z bakteriami z rodzaju *Legionella*, które nie były poddawane kontroli.

Istotnym krokiem w kierunku usystematyzowania i znormalizowania kontroli jakości wody basenowej były wytyczne [145] w sprawie wymagań jakości wody na pływalniach, wydane w 2014 roku przez Państwową Inspekcję Sanitarną. Dokument poruszał następujące kwestie:

1. Wymagania dotyczące warunków sanitarno-higienicznych na pływalniach.

2. Zalecenia dotyczące mikrobiologicznej jakości wody na pływalniach, pływalniach z hydromasażem i innych urządzeniach do rekreacji wodnej.
3. Sposobu pobierania próbek wody do badań mikrobiologicznych.
4. Postępowania w przypadku wykrycia ponadnormatywnego skażenia mikrobiologicznego wody na pływalniach.

Powyższe wytyczne były podstawą dla obowiązującego rozporządzenia [130], które szczegółowo określa:

1. Wymagania mikrobiologiczne i fizykochemiczne jakim powinna odpowiadać woda na pływalniach (Tab. 2.5, Tab. 2.6, Tab. 2.7, Tab. 11.1 *w Załączniku*)
2. Częstotliwość pobierania próbek wody na pływalniach (Tab. 2.8, Tab. 11.2 *w Załączniku*),
3. Metodyki referencyjne analiz wody na pływalniach (Tab. 11.3, Tab. 11.4 *w Załączniku*),
4. Sposób informowania użytkowników o jakości wody na pływalni.

Tab. 2.5 Wymagania mikrobiologiczne, jakim powinna odpowiadać woda na pływalniach [130]

Lp.	Parametr	Najwyższa dopuszczalna liczba mikroorganizmów [jtk lub NPL]				
		Woda wprowadzona do niecki basenowej z systemem cyrkulacji[1)]	Woda w niecce basenowej[6)]	Woda w nieckach basenowych wyposażonych w urządzenia wytwarzające aerozol wodno-powietrzny[2)]	Woda w nieckach basenowych udostępnianych do nauki niemowląt i małych dzieci do lat 3	Woda w natryskach
1	*Escherichia coli* w 100 ml wody	0	0	0	0	-
2	*Pseudomonas aeruginosa* w 100 ml wody	0	0	0	0	-
3	Ogólna liczba mikroorganizmów[3)] w temp. 36 ± 2^0C po 48h w 1 ml wody	20	100	100	100	-
4	Gronkowce koagulazododtanie w 100 ml wody	-	-	-	0	-
5	*Legionella sp.* w 100 ml wody	0	0[4)]	0	0	< 100[5)]

Tab. 2.6 Wymagania fizykochemiczne, jakie powinna spełniać woda na pływalniach [130]

Parametr	Jedn.	Woda wprowadzona do niecki basenowej z systemem cyrkulacji[1)]		Woda w niecce basenowej[12)]		Woda w nieckach basenowych wyposażonych w urządzenia wytwarzające aerozol wodno-powietrzny		Woda w nieckach basenowych udostępnianych do nauki pływania dla niemowląt i małych dzieci do lat 3		Woda w brodziku do płukania stóp	
		min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
pH											
a) woda słodka		6,5	7,6	6,5	7,6	6,5	7,6	6,5	7,6	-	-
b) woda słona		6,5	7,8	6,5	7,8	6,5	7,8	6,5	7,8	-	-
Chlor wolny											
	mg/l	-	-	0,3[3)]	0,6 [4)5)]	0,7	1,0[4)]	0,3[3)]	0,4[4)]	1,0	2,0
Potencjał redox	Dane w Tab. 11.1 *w Załączniku*										

Objaśnienia:

1) Dotyczy wód:
   a) słodkich, tj. wód powierzchniowych lub podziemnych spełniających wymagania określone w przepisach dla wody do spożycia,
   b) słonych, w tym morskich i solankowych zawierających od 5g/l do 15g/l składników mineralnych (głównie chlorków),
   c) termalnych, tj. wód podziemnych, które na wypływie z ujęcia mają temperaturę nie mniejszą niż 20^0C (z wyłączeniem wód pochodzących z odwadniania wyrobisk górniczych),
2) Próbkę wody do badań należy pobierać z niecki basenowej, w możliwie jak najmniejszej odległości od wylotu dyszy.
3) Nie dotyczy pływalni odkrytych.
4) Badanie należy wykonać w przypadku gdy temperatura wody jest $\geq 30^0$C,
5) Należy badać w instalacjach wody ciepłej. Próbkę do badań należy pobrać przynajmniej z 1 na 10 natrysków,
6) Z uwzględnieniem brodzików do zabawa dziecięcych.

Tab. 2.7 Dodatkowe wymagania fizykochemiczne, jakie powinna spełniać woda na pływalniach [130]

Parametr	Jedn.	Woda wprowadzona do niecki basenowej z systemem cyrkulacji[1)]		Woda w niecce basenowej[12)]		Woda w nieckach basenowych wyposażonych w urządzenia wytwarzające aerozol wodno-powietrzny		Woda w nieckach basenowych udostępnianych do nauki niemowląt i małych dzieci do lat 3	
		min	max	min	max	min	max	min	max
Mętność	NTU	-	0,3	-	0,5	-	0,5	-	0,5
Chlor związany[6)]	mg/l	-	0,2	-	0,3	-	0,3	-	0,3
Chloroform	mg/l	-	0,03	-	0,03	-	0,03	-	0,02
∑THM[7)]	mg/l	-	0,1	-	0,1	-	0,1	-	0,1
Glin[8)]	mg/l	-	-	-	0,2	-	0,2	-	0,2
Żelazo[8)]	mg/l	-	-	-	0,2	-	0,2	-	0,2
Azotany[9)]	mg/l	-	20	-	20	-	20	-	20
Ozon[10)]	mg/l	-	0,05	-	-	-	-	-	-
Kwas izocyjanurowy[11)]	mg/l	-	-	-	100	-	100	-	-
Utlenialność[9)]	mg/l	-	-	-	4	-	4	-	4

Objaśnienia:

1) Dotyczy wód:
   a) słodkich, tj. wód powierzchniowych lub podziemnych spełniających wymagania określone w przepisach dla wody do spożycia,
   b) słonych, w tym morskich i solankowych zawierających od 5g/l do 15g/l składników mineralnych (głównie chlorków),
   c) termalnych, tj. wód podziemnych, które na wypływie z ujścia mają temperaturę nie mniejszą niż 20^0C (z wyłączeniem wód pochodzących z odwadniania wyrobisk górniczych).
2) Wartość dla wody z zawartością chlorków powyżej 5g/l lub zawierającej bromki i jodki w ilości powyżej 0,5 mg/l należy ustalić indywidualnie dla każdego obiektu.
3) Przy jednoczesnym wspomaganiu dezynfekcji związkami chloru – promieniowaniem UV lub ozonem.
4) W sytuacji przekroczenia norm wskaźników mikrobiologicznego zanieczyszczenia wody lub bardzo dużego obciążenia niecki basenowej kąpiącymi się możliwe jest krótkotrwałe podwyższone stężenia chloru wolnego do wartości nie większej niż 3,0 mg/l.
5) W przypadku niecek basenowych odkrytych najwyższa dopuszczalna wartość stężenia wolnego chloru wynosi 1,0 mg/l.
6) Dążyć do utrzymania jak najniższej wartości.
7) ∑THM – wartość oznacza sumę stężeń związków: trichlorometan, bromodichlorometan,dibromochlorometan, tribromometan.
8) Oznacza się, gdy jest stosowany jako koagulant.
9) Podana wartość stanowi różnicę pomiędzy wartością tego parametru w wodzie w niecce basenowej, a jego zawartością w wodzie doprowadzanej do pływalni.
10) Oznacza się w przypadku ozonowania wody, po filtracji sorpcyjnej.
11) Oznacza się w przypadku stosowania di- i trichloroizocyjanuranu.
12) Z uwzględnieniem brodzików do zabaw dziecięcych.

Tab. 2.8 Częstotliwość pobierania próbek wody doprowadzanej do pływalni, wprowadzanej do niecki basenowej i w nieckach basenowych[1),2)] [130]

Parametr	Okres	Woda wprowadzona do niecki basenowej z systemem cyrkulacji	Woda w niecce basenowej[7)]	Woda w nieckach basenowych wyposażonych w urządzenia wytwarzające aerozol wodno-powietrzny	Woda w nieckach basenowych udostępnianych do nauki pływania dla niemowląt i małych dzieci do lat 3
Wskaźniki bakteriologiczne					
Escherichia coli	miesiąc	1	2	2	4
Pseudomonas aeruginosa	miesiąc	1	2	2	2
Ogólna liczba mikroorganizmów w temp. 36 ± 2^0C po 48h	miesiąc	1	1	1	2
Legionella sp.	rok	4	4	12	4
Gronkowce koagulazododatnie	miesiąc	-	-	-	1
Wskaźniki fizykochemiczne					
Mętność	kwartał	1	3	3	3
pH[3)]	dzień	4	4	4	4
Potencjał redox oksydoredukcyjny przy elektrodzie Ag/AgCl 3,5 m KCl[3)4)]	dzień	4	4	4	4
Chlor wolny[3)4)]	dzień	4	4	4	4
Chlor związany [3)4)]	dzień	1	1	1	1
Chloroform	kwartał	1	1	1	1
∑THM	kwartał	1	1	1	1
Glin[5)]		-	-	-	-
Żelazo[5)]		-	-	-	-
Ozon[6)]	kwartał	1	-	-	-
Kwas izocyjanurowy	rok	-	4	4	4
Azotany	kwartał	1	1	1	1
Utlenialność	miesiąc	1	1	2	2

Objaśnienia:
1) Jest to minimalna częstotliwość pobierania próbek wody na pływalni w ramach prowadzonej oceny przez zarządzającego pływalnią.
2) W przypadku niecek basenowych odkrytych jakość wody należy badać co najmniej 3 razy w sezonie, a w przypadku długo utrzymujących się wysokich temperatur co najmniej 2 razy w miesiącu.
3) Pomiar automatyczny. W przypadku braku możliwości pomiaru automatycznego, należy wykonać pomiar manualnie.
4) Oznaczać każdorazowo z wykonaniem badań mikrobiologicznych w miejscu i punkcie pobierania próbek wody do badań mikrobiologicznych.
5) W przypadku zastosowania w technologii uzdatniania wody na pływalni – należy kontrolować w wodzie stężenie po procesie filtracji sorpcyjnej lub koagulacji, wyłącznie jeśli wystąpią problemy z mętnością wody.
6) W przypadku zastosowania w technologii uzdatniania wody na pływalni – należy kontrolować w wodzie stężenie po procesie filtracji sorpcyjnej.
7) z uwzględnieniem brodzików do zabaw dziecięcych.

Przedstawione dane pokazują, że wprowadzone rozporządzenie rozszerzyło zakres wskaźników kontroli jakości wody basenowej, jakie są monitorowane regularnie:

- w zakresie parametrów mikrobiologicznych o bakterie typu *Legionella*,
- w zakresie parametrów fizykochemicznych o chlor związany, chloroform i THM-y oraz w razie mętności wody o glin i żelazo,

oraz zwiększyło ilość i częstotliwość pobieranych próbek do analizy. Wcześniej powszechną praktyką na pływalni było pobieranie próbek raz w miesiącu i to jedynie z basenu sportowego i rekreacyjnego. Obecnie w myśl rozporządzenia dodatkowo kontroli podlega również woda w urządzeniach wytwarzających aerozol wodno-powietrzny (grzybki, gejzery, wodospady, hydromasaże i inne atrakcje wodne) oraz w nieckach basenowych udostępnianych dla niemowląt i małych dzieci do lat 3 (ze zwiększoną częstotliwością pomiarową). Wprowadzenie w życie powyższego rozporządzenia, wpłynęło na poprawę bezpieczeństwa korzystania z obiektów basenowych. Rozszerzona kontrola pozwoliła na szybszą reakcję zarządcy basenu w przypadku ewentualnego zakażenia wody basenowej. Dodatkowe badanie wody pod kątem występowania chloru związanego, chloroformu i sumy THM-ów daje możliwość monitorowania i szybkiej reakcji w sytuacji ich przekroczenia. Trichlorometany są związkami lotnymi, o gęstości większej od powietrza, więc jeśli będą obecne w wodzie basenowej to również będą gromadzić się nad taflą wody, w strefie gdzie pływacy pobierają powietrze. Dlatego też dla pełnego bezpieczeństwa użytkowników w środowisku basenowym stężenie sumy THM-ów powinno być badane zarówno w wodzie jak i w powietrzu.

2.3.2 Podstawowe parametry oceny jakości powietrza

Jakość powietrza wewnętrznego kształtowana jest przez wiele czynników, do głównych z nich należą:

- rodzaj przyjętego układu wentylacyjnego w pomieszczeniu,
- wartość temperatury i wilgotności względnej powietrza wewnętrznego,
- jakość powietrza zewnętrznego w bezpośrednim sąsiedztwie obiektu,
- emisja zanieczyszczeń ze źródeł wewnątrz pomieszczenia.

W początkowych badaniach nad jakością powietrza wewnętrznego przyjmowano, że główne jego zanieczyszczenia to ditlenek węgla, para wodna, nieprzyjemne zapachy, kurz, pył i mikroorganizmy [117]. Dopiero w późniejszych badaniach zwrócono uwagę na zanieczyszczenia emitowane wewnątrz pomieszczenia z wykładzin, mebli, materiałów budowlanych, które w większości okazały się toksyczne [50, 86].
Zanieczyszczenia powietrza wewnętrznego często dzieli się na grupy:

- zanieczyszczenia fizyczne,
- zanieczyszczenia chemiczne,
- zanieczyszczenia biologiczne.

Każda z tych grup charakteryzuje się innym typem zanieczyszczenia, lecz wszystkie w zasadniczy sposób wpływają na jakość powietrza wewnętrznego. Poniżej zostały scharakteryzowane zanieczyszczenia występujące w pomieszczeniach, gdzie przebywają ludzie, większość z nich występuje również w halach basenowych.

Potencjalny wpływ zanieczyszczeń fizycznych środowiska wewnętrznego na ludzkie samopoczucie i zdrowie zestawiono w Tab. 2.9. Do głównych z tych zanieczyszczeń występujących w obiekcie basenowym należą:

- hałas (generowany przez urządzenia instalacji grzewczo-wentylacyjnej i uzdatniania wody np. wentylatory w centralach wentylacyjnych, pompy wodne, urządzenia pneumatyczne, urządzenia do rekreacji wodnej),
- wibracje (generowane przez urządzenia większości instalacji).

W celu ochrony użytkowników przed ekspozycją na hałas i wibracje od urządzeń, pomieszczenia techniczne i technologiczne lokalizowane są na poziomie -1 lub są specjalnie wygłuszane. Zalecane jest też stosowanie podstaw antywibracyjnych pod urządzenia.

Tab. 2.9 Potencjalny wpływ zanieczyszczeń fizycznych środowiska wewnętrznego na ludzkie samopoczucie i zdrowie [117]

Typ zanieczyszczenia		Wpływ na zdrowie – możliwe zaburzenia	Źródło
Zanieczyszczenia fizyczne	Hałas	Zaburzenia słuchu (przejściowy lub trwały ubytek słuchu) i skutki pozasłuchowe – znużenie lub pobudliwość, zmiany w centralnym układzie nerwowym (patologiczny zapis fal EEG, trudność w koncentracji, kłopoty w zapamiętywaniu, w uczeniu się, przerywanie myśli), zmiany w układzie krążenia (obniżenie częstości tętna, spadek lub podwyższenie ciśnienia tętniczego krwi), zmiany w układzie oddechowym (zwiększenie częstości oddechu, spadek objętości oddechowej, mniejsze zużycie tlenu), zmiany w układzie pokarmowym (zwiększenie częstotliwości pojawiania się wrzodów żołądka, dwunastnicy), zmiany w procesie przemiany materii, ból głowy, bezsenność.	[99]
	Wibracje	Uczucie zmęczenia, apatii, brak chęci do pracy, bóle i zawroty głowy, drętwienie i mrowienie kości, bezsenność, przy jednoczesnym rozdrażnieniu, a nawet agresji. Wibracje mogą powodować uszkodzenia układu kostnego, przede wszystkim stawów i dysków, przy dużym obciążeniu nawet pęknięcie kości i zmiażdżenie tkanek stawowych.	[99]
	Promieniowanie jonizujące	Działa mutagennie, powodując powstawanie uszkodzeń w DNA w wyniku bezpośredniego niszczenia cząsteczek kwasów nukleinowych oraz produkcji wolnych rodników.	[99]
	Promieniowanie elektromagnetyczne	Zaburzenia funkcjonowania układu wewnątrzwydzielniczego, zmiany błon śluzowych dróg oddechowych, zaburzenia snu, bóle głowy, brak koncentracji, problemy ze wzrokiem, zmiana ciśnienia krwi, zmiany poziomu hormonów oraz obrazu krwi (zachwianie stosunku białych i czerwonych krwinek), zmęczenie nieadekwatne do wysiłku.	[99]

Tab. 2.10 Potencjalny wpływ zanieczyszczeń biologicznych powietrza wewnętrznego na ludzkie samopoczucie i zdrowie [117]

Typ zanieczyszczenia		Wpływ na zdrowie – możliwe zaburzenia	Źródło
Zanieczyszczenia biologiczne	Kurz	Astma oskrzelowa, alergiczny całoroczny nieżyt nosa, alergiczne zapalenie pęcherzyków płucnych, pyłkowica (alergiczny sezonowy nieżyt nosa), pokrzywka, alergiczne zapalenie oskrzeli, wyprysk kontaktowy, alergiczne zapalenie spojówek; cząstki pochodzenia nieorganicznego w postaci pyłów i aerozoli mogą osadzać się w przewodzie oddechowym człowieka, powodując jego uszkodzenia, przewlekłe choroby, a nawet zmiany nowotworowe. dwunastnicy), zmiany w procesie przemiany materii, ból głowy, bezsenność.	[121] [6], [48], [67], [69]
	Roztocza i saprofity, oraz produkty ich metabolizmu	Alergia, objawy całorocznego atopowego nieżytu błony śluzowej nosa.	[104], [108]
	Pleśnie	Kaszel, napady kichania, pokrzywka, ostre zaburzenia oddychania i schorzenia alergiczne (alergiczny nieżyt nosa, alergiczne zapalenie spojówek, astma oskrzelowa, alergiczne zapalenie pęcherzyków płucnych), złe samopoczucie, czasem depresja.	[44], [65]
	Mytotoksyny	Działanie kancerogenne, immunotoksyczne, neurotoksyczne, mutagenne i teratogenne.	[115]
	Bakterie typu *Legionella pneumophilis*	Ostra niewydolność płuc, często prowadząca do śmierci.	[8]

Do głównych zanieczyszczeń biologicznych występujących w obiekcie basenowym należą:

- pleśnie, mytotoksyny (rozwijają się w obszarach źle wentylowanych o podwyższonej wilgotności powietrza są to głównie rejony podsufitowe, narożniki ścian zewnętrznych oraz strefa natryskowa),
- bakterie typu *Legionella pneumophilis* (bakterie te mogą kolonizować wewnętrzne części rur z ciepłą wodą, głowice natryskowe pryszniców, wanny z hydromasażem, baseny rekreacyjne z gejzerami, wodospadami itp.)

Do zakażeń wymienionymi zanieczyszczeniami biologicznymi w środowisku basenowym dochodzi głównie poprzez inhalację. W celu zapobiegania tworzenia się pleśni, mytotoksyn na ścianach należy zabezpieczyć potencjalnie zagrożone rejony (strefa podsufitowa, przyokienna, narożniki ścian zewnętrznych, oraz rejon natrysków) przed występowaniem parametrów powietrza sprzyjających ich rozwojowi. Już na etapie projektowania obiektu powinny zostać podjęte działania polegające na właściwym doborze:

- materiałów budowlanych (o dobrej izolacyjności cieplnej),
- rozdziału powietrza w hali basenowej (zapewniającym ruch mas powietrza w obrębie całej hali basenowej, bez powstawania stref martwych).

Hale basenowe są dogodnym środowiskiem dla rozwoju bakterii typu *Legionella pneumophilis* ze względu na wysoką temperaturę wody, wysoką wilgotność powietrza oraz rozbudowaną instalację wodną z licznymi urządzeniami wytwarzającymi aerozol wodny. W celu zapobiegania zakażeniom tą bakterią, już na etapie projektowania powinny zostać podjęte działania polegające na:

- zapewnieniu, aby instalacje wodno-kanalizacyjne i klimatyzacyjne były wykonane w taki sposób aby, temperatura zimnej wody nie była wyższa niż 20^{o}C, a gorącej nie osiągała wartości wyższej od 55^{o}C (namnażanie bakterii występuje w zakresie temp. $20 \div 45^{o}$C),
- doborze takich materiałów instalacyjnych (rur, zaworów czerpalnych, itp.), aby możliwe było przeprowadzanie dezynfekcji termicznej (czasowe podniesienie temp. wody w instalacji do wysokości $70 \div 80^{o}$C) oraz dezynfekcji chemicznej (płukanie instalacji wodnej roztworem podchlorynu sodu lub innymi substancjami bakteriobójczymi).

Tab. 2.11 Potencjalny wpływ zanieczyszczeń chemicznych powietrza wewnętrznego na ludzkie samopoczucie i zdrowie [117]

Typ zanieczyszczenia		Wpływ na zdrowie – możliwe zaburzenia	Źródło
Zanieczyszczenia chemiczne	Ditlenek azotu	Kaszel, ślinotok, katar, zaburzenia w oddychaniu, w większych stężeniach może nawet powodować uszkodzenie płuc i oskrzeli, a nawet prowadzić do śmierci	[94, 143]
	Ditlenek siarki	Podrażnienie błon śluzowych, stany zapalne dróg oddechowych, zapalenie oskrzeli oraz duszność	[62, 143]
	Amoniak	Miejscowe objawy podrażnienia błon śluzowych oczu, nosa i gardła, bóle głowy, wymioty, nudności, pieczenie za mostkiem, zapalenie tchawicy, kaszel z podrażnienia, duszność, przy wysokich stężeniach –oparzenie chemiczne.	[91]
	Tlenek węgla	Zablokowanie transportu tlenu do komórek (karboksyhemoglobina), zablokowanie niektórych układów enzymatycznych, zaburzenia układu nerwowego. Często następstwem ekspozycji na niskie, ale ciągłe stężenie tlenku węgla jest osłabienie kondycji organizmu, osłabienie spostrzegawczości oraz zwolnienie reakcji psychofizycznych.	[34]
	Ditlenek węgla	W wysokich stężeniach powoduje zakłócenia rytmu i głębokości oddechu, złe samopoczucie, bóle i zawroty głowy. Ciągła ekspozycja na podwyższone stężenie CO_2 w powietrzu może być przyczyną nadciśnienia.	[99]
	Ozon	Powoduje uszkodzenie błon komórkowych wskutek tworzenia nadtlenku wodoru i krótkołańcuchowych aldehydów. Blokuje aktywność niektórych enzymów i zmniejsza efektywność oddychania komórkowego. W niewielkim stężeniu wywołuje kaszel, uczucie zmęczenia, bóle głowy, wzmożoną pobudliwość, podrażnienie oczu i zmniejszenie pojemności płuc. Przy długotrwałym narażeniu dochodzić może do zwłóknienia tkanki płucnej oraz zmniejszenia zdolności obronnych organizmu.	[33, 99]
	Lotne zanieczyszczenia organiczne	Częste bóle i zawroty głowy (formaldehyd, tetrachloroetylen, polichlorowane bifenyle, nikotyna i jej pochodne), uczucie permanentnego zmęczenia i senności (tetrachloroetylen, chlorek winylu), podrażnienie błon śluzowych oczu, gardła, dróg oddechowych (formaldehyd, chlorek winylu, akroleina, aldehyd octowy, benzen), nadmierne pocenie się (tetrachloroetylen), uszkodzenie wątroby, nerek (tetrachloroetylen, polichlorowane bifenyle), układu nerwowego (benzen, toluen, styren, czterochlorek węgla), układu krwionośnego i limfatycznego (benzen, styren). W wyższych stężeniach mogą powodować obrzęk płuc czy astmę, a także zmiany skórne. Niektóre z lotnych związków organicznych (benzen, czterochlorek węgla, styren, tetrachloroetylen, *p*-dichlorobenzen, chlorek winylu, polichlorowane bifenyle, chloroform, naftaleny, fenol) mają udowodnione właściwości kancerogenne, teratogenne i genotoksyczne lub są podejrzewane o takie działanie na organizm człowieka w przypadku długotrwałej ekspozycji.	[18, 33, 74, 76, 143]
	THM-y	Wdychanie powietrza ze znaczną zawartością THM-ów może sprzyjać zachorowaniom na: raka pęcherza, raka jelita grubego, astmę, problemy zdrowotne związane z układem oddechowym, bezpłodność.	[5, 31, 37, 71, 72, 95, 111, 136]
	Środowiskowy dym tytoniowy *(Environmental Tobacco Smoke – ETS)*	Infekcje oddechowe, kaszel, pojawienie się flegmy, trudności z oddychaniem zwłaszcza u dzieci, upośledzenie wzrostu płuc u dzieci, podrażnienie błon śluzowych, rak płuc.	[21, 120, 143]

Do głównych zanieczyszczeń chemicznych występujących w hali basenowej należą:

- ditlenek węgla (nawiewany z centrali wentylacyjnej w niskim stężeniu wraz z powietrzem atmosferycznym; jego stężenie rośnie na skutek wydychania powietrza przez użytkowników pływalni),
- ozon (możliwe jest występowanie ozonu w środowisku basenowym przy wadliwie zaprojektowanym układzie uzdatniania, bądź przy niestarannej eksploatacji urządzeń),
- trihalometany (ich występowanie w środowisku basenowym związane jest z metodą dezynfekcji. Podczas procesu chlorowania generowane są w wodzie prekursory THM-ów. Związki te z uwagi na swoją specyfikę wydzielają się do powietrza).

Hala basenowa jest niestandardowym obiektem, z uwagi na obecność tafli wody oraz dużej liczby użytkowników na $1m^2$ powierzchni. Na jakość powietrza na pływali zasadniczy wpływ ma układ wentylacji oraz rodzaj dobranego systemu uzdatniania wody. Niewłaściwie zaprojektowany system uzdatniania wody może prowadzić do emisji zanieczyszczeń chemicznych np. kumulacji ozonu czy ubocznych produktów utleniania w wodzie kierowanej do basenu. Większość z tych związków ma właściwości lotne i w szybkim tempie przenika z wody do powietrza. To właśnie one odpowiedzialne są za specyficzny zapach chloru na pływalni. Dodatkowo, większość lotnych związków organicznych zalega bezpośrednio nad taflą wody ze względu na wyższą od powietrza gęstość właściwą. Czyli znajdują się w strefie, gdzie pływacy pobierają powietrze podczas korzystania z basenu. Wszystkie te czynniki decydują o tym, że obiekty sportowe wyposażone w pływalnię, wymagają niestandardowych rozwiązań systemów instalacji wentylacyjnej i uzdatniania wody, uwzględniających w wielu wypadkach różnorodność aktywności fizycznej i funkcjonalność w różnych strefach obiektu.

Przy standardowo zaprojektowanym układzie wentylacyjnym nie uwzględniającym specyfiki obiektu dochodzi do tworzenia się stref martwych, które nie tylko odpowiedzialne są za zaleganie zanieczyszczeń biologicznych i chemicznych, ale również wpływają negatywnie na elementy konstrukcyjne ścian i dachu, gdzie z uwagi na podwyższoną wilgotność mogą rozwijać się grzyby i pleśnie. Ponadto zbyt mała ilość doprowadzanego świeżego powietrza może prowadzić do nagromadzania się w powietrzu wewnętrznym ditlenku węgla z wydychanego przez licznych użytkowników (w szczególności podczas zawodów sportowych).

Pomiar jakości powietrza wewnętrznego jest dość skompilowany i w konsekwencji jest wykonywany jedynie w przypadku długotrwałego dyskomfortu odczuwanego przez

użytkowników. Do pomiaru wykorzystywane są dozymetry pasywne, dobierane osobno do każdego badanego związku. Ich zasada działania oparta jest na wykorzystaniu zjawiska transportu masy, opisywanego przez I prawo dyfuzji Ficka.

2.3.3 Zawartość ditlenku węgla (CO_2)

„Ditlenek węgla jest nieorganicznym związkiem chemicznym z grupy tlenków, w którym węgiel występuje na IV stopniu utlenienia. W temperaturze pokojowej jest to bezbarwny, bezwonny i niepalny gaz, dobrze rozpuszczalny w wodzie i cięższy od powietrza (ok. 1,5 raza). Pod normalnym ciśnieniem przechodzi ze stanu stałego do gazowego (sublimuje) z pominięciem fazy ciekłej w temperaturze −78,5°C. Można go jednak skroplić pod zwiększonym ciśnieniem, np. pod ciśnieniem 34 atm skrapla się w temperaturze 0^0C. W naturze występuje w stanie wolnym w atmosferze i związanym (np. jako składnik $CaCO_3$). Jest produktem spalania i oddychania. Tworzy się przy procesach utleniania i fermentacji substancji organicznych. Występuje w wodzie basenowej oraz powietrzu hali basenowej. W małych stężeniach nie jest trujący, w większych stężeniach ditlenek węgla jest szkodliwy dla zdrowia a nawet śmiertelny, a jego działanie powoduje powstawanie hiperkapni, a co za tym idzie kwasicy oddechowej i w następstwie obrzęku mózgu” [147].

Gazowy ditlenek węgla jest łatwo rozpuszczalny w wodzie, w której przechodzi następujące przemiany [42]

$$CO_2 + H_2O \leftrightarrow H_2CO_3 \leftrightarrow H^+ + HCO_3^- \leftrightarrow 2H + CO_3^{2-} \quad (2.1)$$

Słaby kwas, jakim jest HCO_3- dysocjuje w wodzie z wydzieleniem OH^- regulując w ten sposób odczyn środowiska, co ilustrują poniższe reakcje:

$$HCO_3^- + H_2O \leftrightarrow H_2CO_3 + OH^- \quad (2.2)$$

$$CO_3^{2-} + H_2O \leftrightarrow HCO_3^- + OH^- \quad (2.3)$$

$$H_2CO_3 \leftrightarrow H_2O + CO_2 \quad (2.4)$$

$$HCO_3^- \leftrightarrow H^+ + CO_3^{2-} \quad (2.5)$$

Formy występowania ditlenku węgla zależą od pH wody – może on przyjąć jedną z czterech form:

- poniżej pH=4 występuje wyłącznie CO_2 (100%)

- przy pH=7 (zbliżone do wody basenowej) przeważa forma HCO_3- (80%), następnie $CO_2 \leftrightarrow H_2CO_3$ (20%), brak natomiast CO_3^{2-} (0%)
- przy pH=10 również dominuje forma HCO_3- (70%), pojawia się CO_3^{2-} (30%) a zanikają formy $CO_2 \leftrightarrow H_2CO^3$ (0%)

Nadmierne stężenie CO_2 w powietrzu w hali basenowej może być spowodowane wadliwie zaprojektowanym systemem wentylacyjnym. Obecność wielu użytkowników na pływalni może skutkować wzrostem ditlenku węgla jeśli układ wentylacyjny nie dostarcza odpowiedniej ilości świeżego powietrza do pomieszczenia. W celu zapewnienia dobrego samopoczucia osób przebywających na pływalni powinno się dążyć do zapewnienia składu chemicznego powietrza wewnętrznego zbliżonego do naturalnego. (Tab. 2.12)

Tab. 2.12 Skład suchego czystego powietrza

Gaz	% masy	% objętości
Azot	75,51	78,10
Tlen	23,01	20,93
Ditlenek węgla	0,04	0,03
Inne gazy (argon, krypton, hel, ksenon, wodór, neon)	1,44	0,94

Stężenie CO_2 w powietrzu w pomieszczeniach zamkniętych (przeznaczonych na pobyt ludzi) bywa nawet kilkakrotnie wyższe niż w powietrzu zewnętrznym, które wynosi w mieście ok. 400-500ppm[1]. [41].

Wynika to głównie z obecności ditlenku węgla w powietrzu wydychanym w ilości 4-5,2% [41]. Dorosły człowiek w trakcie odpoczynku szacunkowo może wydzielać ok. 200 ml ditlenku węgla/minutę, czyli 12 litrów na godzinę. W trakcie pobytu na pływalni większość użytkowników wykonuje wysiłek fizyczny podczas, którego ilość wydzielanego CO_2 wzrasta nawet 4÷6-krotnie. Podwyższona temperatura powietrza wewnętrznego ma również pośredni wpływ na zwiększone wydzielanie CO_2 przez ludzi, ponieważ przyczynia się do zwiększonej częstotliwość oddechów (Tab. 2.13).

[1] ppm (parts per milion) – części na milion, czyli liczba części wagowych składnika przypadająca na milion części wagowych roztworu

Przy projektowaniu układów wentylacyjnych dla pomieszczeń przeznaczonych na pobyt ludzi należy mieć na uwadze ryzyko wystąpienia wysokiego stężenia CO_2, gdyż przy stężeniu przekraczającym 5000 ppm następuje wyraźny szkodliwy wpływ na organizm. Przyjmuje się, że graniczną bezpieczną wartością stężenia ditlenku węgla w pomieszczeniu zamkniętym jest 0,5%. Przy wyższych stężeniach następuje efekt hiperwentylacji (zwiększenie szybkości oddychania).

Tab. 2.13 Ilość ditlenku węgla wydzielanego przez człowieka w zależności od temperatury i wysiłku fizycznego [109]

Temperatura powietrza [^oC]	Ilość wydychanego CO_2 [l/h]	
	Odpoczynek	Praca śr. ciężka
18	10	39
20	10	39
22	11	40
23	11	41
24	12	42
25	13	42
26	13	42

Przy projektowaniu układów wentylacyjnych dla pomieszczeń przeznaczonych na pobyt ludzi należy mieć na uwadze ryzyko wystąpienia wysokiego stężenia CO_2, gdyż przy stężeniu przekraczającym 5000 ppm następuje wyraźny szkodliwy wpływ na organizm. Przyjmuje się, że graniczną bezpieczną wartością stężenia ditlenku węgla w pomieszczeniu zamkniętym jest 0,5%. Przy wyższych stężeniach następuje efekt hiperwentylacji (zwiększenie szybkości oddychania).

Tab. 2.14 Strumień powietrza zewnętrznego wymagany do utrzymania w pomieszczeniu stężenia CO_2 na poziomie 0,5% [89]

Rodzaj aktywności	Wydzielanie CO_2 [dm^3/h]	Strumień powietrza zew. [$m^3/h/os.$]
Odpoczynek	10-15	2,9
Praca lekka	19-24	4,7-9,4
Praca ciężka i b.ciężka	55-70	14-23

Dopuszczalne stężenie ditlenku węgla w pomieszczeniu, w którym stale przebywają ludzie, określają normy oraz zalecenia europejskie, amerykańskie (ASHRAE) oraz te sformułowane przez Światową Organizację Zdrowia (WHO). Przyjęty bezpieczny poziom to 1000 ppm (0,1%), czyli wymóg minimum higienicznego. Stężenie to określane jest mianem liczby Pettenkoffera, od nazwiska naukowca zajmującego się badaniem wpływu CO_2 na zdrowie człowieka. W polskim ustawodawstwie można znaleźć jedynie rozporządzenie dot. dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych w środowisku pracy. [132], które określa:

- najwyższe dopuszczalne stężenie (NDS) – wartość średnia ważona stężenia, którego oddziaływanie na pracownika w ciągu 8-godzinnego dobowego i przeciętnego tygodniowego wymiaru czasu pracy przez okres jego aktywności zawodowej nie powinno spowodować ujemnych zmian w jego stanie zdrowia i w stanie zdrowia jego przyszłych pokoleń ($NDS_{CO_2} = 9\,000\ mg/m^3$),
- najwyższe dopuszczalne stężenie chwilowe (NDSCh) – wartość średnia stężenia, które nie powinno spowodować ujemnych zmian w stanie zdrowia pracownika, jeśli występuje w środowisku pracy nie dłużej niż 15 minut i nie częściej niż 2 razy w czasie zmiany roboczej, w odstępie czasu nie krótszym niż 1 godzina ($NDSCh_{CO_2} = 27\,000\ mg/m^3$).

Projektanci przy doborze systemu wentylacji dla pomieszczeń klimatyzowanych oraz wentylowanych o nie otwieranych oknach, pomijają zagadnienie stężenia CO_2 i przyjmują minimalny strumień objętości powietrza 30m^3/h dla każdej przebywającej osoby [139]. Jednak obiekty sportowe takie jak sale gimnastyczne oraz pływalnie, które często wyposażone są w trybuny powinny mieć układ wentylacyjny wyposażony w detektory CO_2. Sterownie dopływu świeżego powietrza w zależności od stężenia ditlenku węgla powinno być zalecane w sytuacjach zawodów sportowych lub wydarzeń skupiających większą liczbę użytkowników i kibiców na trybunach. Niezbędną ilość świeżego powietrza wentylacyjnego dla pomieszczeń zagrożonych podwyższonym stężeniem CO_2 można wyliczyć na podstawie wzorów przedstawionych poniżej:

$$V_{sw} = n \cdot V_i \quad [m^3/h] \tag{2.6}$$

V_{sw} – ilość świeżego powietrza wentylacyjnego, [m^3/h]
n – ilość osób w pomieszczeniu, [os]
V_i – ilość powietrza świeżego przypadająca na 1 osobę przebywającą w pomieszczeniu, [m^3/h x os]

$$V_{sw} = \frac{m}{10^{-3}(S-S_n)} \ [m^3/h] \tag{2.7}$$

V_{sw} – ilość świeżego powietrza wentylacyjnego, [m^3/h]
m – emisja ditlenku węgla w pomieszczeniu, [m^3/h]
S – stężenie objętościowe ditlenku węgla w pomieszczeniu, [ppm]
S_n – stężenie objętościowe ditlenku węgla w powietrzu nawiewanym, [ppm]

Przy założeniu, że w stanie ustalonym stężenie ditlenku węgla w powietrzu nawiewanym nie będzie przekraczało wartości dopuszczalnej S_m i ilość doprowadzanego powietrza będzie równa ilości powietrza wywiewanego stosuje się wzór:

$$V_{sw} \geq \frac{E}{S_m-S_n} \ [m^3/h] \tag{2.8}$$

V_{sw} – ilość świeżego powietrza wentylacyjnego, [m^3/h]
E – emisja ditlenku węgla w pomieszczeniu, [mg/h]
S_m – najwyższe dopuszczalne stężenie NDS ditlenku węgla w pomieszczeniu, [mg/m^3]
S_n – stężenie ditlenku węgla w powietrzu nawiewanym, [mg/m^3]

Do oszacowani stężenie ditlenku węgla w pomieszczeniu, w którym przebywają ludzie, korzysta się ze wzoru (2.9). Stężenie w stanie ustalonym dla$t \to \infty$:

$$S_{(t\to\infty)} = 10^6 \frac{m}{V} + S_{nat} = 10^6 \frac{n}{V_p}\frac{m_0}{k} + S_{nat} \ [ppm] \tag{2.9}$$

S – stężenie ditlenku węgla w pomieszczeniu po ustaleniu się stanu równowagi, [ppm]
S_{nat} – naturalne stężenie ditlenku węgla w środowisku, [ppm]
V_p – kubatura pomieszczenia, [m^3]
m – emisja ditlenku węgla w pomieszczeniu, [m^3/h]
m_0 – emisja ditlenku węgla od jednego człowieka, [m^3/h]
n – ilość osób w pomieszczeniu, [os]
k – krotność wymian powietrza w pomieszczeniu, [l/h]

2.3.4 Substancje związane z reakcjami ubocznymi dezynfekcji wody (THM i inne)

W procesach dezynfekcji wody często wykorzystywane są utleniacze chemiczne. Do najczęściej stosowanych należą:

- powietrze (tlen w nim zawarty),
- chlor,
- dwutlenek chloru,

- nadmanganian potasu,
- ozon,
- ozon wspomagany wodą utlenioną i/lub promieniowaniem UV,

Proces napowietrzania wykorzystywany jest do usuwania z wody następujących związków [70]:

- nadmiernej ilości rozpuszczonego ditlenku węgla,
- rozpuszczonego siarkowodoru,
- amoniaku (po uprzednim zalkalizowaniu wody),
- promieniotwórczego radonu,
- żelaza (proces odżelaziania),
- manganu (proces odmanganiania),
- tlenu (proces odtleniania).

Proces chlorowania wykorzystywany jest do [70]:

- niszczenia zoo- i fitoplanktonu w wodzie,
- obniżania barwy wody (przez utlenienie substancji humusowych),
- usuwania amoniaku (przez chlorowanie do punktu przełamania),
- usuwania nieprzyjemnego smaku i/lub zapachu z wody,
- usuwania bakterii i wirusów.

Dwutlenek chloru wykorzystywany jest do [70]:

- obniżania barwy wody (przez utlenianie związków organicznych),
- usuwania nieprzyjemnego smaku i/lub zapachu z wody,
- usuwania niektórych metali (żelazo, mangan),
- usuwania siarkowodoru,
- usuwania bakterii i wirusów.

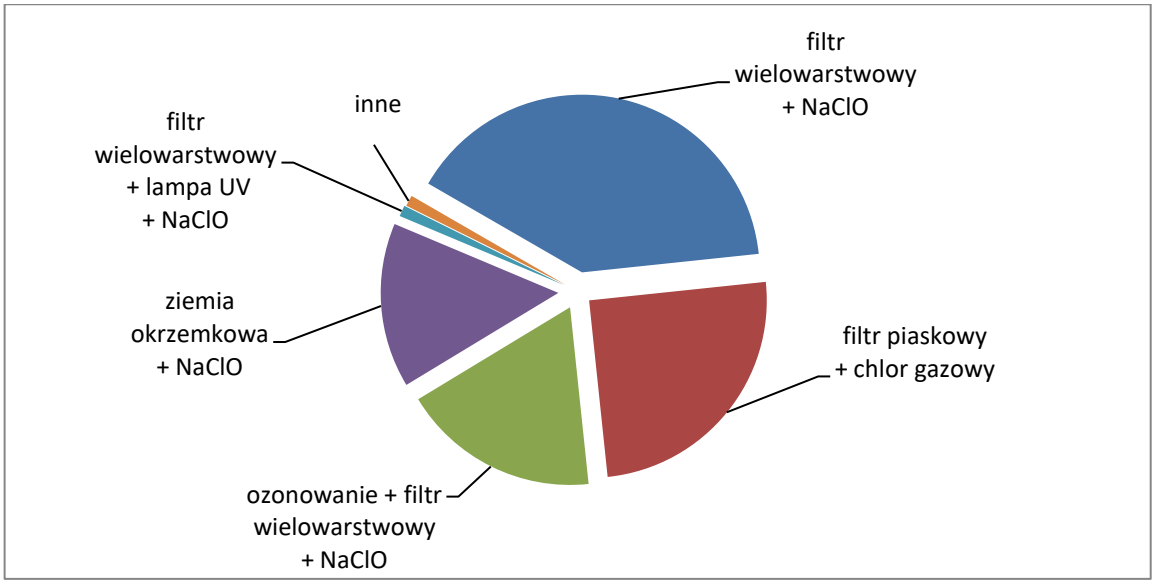
Nadmanganian potasu wykorzystywany jest do usuwania z wody [70]:

- zooplanktonu- i fitoplanktonu,
- nieprzyjemnego smaku i/lub zapachu,
- niektórych metali (żelazo, mangan),
- siarki,
- niektórych substancji organicznych,
- bakterii.

Ozonowanie stosuje się w celu usunięcia z wody [70]:

- nieprzyjemnego smaku i/lub zapachu,
- bakterii i wirusów,
- naturalnej materii organicznej,
- mikrozanieczyszczeń,
- niektórych metali (żelazo, mangan).

W systemach uzdatniania wody basenowej wykorzystuje się przeważnie utleniacze chlorowe wraz z ozonem lub same utleniacze chlorowe. Na Rys. 2.3 przedstawiono udziały różnych procesów dezynfekcji wody basenowej stosowanych w Polsce.



Rys. 2.3 Udziały procentowe procesów dezynfekcji wody basenowej stosowanych w Polsce (opracowanie własne)

Proces chlorowania przebiega w szybkim tempie, gdyż chlor wprowadzony do wody natychmiast ulega dysproporcionowaniu:

$$Cl_2 + H_2O \rightleftarrows H^+ + HClO + Cl^- \tag{2.10}$$

W wodzie basenowej zawierającej azot amonowy w kolejnym etapie słaby kwas chlorowy (I) reaguje z jonem amonowym tworząc chloraminy:

$$NH_4{}^+ + HClO \rightleftarrows NH_2Cl + H_2O + H^+ \tag{2.11}$$

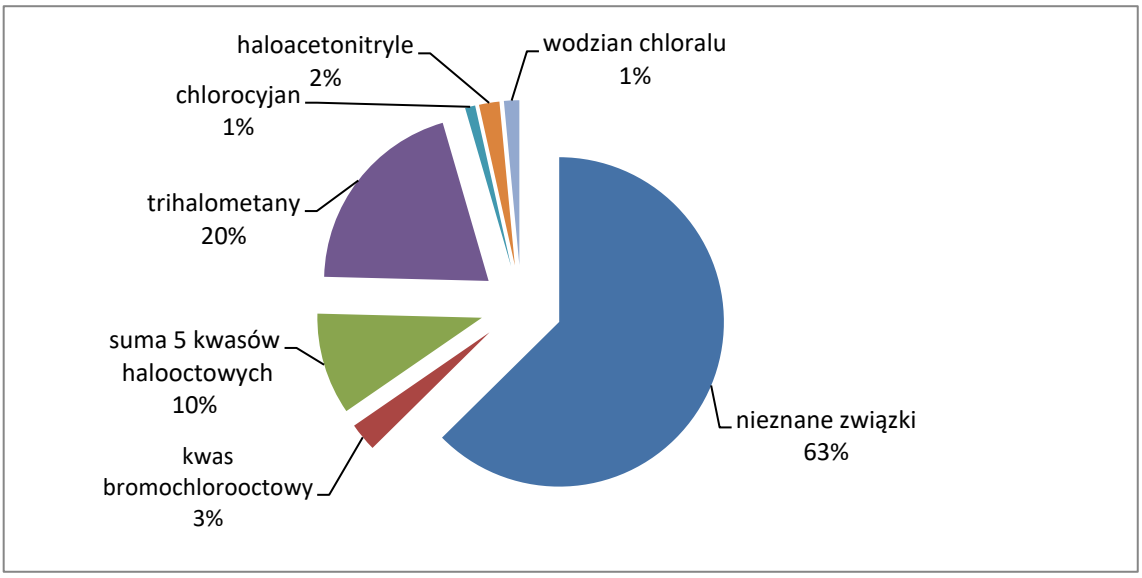
$$NH_2Cl + HClO \rightleftarrows NHCl_2 + H_2O \tag{2.13}$$

$$NHCl_2 + HClO \rightleftarrows NCl_3 + H_2O \tag{2.14}$$

Rodzaj powstających chloramin zależy głównie od proporcji stężenia chloru do azotu amonowego, co przekłada się na zależność dawki chloru i pH wody. W obiektach basenowych pH wody zgodnie z rozporządzeniem [130] jest utrzymywane w przedziale 6,5÷7,6. Takie wartości pH sprzyjają powstawaniu zarówno monochloroamin i dichloroamin. Podczas dezynfekcji surowej wody chlorem zachodzi reakcja chemiczna pomiędzy naturalnie występującymi związkami organicznymi zawartymi w wodzie, a podawanym chlorem. (2.15) Produktami ubocznymi tego procesu są uboczne produkty utleniania (UPU, eng. DBP).

Zasadniczo uboczne produkty utleniania można podzielić [49] na halogenowane związki organiczne, niehalogenowane związki organiczne oraz nieorganiczne UPU. Halogenowane związki organiczne traktuje się jako substancje toksyczne, pierwsze informacje o ich właściwościach pochodzą z lat siedemdziesiątych [93] i dotyczą trihalometanów, które są najbardziej poznaną grupą halogenowanych związków organicznych. Najprostszym równaniem opisującym reakcję powstawania THM-ów oraz innych ubocznych produktów chlorowania jest zapis [70]:

prekursory THM + chlor → THM + inne UPU (2.15)



Rys. 2.4 Uboczne chloroorganiczne produkty dezynfekcji wody [70]

Udział ilościowy różnych rodzajów halogenowych związków organicznych, które mogą powstawać w tym procesie przedstawiono na Rys. 2.4.

Jak można zaobserwować, chociaż trihalometany są zdecydowanie najliczniejszą grupą wśród poznanych ubocznych produktów dezynfekcji chlorem to jednak ich udział jest stosunkowo niewielki w porównaniu do ilości związków niesklasyfikowanych.

Do grupy trihalometanów – trichrolowcopochodnych metanu (THM-ów) należą pochodne metanu, w których trzy atomy wodoru są zastąpione następującymi atomami:

- fluoru (F): CHF_3,
- chloru (Cl): $CHCl_3$,
- bromu (Br): $CHBr_3$,
- jodu (I): HI_3,
- pozostałe związki, w których atomy wodoru zastąpione są kombinacją atomów (F, Cl, Br, I) np. $CHBrCl_2$, $CHBr_2Cl$, $CHCl_2F$, $CHClBr_2$, $CHCl_2Br$.

Do głównych THM-ów wykrywanych w wodzie basenowej i powietrzu należą poniższe związki:

- chloroform ($CHCl_3$) ,
- bromodichlorometan ($CHBrCl_2$),
- dibromochlorometan ($CHBr_2Cl$),
- bromoform ($CHBr_3$).

Zostały one uszeregowane w kolejności występowania najwyższych stężeń tj. chloroform zwykle występuje w największym stężeniu [119]. Ich stężenie w wodzie basenowej jest limitowane wymogami w rozporządzeniu [130] i wynoszą odpowiednio dla chloroformu – 0,03 mg/dm^3 oraz dla sumy THM-ów – 0,1 mg/dm^3.

Drugą dominującą grupą pośród halogenowych związków organicznych są kwasy halogenooctowe (HAA) stanowiące 10% chloorganicznych produktów dezynfekcji (Rys. 2.4). Powstają one głównie podczas procesu chlorowania wody zawierającej związki organiczne. Dopuszczalne stężenia HAA zarówno w polskich jak i europejskich przepisach dotyczących wody basenowej nie są wyszczególnione. Zgodnie z normami amerykańskimi suma stężeń pięciu dominujących kwasów halogenooctowych (monochlorooctowego, dichlorooctowego, trichlorooctowego, monobromooctowego, dibromooctowego) w wodzie basenowej nie powinna przekraczać 0,06 mg/dm^3 [70].

2.3.5 Oddziaływanie THM-ów na organizm człowieka

Większość trihalometanów negatywnie wpływa na zdrowie człowieka. Ich szkodliwość zależy od stężenia, budowy chemicznej, właściwości prekursorów

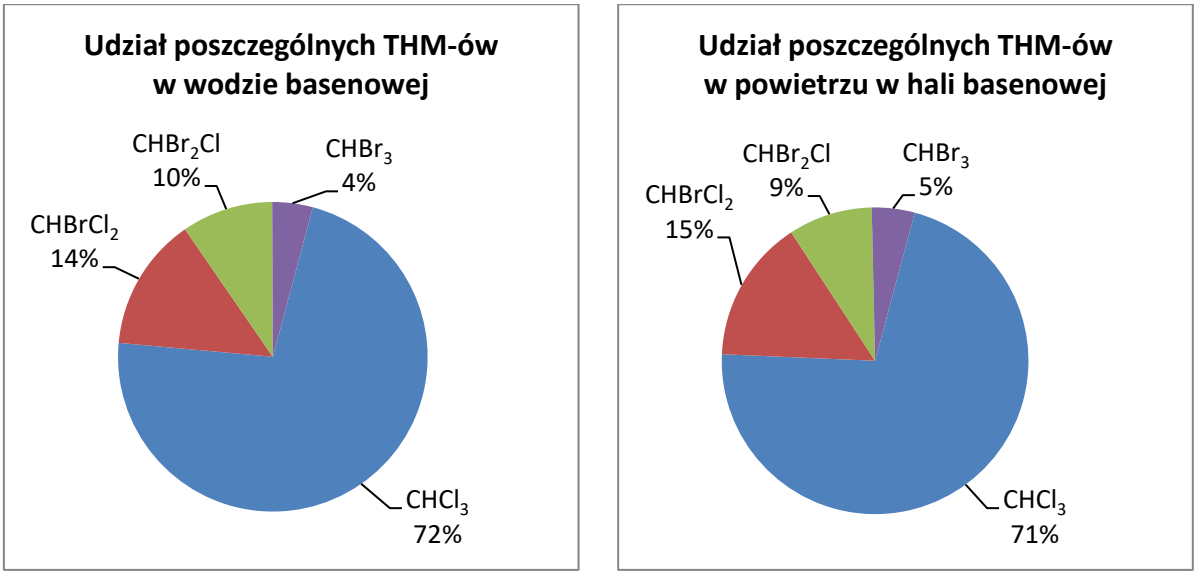
występujących w wodzie, rodzaju i dawki środka dezynfekującego, czasu kontaktu oraz temperatury i pH wody.

Wykonano wiele prac badających wpływ THM-ów na zdrowie użytkowników basenu. THM-y mogą przenikać do organizmu człowieka trzema sposobami: przez skórę, przez drogi oddechowe oraz przez drogi pokarmowe. Ze zgromadzonych materiałów literaturowych wynika, że ekspozycja na drogi oddechowe ma najsilniejszy związek z zawartością THM-ów we krwi i jego toksycznym działaniem na człowieka [3, 4, 13, 14, 22, 26, 52, 111, 113].

Wdychanie powietrza ze znaczną zawartością THM-ów może sprzyjać zachorowaniom na następujące schorzenia:

- raka pęcherza [31, 111, 136],
- raka jelita grubego [31],
- astmę [71, 95],
- bezpłodność [5, 72].

W wodzie basenowej największą poznaną grupą ubocznych chloroorganicznych produktów dezynfekcji wody stanowią THM-y, w związku z tym poniżej zostanie przedstawiona ich szkodliwość. Ponadto THM-y są związkami lotnymi, o gęstości wyższej od powietrza, stąd też w hali basenowej występują w wodzie basenowej oraz w powietrzu.



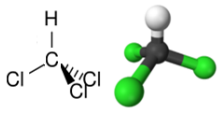
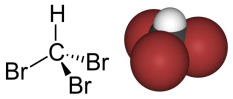
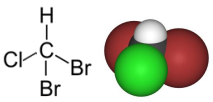
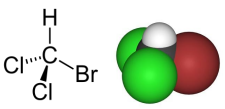
Rys. 2.5 Udział zawartości poszczególnych THM-ów w wodzie basenowej i powietrzu w hali basenowej – na podstawie badań przeprowadzonych w 4 halach basenowych [56]

Zestawienia na Rys. 2.5 ilustrują udział zawartości poszczególnych THM-ów w wodzie basenowej i powietrzu w hali basenowej. W obu zestawieniach największy udział procentowy

ma chloroform ($CHCl_3$). THM-y desorbują z powierzchni wody basenowej i przy temperaturze około 30^0C panującej na pływalni są cięższe od powietrza. Oznacza to, że przy niewłaściwym rozdziale powietrza w hali basenowej będą zalegać nad taflą wody.

W Tab. 2.15 zestawiono porównanie poszczególnych związków klasyfikowanych jako suma THM-ów, a szerszą ich charakterystykę i szkodliwość opisano w artykule [84], którego fragment zamieszczono w Załączniku.

Tab. 2.15 Zestawienie porównawcze związków klasyfikowanych jako suma THM-ów

Nazwa związku	Trichlorometan (chloroform)	Tribromometan (bromoform)	Dibromochloro-metan	Bromodichloro-metan
Wzór chemiczny	$CHCl_3$	$CHBr_3$	$CHBr_2Cl$	$CHBrCl_2$
Struktura chemiczna				
Udział w mieszaninie THM-ów	71-72%	4-5%	9-10%	14-15%
Masa molowa	119,38 g/mol	252,73 g/mol	208,28 g/mol	163,8 g/mol
Gęstość	1,4788 g/cm³	2,89 g/cm³	2,45 g/cm³	1,98 g/cm³
Śmiertelna dawka	10 ml (14,8 g) doustnie	20÷40 kropli (150-300 mg/kg)	20÷40 kropli (150-300 mg/kg)	b.d.
Dopuszczalny poziom	0,03 mg/dm^3	∑THM-ów < 0,1 mg/dm^3	∑THM-ów < 0,1 mg/dm^3	∑THM-ów < 0,1 mg/dm^3
Klasyfikacja zg. z USEAP	prawdopodobny czynnik rakotwórczy	prawdopodobny czynnik rakotwórczy	rakotwórczy	w planach ma być sklasyfikowany jako rakotwórczy

gdzie: USEAP - Agencja Ochrony Środowiska w Stanach Zjednoczonych

2.4 Zawartość THM-ów w wodzie i powietrzu

2.4.1 THM w wodzie

Do czynników sprzyjających powstawaniu związków THM [70] w wodzie basenowej należą:

- zawartość substancji organicznych w wodzie surowej,
- dawka chloru (lub innego pierwiastka halogenowego) podawanego podczas procesu dezynfekcji,

- temperatura wody,
- pH wody,
- czas kontaktu chloru z prekursorami THM-ów,
- liczba ludzi pływających w basenie.

Na podstawie badań [35] stworzono równania empiryczne przedstawiające szczegółowo wpływ powyższych czynników na stężenie THM-ów w wodzie basenowej. Każde równanie zostało opracowane dla innego parametru charakteryzującego zawartość materii organicznej w wodzie (OWO, UV_{254}, ChZT):

$$\sum THM = 1{,}624[OWO]^{0{,}501}[Cl_2]^{0{,}427}t^{0{,}218}10^{-5{,}898/T}[pH - 1{,}478] \text{ , mg/m}^3 \quad (2.16)$$

$$\sum THM = 8{,}824[UV_{254}]^{0{,}464}[Cl_2]^{0{,}428}t^{0{,}217}10^{-5{,}805/T}[pH - 1{,}543] \text{ , mg/m}^3 \quad (2.17)$$

$$\sum THM = 1{,}232[ChZT]^{0{,}445}[Cl_2]^{0{,}429}t^{0{,}217}10^{-5{,}748/T}[pH - 1{,}577] \text{ , mg/m}^3 \quad (2.18)$$

gdzie:

OWO – ogólny węgiel organiczny, [g/m^3]
UV_{254} – absorbancja w nadfiolecie UV (254 nm), [1/m]
ChZT – chemiczne zapotrzebowanie tlenu, [g/m^3]
Cl_2 – stężenie chloru, [g_{Cl2}/m^3]
t – czas kontaktu, [h]
T – temperatura wody, [^{0}C]
pH – pH wody. [-]

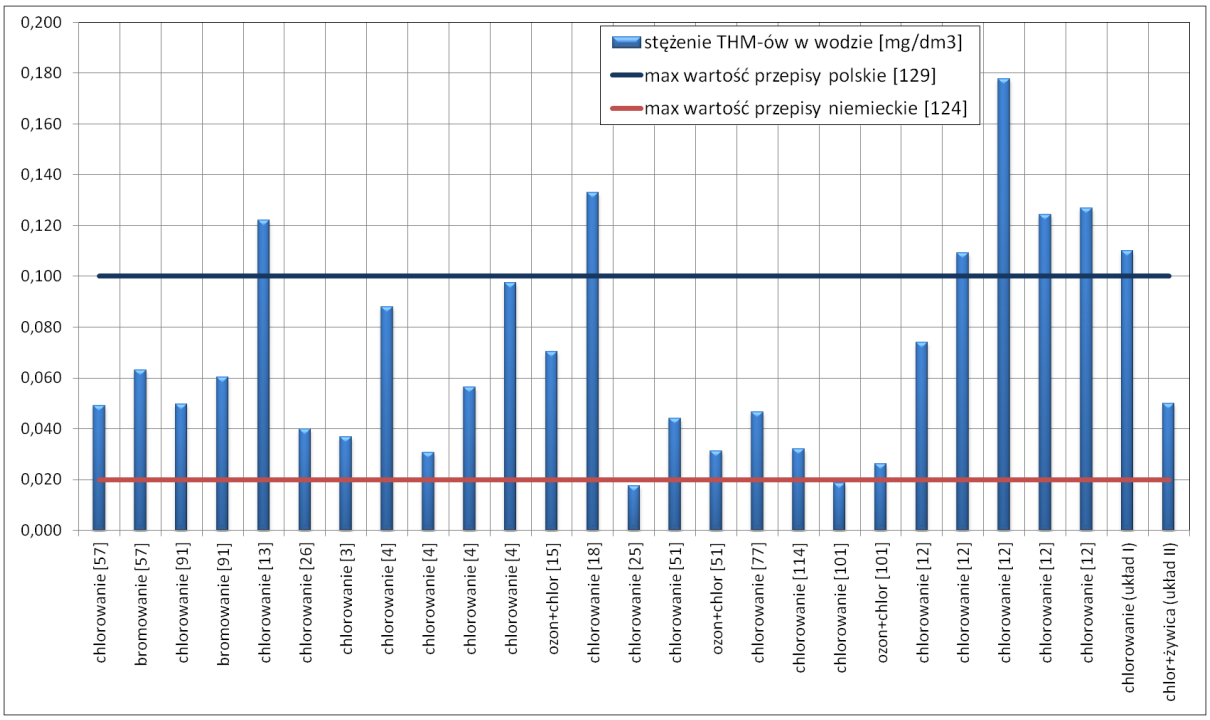
Dopuszczalne stężenie sumy THM-ów w wodzie basenowej jest regulowane przepisami [130] i może wynosić nie więcej niż 0,1 mg/dm^3, a stężenie chloroformu nie więcej niż 0,03 mg/dm^3. Ze względu na negatywny wpływ chloroformu na zdrowie, w rozporządzeniu [130] wyszczególniono osobno zalecenia dla niecki udostępnianej do nauki pływania dla niemowląt i małych dzieci do lat 3. Stężenie tego związku nie powinno przekraczać wartości 0,02 mg/dm^3.

W wielu krajach dopuszczalne stężenie THM-ów w wodzie basenowej jest zróżnicowane i przyjmowane zgodnie z zaleceniami jak dla wody pitnej. Normy amerykańskie dopuszczają stężenie do 0,04 mg/dm^3, a w większości krajów europejskich wartością graniczną jest 0,1 mg/dm^3. Natomiast normy ISO nie określają konkretnych

wartości dopuszczalnego stężenia THM-ów w wodzie, zalecają jedynie, aby było ono utrzymywane na jak najniższym poziomie. W niektórych krajach, podobnie jak w Polsce, wprowadzono regulacje dotyczące najwyższego dopuszczalnego stężenia sumy THM-ów w wodzie basenowej. W Niemczech i Danii wartości maksymalne są bardzo rygorystyczne i wynoszą odpowiednio 0,02 mg/dm^3 [125] i 0,03 mg/dm^3 [80].

Na całym świecie prowadzone są badania naukowe poświęcone zawartości THM-ów w wodzie. Na Rys. 2.6 zestawiono wyniki uzyskanych stężeń THM-ów w wodzie basenowej w różnych krajach, w tym w Polsce [12, 101]. Blisko ¼ analizowanych pomiarów przekracza wartość dopuszczalną zalecaną w Polsce i są to głównie wyniki z polskich basenów [11]. Dodatkowo rozpatrując bardziej rygorystyczne przepisy niemieckie to tylko nieliczne wyniki [25, 101] znajdują się poniżej dopuszczalnej wartości THM-ów w wodzie wskazanej w niemieckich przepisach (20 µg/dm^3) [125].

W badaniach przeprowadzonych przez Lourencetti [57] i Richardson [90] badano stężenie THM-ów w zależności od metody dezynfekcji. W basenach z układem technologicznym zakończonym procesem bromowania uzyskano wyższe stężenia niż przy procesie chlorowania. Kilku autorów [15, 51, 101] badało też próbki wody basenowej po łącznym procesie ozonowania i chlorowania. Wyniki pomiarów były rozbieżne, więc trudno jednoznacznie stwierdzić czy połączenie tych procesów zasadniczo wpływa na obniżenie stężenia THM-ów w wodzie.



Rys. 2.6 Zestawienie wyników pomiarów THM w wodzie wg różnych źródeł (podanych na rysunku)

Wielu autorów [93, 95] wskazuje, że nie tylko sposób uzdatniani wody ma wpływ na formowanie THM-ów w wodzie, ale są również inne czynniki. Poniżej zostanie przedstawiona analiza wpływu różnych czynników wpływających na obecność THM-ów w wodzie. basenowej

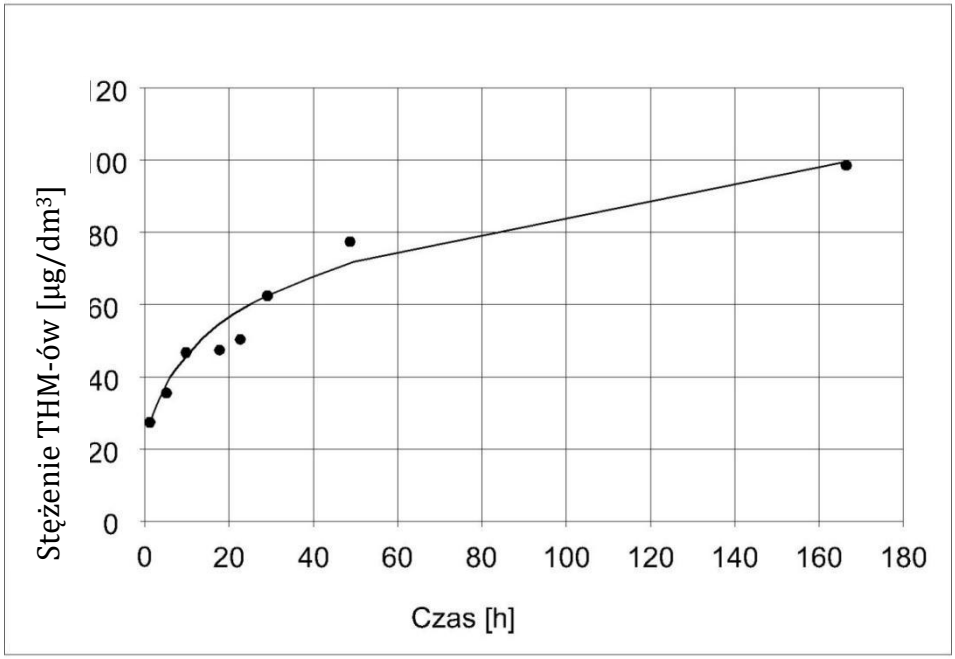
Wpływ czasu przebiegu reakcji podawanego chloru na formowanie THM-ów

W wodzie surowej poddawanej procesowi chlorowania powstawanie THM-ów nie jest natychmiastowe i proporcjonalne liniowo. Z przeprowadzonych badań [96] wynika, że stężenie trihalometanów wzrasta z czasem. Początkowo przebieg reakcji jest dosyć szybki, a później spowalnia.

Podczas chlorowania powstaje kwas chlorowy (I), który reaguje z substancjami organicznymi zawartymi w wodzie tworząc chloraminy (szczegółowy przebieg reakcji przedstawiono w Rozdziale 2.3.4).

Na

Rys. 2.**7** przedstawiono przyrost stężenia THM-ów w czasie, krzywa przypomina kształtem krzywą logarytmiczną.

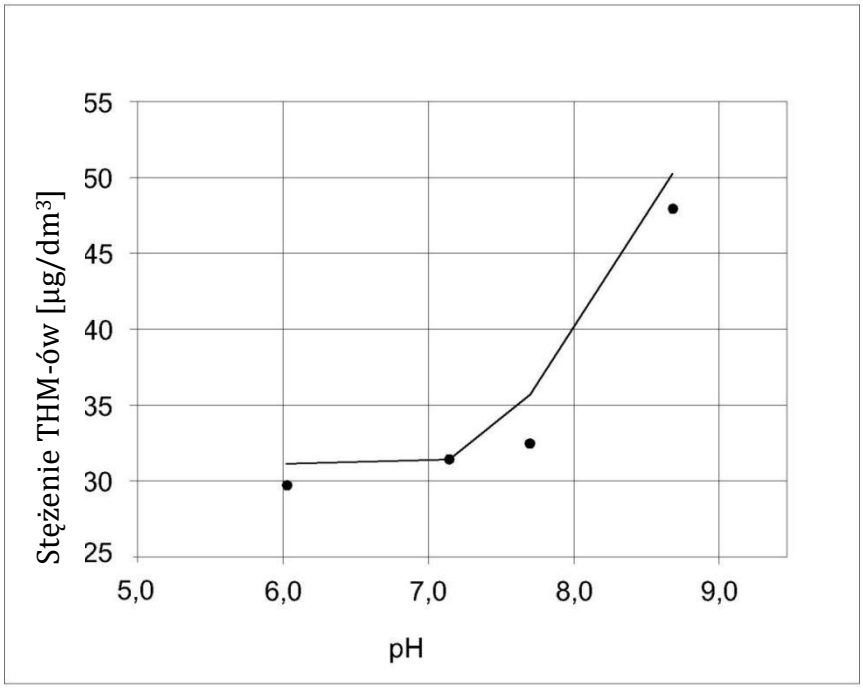


Rys. 2.7 Graficzna zależność między czasem reakcji, a stężeniem THM-ów w wodzie [96]

Wpływ wartości pH wody na formowanie THM-ów

Wartość pH jest ważnym parametrem wody basenowej, gdyż jego poziom zależny jest od stopnia dezynfekcji podczas procesu chlorowania. Optymalna wartość odczynu pH dla wody basenowej mieści się w przedziale 7,0÷7,4 i wynika z efektywności przebiegu procesu chlorowania i neutralnego wpływu na błony śluzowe użytkowników. Ponadto zaobserwowano, że wyższe pH > 7,5 oprócz negatywnych odczuć swędzącej skóry sprzyja powstawaniu większych ilości THM-ów. Wraz ze wzrostem wartości pH wśród pozostałych produktów reakcji rośnie zawartość chloroformu, a działanie dezynfekcyjne chloru ulega zmniejszeniu, z uwagi na wzrost obecności jonów podchlorynu nie posiadających zdolności dezynfekcyjnych.

Utrzymywanie odczynu pH poniżej podanego zakresu sprzyja tworzeniu się większych ilości nielotnych związków halogenoorganicznych. Wpływ wartości pH wody na stężenie THM-ów w wodzie basenowej ilustruje Rys. 2.9

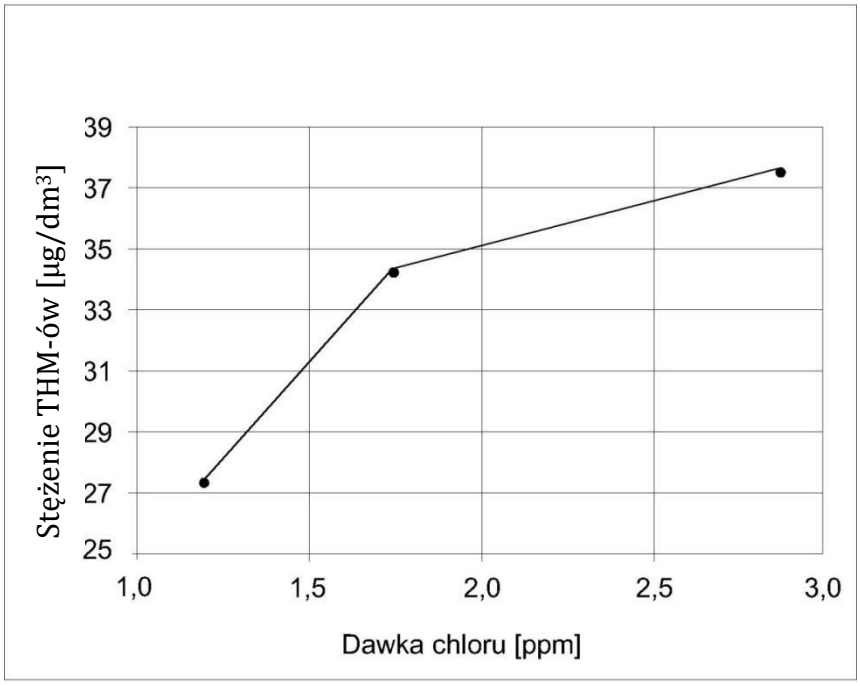


Rys. 2.8 Graficzna zależność między dawką chloru a stężeniem THM-ów w wodzie [96]

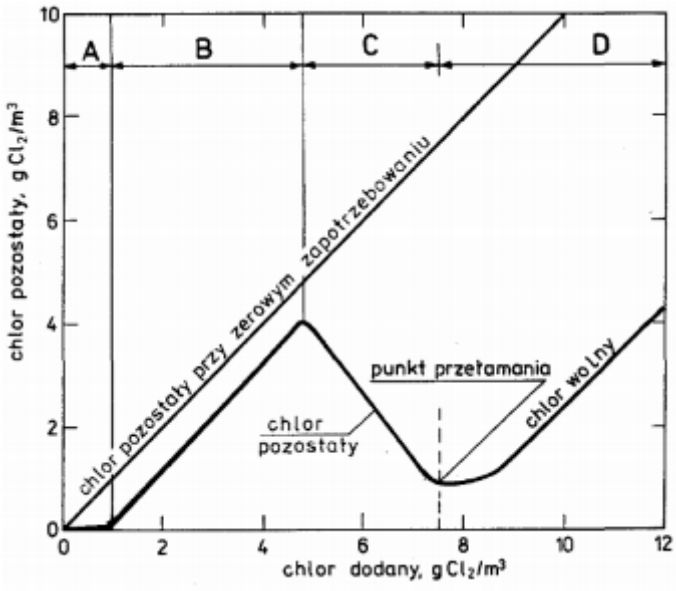
Wartość poziomu pH wody basenowej jest wskaźnikiem regulowanym przepisami [130]. Jego wartość powinna zawierać się w przedziale 6,5÷7,6, a pomiar dokonywany 4 razy dziennie.

Wpływ dawki chloru na formowanie THM-ów

Z przeprowadzonych badań [110] wynika, że reakcja chloru z prekursorami THM-ów przebiega dwuetapowo. W pierwszym etapie dochodzi do bardzo szybkiego utlenienia substancji organicznych (prekursorów THM-ów) zawartych w wodzie, co przekłada się na gwałtowny wzrost stężenia THM-ów Rys. 2.9. W kolejnym etapie przy zwiększającej się dawce chloru wzrost stężenia THM-ów jest już niewielki.



Rys. 2.9 Graficzna zależność między dawką chloru a stężeniem THM-ów w wodzie [96]



Obszar A – zużycie chloru na utlenienie związków organicznych i nieorganicznych;
Obszar B – powstawanie chloramin i związków chloroorganicznych;
Obszar C – rozpad chloramin i związków chloroorganicznych;
Obszar D – wolny chlor i pozostałe chlorowane związki organiczne.

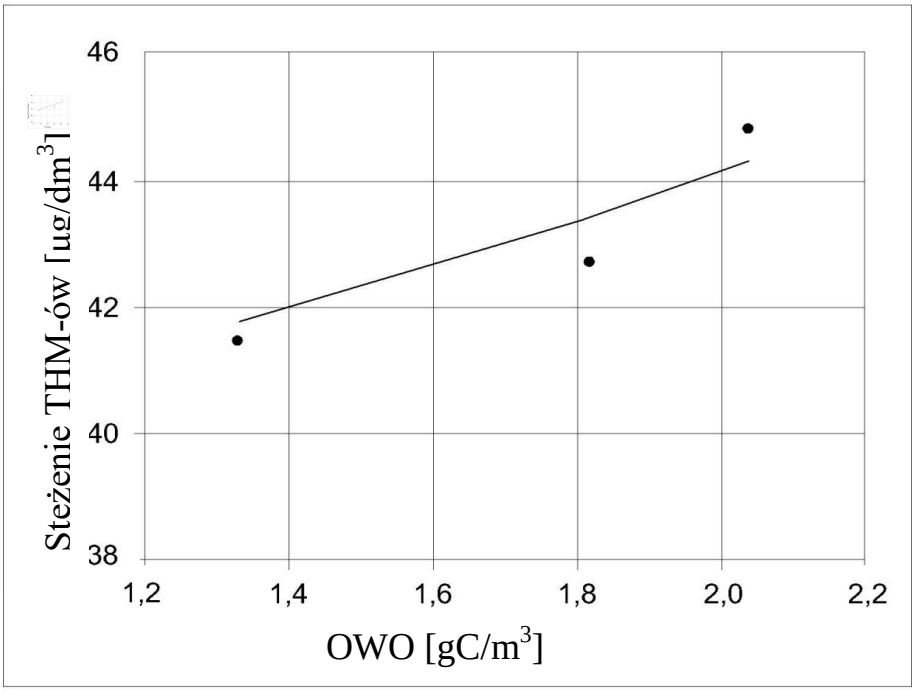
Rys. 2.10 Krzywa chlorowania do punktu przełamania [49]

Pełen przebieg reakcji chloru z wodą przedstawia krzywa chlorowania (Rys. 2.10). Po przekroczeniu punktu przełamania (obszar D) w wodzie pozostaje jedynie chlor wolny (suma: Cl_2, HClO, Cl^-), którego zawartość jest regulowana przepisami. Powinna ona zawierać się w przedziale 0,3÷0,6mg/dm^3 w basenach rekreacyjnych oraz 0,3÷0,4mg/dm^3 w basenach dla dzieci. Pomiar zawartości chloru wolnego należy dokonywać 4 razy dziennie.

Wpływ zawartości substancji organicznych w wodzie surowej na formowanie THM-ów

Dominującym parametrem wpływającym na tworzenie się THM-ów w wodzie basenowej jest zawartość substancji organicznych, których miarą może być m.in. zawartość ogólnego węgla organicznego (OWO). Pomiar tego parametru daje możliwość identyfikacji sumy wszystkich związków organicznych występujących w wodzie. Pojęcie ogólnego węgla organicznego definiowane jest jako całkowita zawartość węgla w rozpuszczonej i nierozpuszczonej materii organicznej.

Z przeprowadzonych badań [96, 141] wynika, że stężenie THM-ów wzrasta niemalże liniowo wraz ze wzrostem zawartości OWO (ogólnego węgla organicznego). Zależność tą przedstawiono na Rys. 2.11.



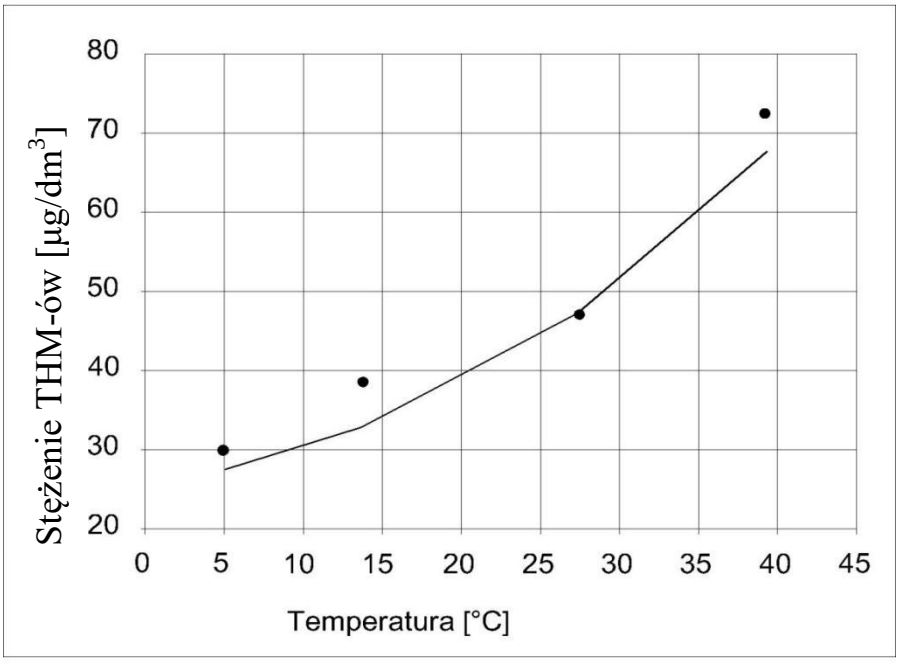
Rys. 2.11 Graficzna zależność między zawartością OWO a stężeniem THM-ów w wodzie [96]

Poziom zawartości (OWO) w wodzie basenowej jest ściśle związany z jakością wody surowej, liczbą użytkowników pływalni oraz sposobem uzdatniania wody [96]. Dopuszczalna

wartość (OWO) dla wody basenowej nie jest określona liczbowo, lecz w Rozporządzeniu [130] określona jest terminem „bez nieprawidłowych zmian". Oznacza to ,że różnica pomiędzy największą i najmniejszą wartością OWO w skali roku nie powinna przekraczać 40% wartości najmniejszej [68].

Wpływ temperatury wody surowej na formowanie THM-ów

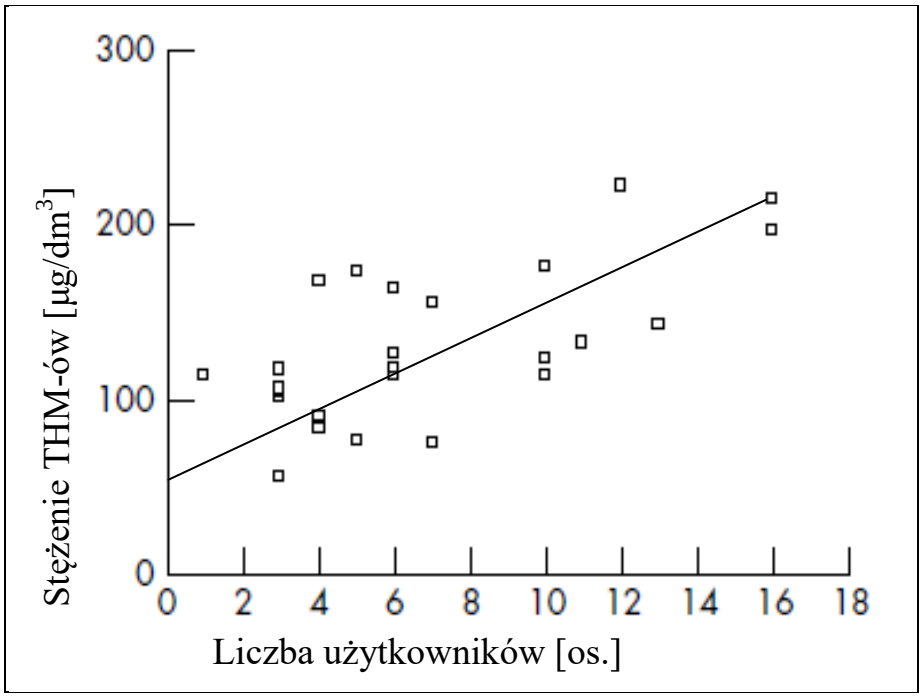
W przeprowadzonych badaniach na wielu stacjach uzdatniania wody pitnej z ujęciami wody powierzchniowej, gdzie temperatura wody surowej jest zmienna w czasie roku, zaobserwowano znaczny wpływ temperatury wody na stężenie THM-ów. Ogólny trend przedstawiono na Rys. 2.12. W systemie uzdatniania wody basenowej temperatura wody surowej ma nieznaczne wahania, co wynika ze stałej temperatury wody basenowej oraz mało zmiennej temperatury świeżej wody wodociągowej. Z przedstawionej zależności, na potrzeby stacji uzdatniania wody basenowej, można rozpatrywać zakres temperatury $20 \div 30^0$C.



Rys. 2.12 Graficzna zależność między temperaturą wody a stężeniem THM-ów [96]

Wpływ liczby osób pływających w basenie na formowanie THM-ów

Głównym źródłem zanieczyszczeń wody basenowej są użytkownicy [2, 23, 98], którzy wprowadzają do wody wiele zanieczyszczeń organicznych i mikrobioologicznych.



Rys. 2.13 Graficzna zależność między liczbą użytkowników basenu a stężeniem THM-ów w wodzie [18]

Wiele z tych zanieczyszczeń odpowiedzialnych jest za powstawanie prekursorów THM-ów. Zależność wpływu liczby użytkowników basenu na stężenie THM-ów przedstawia Rys. 2.13. Z zależności wynika, że liczba użytkowników ma zasadniczy wpływ na formowanie THM-ów w wodzie basenowej. Blisko liniowa zależność wskazuje, że stężenie THM-ów w wodzie basenowej rośnie wraz ze wzrostem liczby użytkowników basenu. Główną przyczyną tej sytuacji jest zaniedbanie użytkowników w korzystaniu z prysznica przed wejściem do basenu oraz pływanie bez czepków. Badania wskazują, że włosy są również dużym źródłem zanieczyszczeń [90].

2.4.2 THM w powietrzu

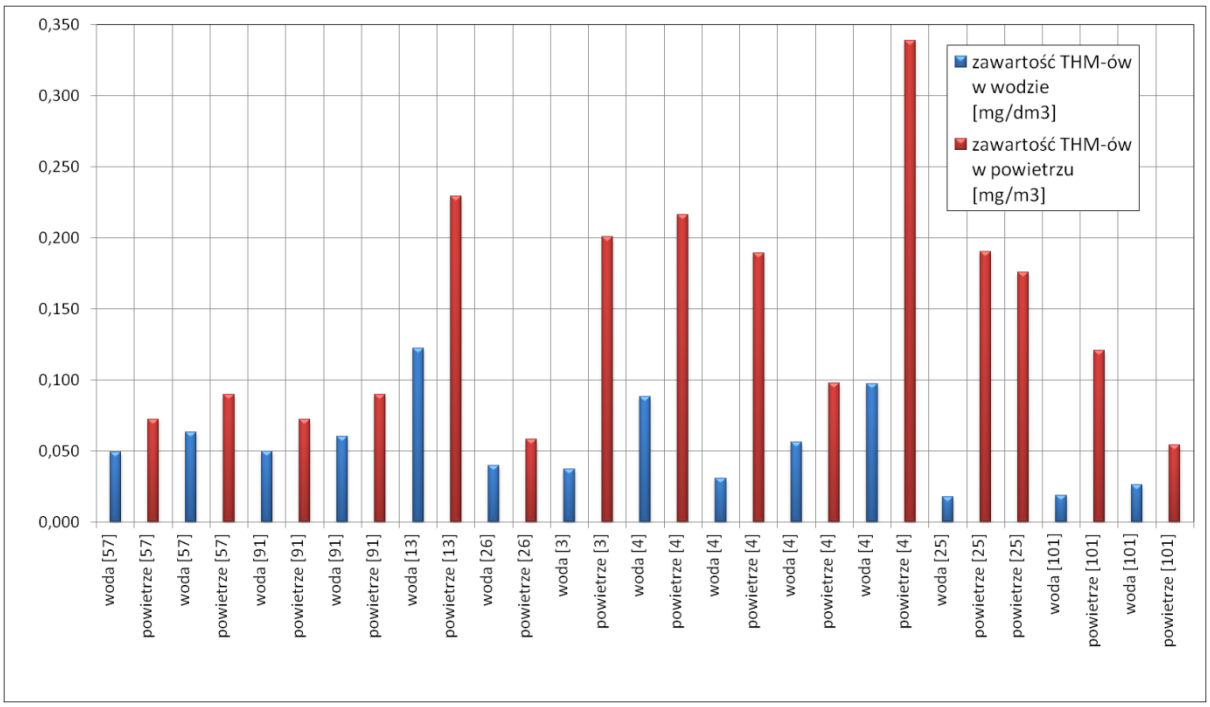
Stężenie THM-ów w powietrzu jest związane z ich stężeniem w wodzie basenowej. W związku z dużą lotnością związki te, swobodnie przenikają z wody do powietrza. Dla przedstawienia tej prawidłowości w Tab. 2.16 zebrano dane dotyczące pomiarów stężenia THM-ów w wodzie i powietrzu z uwzględnieniem kraju, badanego medium, liczby i miejsca poboru próbek oraz wymiaru niecki i metody dezynfekcji Natomiast Rys. 2.14. przedstawiono graficznie zestawienie z odniesieniem do obowiązujących przepisów.

Tab. 2.16 Zestawienie zebranych wyników pomiarów THM-ów w wodzie i powietrzu w basenach krytych (źródło podano w tabeli)

Kraj	medium	Σ THM [mg/m^3] **woda** [mg/dm^3] **powietrze**	liczba próbek	wymiar niecki	metoda dezynfekcji	miejsce poboru próbki	źródło
Hiszpania	woda	0,049	70	33x25m	chlorowanie	b.d.	[57]
	powietrze	0,072	82			0,6 m powyżej tafli	[57]
	woda	0,063	9	20x10m	bromowanie	b.d.	[57]
	powietrze	0,090	10			0,6 m powyżej tafli	[57]
	woda	0,050	68	33x25m	chlorowanie	b.d.	[90]
	powietrze	0,072	68			0,6 m powyżej tafli	[90]
	woda	0,060	12	20,9x13, 2 m	bromowanie	b.d.	[90]
	powietrze	0,090	12			0,6 m powyżej tafli	[90]
	woda	0,122	18	b.d.	chlorowanie	b.d.	[13]
	powietrze	0,229	5			b.d.	[13]
Włochy	woda	0,040	5	b.d.	chlorowanie	poniżej tafli, 0,2 m od brzegu	[26]
	powietrze	0,058	5			b.d.	[26]
	woda	0,037	5	b.d.	chlorowanie	0,2 m poniżej tafli	[3]
	powietrze	0,201	5			1,5 m powyżej tafli	[3]
	woda	0,088	26	b.d.	chlorowanie	0,2 m poniżej tafli	[4]
	powietrze	0,216	26			1,5 m powyżej tafli	[4]
	woda	0,031	26	b.d.	chlorowanie	0,2 m poniżej tafli	[4]
	powietrze	0,189	26			1,5 m powyżej tafli	[4]
	woda	0,056	9	b.d.	chlorowanie	0,2 m poniżej tafli	[4]
	powietrze	0,098	9			1,5 m powyżej tafli	[4]
	woda	0,097	8	b.d.	chlorowanie	0,2 m poniżej tafli	[4]
	powietrze	0,339	8			1,5 m powyżej tafli	[4]
Niemcy	woda	0,018	3	25x12,5 m	chlorowanie	0,1 m poniżej tafli	[25]
	powietrze	0,190	3			0,2 m	[25]
	powietrze	0,176	3			1,5 m	[25]
Polska	woda	0,019	10	b.d.	chlorowanie	b.d.	[100]
	powietrze	0,121	10		chlorowanie	b.d.	[100]
	woda	0,026	10	b.d.	ozon+chlor	b.d.	[100]
	powietrze	0,054	10		ozon+chlor	b.d.	[100]

Z zebranych wyników pomiarów wynika, że zawartość sumy THM-ów w powietrzu jest kilkukrotnie wyższa niż zawartość w wodzie, w niektórych badaniach [3, 4, 25] różnica między mediami jest nawet ponad dziesięciokrotna (należy jednak pamiętać o jednostkach (w wodzie - mg/dm^3, w powietrzu - mg/m^3). Wynika to z właściwości ewaporacyjnych (fugatywności) tych związków, które łatwo wydzielają się z wody i zalegają nad taflą ze względu na wyższą gęstość w stosunku do powietrza. Podjęto próby opracowania korelacji między zawartością trihalometanów w wodzie i powietrzu w hali basenowej [22, 73]. Jednak

z analizy danych zestawionych na Rys. 2.14 wynika, że na każdym obiekcie istnieje inna zależność między tymi wartościami. Rozbieżności wynikają z różnej jakości wody i sposobu jej uzdatniania, intensywności użytkowania basenów oraz zastosowanego systemu wentylacyjnego.



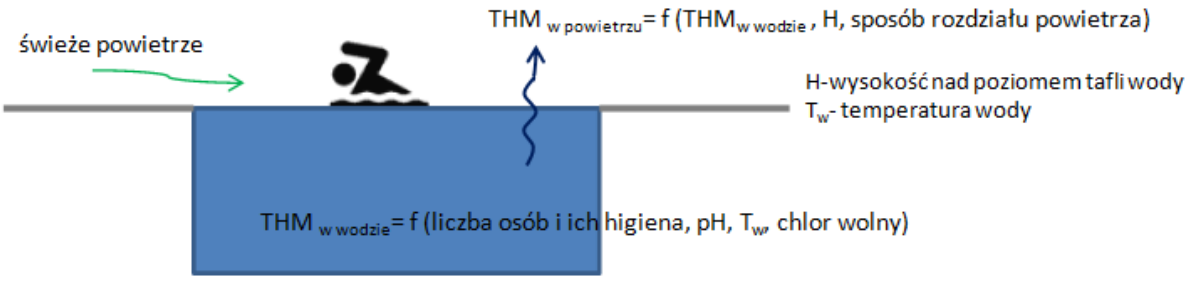
Rys. 2.14 Graficzne zestawienie wyników pomiarów ∑THM-ów w wodzie i powietrzu w basenach krytych wg różnych źródeł (podanych na rysunku)

W dalszej części pracy zostaną przedstawione rozwiązania wpływające na zmniejszenie stężenia sumy THM-ów w środowisku basenowym. Tylko kompleksowe podejście do problemu występowania tych związków może przynieść oczekiwany efekt.

3. Obciążenie środowiska basenów krytych THM-ami i sposoby ich redukcji

Rozpatrując zagadnienie występowania THM-ów w środowisku basenowym należy zwrócić uwagę, że związki te występują nie tylko w wodzie (gdzie powstają), ale też w powietrzu. Wynika to ze specyficznych właściwości tych związków. THM-y wydzielają się z powierzchni wody i zalegają tuż nad nią w warstwie aerozolu wodno-powietrznego, ze względu na wyższą od powietrza gęstość

Przebywające na pływalni osoby narażone są na ekspozycję THM-ów zarówno ze strony wody, jak i powietrza. Szczególnie jest to ważne z punktu widzenia pływaków wyczynowych, którzy przebywają w wodzie wiele godzin, ale też trenerów i ratowników. Obciążenie środowiska basenowego THM-ami przedstawia Rys. 3.1.



Rys. 3.1 Obciążenie środowiska basenowego THM-ami

Jednym z czynników o dominującym wpływie na stężenie THM-ów w wodzie jest liczba osób w basenie i ich higiena. To właśnie użytkownicy wprowadzają do wody ładunek biozanieczyszczeń, które są prekursorami powstawania THM-ów w procesie chlorowania. Wartość pH i chloru wolnego w wodzie są ściśle zależne od sposobu uzdatniania i ich zalecany poziom regulowany jest przepisami (dla pH 6,5÷7,6; dla chloru wolnego 0,3÷0,6mg/dm^3 baseny rekreacyjne, 0,3÷0,4 mg/dm^3 baseny dla dzieci).

Stężenie THM-ów w powietrzu jest zależne od jego stężenia w wodzie i maleje wraz z wysokością. Sposób rozdziału powietrza w hali basenowej również determinuje rozkład stężenia tych związków w całej kubaturze.

Obecności THM-ów w obszarze pływalni nie da się wyeliminować całkowicie ze względu na konieczność chlorowania wody, w celu jej zabezpieczenia pod kątem sanitarno-higienicznym. Ale poprzez analizę przyczyn ich powstawania i rozprzestrzeniania mogą

zostać podjęte działania, celem jak największej redukcji tych związków chemicznych ze środowiska basenowego.

Uzyskanie niskich stężeń w wodzie i powietrzu można otrzymać w wyniku sprzężenia dwóch korzystnych działań:

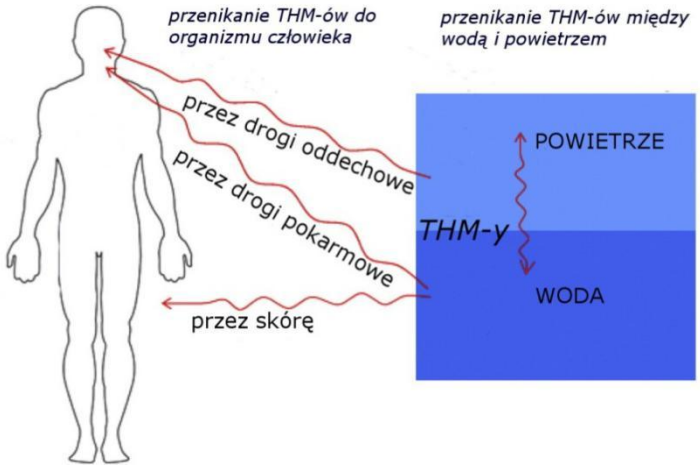
- redukcji prekursorów THM-ów w wodzie basenowej na etapie jej oczyszczania w stacji uzdatniania wody ,
- odpowiedniej wentylacji w hali basenowej, uwzględniającej nawiew świeżego powietrza i odciąganie zanieczyszczonego z obszaru kontaktowego woda – powietrze, czyli w miejscu ich przenikania do powietrza i największej ekspozycji osób pływających.

3.1 Równowaga chemiczna THM-ów w wodzie i powietrzu – model fugatywności

Obecne w wodzie THM-y, z uwagi na swoją lotność uwalniają się do powietrza i kumulują nad taflą wody, ze względu na większą od powietrza gęstość właściwą. Pływające w wodzie osoby narażone są na ekspozycję THM-ów zarówno ze strony wody, jak i powietrza. Szczególnie jest to ważne z punktu widzenia pływaków wyczynowych, którzy przebywają w wodzie wiele godzin.

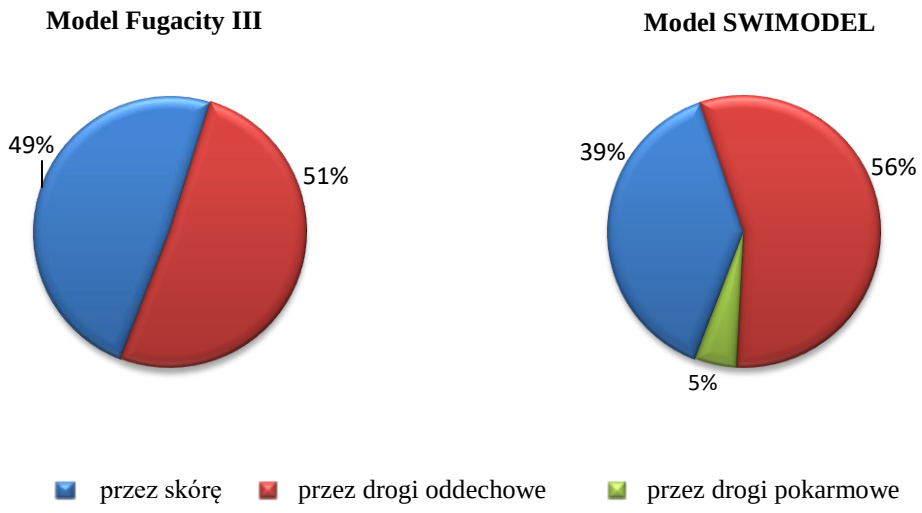
THM-y mogą przenikać do organizmu człowieka trzema sposobami (Rys. 3.2):

- przez skórę,
- przez drogi oddechowe,
- przez drogi pokarmowe.



Rys. 3.2 Sposoby przenikania THM-ów w środowisku basenowym do organizmu człowieka [22]

Kilka ośrodków naukowych przeprowadziło prace nad oszacowaniem, która z dróg przenikania do organizmu człowieka jest przeważająca. W pracy [22] przeprowadzono w tym celu obliczenia na podstawie modelu fugatywności (poziom III) oraz modelu SWIMODEL. Poniższe diagramy (Rys. 3.3) przedstawiają uzyskane wyniki dla chloroformu (dominującego związku wśród THM-ów).

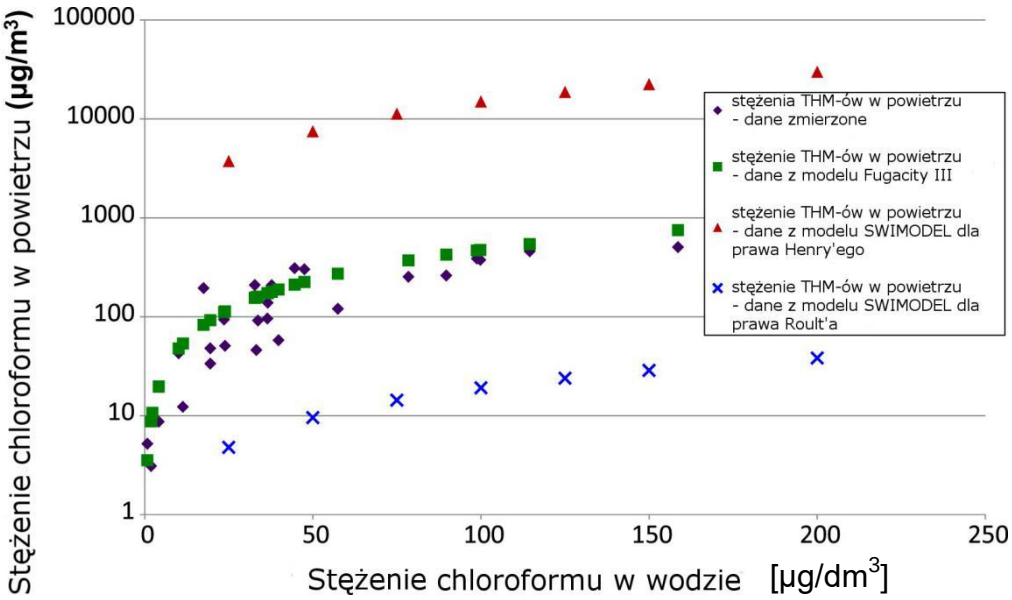


Rys. 3.3 Procentowy udział różnych dróg przenikania chloroformu do organizmu człowieka w środowisku basenowym [22]

Z przedstawionych zestawień wynika, że przenikanie chloroformu do organizmu człowieka w środowisku basenowym odbywa się głównie przez wdychanie powietrza (51% i 56%) oraz w drugiej kolejności przez skórę (49% i 39%). Przenikanie przez drogi pokarmowe ma dużo mniejsze znaczenie.

W celu zapewnienia niskiego stężenia THM-ów w wodzie i powietrzu konieczne jest utrzymanie właściwie działającego systemu uzdatniania wody basenowej oraz skutecznej wentylacji pomieszczenia hali pływalni, szczególnie obszaru tuż nad zwierciadłem wody. W przeciwnym wypadku jakość wody i powietrza spada poniżej standardów i przebywanie w takim obiekcie może być szkodliwe dla zdrowia, szczególnie dla dzieci i osób starszych.

Aby wykazać problem obecności THM-ów w środowisku basenowym, przeprowadzono liczne pomiary ich stężenia w pływalniach krytych [4, 25]. Na podstawie rozbudowanych badań doświadczalnych, podjęto również próby sformułowania zależności między stężeniem THM-ów w wodzie i w powietrzu [66].



Rys. 3.4 Zestawienie porównawcze wyników obliczeń stężenia chloroformu (dominującego związku wśród THM-ów) w powietrzu i wodzie - uzyskanych w trzech modelach obliczeniowych, z wynikami na podstawie pomiarów [22]

Zestawione na Rys. 3.4 wyniki badań pięciu pływalni o wymiarach 25 x 20 m uzyskano przy następujących założeniach:

- uzupełnianie świeżej wody w obiegu wodnym w ilości 30 litrów na 1 użytkownika,
- wilgotność powietrza wewnętrznego w zakresie 40÷60%,
- temperatura powietrza wyższa o 2÷4 K niż temperatura wody,
- wentylacja powietrza z recyrkulacją przy udziale powietrza świeżego w ilości min. 10÷15%,
- wymiana całej objętości powietrza w ilości 4÷6 wymian/h.

Z przedstawionych danych na Rys. 3.4 wynika, że wzrost stężenia chloroformu w wodzie implikuje wzrost stężenia tego związku w powietrzu. Zależność ta jest w przybliżeniu linią wykładniczą. Z Rys. 3.4 wynika, że dla opisu równowagi chemicznej THM-ów w wodzie i powietrzu najkorzystniejszy okazał się model obliczeniowy wykorzystujący model fugatywności. Modele fugatywnościowe stosowane są do opisu stanu równowagi w układach wielofazowych. Przeprowadzenie obliczeń zgodnie z modelem pozwala na wyznaczenie jaka ilość danego związku (np. THM-ów, CO_2) może ulotnić się z jednej fazy np. wody do drugiej

fazy np. powietrza. Proces migracji danego związku między fazami zachodzi, aż fugatywność danej substancji wyrówna się w obu ośrodkach tj. aż do momentu ustalenia się stanu równowagi. [19]:

Wzór opisujący liniową zależność między fugatywnością, a stężeniem substancji oraz pojemnością fugatywnościową zapisuje się następująco:

$$f = {}^{C}/_{Z} \text{ [Pa]} \tag{2.19}$$

gdzie:

f – fugatywność [Pa]

C – stężenie substancji [mol/m^3]

Z – pojemność fugatywnościowa [mol/(Pa m^3)]

Pojemność fugatywnościową oblicza się wykorzystując wzory podstawowe w zależności od ośrodka:

– dla powietrza

$$Z = {}^{1}/_{RT} \text{ [mol/(Pa m}^3\text{)]} \tag{2.20}$$

gdzie:

R – stała gazowa (R=8,314 Pa m^3/(mol K))

T – temperatura gazu [K]

– dla wody

$$Z = {}^{1}/_{H} \text{ [mol/(Pa m}^3\text{)]} \tag{2.21}$$

gdzie:

H – stała Henry’ego, [Pa m^3/mol]

W pracach Donalda Mackay zaproponowano cztery podstawowe modele (poziomy od I do IV) opisu migracji substancji między fazami. Modele fugatynościowe różnią się przyjętymi uproszczeniami, co rzutuje na ilość danych potrzebnych do przeprowadzenia obliczeń. Im wyższy poziom modelu tym większa dokładność obliczeń.

Wybór odpowiedniego poziomu modelu fugatywnościowego zależny jest od stopnia złożoności badanego środowiska oraz zakładanego celu modelowania i dostępności danych wejściowych. W praktyce głównie wykorzystywane są modele na poziomie III i IV z uwagi na większą dokładność obliczeń. Jednakże w przypadku szybkiego ustalania się stanu równowagi dla danego zanieczyszczenia pomiędzy przedziałami środowiska wyniki obliczeń na poziomie III będą bardzo zbliżone do wyników uzyskanych z poziomu II.

Tab. 3.1 Porównanie modeli fugatywnościowych [19]

Poziom modelu fugatywnościowego	Poziom I	Poziom II	Poziom III	Poziom IV
Stan równowagi pomiędzy elementami środowiska	+	+	brak: stan stacjonarny (niezmienny w czasie)	brak: stan dynamiczny (zmienny w czasie)
Fugatywność	równa dla wszystkich elementów środowiska	równa dla wszystkich elementów środowiska	różna dla różnych elementów środowiska	różna dla różnych elementów środowiska
Emisja zanieczyszczeń	jednorazowa	ze stałą szybkością	ze stałą szybkością do różnych elementów środowiska	ze zmienną szybkością do różnych elementów środowiska
Transport zanieczyszczeń w obrębie jednego elementu środowiska	-	+	+	+
Wymiana zanieczyszczeń pomiędzy elementami środowiska	-	-	+	+
Przemiany zanieczyszczeń	-	+	+	+

gdzie: „+” uwzględniono w modelu; „-” nie uwzględniono w modelu

Do opisu migracji THM-ów z wody do powietrza można wykorzystać model na poziomie III. Na poziomie III odrzuca się założenie istnienia stanu równowagi pomiędzy elementami środowiska, natomiast zakłada się niezmienność w czasie określonych, nierównowagowych warunków - tzw. stan stacjonarny. Ze względu na różną fugatywność dla każdego z ośrodków uwzględnia się transport substancji pomiędzy nimi w wyniku takich procesów, jak np. odparowanie, które występuje w środowisku basenowym. Proces odparowania ma charakter wymiany masy i zachodzi na powierzchni lustra wody.

W modelu tym szybkość ubytku zanieczyszczenia (THM-ów) D można wyrazić ogólnym wzorem:

$$D = A \cdot k \cdot Z \tag{2.22}$$

gdzie:

A – pole powierzchni wymiany masy [m^2]

k – współczynnik szybkości transportu zanieczyszczenia [m/h]

W przypadku modelu na poziomie III określa się także wielkość emisji do poszczególnych przedziałów środowiska. Całkowita ilość zanieczyszczenia równa jest sumie ilości zanieczyszczenia transportowanego na drodze adwekcji, ulegającego degradacji oraz ilości zanieczyszczenia zmieniającego ośrodek, w którym pierwotnie przebywało. Stąd znak „+” w tabeli odnosząc to do dynamiki zachodzących procesów i wykorzystując współczynniki D (fugatywnościowe stałe szybkości), można zapisać równanie [19]:

$$D_{iT} = D_{iA} + D_{iR} + \sum D_{ij} \tag{2.23}$$

albo wyrażając powyższe w jednostkach szybkości emisji, mol/h:

$$E_i + \sum D_{j,i} f_i = f_i D_{iT} \tag{2.24}$$

gdzie:

$\sum D_{j,i} f_i$ – suma szybkości transportu zanieczyszczenia z innych ośrodków j do ośrodka i.

Fugatywności w poszczególnych ośrodkach można obliczyć z przekształcenia wzoru powyżej do postaci:

$$f_i = \frac{E_i + \sum D_{j,i} f_i}{D_{iT}} \tag{2.25}$$

Sumowanie we wzorach (2.23)-(2.25) zachodzi (w przypadku danego ośrodka i) dla pozostałych rozpatrywanych ośrodków j.

Dla n ośrodków środowiska otrzymuje się n równań z n nieznanymi fugatywnościami.

Po ich obliczeniu możliwe jest skorzystanie z równania $C_i = Z_i f$ - dla różnych fugatywności - w celu określenia stężeń zanieczyszczenia w każdym z ośrodków.

Dla obliczenia szybkości ubytku THM-ów z wody basenowej (ośrodek 1) do powietrza (ośrodek 2) można wykorzystać przekształcone równanie:

$$D_{12} = \frac{1}{\frac{1}{k_1 A_{12} Z_1} + \frac{1}{k_2 A_{12} Z_2}} \tag{2.26}$$

gdzie:

A – pole powierzchni tafli wody [m^2]

k_1 – współczynnik szybkości transportu THM-ów dla wody [m/h]

k_2 – współczynnik szybkości transportu THM-ów dla powietrza [m/h]

Zakładając, że chloroform jest głównym składnikiem THM-ów przeprowadzono kalkulacje szybkości jego ubytku (D_{12}) z wody do powietrza dla typowego basenu przyszkolnego. Podstawiając dane z Tab. 3.2 otrzymano wartość D_{12} = 4,97x10^{-2} mol/Pa h.

Tab. 3.2 Parametry wykorzystane do obliczenia szybkości ubytku chloroformu z wody do powietrza

Parametry		Jednostki	Źródło
k_1	46,25	m/h	Dyck, 2011
k_2	0,399	m/h	Dyck, 2011
A_{12}	312,5	m^2	wymiar typowej tafli basenu 25x12,5m
Z_1	2,21x10^{-3}	mol/Pa m^3	$Z_1 = {}^1/_H$, H=453,35 Pa m^3/mol (H=$V_p M_{mol}/R_{rop}$)
Z_2	3,96x10^{-4}	mol/Pa m^3	$Z_2 = {}^1/_{RT}$, T=301,15 K, R=8,314 Pa m^3/mol K

3.2 Kierunki działań dla obniżenia stężenia THM-ów w środowisku basenowym

W celu pełnej ochrony użytkowników basenu przed ekspozycją na działanie THM-ów istotne jest projektowanie zarówno skutecznego procesu uzdatniania wody jak i układu wymiany powietrza w hali basenowej. Zadaniem systemu wentylacyjnego powinno być

zapewnienie komfortu cieplnego oraz odpowiedniej jakości powietrza, w szczególności w strefie przebywania ludzi tj. nad taflą wody i na brzegu wokół basenu.

W polskim prawodawstwie brakuje przepisów dotyczących jakości powietrza w środowisku basenowym. Nie ma obowiązku pomiaru parametrów jakości powietrza wewnętrznego, głównie z uwagi na wysokie koszty i brak standardowych procedur pomiaru. Jednak wiele prac naukowych podaje, że problem złej jakości powietrza wewnętrznego jest obecny w większości poddanych ocenie obiektów [4, 13, 25, 26, 55, 91, 101, 106].

W zakresie projektowania systemów uzdatniania wody, sytuacja znacząco się zmieniła po ogłoszeniu w 2015 roku nowego Rozporządzenia Ministra Zdrowia w sprawie wymagań jakim powinna odpowiadać woda na pływalniach [130], które nakazuje kontrolę jakości wody basenowej poprzez pomiar chloru związanego i wolnego oraz innych parametrów fizykochemicznych wody. Kontrola wartości chloru związanego jest istotna, gdyż jego obecność przekłada się na stężenie szkodliwych dla zdrowia produktów ubocznych dezynfekcji wody. Wiele obecnie pracujących systemów uzdatniania wody wymaga modernizacji, aby podołać nowym wartościom parametrów wskazanych w rozporządzeniu.

W pracy zostaną przedstawione wyniki własnych pomiarów przeprowadzonych na trzech stacjach pilotowych systemów uzdatniania wody. Badane moduły filtracyjne w znaczący sposób poprawiły parametry wody kierowanej do niecki basenowej. Pełna analiza zostanie zaprezentowana w rozdziale 3.

Ważne jest również zadbanie o dodatkowe zabezpieczanie użytkowników basenów przed produktami ubocznymi dezynfekcji wody poprzez edukację w zakresie konieczności przeprowadzania czynności higienicznych przed wejściem do basenu, takimi jak prysznic z użyciem mydła i zakładanie czepków. Badania zaprezentowane w pracy [40] wskazują, że kąpiel pływaków pod prysznicem przed wejściem do wody basenowej ma znaczący wpływ na ograniczenie ilość prekursorów powstawania THM-ów.

W dalszej części pracy zostaną również przedstawione wyniki pomiarów wykonanych w pomieszczeniu modelowym, które zostało wybudowane z uwzględnieniem różnych wariantów układu wentylacyjnego. Zamontowane kanały wentylacyjne zapewniały możliwość nawiewania i wywiewania powietrza realizując różne typy rozdziału powietrza. Kanały zostały wyposażone w przepustnice, co dało możliwość wykorzystywania ich w funkcji nawiewnych i wywiewnych. Oprócz typowych układów wentylacyjnych (dół-góra) projektowanych na basenach publicznych zamontowano układ kanałów pełniących funkcję tzw. odciągów brzegowych oraz układ powietrza obiegowego. Otrzymane dane podczas

badań przeprowadzonych w pomieszczeniu modelowym zostały wykorzystane jako dane źródłowe do przeprowadzenia symulacji numerycznych (szerzej opisano w rozdziale 6). Symulacje numeryczne posłużyły do opracowania rozwiązań technicznych ograniczających stężenie THM-ów w środowisku basenowym poprzez odpowiednio dobrany rozdział powietrza.

Wyniki pomiarów doświadczalnych oraz symulacji numerycznych dały możliwość rekomendacji układu wentylacyjnego zapewniającego skuteczną wymianę powietrza w szczególności nad taflą wody, co jest istotne z uwagi, że drogi oddechowe pływaków są najbardziej narażone na szkodliwe działanie THM-ów [22] . Pełna analiza przeprowadzonych pomiarów zostanie przedstawiona w rozdziale 5.

4. Uzdatnianie wody basenowej w aspekcie redukcji THM-ów

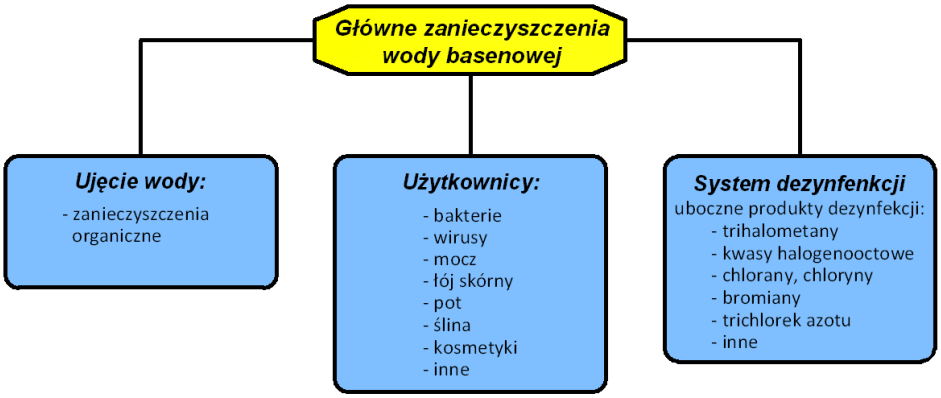
Kryte baseny publiczne, z uwagi na znaczną objętość wody w niecce i szczególne parametry powietrza wewnętrznego, są obiektami wymagającymi zaprojektowania specjalistycznej instalacji wentylacyjnej, grzewczej oraz uzdatniania wody. Pływalnie są chętnie odwiedzane przez dzieci i dorosłych. Typowy basen przyszkolny w dużym mieście obsługuje 600 osób dziennie, co daje w skali miesiąca przepustowość na poziomie 18 000 osób. Hala basenowa to miejsce, które ma spełniać cele rekreacyjne, sportowe oraz rehabilitacji. W związku z tym, komfort cieplny oraz jakość wody i powietrza wewnętrznego powinny spełniać najwyższe standardy.

Nowe Rozporządzenie Ministra Zdrowia w sprawie wymagań jakim powinna odpowiadać woda na pływalniach [130] wprowadziło konieczność kontroli jakości wody basenowej w szerszym niż dotychczas zakresie. Dodatkowo do obowiązkowych parametrów mierzonych codziennie rekomendowano chlor związany. Obecność chloru związanego w wodzie świadczy o obecności szkodliwych dla zdrowia produktów ubocznych dezynfekcji wody.

W pracy przedstawiono wyniki jakości wody z 3 basenów posiadających standardowe systemy uzdatniania wody. Wartość chloru związanego była przekroczona na każdym z nich. Tylko przeprowadzanie we właściwy sposób procesu dezynfekcji wody z zastosowaniem np. dodatkowych elementów filtracyjnych może przyczynić się do obniżenia stężenia THM-ów w wodzie i powietrzu. Dla potwierdzenia możliwości dostosowania obecnie pracujących systemów uzdatniania wody przeprowadzono pomiary własne na 3 różnych układach badawczych pracujących na 3 obiektach basenowych. Wyniki uzyskanych pomiarów oraz wnioski zostaną zaprezentowane w dalszej części pracy.

4.1 Istniejące rozwiązania technologiczne

Za jakość wody odpowiada instalacja uzdatniania wody basenowej, która pracuje w obiekcie w sposób ciągły bez względu na godziny otwarcia pływalni. Głównym źródłem zanieczyszczeń wody basenowej są użytkownicy, którzy wprowadzają do wody wiele zanieczyszczeń organicznych i mikrobiologicznych.



Rys. 4.1 Główne zanieczyszczenia wprowadzane do wody basenowej

Ciągła dezynfekcja wody jest niezbędna ze względu na eliminację ryzyka zakażenia biologicznego. Stosowanych jest wiele układów technologicznych uzdatniania wody basenowej, schematy 5-ciu przykładowych rozwiązań przedstawiono na Rys. 4.2:



Rys. 4.2 Przykłady 5-ciu najczęściej stosowanych układów technologicznych uzdatniania wody basenowej

Filtracja wstępna

Pierwszym etapem filtracji wody basenowej jest filtracja wstępna, która separuje z wody kierowanej do uzdatnienia większe zanieczyszczenia mechaniczne (włosy, włókna, itp.), w celu zabezpieczenia pomp i filtrów przed zanieczyszczeniem lub uszkodzeniem. Filtracja najczęściej odbywa się przy użyciu łapaczy włosów, w starszych instalacjach można je spotkać jako osobne urządzenia zamontowane na rurociągu. Obecnie standardem jest stosowanie łapaczy zintegrowanych z pompą filtracyjną. Takie rozwiązanie zmniejsza opory

przepływu w instalacji oraz jest wygodniejsze dla użytkownika, gdyż umożliwia szybkie jego oczyszczenie.

Koagulacja

Proces koagulacji służy do lepszego usuwania z wody zawiesin. Koagulanty hydrolizują tworząc zawiesinę kłaczkowatą, która adsorbuje zanieczyszczenia i część bakterii [43]. Koagulacja pozwala na zwiększenie skuteczności filtracji.

Filtracja w pionowym filtrze ze złożem wielowarstwowym

Filtr ze złożem wielowarstwowym jest powszechnie stosowany w instalacjach uzdatniania wody basenowej ze względu na prostą konstrukcję i eksploatację oraz stosunkowo niskie koszty inwestycyjne i eksploatacyjne. Zadaniem filtra jest usuwanie z wody mniejszych zanieczyszczenia mechanicznych nie wychwyconych w filtracji wstępnej (np. naskórek) oraz zawiesin (np. olejki do opalania) i cząstek koloidowych (tłuszcze, kremy, itp.). Filtr wypełniony jest zazwyczaj cztero-warstwowym złożem o zróżnicowanej wysokości i granulacji, ułożonym w ściśle ustalonej kolejności jak w Tab. 4.1

Tab. 4.1 Przykładowa struktura złoża wielowarstwowego o wysokości 1200mm

lokalizacja warstwy	materiał warstwy	granulacja warstwy	wysokość warstwy
góra	hydroantracyt o granulacji	0,6-1,6 mm	600 mm
środek	piasek kwarcowy o granulacji	0,5-1,0 mm	400 mm
poniżej	żwir kwarcowy o granulacji	1,0-3,0 mm	100 mm
dół	żwir kwarcowy o granulacji	3,0-5,0 mm	100 mm

Podczas normalnej pracy woda do uzdatnienia wtłaczana jest do filtra pod ciśnieniem w górnej jego części, następnie przepływa przez kolejne warstwy. W typowych filtrach prędkość filtracji nie powinna przekraczać $30 m^3/h$ na 1 m^2 złoża, gdyż przy wyższej prędkości cząsteczki zanieczyszczeń mogą przedostać się przez filtr. Tego rodzaju filtry wymagają wprowadzenia wcześniejszego procesu koagulacji do zwiększenia efektywności procesu.
Ciśnieniowe filtry ze złożem wielowarstwowym pracują w sposób ciągły z krótkimi przerwami przeznaczonymi na ich płukanie, które należy wykonywać przy wzroście ciśnienia na złożu o 40-50 Pa [103]. Płukanie filtra odbywa się za pomocą sprężonego powietrza oraz

wody wtłaczanych w dolnej jego części. Powietrze i woda przepływają w przeciwnym kierunku do filtracji. Sprężone powietrze ma za zadanie spulchnić złoże, a wtłaczana woda zgodnie z ustaloną kolejnością i czasem płukania wymywa osadzone zanieczyszczenia.

Na starszych basenach pracują jeszcze poziome filtry ze złożem piaskowym. Konstrukcją przypominają filtry pionowe, gdyż również posiadają dno dyszowe i złoże. W związku z tym, że skuteczność filtracji zwiększa się ze wzrostem wysokości warstwy filtracyjnej [43] zostały one wyparte przez pionowe filtry ze złożem wielowarstwowym, które zajmują znacznie mniej miejsca w pomieszczeniu technicznym.

Filtracja w pionowym filtrze ze złożem ziemi okrzemkowej (diatomitowym)

Filtracja mechaniczna w filtrze ciśnieniowym ze złożem namywanym ziemią okrzemkową ma za zadanie (podobnie jak filtry ze złożem wielowarstwowym) usunąć z wody mniejsze zanieczyszczenia mechaniczne nie wychwycone w filtracji wstępnej. Tego rodzaju filtry z zewnątrz (Rys. 3.4a) wyglądają bardzo podobnie do pionowych filtrów ze złożem wielowarstwowym opisanych wcześniej, lecz złoże filtracyjne bardzo się różni. W środku filtr wypełniony jest elementami świecowymi, które podczas filtracji otoczone są na zewnętrznej powierzchni złożem z ziemi okrzemkowej. Kierunek filtracji w filtrze diatomitowym jest przeciwny w stosunku do kierunku w filtrze ze złożem wielowarstwowym. Uzdatniana woda jest podawana do zbiornika filtra w jego dolnej części i dalej zasysana poprzez złoże do wnętrza świec. Ze świec woda trafia do górnej części filtra i jest kierowana do dalszego procesu uzdatniania. W procesie mycia filtra diatomitowego ruch wody odbywa się w przeciwnym kierunku i powoduje wymywanie złoża z powierzchni świec, odprowadzanego wraz z wodą płuczącą i zanieczyszczeniami do kanalizacji. Po każdym myciu następuje namywanie nowego złoża na świece roztworem z ziemią okrzemkową przygotowanym w oddzielnym zbiorniku zarobowym. Ziemia okrzemkowa to naturalny materiał filtracyjny utworzony głównie z pancerzyków glonów jednokomórkowych (okrzemków). Jest chemicznie obojętna i dzięki mikroskopijnej strukturze szkieletowej zatrzymuje w sposób mechaniczny zanieczyszczenia o wymiarach 1÷2μm.

Powyższe filtry posiadają wiele zalet m.in.: mają większą powierzchnię filtracji na mniejszej powierzchni niż filtry ze złożem wielowarstwowym, nie wymagają stosowania procesu koagulacji oraz wykazują lepsze efekty oczyszczania wody w stosunku do innych rozwiązań. Jednak wysokie koszty inwestycyjne, wysokie koszty eksploatacyjne związane z częstą wymianą złoża, ryzyko przeniknięcia ziemi okrzemkowej do niecki basenu oraz brak

możliwości całkowitej automatyzacji procesu, powodują że są rzadziej stosowane niż filtry ze złożem wielowarstwowym.

Ekonomiczną wersją filtrów ze złożem namywanym ziemią okrzemkową jest filtr wykonany w wersji poziomej. Znacząco różni się od wcześniej opisanego pionowego ciśnieniowego filtra diatomitowego. Filtr poziomy jest przede wszystkim zbiornikiem otwartym z przewodami tłocznym i ssawnym zlokalizowanymi w jego dolnej części. Złoże w postaci ziemi okrzemkowej osadza się na płytach lub świecach pokrytych siatką miedzianą. Wtłaczana woda do zbiornika omywa złoże i jest zasysana przez pompę do przewodu wody czystej. Prędkość przepływu wody przez filtr jest bardzo niska rzędu 2÷5 m/h ze względu na dużą powierzchnię filtracji. Płukanie filtra polega na usunięciu złoża z powierzchni filtracyjnej poprzez pulsacyjne polanie strumieniem wody całej powierzchni wewnętrznej i zewnętrznej. Czynnikiem decydującym o małym zainteresowaniu na rynku opisanym filtrem jest fakt, że zajmuje większą powierzchnię w stosunku do innych rozwiązań i wymaga znacznego zaangażowania obsługi, gdyż nie ma możliwości wprowadzenia pełnej automatyzacji procesu.

Ozonowanie

Ozonowanie jest procesem dezynfekcyjnym, w którym wytwarzany na miejscu ozon jest wprowadzany do uzdatnianej wody. Ozon stosunkowo szybko rozkłada się w wodzie, więc działa jedynie w miejscu dozowania i nie chroni trwale wody przed zanieczyszczeniami mikrobiologicznymi. Zaobserwowano, że ozonowanie sprzyja mikrokoagulacji m.in. rozpuszczonych białek i kawałków naskórka, więc dla zwiększenia efektywności procesu koagulacji, koagulant dodawany jest przed filtracją na złożu wielowarstwowy. W układzie technologicznym z procesem ozonowania stosowane jest zmodyfikowane złoże w filtrze. Górna warstwa hydroantracytu jest zastąpiona warstwą węgla aktywnego i hydrofitu w celu usunięcia pozostałego ozonu. Na koniec procesu uzdatniania, po ozonowaniu i filtrze, dla zabezpieczenia higienicznego wody dodawany jest chlor, lecz w dawce znacznie niższej niż w układzie uzdatniania wody bez ozonowania. Ozonowanie nie należy do najtańszych metod, ale charakteryzuje się wieloma zaletami m.in.: zapewnia wysokie walory organoleptyczne wody (smak, zapach, barwa, przejrzystość), niszczy grzyby i wirusy, redukuje THM-y oraz utlenia fenole, detergenty, pestycydy.

Lampa UV

Dezynfekcja lampą UV jest procesem dezynfekcyjnym i stosuje się ją w celu polepszenia efektywności dezynfekcji na filtrze wielowarstwowym oraz ograniczenia ilości wolnego chloru w wodzie. Proces dezynfekcji promieniowaniem UV polega na naświetlaniu wody przepływającej przez urządzenie, w którym umieszczone są lampy emitujące promieniowanie ultrafioletowe o odpowiedniej mocy. Stosowanie lamp UV bardzo podnosi skuteczność niszczenia bakterii i wirusów oraz poprzez wpływ na reakcje chemiczne, zmniejszenie ilości chloramin w wodzie.

Ponadto dezynfekcja lampą UV pozwala na redukcję dozowanego chloru. Urządzenie UV lokalizowane jest między filtrem, a miejscem dozowania korektora pH i chloru. Kluczem dla skutecznej dezynfekcji lampą UV jest jej prawidłowy dobór, którego dokonuje się na podstawie: wielkości maksymalnego chwilowego przepływu, jakości wody oraz żądanej dawki UV.

Korekta odczynu pH

Optymalna wartość odczynu pH dla wody basenowej mieści się w przedziale 7,0÷7,4 i wynika z efektywności przebiegu procesu chlorowania i neutralnego wpływu na błony śluzowe. W nowoczesnych instalacjach uzdatniania wody wartość odczynu pH wody kierowanej do niecki basenowej jest mierzona w sposób ciągły i automatycznie korygowana. W przypadku zbyt niskiej wartości pH, do uzdatnionej wody dozowany jest podchloryn sodu. Utrzymywanie wartość pH wody poniżej 7,0 może powodować łzawienie oczu, korozję części metalowych zanurzonych w wodzie oraz powstawanie chlorków. W przypadku zbyt wysokiej wartości pH dozowany jest kwas siarkowy. Woda o wartości pH powyżej 7,8 może powodować swędzenie skóry oraz wytrącanie kamienia z wody.

Chlorowanie

Dozowanie chloru powinno stanowić końcowy etap uzdatniania wody i jest realizowane automatycznie na podstawie pomiaru jakości wody kierowanej do niecki basenowej. Woda chlorowana jest chlorem gazowym lub roztworem podchlorynu sodu. Chlor gazowy pobierany jest z butli gazowej lub otrzymywany z urządzenia do elektrolizy. Od stosowania butli gazowych odchodzi się ze względów bezpieczeństwa, a elektrolizery nie są często stosowane ze względu na wysokie koszty inwestycyjne. Natomiast roztwór podchlorynu sodu jest powszechnie stosowany w instalacjach uzdatniania wody na polskich basenach.

Minimalna wymagana normatywna wartość stężenia chloru wolnego w wodzie basenowej wynosi 0,3mg Cl_2/l, a maksymalna 0,5mgCl_2/l.

Bromowanie

Alternatywą dla procesu chlorowania jest bromowanie wody w celu końcowej dezynfekcji. Brom dodawany jest najczęściej do wody w formie tabletek, jego skuteczność jest niższa od chloru, ale również zapewnia niszczenie bakterii, wirusów i grzybów oraz usuwa organiczne zanieczyszczenia w procesie utleniania. Brom nie działa drażniąco na skórę, ma naturalne pH. Bromowanie znalazło szerokie zastosowanie do dezynfekcji małych basenów rekreacyjnych i jacuzzi, lecz nie powinno być stosowane do uzdatniania wody w basenach zewnętrznych ze względu na szybki rozkład pod wpływem promieniowania słonecznego. W basenach publicznych nie wykorzystuje się bromowania, ze uwagi na polskie przepisy, które wymagają stosowania chloru jako skutecznego dezynfektanta. Głównymi wadami procesu bromowania jest powstawanie szkodliwego bromoformu i dibromochlorometanu.

Wybór systemu uzdatniania wody basenowej dla danej pływalni jest uzależniony od wielu czynników np. właściwości fizykochemicznych wody, frekwencji użytkowników, planowanych kosztów inwestycyjnych oraz późniejszych kosztów eksploatacyjnych.
Najczęściej projektowanym systemem uzdatniania wody jest filtracja przez złoże wielowarstwowe i dezynfekcja podchlorynem sodu (tj. pierwszy prezentowany układ technologiczny na Rys. 4.2). Wynika to z najkorzystniejszego bilansu jakości uzyskanej wody do ceny dezynfektanta i ponoszonych kosztów eksploatacyjnych podczas ciągłej pracy instalacji.

Większość pokazanych układów technologicznych na Rys. 4.2 w końcowej fazie zawiera dezynfekcję związkiem chloru. Wynika to z uwarunkowań formalnych oraz uniwersalności chloru, jego efektywności i trwałości oraz niskiego kosztu zakupu. Niestety chlorowanie ma również wady, wiąże się z powstawaniem ubocznych produktów dezynfekcji w wyniku reakcji chloru ze związkami organicznymi i zanieczyszczeniami antropogenicznymi, które mogą być charakteryzowane przez zawartość węgla organicznego w wodzie (RWO). Wśród ubocznych produktów dezynfekcji znajdują się też szkodliwe THM-y (trihalometany), głównie chloroform ($CHCl_3$), bromodichlorometan ($CHBrCl_2$), dibromochlorometan ($CHBr_2Cl$), bromoform ($CHBr_3$) [119].

4.2 Możliwości korekty technologii dla redukcji zawartości THM-ów

Przeprowadzono wiele badań naukowych zajmujących się badaniem obecności ubocznych produktów uzdatniania w środowisku basenowym przy zastosowaniu różnych metod dezynfekcji [32, 51, 79]. Często skupiają się one na porównywaniu wysokości stężeń tych związków w wodzie i w powietrzu przy zastosowaniu różnych układów uzdatniania. Bezpośredni pomiar ubocznych produktów uzdatniania, czy jego reprezentantów (np. THM) w wodzie basenowej, jest dość skomplikowany i kosztowny. W celu analizy wpływu różnych metod dezynfekcji na stężenie THM-ów w wodzie basenowej przeprowadzono pomiar m.in. chloru wolnego i związanego, na 3 basenach z różnymi modułami filtracyjnymi. Chlor związany jest nowym parametrem włączonym do obowiązkowej kontroli w rozporządzeniu w sprawie wymagań jakim powinna odpowiadać woda na pływalniach, obowiązującym od połowy 2016 roku [130]. Przekroczenie maksymalnego poziomu chloru związanego w wodzie basenowej, wskazuje na niedostateczne działanie układu uzdatniania wody i świadczy o gromadzeniu się w wodzie chloroamin i trihalometanów.

Odczuwalnymi przez użytkowników basenu efektami przekroczenia dopuszczalnej wartości chloru związanego mogą być:

- zmiany skórne i astma,
- podrażnienie błony śluzowej oczu i dróg oddechowych,
- charakterystyczny „zapach chloru”.

Pomiar chloru wolnego w wodzie basenowej jest również istotnym parametrem świadczącym o właściwym doborze metody dezynfekcji wody. Chlor wolny to chlor zawarty w roztworze w postaci rozpuszczonego chloru elementarnego (Cl_2), jako kwas podchlorawy (HClO) oraz w postaci jonu podchloranowego (Cl^-). Zawarty w wodzie basenowej chlor wolny jest odpowiedzialny za redukcję bakterii i wirusów wprowadzanych przez użytkowników.

W celu rozważenia możliwości korekty obecnych na basenach technologii uzdatniania wody przeprowadzono pomiary własne na trzech pływalniach krytych z klasycznymi systemami uzdatniania wody basenowej, obejmującymi procesy: filtracji wstępnej, koagulacji, filtracji na złożu wielowarstwowym, naświetlania w lampie UV, korekty pH, chlorowania.

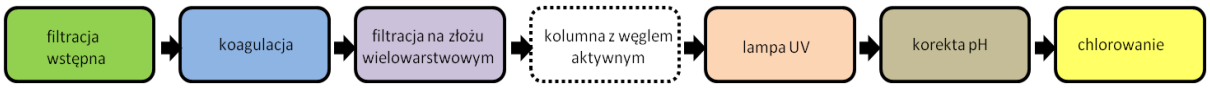
Próbki wody pobierano z niecek udostępnianych do nauki pływania dla dzieci, z częstotliwością dwa razy dziennie (o stałych godzinach) z punktów pobrania zlokalizowanych

na instalacji obiegowej wody basenowej. W próbkach oznaczano chlor wolny, chlor całkowity i chlor związany. Chlor całkowity jest sumą chloru wolnego i związanego, więc ilość chloru związanego obliczono z różnicy zmierzonej wartości chloru całkowitego i wolnego. Analizy przeprowadzono na basenowym fotometrze POOLTEST 3 SPH firmy PALINTEST. Dodatkowo mierzono pH i temperaturę wody.

W miesiącach kwiecień–czerwiec 2016 roku prowadzono pomiary na klasycznych systemach uzdatniania wody. W miesiącach styczeń-marzec 2017 roku prowadzono pomiary na układach wyposażonych w dodatkowe moduły systemu uzdatniania wody.

Baseny z trzema różnymi zmodyfikowanymi systemami uzdatniania wody oznaczono - basen I, basen II i basen III.

W basenie I układ uzdatniania wody dla obiegu niecki rekreacyjnej uzupełniono o moduł wykorzystujący proces adsorpcji. Umiejscowienie kolumny ze złożem granulowanego węgla aktywnego przedstawiono na Rys. 4.3 (dodatkowy moduł oznaczony przerywaną linią).

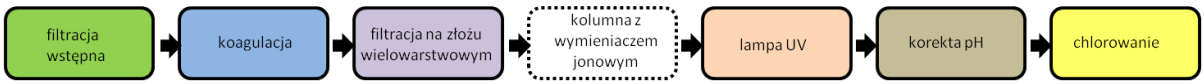


Rys. 4.3 Układ technologiczny systemu uzdatniania wody dla basenu I [85]

Proces adsorpcji na węglu aktywnym polega na usuwaniu zanieczyszczeń na powierzchni adsorbentu. Równocześnie zachodzi adsorpcja fizyczna (cząsteczki adsorbatu są zatrzymywane na powierzchni złoża) oraz adsorpcja chemiczna (cząsteczki zanieczyszczeń łączą się w sposób chemiczny z powierzchnią węgla aktywnego). Główną wadą takiego typu złoża jest konieczność jego okresowej wymiany z uwagi na to, że proces chemisorpcji jest trwały i nie ma możliwości regeneracji złoża. Na skuteczność i czas pracy złoża węgla aktywnego wpływa również jakość wprowadzanej wody, dlatego też kolumna została zlokalizowana za modułami z procesami filtracji wstępnej, koagulacją i filtrem wielowarstwowym. Odpowiednie usytuowanie kolumny zapewnia usunięcie zawiesin, emulsji oraz substancji mogących się osadzić na złożu adsorpcyjnym. Proces adsorpcji jest wykorzystywany w technice uzdatniania wody w szczególności do usuwania związków organicznych pochodzenia naturalnego oraz antropogenicznego będących prekursorami THM-ów. Złoże z węglem aktywnym charakteryzuje się bardzo rozwiniętą powierzchnię właściwą, dzięki temu może adsorbować duże ilości zanieczyszczeń, nawet tych

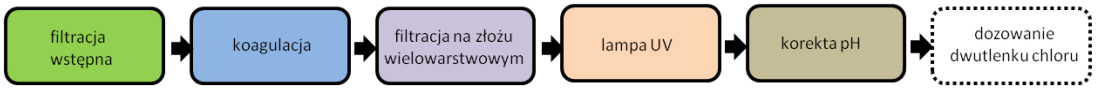
niebezpiecznych (np. metali ciężkich: chromu, arsenu), uciążliwych, pogarszających smak i zapach wody.

W basenie II jako dodatkowy moduł systemu uzdatniania wody zastosowano kolumnę z wymieniaczem jonowym, odpowiednio dobranym do uzdatniania wody. Złoże jonitowe (moduł oznaczony przerywaną linią) zlokalizowane jak na Rys. 4.4, pochłania ujemnie naładowane jony rozpuszczonego węgla organicznego zawarte w wodzie, wymieniając je na jony chlorkowe znajdujące się w miejscach aktywnych. W wyniku tego procesu redukowane są prekursory powstawania THM-ów. Gdy zdolność jonowymienna złoża zostaje wyczerpana, należy poddać je regeneracji roztworem NaCl.



Rys. 4.4 Układ technologiczny systemu uzdatniania wody dla basenu II [85]

W basenie III (Rys. 4.5) dokonano zmiany w sposobie dozowania chloru w końcowym etapie przygotowania wody basenowej (moduł oznaczony przerywaną linią). Przeprowadzone badania wskazują, że zamiana podchlorynu sodu na dwutlenek chloru wpływa korzystnie na obniżenie ilości prekursorów THM-ów, co wynika ze zmienionego charakteru reakcji chemicznych. Dezynfektant ten wykazuje słabszą reaktywność w stosunku do związków organicznych obecnych w wodzie oraz do amoniaku, co przekłada się na zmniejszoną ilość tworzenia chlorowcopochodnych, w tym trihalometanów. Dwutlenek chloru wykazuje dużo lepsze właściwości utleniające niż chlor i niszczy także te substancje organiczne, wirusy i przetrwalniki bakterii, które nie są niszczone przez chlor.



Rys. 4.5 Układ technologiczny systemu uzdatniania wody dla basenu III [85]

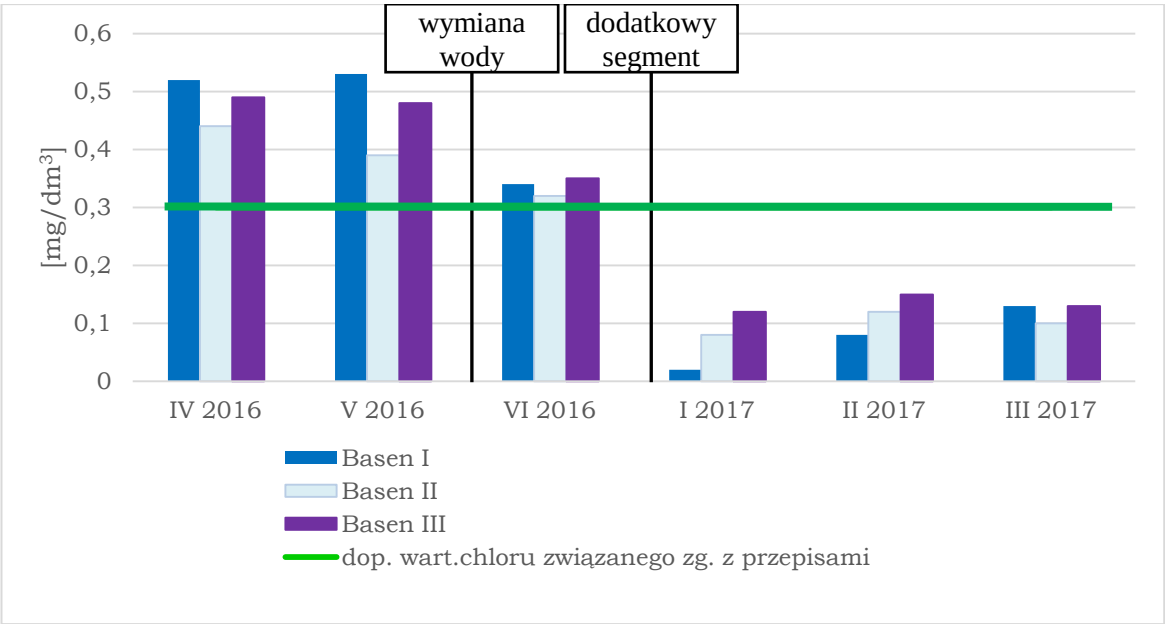
W Tab. 4.2 przedstawiono zbiorcze wyniki pomiarów uzyskanych na układach technologicznych opisanych powyżej. W każdym z badanych basenów poziom chloru związanego był przekroczony przy oczyszczaniu wody za pomocą klasycznego układu uzdatniania. Warto zwrócić uwagę, że w miesiącu kiedy woda w nieckach została całkowicie wymieniona (06.2016) poziom chloru związanego obniżył się w okolice maksymalnej dopuszczalnej wartości, więc można założyć, że wymiana wody raz w miesiącu mogłaby być

rozwiązaniem na dostosowanie instalacji basenowych do nowych przepisów, na co wskazują również inni autorzy [23]. Jednak stale rosnąca cena wody i ścieków wyklucza to rozwiązanie. Wyniki pomiarów na układach uzupełnionych o dodatkowe procesy technologiczne wskazują możliwości ich praktycznego zastosowania. Poziom chloru związanego w tych przypadkach był poniżej maksymalnej dopuszczalnej obecnie wartości, co zilustrowano na Rys. 4.6.

Tab. 4.2 Zestawienie wyników pomiarów przeprowadzonych na trzech basenach (wartości średniomiesięczne)

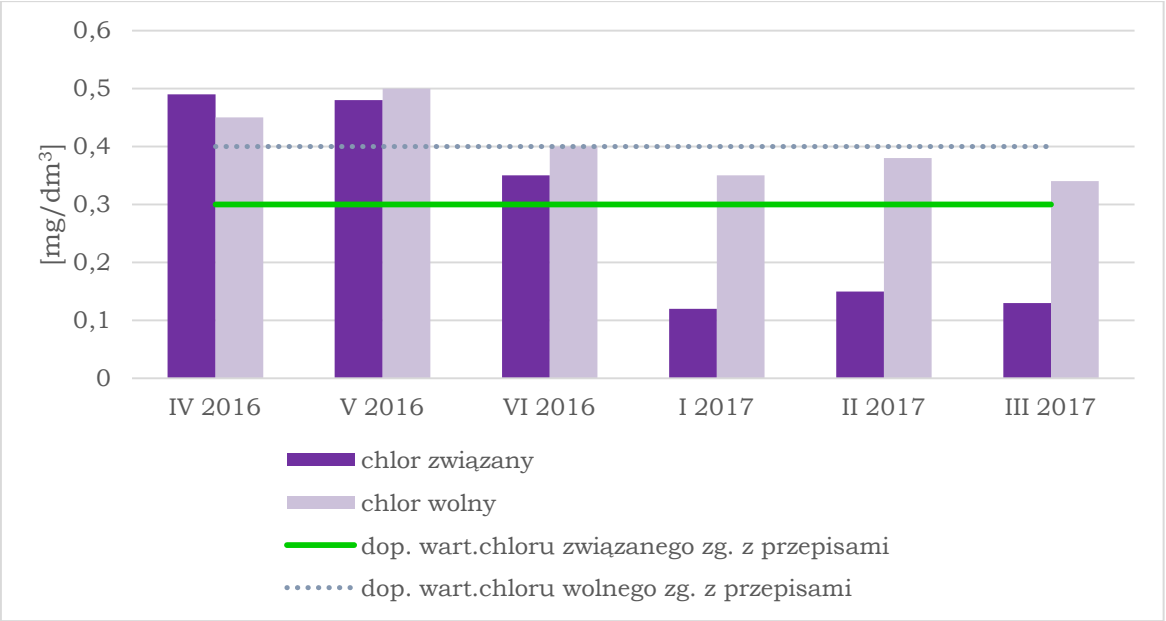
	Basen I			Basen II			Basen III		
parametr	pH	T	chlor związany	pH	T	chlor związany	pH	T	chlor związany
jednostka	[-]	[°C]	[mg/dm^3]	[-]	[°C]	[mg/dm^3]	[-]	[°C]	[mg/dm^3]
04.2016	7,0	32	**0,52**	6,7	35	**0,44**	7,1	33	**0,49**
05.2016	7,2	32	**0,53**	6,8	35	**0,39**	7,2	33	**0,48**
06.2016*****	7,0	32	**0,34**	6,8	35	**0,32**	7,2	33	**0,35**
dodatkowy segment	proces sorpcji (kolumna z węglem aktywnym)			proces wymiany jonowej (kolumna ze złożem jonowymiennym)			zastosowanie dwutlenku chloru w przygotowaniu wody surowej		
01.2017	7,0	32	**0,01**	6,7	35	**0,07**	7,5	33	**0,11**
02.2017	6,9	32	**0,05**	6,6	35	**0,07**	7,5	33	**0,13**
03.2017	7,0	32	**0,15**	6,7	35	**0,08**	7,5	33	**0,12**
dop. wart. zg. z przepisami	6,5÷7,6	-	0,3	6,5÷7,6	-	0,3	6,5÷7,6	-	0,3

[*]w tym miesiącu przeprowadzono 2-tygodniową przerwę technologiczną, podczas której dokonano przeglądu i czyszczenia instalacji oraz została całkowicie wymieniona woda basenowa



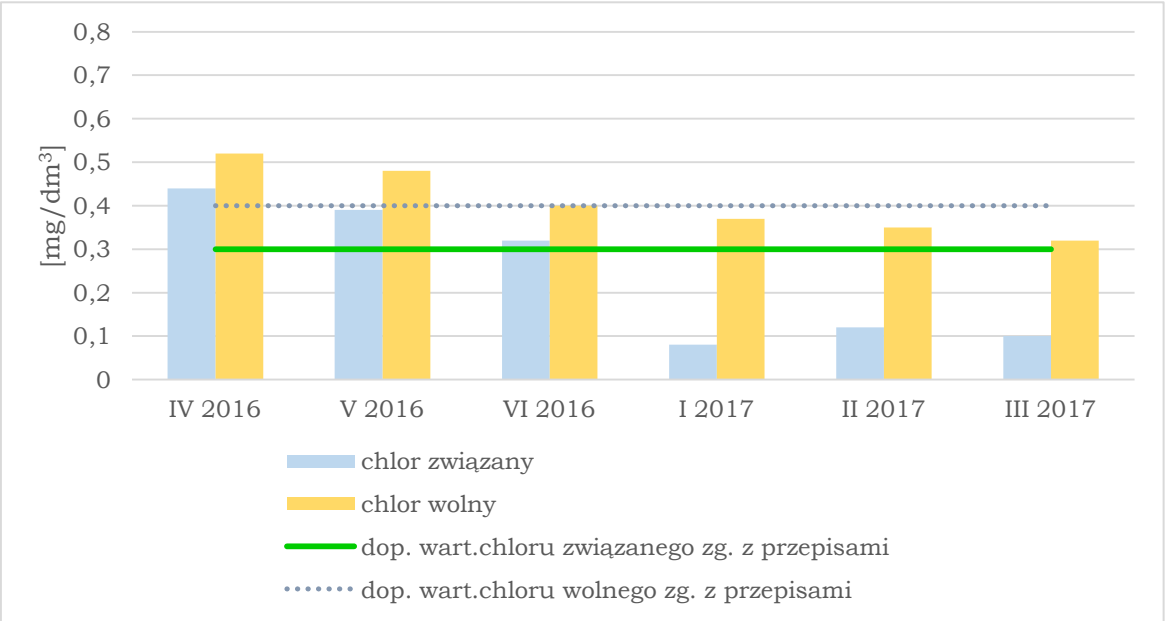
Rys. 4.6 Porównanie uzyskanych wyników pomiarów chloru związanego dla wszystkich 3 basenów z max wartością dopuszczalną zg. z zaleceniami zawartymi w rozporządzeniu [130]]

We wszystkich trzech badanych układach technologicznych uzyskano średniomiesięczne wartości chloru związanego zdecydowanie poniżej wartości dopuszczalnej 0,3mg/dm^3. Składowymi chloru związanego są chloroaminy i THM-y, więc analizowanie jego wartości daje informację o ich obecności w wodzie basenowej. Najniższe wartości chloru związanego uzyskano na basenie I, gdzie dodatkowy segment oczyszczania wody stanowi kolumna z granulowanym węglem aktywnym. Wyniki badań wskazują, że dobrany węgiel typu Filtrasorb400 firmy Chemviron Carbon wykorzystywany w stacjach uzdatniania wody pitnej, może być również skuteczny dla wody basenowej. Węgiel granulowany jest materiałem porowatym, wytworzonym z kilku surowców: węgla kamiennego, torfu, drewna i łupin orzecha kokosowego. Rodzaj użytego surowca ma wpływ na wytworzenie określonej struktury porów. Wybrany węgiel został wyprodukowany głównie z węgla kamiennego, co poprawia jego właściwości adsorpcyjne, gdyż płytki grafitowe zwiększają powierzchnię reakcji.



Rys. 4.7 Zestawienie wyników pomiarów chloru wolnego i związanego dla basenu typu I w porównaniu z max wartościami dopuszczalnymi zg. z zaleceniami zawartymi w rozporządzeniu [130]

W układzie uzdatniania wody uzupełnionym o kolumnę z węglem aktywnym wartość chloru związanego spadła z wartości średniej z okresu IV-VI 2016 wynoszącej 0,46 mg/dm^3 do wartości średniej 0,08 mg/dm^3 w okresie I-III 2017. Obniżeniu uległa też wartość chloru wolnego z wartości średniej 0,63 mg/dm^3 z okresu IV-VI 2016 na wartość 0,33 mg/dm^3.

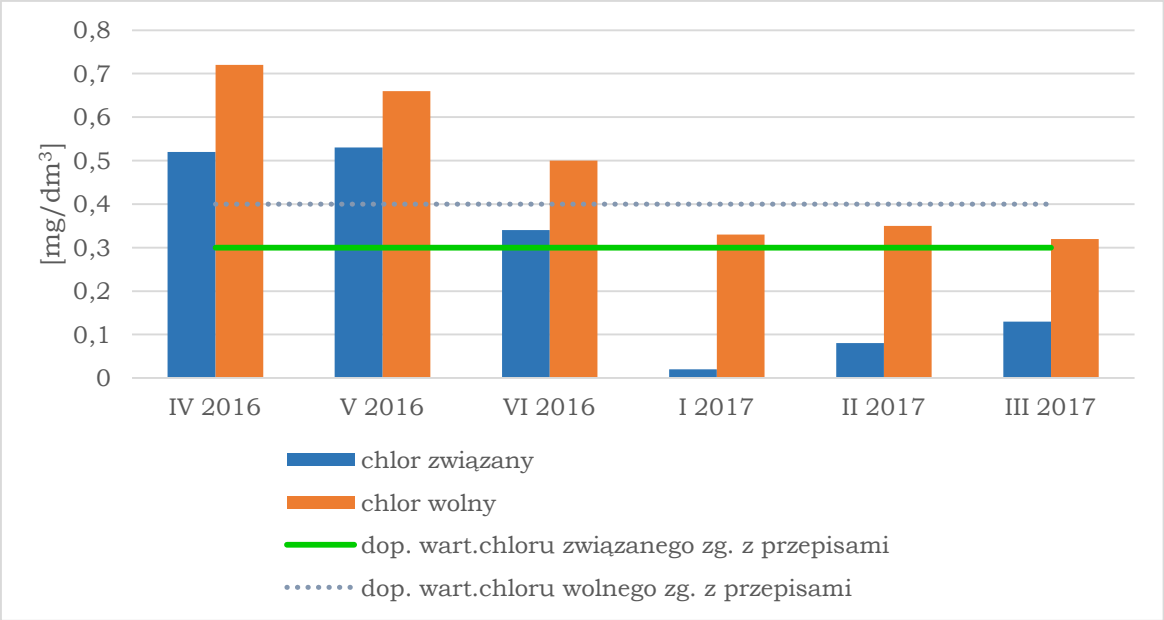


Rys. 4.8 Zestawienie wyników pomiarów chloru wolnego i związanego dla basenu II w porównaniu z max wartościami dopuszczalnymi zg. z zaleceniami zawartymi w rozporządzeniu [130]

W basenie II również uzyskano redukcję wartości chloru związanego i wolnego poniżej dopuszczalnych wartości co przedstawiono na Rys. 4.8. Dodany segment do układu uzdatniania wody w postaci kolumny z wymieniaczem jonowym pozwolił na redukcję średniej wartości chloru związanego wynoszącej 0,38 mg/dm^3 w okresie IV-VI 2016 do wartości 0,10 mg/dm^3 w okresie I-III 2017. Obniżeniu uległa też wartość chloru wolnego z wartości średniej 0,47 mg/dm^3 z okresu IV-VI 2016 na wartość 0,35 mg/dm^3.

W układzie uzdatniania wody basenu II zastosowano wymieniacz jonowy w postaci żywicy jonowymiennej, poliakrylowej o strukturze mikroporowatej.

Rodzaj żywicy dobrano pod kątem stopnia efektywności usuwania materii organicznej będącej prekursorami THM-ów. Przed podjęciem decyzji, przebadano w warunkach laboratoryjnych 3 typy żywic jonowymiennych. W wyniku przeprowadzenia 5 serii testów zlewkowych na próbkach wody basenowej i porównania uzyskanych wyników redukcji OWO (ogólnego węgla organicznego) wytypowano żywicę IRA958.



Rys. 4.9 Zestawienie wyników pomiarów chloru wolnego i związanego dla basenu III w porównaniu z max wartościami dopuszczalnymi zg. z zaleceniami zawartymi w rozporządzeniu [130]

W basenie III nie dodano nowego segmentu uzdatniania wody, lecz dokonano zmiany dezynfektanta z podchlorynu sodu na dwutlenek chloru.

Dwutlenek chloru produkowany jest na miejscu dozowania za pomocą generatora. Dla celów badawczych został dobrany najmniejszy generator typu DIOX-A. Jako podstawowe

chemikalia wyjściowe używane są 9% roztwór kwasu solnego oraz 7,5% roztwór chlorynu sodu. Obydwa reagenty są dozowane bezpośrednio ze zbiorników pośrednich do kolumny reakcyjnej, gdzie powstaje roztwór dwutlenku chloru. Wytworzony dwutlenek chloru jest bezpośrednio dozowany poprzez inżektor do uzdatnianej wody.

W basenie III uzyskano redukcję średniej wartości chloru związanego wynoszącej 0,44 mg/dm^3 w okresie IV-VI 2016 do wartości 0,13 mg/dm^3 w okresie I-III 2017. Obniżeniu uległa też wartość chloru wolnego z wartości średniej 0,45 mg/dm^3 z okresu IV-VI 2016 na wartość 0,36 mg/dm^3.

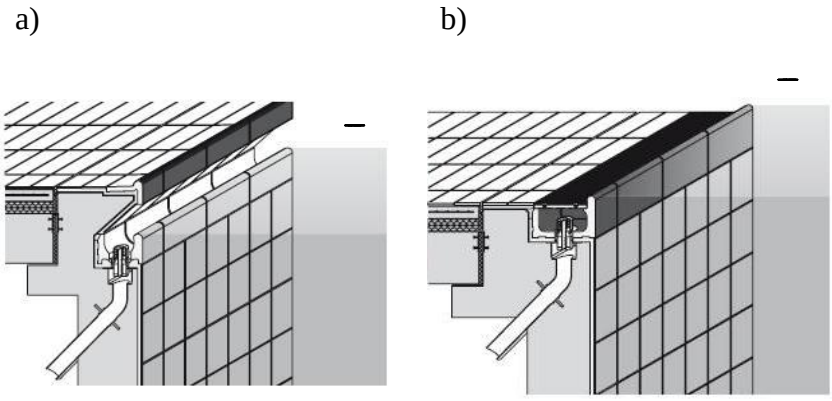
Z wykonanych badań wynika, że prowadzenie we właściwy sposób procesu dezynfekcji wody z zastosowaniem dodatkowych elementów filtracyjnych przyczynia się do obniżenia zawartości chloru wolnego i związanego w wodzie basenowej. Obniżenie tych wskaźników wynikało głównie z redukcji prekursorów THM-ów w wodzie kierowanej na końcowy etap uzdatniania czyli proces chlorowania, podczas którego prekursory łączą się z chlorem i w efekcie powstają THM-y. Proces ten ma bezpośredni wpływ na obniżenie zawartości THM-ów w wodzie i powietrzu. We wszystkich trzech badanych układach technologicznych uzyskano średniomiesięczne wartości chloru związanego zdecydowanie poniżej wartości dopuszczalnej 0,3mg/dm^3.

5. Układy wentylacyjne w aspekcie redukcji THM-ów

5.1 Istniejące rozwiązania wentylacyjne dla basenów krytych

Na obecność THM-ów w środowisku basenowym, ma wpływ nie tylko układ uzdatniania wody ale również układ wentylacyjny hali basenowej. Obecnie podstawowymi parametrami uwzględnianymi przy projektowaniu systemu wentylacji są: temperatura i wilgotność powietrza, prędkość przepływu powietrza, temperatura wody oraz krotność wymian powietrza. W obliczu wyników badań naukowych świadczących o toksyczności THM-ów [3, 4, 5, 13, 14, 22, 26, 31, 52, 71, 72, 95, 111, 113, 136] ryzyko wysokiego ich stężenia w powietrzu wewnętrznym w pływalni powinno być jednym z kryteriów doboru prawidłowego systemu wentylacyjnego w obszarze niecki basenowej.

W latach dziewięćdziesiątych nastąpiła korzystna zmiana w projektowaniu brzegu niecki basenowej polegająca na zastąpieniu wysokiego brzegu niecki (Rys. 5.1a) przelewem typu „fińskiego" (Rys. 5.1b).



Rys. 5.1 Przelew w niecce basenowej [122]
a) z wysokim brzegiem
b) typu „fińskiego"

W starszych basenach z wysokim brzegiem (Rys. 5.1b) tafla wody w niecce znajduje się 20-30 cm poniżej poziomu posadzki, co sprzyja kumulacji i zaleganiu zanieczyszczeń cięższych od powietrza w obszarze bezpośrednio nad taflą wody. Taki układ jest bardzo niekorzystny dla użytkowników basenu, którzy właśnie w tym obszarze pobierają powietrze.

Przelew typu „fińskiego" częściowo rozwiązuje problem zalegania zanieczyszczeń nad taflą, jednak by w pełni go rozwiązać niezbędne jest zaprojektowanie odpowiedniego systemu wentylacyjnego w obszarze niecki basenowej.

Organizacja rozdziału powietrza w hali basenowej jest jednym z kluczowych aspektów wpływających na właściwą pracę systemu wentylacji polegającą na:

- uzyskaniu właściwych parametrów powietrza w poszczególnych strefach hali (przebywania ludzi, przyokiennej, podsufitowej),
- pełnej wymiany powietrza w hali basenowej,
- usunięciu wilgoci oraz zanieczyszczeń z powietrza wewnętrznego.

W dalszej części rozdziału zostaną przedstawione różne układy nawiewno-wywiewne powietrza projektowane w halach basenowych.

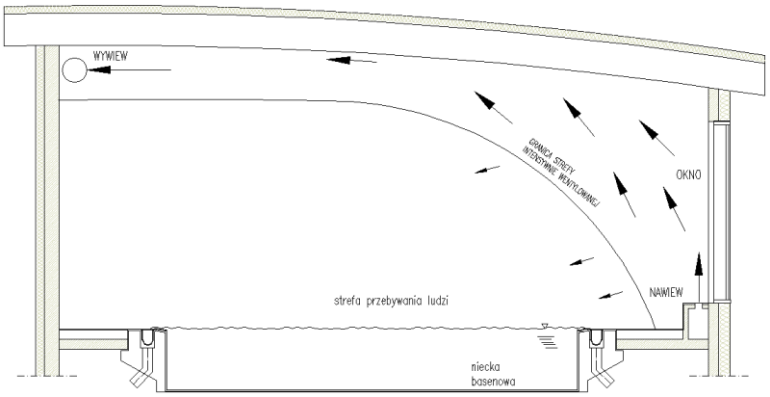
Udział powietrza świeżego w strumieniu wentylacyjnym w halach basenowych jest przyjmowany w zakresie 30÷100%. Ograniczanie jego udziału związane jest z optymalizacją kosztów zużycia energii elektrycznej. Minimalna wartość wynikająca ze względów higienicznych (zawartość CO_2) jest przyjmowana w okresie zimowym przy bardzo niskich temperaturach powietrza zewnętrznego. Udział świeżego powietrza rośnie wraz ze wzrostem temperatury zewnętrznej. W okresie letnim centrala wentylacyjna pracuje na 100% udziale powietrza zewnętrznego.

Wybór rozdziału powietrza ściśle zależy od specyfiki architektoniczno - budowlanej hali basenowej oraz od przewidzianego budżetu na daną inwestycję. W małych obiektach projektowane są proste instalacje wentylacyjne wspomagane dodatkowymi urządzeniami np. osuszaczami powietrza. Natomiast w większych halach projektowane są rozbudowane instalacje z centralnym uzdatnianiem powietrza. Dokonując wyboru sposobu organizacji powietrza oraz typu urządzeń wentylacyjnych projektanci powinni kierować się nie tylko kosztami inwestycyjnymi i eksploatacyjnymi ale również komfortem i bezpieczeństwem użytkowników.

W większości istniejących obiektów basenowych instalacja wywiewna powietrza z hali basenu umieszczana jest w górnej części pomieszczenia, często tuż pod stropem. W przypadku instalacji nawiewnej stosowanych jest wiele rozwiązań jej usytuowania.

Najczęściej projektowanym systemem wentylacyjnym hali basenowej jest układ dół-góra, który bazuje na nawiewie powietrza z poziomu posadzki wzdłuż płaszczyzny okien i wywiewie po przeciwnej stronie w górnej części pomieszczenia. Przedstawione na Rys. 5.2 rozwiązanie charakteryzuje się dużą skutecznością ochrony przegród budowlanych przed

zawilgoceniem, ponieważ nawiew ciepłego powietrza wzdłuż okien przeciwdziała wykraplaniu się pary wodnej nawet przy niskich wartościach temperatury powietrza zewnętrznego. Szyny nawiewne zapobiegają opadaniu zimnego powietrza i powstawaniu przeciągów [116]. Jednak opisany sposób rozdziału powietrza zaleca się stosować jedynie w małych i średnich obiektach. W dużych halach basenowych nawiew kurtynowy z poziomu posadzki nie jest efektywny, gdyż z reguły nie zapewnia dostatecznej wentylacji strefy przebywania ludzi. Zbyt mała prędkość powietrza we wspomnianej strefie powoduje odczucie duszności i negatywne wrażenia węchowe u osób korzystających z pływalni.

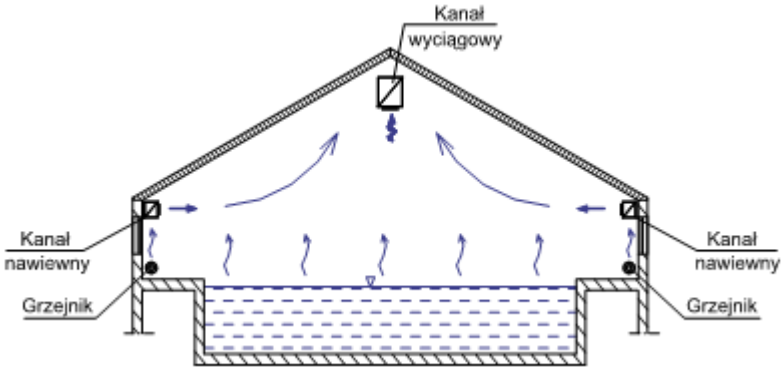


Rys. 5.2 Układ rozdziału powietrza wentylacyjnego – typu dół-góra I

Brak mieszania mas powietrza w strefie nad taflą wody skutkuje wzrostem stężenia szkodliwych dla zdrowia zanieczyszczeń głównie THM-ów. Dlatego istotnym jest uzupełnienie powyższego systemu wentylacji w układ zapewniający usunięcie szkodliwych zanieczyszczeń oraz dostarczenie świeżego powietrza do strefy przebywania ludzi.

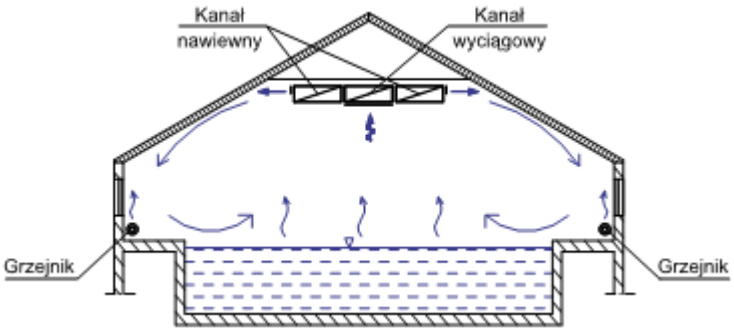
W obiektach o niskim zagrożeniu zawilgocenia ścian, czyli charakteryzujących się dużą izolacyjnością przegród budowlanych i małą powierzchnią okien, stosuje się organizację powietrza przedstawioną na Rys. 5.3. Przedstawione rozwiązanie opiera się na nawiewie powietrza na wysokości ok. 1m bezpośrednio do strefy przebywania ludzi i wywiewie centralnym spod stropu pomieszczenia. Zaletą takiego układu jest efektywne wentylowanie strefy, w której znajdują się użytkownicy przebywający wokół niecki basenu (ratownicy, trenerzy oraz osoby wchodzące i wychodzące z basenu). Natomiast wadą tego systemu jest możliwość powstawania przeciągów w pobliżu nawiewników oraz ryzyko lokalnego przekraczania prędkości w strefie wokół niecki. Z przeprowadzanych badań i pomiarów wynika, że wyżej opisana organizacja wymiany powietrza jest najskuteczniejsza w niskich halach przykrytych dwuspadowym dachem [36]. Przy wysokich halach strefa nad taflą wody

jest wentylowana w niskim stopniu, co skutkuje niedotrzymaniem parametrów komfortu cieplnego i kumulacją zanieczyszczeń gazowych (m.in. THM-ów).



Rys. 5.3 Układ wentylacyjny z nawiewem do strefy przebywania ludzi i wywiewem centralnym pod stropem – typ dół-góra II [36]

Kolejnym sposobem rozmieszczenia kanałów wentylacyjnych w hali basenowej jest umieszczenie ich razem pod stropem. Kanał wyciągowy usytuowany jest w środku między dwoma kanałami nawiewnymi, opisany układ ilustruje Rys. 5.4**.**



Rys. 5.4 Układ wentylacyjny z nawiewem i wywiewem usytuowanymi pod stropem – typ góra-góra [36]

Przedstawiony układ projektowany jest w małych i średnich halach basenowych, głownie z uwagi na małą ilość miejsca jaką zajmuje w pomieszczeniu. Taki rozdział powietrza zapewnia skuteczną wentylację strefy podsufitowej oraz znaczne uproszczenie instalacji nawiewno-wywiewnej w stosunku do innych rozwiązań. Jednak uzyskanie równomiernego pola prędkości w strefie przebywania ludzi oraz kurtyny powietrznej chroniącej przegrody budowlane przed zawilgoceniem można uzyskać jedynie przy precyzyjnym doborze

nawiewników. Powyższy układ wentylacyjny nie zapewnia skutecznej wentylacji strefy nad taflą, gdyż jedynie nieznaczna część świeżego powietrza dociera w ten obszar.

We wszystkich przedstawionych sposobach rozdziału powietrza, instalacja wywiewna umieszczona jest pod stropem, zaś instalacja nawiewna jest usytuowana w 3 różnych miejscach. Zróżnicowane propozycje usytuowania instalacji nawiewnej wiążą się z próbą jak najlepszego dopasowania dla danego obiektu, ponieważ nawiew powinien zapewniać ruch powietrza w każdym miejscu hali oraz jego wymianę. Z punktu widzenia efektywności występujących zjawisk związanych z przemieszczaniem oraz wymianą powietrza i ciepła, to właśnie nawiew jest bardziej istotny od wywiewu. Na uniknięcie zjawiska wykraplania się pary wodnej i przeciągu większy wpływ mają odpowiednio dobrane i rozmieszczone nawiewniki niż kratki wywiewne.

Z opisu przedstawionych różnych układów wentylacyjnych wynika, że na efektywność wentylacji hali basenowej ma wpływ nie tylko właściwy dobór rozdziału powietrza, ale również architektura budynku. Dlatego też, korzystnym jest jeśli architekt i instalator wspólnie pracują nad bryłą i instalacją grzewczo-wentylacyjną w budynku.

Analizując wszystkie rozpatrywane sposoby rozdziału powietrza w hali basenowej trudno wybrać jedno właściwe rozwiązanie. Oznacza to, że dla każdej krytej pływalni należy rozważyć wszystkie możliwości i dokonać indywidualnego wyboru systemu wentylacyjnego uwzględniającego odmienne potrzeby każdej ze stref pomieszczenia.

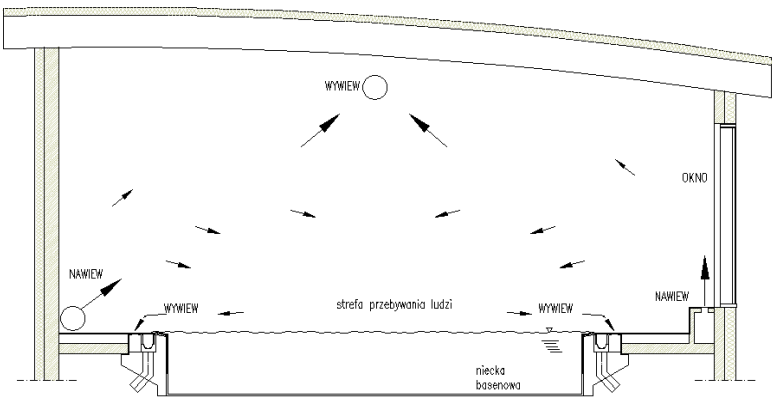
5.2 Możliwości korekty układów wentylacyjnych dla redukcji stężenia THM-ów w powietrzu

Emitowane z wody zanieczyszczenia (m.in. THM-y) kumulują się tuż nad taflą wody, więc w celu ich redukcji należałoby rozważyć taki układ wentylacyjny, który wentylował by właśnie tą strefę. Głównymi ograniczeniami dla tego rodzaju rozwiązań mogą być: stosunkowo duża powierzchnia tafli wody oraz konieczność zachowania dopuszczalnej prędkości powietrza.

Jednym z rozwiązań technicznych jest usytuowanie dodatkowych kanałów wywiewnych w pobliżu niecki basenowej np. wzdłuż kanałów przelewowych. Kratki wyciągowe zlokalizowane na poziomie posadzki odciągają powietrze zalegające nad taflą wody, robiąc miejsce na napływ świeżego, czystego powietrza. Dla usprawnienia ruchu

powietrza w strefie przebywania ludzi można również usytuować dodatkowy kanał nawiewny, a wywiew zlokalizować w centralnej części pomieszczenia. Rozwiązanie zaprezentowano na Rys. 5.5.

Trudnością projektową przy lokalizacji dodatkowego kanału wywiewnego na poziomie posadzki jest ryzyko zalania go wodą oraz dobór prędkości wyciąganego powietrza. Od wartości prędkości powietrza zależy obszar wywiewu, intensywność emisji wilgoci z lustra wody oraz ryzyko odczucia przeciągu przez pływających.

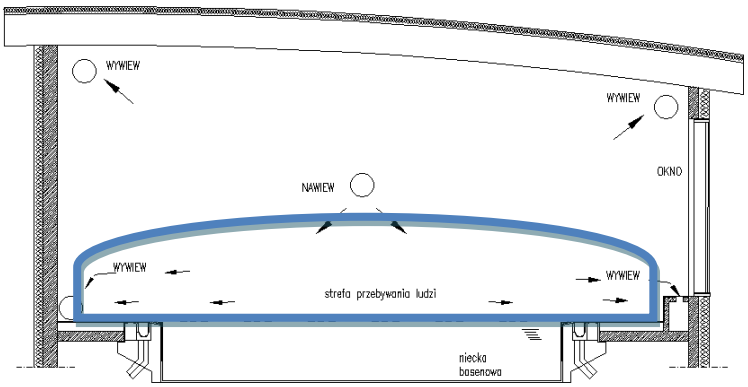


Rys. 5.5 Układ rozdziału powietrza wentylacyjnego z nawiewem po obu stronach niecki, wywiewem centralnym i dodatkowym wywiewem wzdłuż niecki basenowej – typ dół-góra III

Zbyt niska wartość prędkości wywiewanego powietrza może ograniczyć zasięg strumienia jedynie do skrajnych torów basenu, natomiast zbyt duża prędkość może prowadzić do intensyfikacji emisji wilgoci z lustra wody oraz ryzyka odczucia przeciągu.

Zwiększone parowanie wiąże się ze wzrostem wilgotności powietrza, a co za tym idzie pogorszeniem komfortu wilgotnościowego użytkowników oraz koniecznością uzupełniania wody w niecce, co rzutuje na zwiększenie kosztów eksploatacyjnych basenu. Polskie przepisy dopuszczają maksymalną prędkością powietrza w strefie przebywania ludzi na poziomie 0,4m/s, ale dla basenów zalecana jest wartość niższa - na poziomie 0,15÷0,30 m/s [43]. Ograniczenie wynika z charakteru obiektu basenowego, gdzie użytkownicy mają zwilżoną skórę i są bardziej podatni na odczucie zjawiska przeciągu w stosunku do ubranych pracowników w biurze.

Kolejnym rozwiązaniem rozdziału powietrza pozwalającym na redukcję THM-ów znad tafli może być zmodyfikowany układ nawiewno-wywiewny góra-dół. (Rys. 5.6)

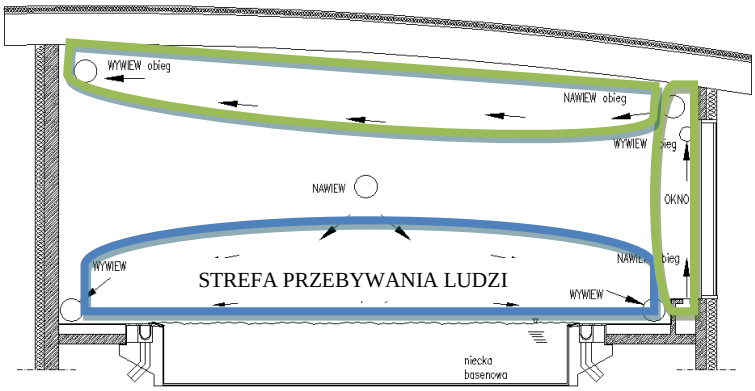


Rys. 5.6 Układ rozdziału powietrza wentylacyjnego z obniżonym nawiewem – typ góra-dół I

Obniżenie kanału nawiewnego pozwala na dystrybucję świeżego powietrza do strefy przebywania, a dodanie obniżonego kanału wywiewnego umożliwia odciąganie wilgotnego, zanieczyszczonego powietrza. Przedstawiony model nawiewno-wywiewny zakłada mieszanie nawiewanego suchego i ciepłego powietrza z wilgotnym i chłodniejszym znajdującym się nad taflą, które następnie będzie wyciągane kanałem wywiewnym. Dodatkowo takie rozwiązanie, przy odpowiednim doborze parametrów, zapobiega rozprzestrzenianiu się zanieczyszczonego i wilgotnego powietrza po całej kubaturze hali basenowej.

Zaproponowany układ rozdziału powietrza skupia się głównie na skutecznej wentylacji strefy przebywania ludzi, jednak przy projektowaniu systemu wentylacyjnego dla hali basenowej należy mieć na uwadze również zabezpieczenie konstrukcji budynku przed zawilgoceniem i stratami ciepła. Można to zrealizować przez zastosowanie materiałów budowlanych o niskich współczynnikach przenikania ciepła (ściany, okna, dach). Jednak w warunkach zimowych wysoka izolacyjność przegród budowlanych może być niewystarczająca dla zabezpieczenia przegród budowlanych przed wykraplaniem wilgoci na ich powierzchni. Skutecznym uzupełnieniem dla opisywanego rozdziału powietrza góra-dół może być strefowy system powietrza obiegowego, którego funkcją byłoby zabezpieczenie przegród zewnętrznych przed zawilgoceniem. Rozdział powietrza w hali basenowej wg powyższego opisu ilustruje Rys. 5.7. Powietrze obiegowe, dla oszczędności energii na potrzeby wentylacyjno-grzewcze, mogłoby być poddawane obróbce w uproszczonym układzie instalacyjnym wyposażonym w osuszacz i nagrzewnicę. Przedstawione rozwiązanie byłoby korzystne w szczególności w okresie zimowym. Parametry powietrza obiegowego byłyby dobierane kierując się utrzymaniem w strefie przyokiennej i podsufitowej temperatury wyższej od temperatury punktu rosy oraz właściwej dla utrzymania zadanej temperatury w hali basenowej. Strumień obiegowy mógłby przejąć funkcję grzewczą, wtedy główny

strumień nawiewny przygotowywany w centrali wentylacyjnej mógłby być zredukowany, a jego parametry dobrane jedynie pod kątem zapewnienia komfortu cieplnego i redukcji zanieczyszczeń (m.in. THM-ów) w strefie przebywania ludzi.



Rys. 5.7 Układ rozdziału powietrza wentylacyjnego ze strefowym systemem obiegowym – typ góra-dół II

Strefowy układ wentylacyjny w hali basenowej charakteryzuje się możliwością:

- utrzymania zadanych parametrów powietrza w różnych strefach hali basenowej,
- usunięcia zanieczyszczeń gazowych (THM i innych) znad tafli wody oraz brak ich rozprzestrzeniania do całej kubatury hali basenowej,
- redukcji zużycia energii na cele grzewczo-wentylacyjne nawet do 30-40% [87].

Podsumowanie wszystkich opisanych wariantów zestawiono w Tab. 5.1. Z przedstawionej analizy wynika, że układami spełniającymi kryterium usuwania THM-ów ze strefy przebywania ludzi są: dół-góra III, góra-dół I, góra-dół II. Jednak układ dół-góra III nie spełnia równie ważnego kryterium utrzymania optymalnych parametrów w strefie przebywania ludzi (zbyt duża prędkość powietrza), a układ góra-dół I nie zapewnia ochrony przegród budowlanych przed zawilgoceniem. Rekomendowanym układem został układ góra-dół II, który spełnia wszystkie kryteria porównawcze. Jest to strefowy układ wentylacyjny, który zapewnia optymalne parametry powietrza w strefie przebywania ludzi, chroni przegrody budowlane przed zawilgoceniem oraz daje możliwość redukcji trihalometanów ze strefy gdzie przebywają użytkownicy.

Tab. 5.1 Zestawienie różnych typów układów wentylacyjnych projektowanych dla hal basenowych

Kryterium	Rodzaj układu wentylacyjnego					
	dół-góra I	dół-góra II	dół-góra III	góra-góra	góra-dół I	góra-dół II
Basen mały	+	+	+	+	+	+
Basen średni	+	–	+	+	+	+
Basen duży	–	–	+	–	–	+
Redukcja THM-ów w SPL	–	–	+	–	+	+
Optymalne warunki w SPL	–	–	–	–	+	+
Ochrona przegród zewnętrznych	+	+	+	+	–	+

gdzie:
SPL – strefa przebywania ludzi,
„+” – układ spełniający dane kryterium,
„–” – układ nie spełniający danego kryterium.

W kolejnych rozdziałach pracy przedstawiono wyniki badań doświadczalnych przeprowadzonych w modelowym pomieszczeniu basenowym. Pomiary parametrów powietrza zostały wykonane dla wybranych wariantów nawiewno-wywiewnych, włącznie z rekomendowanym układem góra-dół II.

6. Badania doświadczalne proponowanych rozwiązań w basenie modelowym

6.1 Postawienie problemu

Rozważania teoretyczne dotyczące przepływów powietrza w pomieszczeniu nie oddają pełnego obrazu zachodzących zjawisk. Powszechną praktyką przy prowadzeniu prac nad optymalizacją procesów jest prowadzenie badań pomiarowych w pomieszczeniach badawczych. Najbardziej wiarygodne wyniki uzyskuje się podczas wykonywania pomiarów w pomieszczeniu w skali 1:1. Z uwagi, że hale basenowe są obiektami z grupy wielkokubaturowych, wybudowanie takiego pomieszczenia dla celów badawczych wymagałoby bardzo wysokich nakładów inwestycyjnych. Dlatego też, w ramach pracy przeprowadzono badania doświadczalne w zmniejszonym w skali pomieszczeniu modelowym.

Obiekt badawczy o wymiarach: długość 9,9 m, szerokość 4,5 m, wysokość 2,4 m został zaprojektowany jako model typowego basenu przyszkolnego w skali 1:5 (Rys. 6.1). Wyposażony został w nieckę basenową o wymiarach 5x2,5 m (też zachowano skalę 1:5 typowej niecki 25x12,5 m) ze stacją pilotową uzdatniania wody oraz wielowariantową instalację wentylacji mechanicznej.

Opisane wyposażenie pozwoliło odtworzyć warunki klimatyczne analogiczne do panujących w typowym obiekcie basenowym. Podczas badań doświadczalnych przeprowadzono kilkadziesiąt serii pomiarowych w różnych wariantach badawczych w celu identyfikacji optymalnego doboru:

- instalacji uzdatniania wody, oraz
- instalacji wentylacji mechanicznej.

W zakresie optymalizacji systemu uzdatniania wody kryterium wyboru stanowił efekt oczyszczenia wody w niecce basenowej polegający na utrzymaniu parametrów wody zgodnych z obowiązującymi przepisami (pomiar poziom stężenia chloru związanego, chloru wolnego, chloroformu, wartość pH wody i potencjału redox).

Podczas prób pomiarowych badano dwa warianty stacji uzdatniania wody: standardowy (wykorzystujący w procesie filtracji - filtr wielowarstwowy) oraz standardowy z dodatkowym modułem filtracyjnym wypełnionym żywicą jonowymienną.

W zakresie optymalizacji systemu wentylacyjnego jako kryterium wyboru przyjęto następujące wymagania:

- utrzymanie komfortu cieplnego w strefie przebywania ludzi (pomiar wartość temperatury powietrza, wilgotności względnej, prędkości przepływu powietrza),
- stopień redukcji THM-ów znad tafli wody (pomiar stężenia zanieczyszczeń),
- zabezpieczenie przegród budowlanych przed zawilgoceniem (pomiar temperatury powietrza w obszarze przyokiennym i podsufitowym).

Podczas prób pomiarowych badano 5 różnych wariantów nawiewno-wywiewnych. W pracy zostaną omówione 3 układy wentylacyjne (typ dół-góra; typ dół-góra z odciągami brzegowymi; typ góra-dół ze strefowym systemem obiegowym powietrza wewnętrznego).



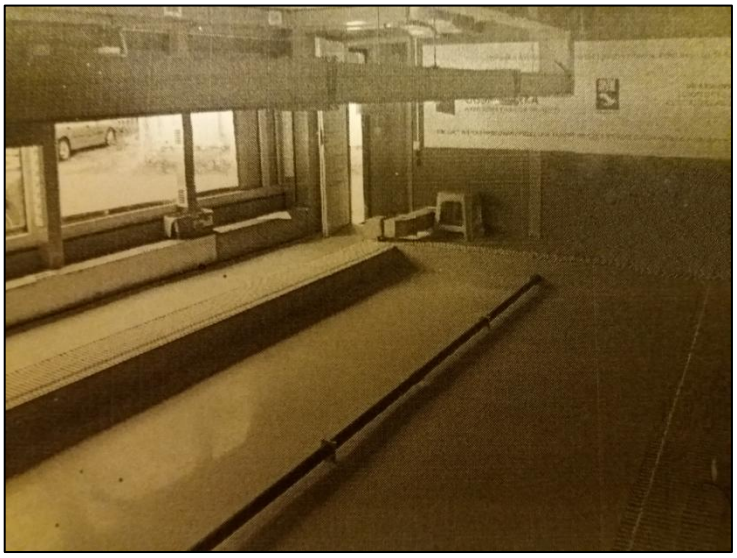
Rys. 6.1 Zdjęcie obiektu modelowego, w którym zostały przeprowadzone badania doświadczalne

Instalacja doświadczalna obejmująca system wodny i system powietrzny została zaprojektowana i wykonana zgodnie z przepisami prawa budowlanego. Wszystkie zastosowane elementy instalacji doświadczalnej (kanały i kratki wentylacyjne, centrala wentylacyjna, osuszacz powietrza, rury wodne, filtry wodne, automatyka, itp.) posiadają wymagane atesty. Ponadto, instalacja doświadczalna została zatwierdzona przez inspektora branży sanitarnej, w celu zapewnienia warunków pracy instalacji jak najbardziej zbliżonej do instalacji rzeczywistej. Pozwoliło to na wyeliminowanie błędów wykonawczych, które mogłyby mieć negatywny wpływ na uzyskiwane wyniki pomiarów.

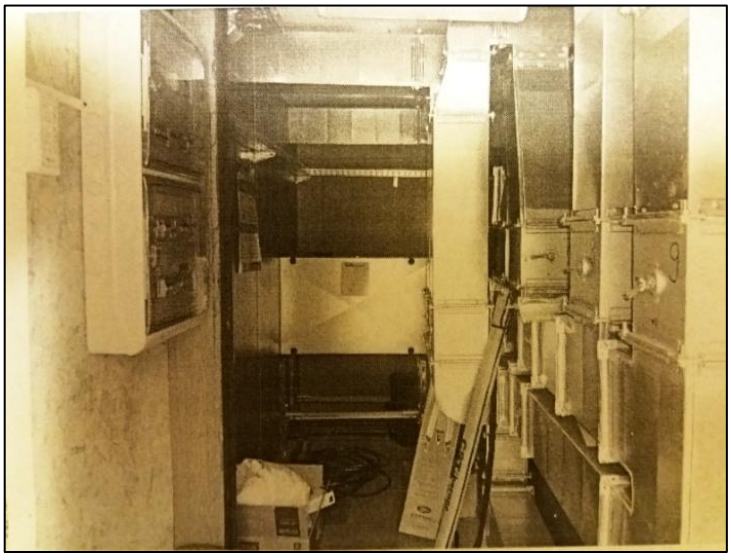
Materiały budowlane wykorzystane do budowy pomieszczenia modelowego zostały dobrane z dbałością, aby przegrody budowlane charakteryzowały się współczynnikami przenikania ciepła w zakresie dopuszczalnym przez obowiązujące przepisy [131].

Obiekt modelowy, analogicznie jak obiekty rzeczywiste, został podzielony na trzy pomieszczenia:

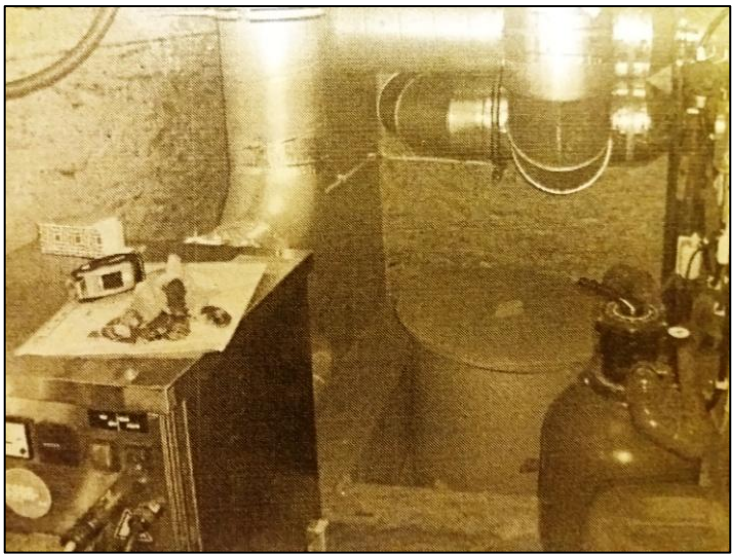
- basenowe, w którym znajduje się niecka basenowa i kanały wentylacyjne z kratkami nawiewnymi i wywiewnymi, (Rys. 6.2)
- wentylatorowe, w którym znajduje się zespół grzewczo-wentylacyjny do obróbki powietrza wraz z przepustnicami i systemem automatyki. (Rys. 6.3)
- technologiczne, w którym znajduje się stacja uzdatniania wody, (Rys. 6.4)



Rys. 6.2 Obiekt modelowy – zdjęcie pomieszczenia basenowego

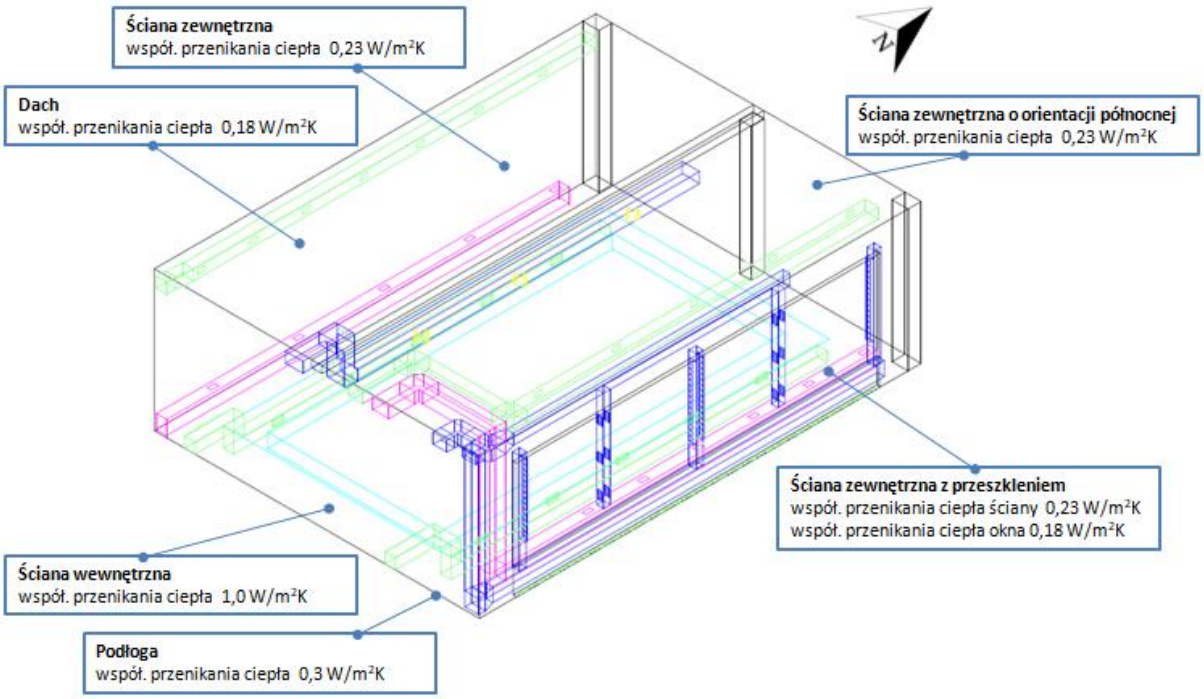


Rys. 6.3 Obiekt modelowy – zdjęcie pomieszczenia wentylatorowego



Rys. 6.4 Obiekt modelowy – zdjęcie pomieszczenia technologicznego

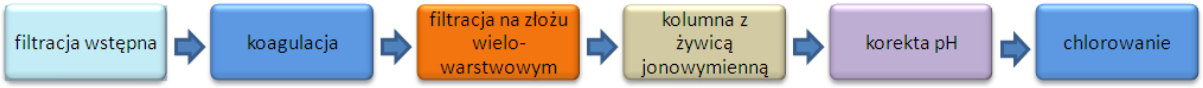
Pomiary wykonywane w ramach pracy prowadzone były w badawczym pomieszczeniu basenowym, którego schemat wraz z wielowariantowym systemem wentylacyjnym przedstawiono ilustruje Rys. 6.5.



Rys. 6.5 Schemat modelowego pomieszczenia basenowego (wydruk z programu AutoCad)

6.2 Doświadczalna instalacja uzdatniania wody basenowej

Doświadczalna instalacja uzdatniania wody została zaprojektowana kierując się bezpieczeństwem sanitarno-higienicznym (wynikającym z zapisów [130]) oraz możliwością redukcji prekursorów THM-ów w wodzie. W związku z tym, powszechnie stosowany standardowy układ technologiczny uzupełniono o dodatkowy moduł filtracyjny. Po filtracji na złożu wielowarstwowym dodano proces wymiany jonowej na żywicy jonowymiennej. Jest to moduł, który został dodany do układu technologicznego na Basenie II (wyniki badań zostały szerzej opisane w Rozdziale 4.4).
Badania przeprowadzono na układzie technologicznym jak na Rys. 6.6.



Rys. 6.6 Układ technologiczny doświadczalnej instalacji uzdatniania wody basenowej

Proces wymiany jonowej jest powszechnie znany w technice uzdatniania wody w zastosowaniach przemysłowych, gdzie wykorzystuje się go do zmiękczania i demineralizacji wody [70]. Może być również z powodzeniem wykorzystany przy użyciu żywic jonowymiennych, które wykazują właściwości usuwania rozpuszczonego węgla organicznego. Proces wymiany jonowej w instalacji doświadczalnej był realizowany w kolumnie wypełnionej wymieniaczem jonowym. Proces bazuje na wychwytywaniu związków organicznych, które odczepiając proton (wodór) przechodzą w formę jonową. Żywica jonowymienna może zostać poddana procesie regeneracji np. roztworem solanki. Zapewnia to możliwość jej ponownego użycia, bez konieczności okresowej jej wymiany.

Doświadczalna stacja uzdatniania wody została zaprojektowana dla niecki basenowej o wymiarach 5x2,5 m, przy założeniach:

- woda krąży w obiegu zamkniętym z czynnym przelewem, odprowadzającym wodę do zbiornika przelewowego,
- wlot wody realizowany jest przez dysze napływowe denne zlokalizowane w dnie niecki,
- niecka wyposażona jest w kanał spustowy, ale pełen obieg realizowany jest przez kanały przelewowe,

- dozowanie chemikaliów odbywa się pompkami dozującymi w trybie automatycznym, w zależności od wskazań urządzeń pomiarowych,
- chlorowanie wody realizowane jest roztworem podchlorynu sodu,
- korekta pH wody realizowana jest roztworem kwasu siarkowego,
- koagulacja wody przed filtrem ze złożem wielowarstwowym realizowana jest polichlorkiem glinu,
- woda podgrzewana jest w nagrzewnicy do zadanej temperatury przed wprowadzeniem do niecki,
- płukanie filtra ze złożem wielowarstwowym wykonywane jest wodą ze zbiornika przelewowego,
- regeneracja żywicy jonowymiennej realizowana jest roztworem regeneracyjnym (10% NaCl + 2% NaOH).

Podstawowe parametry stacji pilotowej zestawiono w tabeli Tab. 6.1.

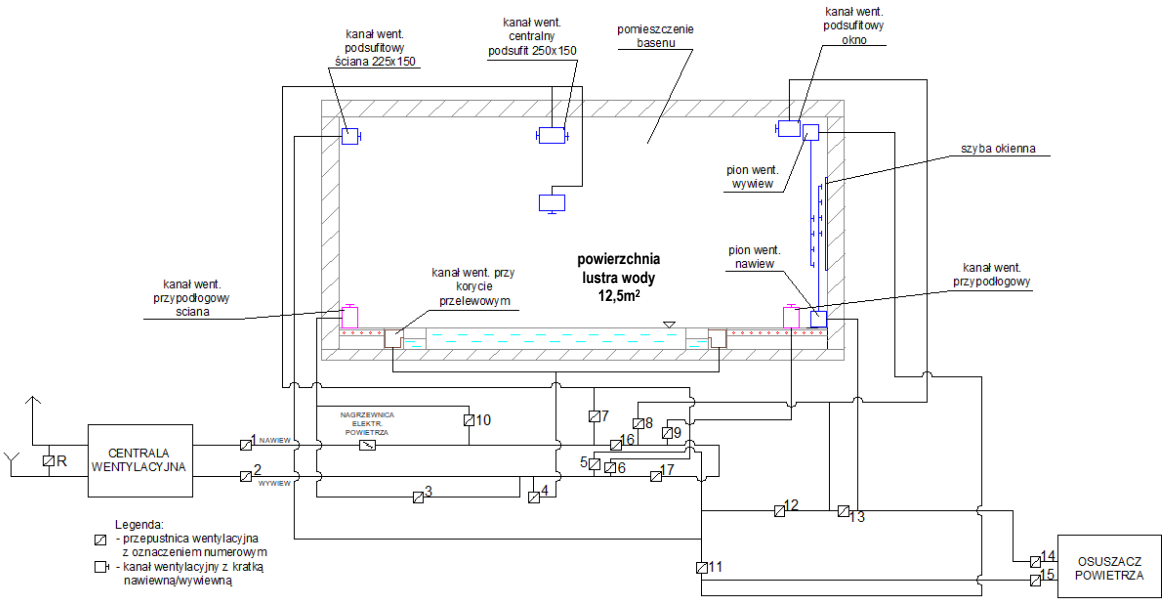
Tab. 6.1 Podstawowe parametry technologiczne doświadczalnej stacji uzdatniania wody

Parametr	Wartość
prędkość przepływu przez filtr ze złożem wielowarstwowym	20 m/h
natężenie przepływu przez stację uzdatniania wody	1,25 m^3/h
czas kontaktu w kolumnie z żywicą jonowymienną	10 min
roztwór regeneracyjny żywicy jonowymiennej	10% NaCl + 2% NaOH
częstotliwość regeneracji złoża żywicy jonowymiennej	1 raz na 2 tyg. przy pracy ciągłej
wymiary zbiornika przelewowego (wyk. z PP)	R=0,75 m; H=0,60 m

6.3 Doświadczalna instalacja wentylacji mechanicznej

Doświadczalna instalacja wentylacji mechanicznej została zaprojektowana pod kątem możliwości przeprowadzenia pomiarów w różnych wariantach pracy instalacji. Poniżej przedstawiono schemat technologiczny instalacji (Rys. 6.7). Zastosowanie przepustnic powietrza na kanałach nawiewnych i wywiewnych pozwoliło na dowolną konfigurację

przepływów powietrza. Kanały wentylacyjne zostały zaprojektowane w kilku strefach: podsufitowej, przyokiennej, przypodłogowej.



Rys. 6.7 Schemat technologiczny doświadczalnej instalacji wentylacji w pomieszczeniu modelowym

Powietrze wentylacyjne podlegało obróbce w centrali wentylacyjnej (o max. wydajności 800 m^3/h) i/lub w osuszaczu (o wydajności osuszania 2,1kg/h) w zależności od przyjętego wariantu doświadczalnego. Dodatkowo powietrze mogło być podgrzane, w nagrzewnicy kanałowej, do zadanej temperatury przed podaniem do kanałów nawiewnych. Stopień recyrkulacji powietrza wentylacyjnego również podlegał regulacji w zakresie 0÷100%.

Centrala wentylacyjna z układem kanałów dała możliwość sprawdzenia różnych wariantów rozdziału powietrza w pomieszczeniu basenowym. Opis badanych wariantów szerzej przedstawiono w Rozdziale 5.5. Celem prowadzenia pomiarów było wytypowanie najkorzystniejszego układu nawiewno-wywiewnego zapewniającego komfort cieplno-wilgotnościowy, bezpieczeństwo konstrukcji oraz redukcję stężenia ubocznych produktów dezynfekcji (m.in. THM-ów) w strefie przebywania ludzi (bezpośrednio nad taflą wody i na brzegu wokół niecki).

6.4 Zakres badań

Prace badawcze zostały przeprowadzone w zakresie badania skuteczności pracy instalacji wodnej oraz powietrznej. Przed przystąpieniem do prowadzenia prac badawczych na instalacjach doświadczalnych przeprowadzono rozruch technologiczny. Testowanie instalacji trwało dwa miesiące i miało na celu wykluczenie ewentualnych błędów projektowych i wykonawczych oraz stanowiło okres rozruchowy dla urządzeń (filtry wodne, centrala wentylacyjna itp.). W okresie rozruchowym sprawdzono również szczelność pomieszczenia modelowego poprzez wykonanie testów ciśnieniowych.

6.4.1 Badania na doświadczalnej instalacji uzdatniania wody basenowej

Doświadczalna stacja uzdatniania wody basenowej obejmuje procesy:

- filtracji wstępnej,
- koagulacji,
- filtracji na złożu wielowarstwowym,
- wymiany jonowej,
- koagulacji,
- chlorowania.

Parametry wody kontrolowane na instalacji uzdatniania wody zestawiono w Tab. 6.2

Pomiar temperatury wody dokonywano za pomocą sondy zanurzanej w połowie długości niecki, w odległości 1m od brzegu. Miejsce pomiaru wybrano jako reprezentatywne po przeprowadzeniu serii pomiarów porównawczych.

Próbki wody do badania poziomu wartości pH, chloru związanego, chloru wolnego pobierano z punktu poboru zlokalizowanego na instalacji obiegowej wody basenowej. Próbki pobierano do specjalnych fiolek i po dodaniu do nich odczynnika, określonego dla badanego parametru, umieszczano w fotometrze. Chlor całkowity jest sumą chloru wolnego i związanego, więc ilość chloru związanego obliczano z różnicy zmierzonej wartości chloru całkowitego i wolnego.

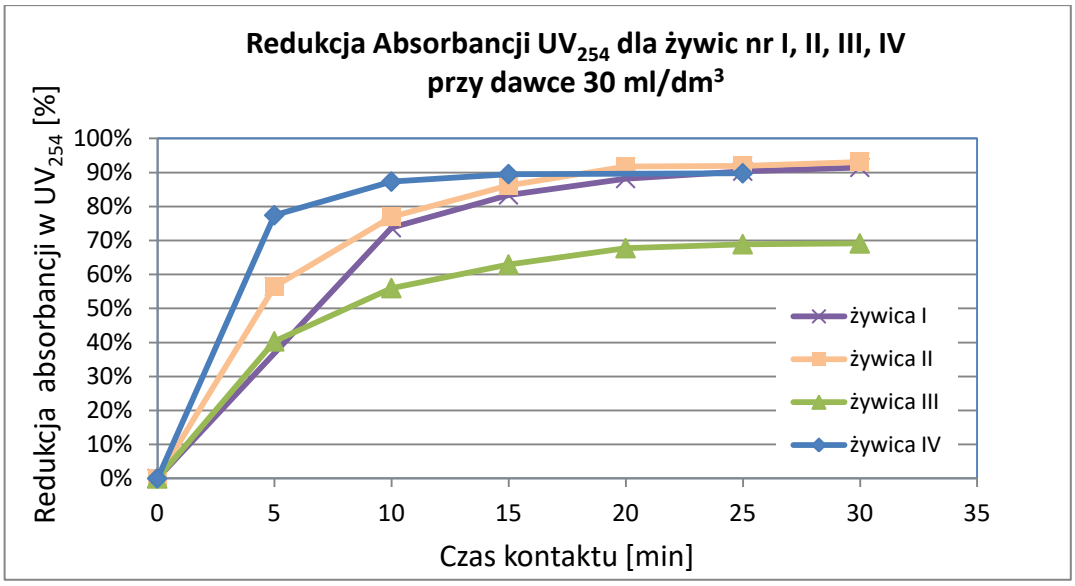
Próbki wody do badania zawartości stężenia sumy THM-ów pobierano w 2 punktach wzdłuż linii brzegowej na głębokości 0,2 m poniżej tafli. Próbki pobierano do butelek pomiarowych zadanych tiosiarczanem sodu (przygotowanych przez laboratorium). Analizy

chromatografii gazowej były wykonywane metodą GS-MS (gas chromatography – mass spectrometry)

Tab. 6.2 Parametry mierzone na doświadczalnej stacji uzdatniania wody wraz z przyrządami pomiarowymi

Parametr	Jednostki	Przyrząd pomiarowy	Zakres pomiarowy	Dokładność pomiaru	Częstotliwość pomiarów
PODSTAWOWE (wykonywane na miejscu)					
temp. wody	^{0}C	termometr elektroniczny z sondą (Stalgast)	-50 ÷ 300	± 0,1	1 raz na godzinę
pH	–	fotometr pooltest SPH3 (Palintest)	6,5 ÷ 8,4	± 2% zakresu pomiarowego	1 raz na godzinę
chlor wolny	mg/dm^3	fotometr pooltest SPH3 (Palintest)	0,01 ÷ 5,0	± 2% zakresu pomiarowego	1 raz na godzinę
chlor związany	mg/dm^3	fotometr pooltest SPH3 (Palintest)	0,01 ÷ 5,0	± 2% zakresu pomiarowego	1 raz na godzinę
DODATKOWE (zlecane do laboratorium)					
∑THM	mg/dm^3	chromatograf gazowy GC-MS (Agilent 7820)	1÷250	niepewność metody max 20 % dokładność metody: 100%	zgodnie ze scenariuszem pomiarów

Dodatkowym modułem stacji uzdatniania wody jest kolumna z żywicą jonowymienną. W celu wytypowania właściwego rodzaju żywicy, charakteryzującej się wysoką efektywnością usuwania materii organicznej, przeprowadzono 5 serii testów zlewkowych (jar test). Do badań wykorzystano wodę basenową pobraną ze zbiornika przelewowego na jednym z warszawskich basenów. Badaniu poddano 4 rodzaje żywic jonowymiennych o różnych parametrach. W wyniku analizy porównawczej uzyskanych wartości redukcji OWO (ogólnego węgla organicznego) oraz redukcji absorbancji w UV_{254} (Rys. 6.8) dla próbek wody po kontakcie z żywicą, wybrano żywicę IV. Wybrana żywica wykazuje najwyższy stopień obniżenia absorbancji w nadfiolecie (80-90%) w czasie kontaktu, na który została zaprojektowana stacja pilotowa (10 min). Wskaźnik absorbancji w nadfiolecie (UV_{254}) wskazuje na zawartość związków organicznych w wodzie, które są prekursorami ubocznych produktów dezynfekcji (m.in. THM-ów).



Rys. 6.8 Analiza porównawcza skuteczności usuwania substancji organicznych z wody dla żywic I, II, III, IV

Oznaczenia wykonano dla próbek wody surowej i wody po kontakcie z żywicą, metodą testów kuwetowych przy pomocy spektrofotometru DR2800 firmy Hach. Parametry żywicy wytypowanej do zastosowania w kolumnie z wymieniaczem jonowym w stacji pilotowej zestawiono w Tab. 6.3.

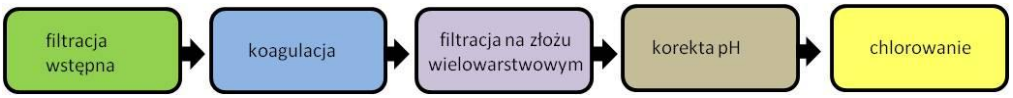
Tab. 6.3 Parametry wybranej żywicy jonowymiennej (żywica IV)

Parametry żywicy IV	
Struktura polimeru	Makroporowaty poliakryl
Forma fizyczna	Białe, nieprzezroczyste, sferyczne ziarna
Zawartość wilgoci	66-72%
Zakres wielkości cząstek	0,3 - 1,2 mm
Ciężar nasypowy, forma Cl^-	680 - 715 g/l
Ciężar właściwy, wilgotna forma Cl^-	1,08 g/ml
Całkowita pojemność wymienna, forma Cl^-	0,8 val/l min
Maksymalna temperatura pracy	80^0C
Regeneracja	
Przepływ	2 OZ/h
Medium	Solanka (40 - 50^0C) 150-250g/l

gdzie: OZ – objętość złoża

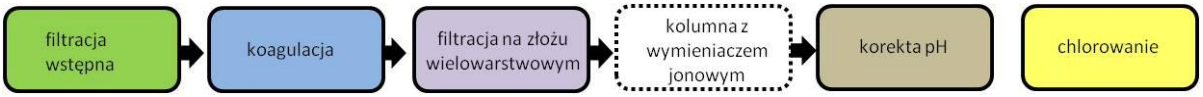
Pomiary parametrów wody przeprowadzano w pomieszczeniu modelowym przy pracującej instalacji uzdatniania wody oraz instalacji wentylacji nawiewno-wywiewnej. Badania doświadczalne zostały wykonane dla dwóch układów technologicznych systemu uzdatniania wody:

1. Układ klasyczny (typ I) obejmujący procesy: filtracji wstępnej, koagulacji, filtracji na złożu wielowarstwowym, korekty pH, chlorowania (Rys. 6.9).



Rys. 6.9 Układ technologiczny stacji pilotowej (typ I)

2. Układ zmodyfikowany (typ II) obejmujący procesy: filtracji wstępnej, koagulacji, filtracji na złożu wielowarstwowym, wymiany jonowej, korekty pH, chlorowania (Rys. 6.10).



Rys. 6.10 Układ technologiczny stacji pilotowej (typ II)

Badania doświadczalne przeprowadzono w 5 seriach, oddzielnie dla każdego układu technologicznego typ I i typ II. Dla zapewnienia jakości wody zbliżonej jak na basenie publicznym do układu uzdatniania wody dozowano wodę basenową pobraną ze zbiornika przelewowego z pobliskiego basenu publicznego.

Zestawienie otrzymanych wyników pomiarów uzyskanych podczas pomiarów na stacji pilotowej przy układzie technologicznym typu I i typu II prezentuje Tab. 6.4. W tabeli podsumowano wyniki pomiarów uzyskanych we wszystkich seriach pomiarowych.

Parametry podstawowe (temperatura powietrza, temperatura wody, odczyn pH, chlor wolny, chlor związany) były mierzone z częstotliwością raz na godzinę. Pobór próbek do pomiaru parametru dodatkowego (stężenie ∑THM-ów) był wykonywany co 4 godziny.

Tab. 6.4 Podsumowanie zmierzonych parametrów dla układów uzdatniania wody typ I i typ II

Mierzony parametr	Jedn.	Zakres mierzonych parametrów dla układu typ I	Wartość średnia parametru dla układu typ I	Zakres mierzonych parametrów dla układu typ II	Wartość średnia parametru dla układu typ I	Zakresy zalecane
temperatura powietrza nad taflą wody	^{0}C	(29,5÷30,5)	30,0	29,5÷30,5	30,0	26÷34 [9] 28 [39] 30÷34 [142] 24÷29[124]
temperatura wody	^{0}C	27,9÷28,1	28,0	27,9÷28,1	28,0	26÷30 [9] 26÷28 [46] 24÷26 [39] 24÷28[142] 24÷29 [124]
odczyn pH	-	7,1÷7,2	7,2	7,1÷7,2	7,2	6,5÷7,6 [130]
chlor związany	mg/dm^3	0,30÷0,55	0,41	0,11÷0,20	0,18	< 0,3 [130]
ΣTHM	mg/dm^3	0,08÷0,15	0,11	0,05÷0,08	0,05	< 0,1 [130]

Wyniki uzyskanych pomiarów wskazują na znaczną różnicę w efektywności oczyszczania wody między dwoma badanymi układami uzdatniania wody. Dla układu typu I uzyskano wartości średnie parametrów chloru związanego (0,41 mg/dm^3) i sumy THM-ów (0,11 mg/dm^3) powyżej dopuszczalnych. Dodatkowy moduł (wymieniacz jonowy) wdrożony w układzie typu II wpłynął korzystnie na efekt oczyszczania wody. Wartości średnie uzyskanych parametry chloru związanego (0,18 mg/dm^3) i sumy THM-ów (0,07 mg/dm^3) spełniają wymogi stawiane w obowiązującym rozporządzeniu [130].

Uzupełnienie standardowego układu uzdatniania wody (typ I) o dodatkowy moduł w postaci kolumny z żywicą jonowymienną pozwala uzyskać lepsze efekty dezynfekcji w porównaniu do samego procesu chlorowania.

6.4.2 Badania na doświadczalnej instalacji wentylacji mechanicznej

Badania doświadczalne zostały przeprowadzone na instalacji wentylacyjnej wyposażonej w liczne przepustnice, kanałowy miernik przepływu powietrza, kanałowy termometr powietrza, kanałowy miernik wilgotności względnej. Dodatkowo w trakcie badań

wykorzystywano 16 przenośnych sond pomiarowych oraz wielofunkcyjny przyrząd pomiarowy do systemów wentylacji współpracujący z sondą wiatraczkową i sondą CO_2.

Tab. 6.5 Parametry powietrza mierzone podczas prac badawczych

Parametr	Jednostki	Metoda pomiaru	Zakres pomiarowy	Dokładność pomiaru	Częstotliwość pomiarów
temperatura	^{0}C	kanałowy termometr powietrza Pt1000	-0÷50	± 0,15	pomiar ciągły w kanale nawiewnym
		Sonda pomiarowa AR235 (Apar)	-30 ÷ 80	± 0,2	pomiar raz na 10 minut
		miernik wielofunkcyjny 435-4 (Testo)	-50 ÷ 150	± 0,2	pojedyncze pomiary kontrolne
wilgotność względna	%	kanałowy czujnik wilgotności (Honeywell)	0 ÷ 100	±3	pomiar ciągły
		Sonda pomiarowa AR235 (Apar)	0 ÷ 100	± 3	pomiar raz na 10 minut
		miernik wielofunkcyjny 435-4 (Testo)	2 ÷ 98	± 2	pojedyncze pomiary kontrolne
prędkość powietrza	m/s	kanałowy przetwornik przepływu powietrza	0 ÷ 20	± 0,2	pomiar ciągły w kanale nawiewnym
		sonda prędkości powietrza z miernikiem (Testo)	0 ÷ 20	± (0,03 + 4% mierzonej wart.)	serie pomiarowe
stężenie CO_2	ppm CO_2	sonda do pomiaru CO_2 z miernikiem (Testo)	0 ÷ 10000	± (150 + 5% mierzonej wart.)	pojedyncze pomiary kontrolne
		rejestrator HT-2000 (Outest)	0 ÷ 9999	± (50 + 5% mierzonej wart.)	pomiar w „teście znacznikowym”

Pomiary parametrów powietrza były wykonywane według zadanych scenariuszy zakładających pracę nawiewną lub wywiewną poszczególnych kanałów wentylacyjnych. Celem pomiarów było wytypowanie najkorzystniejszego układu nawiewno-wywiewnego zapewniającego komfort cieplno-wilgotnościowy, bezpieczeństwo konstrukcji oraz redukcję stężenia ubocznych produktów dezynfekcji (m.in. THM-ów) w strefie przebywania ludzi (bezpośrednio nad taflą wody i na brzegu wokół niecki).

Podczas serii pomiarowych, w celu odwzorowania warunków jak w obiekcie rzeczywistym, w niecce basenowej umieszczano pływającą kulę o masie 60 kg, która generowała zafalowanie tafli wody.

Do oceny stopnia wymiany powietrza w basenowym pomieszczeniu modelowym wykorzystano kryterium efektywności wentylacji.
Kryterium efektywności wentylacji w funkcji temperatury:

$$K_{ef(t)} = \frac{\overline{t_N} - \overline{t_W}}{\overline{t_N} - \overline{t_p}} \tag{5.1}$$

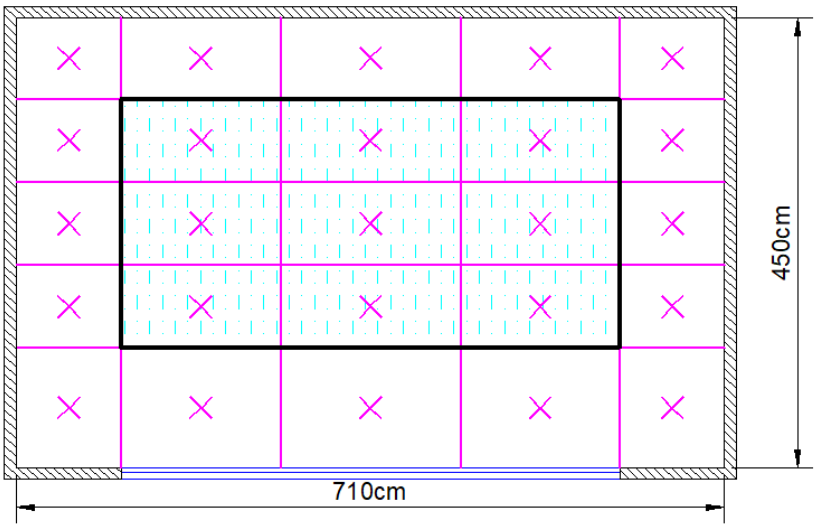
gdzie:
t_N – temperatura powietrza nawiewanego [^{0}C]
t_W – temperatura powietrza wywiewanego [^{0}C]
t_p – temperatura powietrza w pomieszczeniu [^{0}C]

6.5 Parametry cieplno-wilgotnościowe

W ramach pracy przeprowadzono pomiary parametrów cieplno-wilgotnościowych dla 5-ciu wariantów instalacji wentylacyjnej. Poniżej zostanie przedstawiona analiza porównawcza 3-ech wybranych wariantów:

– układ klasyczny (typ dół-góra I) – nawiew wzdłuż okien, wywiew kanałem zlokalizowanym po przeciwnej stronie pod sufitem (jest to rozdział powietrza najczęściej stosowany na pływalniach przyszkolnych),
– układ klasyczny z odciągami brzegowymi (typ dół-góra III),
– układ góra-dół z układem obiegowym (typ góra-dół).

Pomiary parametrów powietrza dla każdego z wariantów prowadzono w okresie letnim oraz zimowym. W celu wykonania pomiarów w określonych punktach, pomieszczenie modelowe podzielono na obszary pomiarowe (Rys. 6.11).

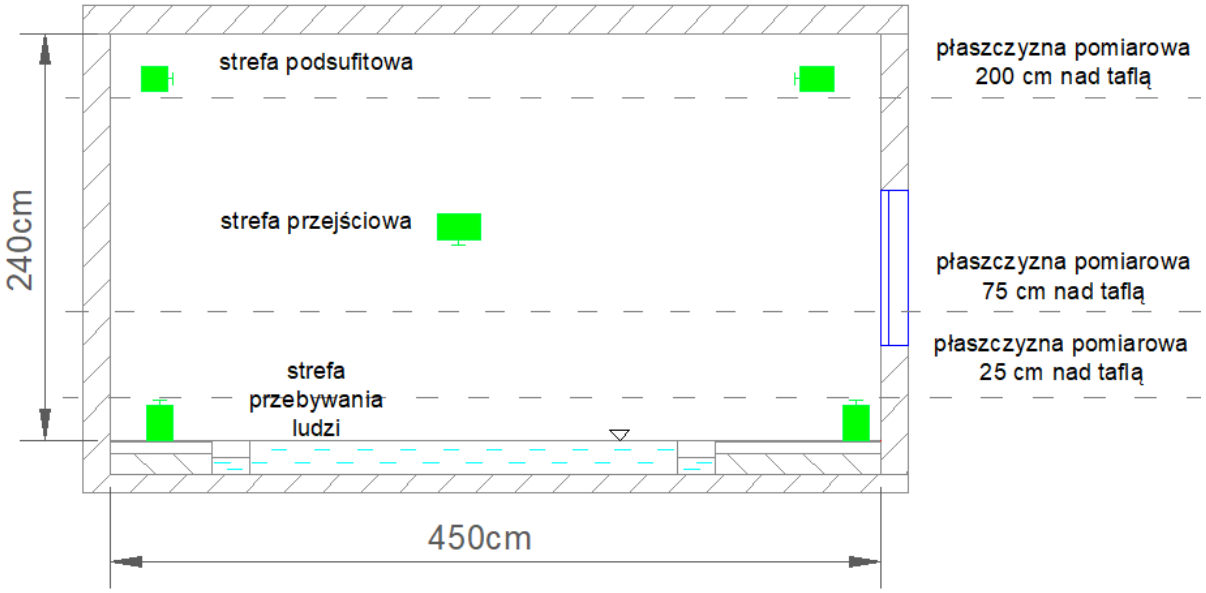


Rys. 6.11 Podział pomieszczenia modelowego na obszary pomiarowe

W centrum każdego obszaru (oznaczenie krzyżykiem) znajdowała się sonda pomiarowa rejestrująca temperaturę i wilgotność względną powietrza oraz prędkość przepływu powietrza.

Pomiary parametrów przeprowadzono w trzech płaszczyznach poziomych, co zilustrowano na Rys. 6.12:

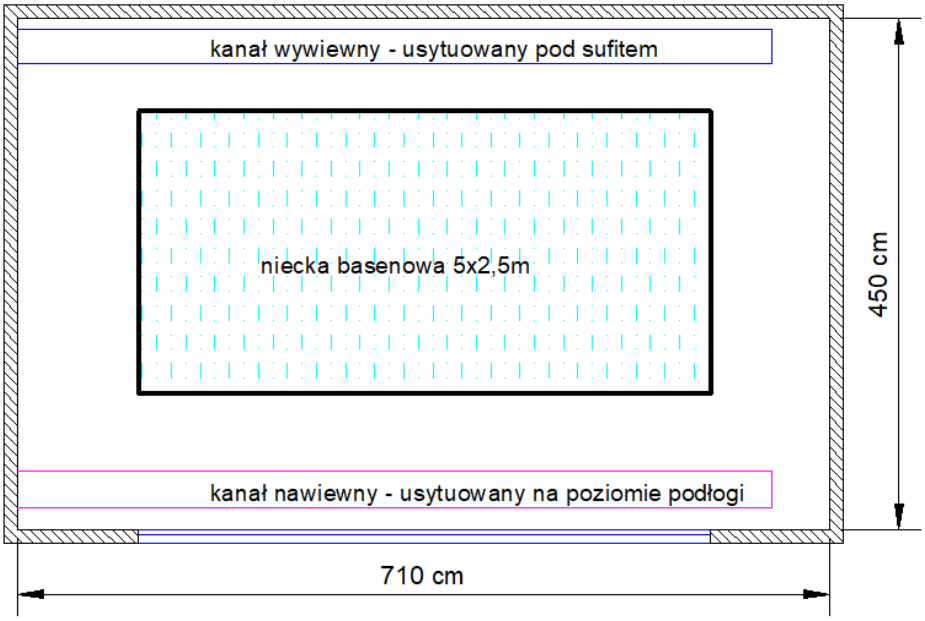
– w strefie przebywania ludzi – na poziomie 25 cm powyżej tafli wody,
– w strefie przejściowej / strefie przebywania ludzi poza taflą – na poziomie 75 cm powyżej tafli wody,
– w strefie podsufitowej – na poziomie 200 cm powyżej tafli wody.



Rys. 6.12 Podział pomieszczenia modelowego na płaszczyzny poziome

6.5.1 Pomiary dla wariantu klasycznego (I)

Wariant klasyczny usytuowania kanałów nawiewno-wywiewnych jest realizowany poprzez nawiew powietrza kanałem nawiewnym usytuowanym wzdłuż okien, a wywiew powietrza kanałem wywiewnym zlokalizowanym po przeciwnej stronie pomieszczenia pod sufitem (Rys. 6.13). Powyższy układ kanałów wentylacyjnych jest najczęściej projektowanym na pływalniach przyszkolnych. Niestety jak już wcześniej wspomniano, nie zapewnia on komfortu cieplno-wilgotnościowego dla osób korzystających z pływalni, a jedynie służy zabezpieczeniu przegród budowlanych przed wykraplaniem wilgoci (w szczególności na oknach). Ciepłe, suche powietrze nawiewane jest pionowo wzdłuż powierzchni przeszklonej, zapewniając temperaturę w obszarze przyokiennym dużo wyższą od temperatury punktu rosy. Następnie lekko schłodzone powietrze przemieszcza się w strefę podsufitową i usuwane jest kanałem wywiewnym. Przy takim układzie wentylacyjnym parametry powietrza nawiewanego są dobierane w funkcji grzewczej, gdyż strumień powietrza musi pokryć straty ciepła pomieszczenia basenowego.

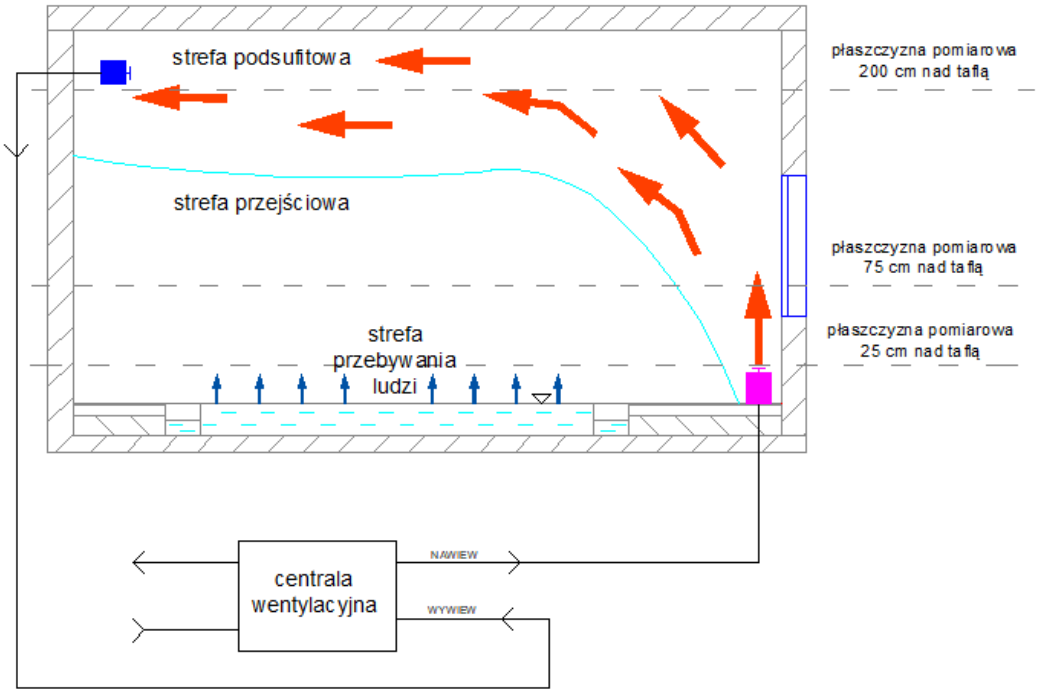


Rys. 6.13 Rzut poziomy pomieszczenia modelowego z zaznaczonym kanałem nawiewnym i wywiewnym dla wariantu (I)

Schematyczny rozdział powietrza dla wariantu (I) prezentuje przekrój pomieszczenia modelowego. (Rys. 6.14) Kanał nawiewny zaznaczono kolorem fioletowym. Nawiew powietrza jest realizowany szyną nawiewną, najczęściej stosowanym elementem nawiewnym w obiektach rzeczywistych. Kanał wywiewny zaznaczono kolorem niebieskim. Wywiew powietrza realizowany jest kratkami wywiewnymi. Powietrze przygotowywane jest w centrali wentylacyjnej z komorą mieszania i wymiennikiem ciepła.

W pomieszczeniu basenowym wydziela się wyraźna strefa przyokienna i podsufitowa. Powietrze o temperaturze (33÷35^{0}C latem; 38÷40^{0}C zimą) i wilgotności (40÷45% latem; 25÷30% zimą) ze znaczną prędkością (1,5÷2,0m/s) nawiewane jest pionowo wzdłuż przegrody przeszklonej tworząc tzw. kurtynę powietrzną. Kurtyna odbiera straty ciepła (w okresie zimowym) lub zyski ciepła (w okresie letnim).

Przy takim rozdziale powietrza w strefie przebywania ludzi nie zachodzi efektywna wymiana powietrza, co potwierdziły pomiary w pomieszczeniu modelowym. Wskaźnik efektywności wentylacji w strefie przebywania ludzi wyniósł odpowiednio ($K_{ef(T)}$ = 0,58; $K_{ef(x)}$ = 0,6).



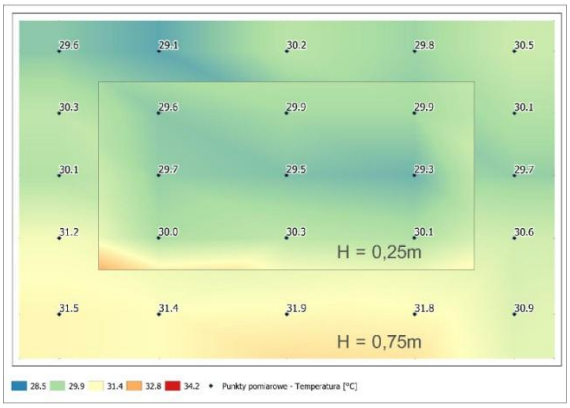
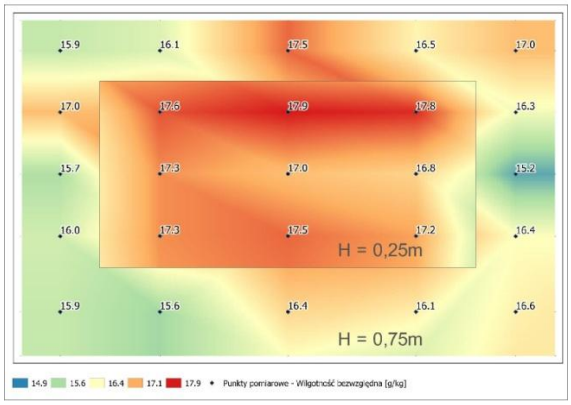
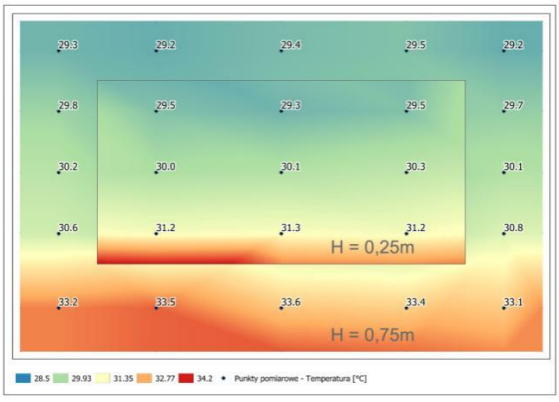
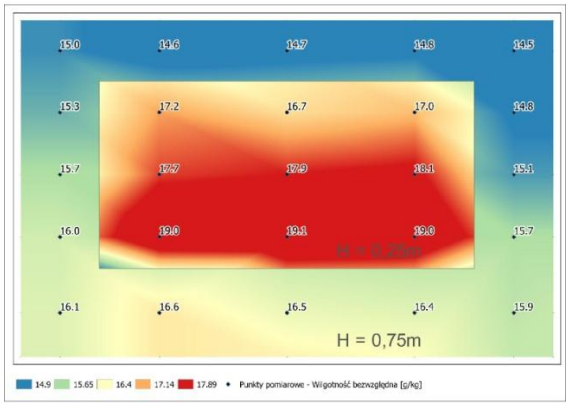
Rys. 6.14 Przekrój pomieszczenia modelowego ze schematycznym rozdziałem powietrza podczas prowadzenia pomiarów przy wariancie klasycznym (I)

Tab. 6.6 Podsumowanie zmierzonych parametrów – wariant klasyczny (I)

Mierzony parametr	Jednostka	Zakres dla powietrza w pomieszczeniu pomiarowym		Zakres dla powietrza w strefie przebywania ludzi		Zakresy zalecane
		lato	zima	lato	zima	
temperatura powietrza	^{0}C	29,1÷33,8	28,3÷38,6	29,1÷31,9	29,3÷33,6	26÷34 [9] 28 [39] 30÷34 [142] 24÷29[124]
wilgotność względna	%	52,3÷68,1	29,7÷66,5	54,5÷68,1	50,1÷66,5	50÷60 [43] 45÷65 [39] 40÷64 [142] 40÷60 [124]
zawartość wilgoci	g/kg	14,9÷18,3	12,6÷19,1	15,2÷17,9	14,5÷19,1	14,1÷15,8 [krzywa duszności wg Lancastera-Castensa-Ruge]
prędkość przepływu powietrza	m/s	0,01÷0,85	0,02÷0,80	0,01÷0,45	0,01÷0,43	0,15÷0,30 [43] ≤ 0,13 [124] 0,15÷ 0,21[139]

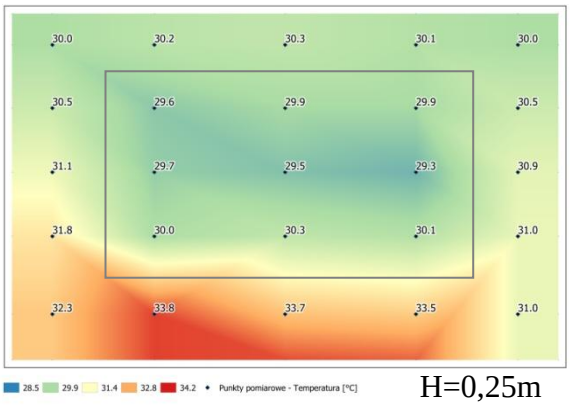
W Tab. 6.6 przedstawiono zestawienie wyników z pomiarów parametrów powietrza dla okresu letniego i zimowego. Wyniki zgrupowano oddzielnie dla strefy przebywania ludzi oraz całego pomieszczenia. Jako strefę przebywania ludzi przyjęto pomiary wykonane 0,25m nad taflą wody w obszarze niecki, a w obszarze wokół niecki basenowej przyjęto pomiary wykonane na wysokości 0,75m nad posadzką.

Badania wykazały, że parametry powietrza w strefie przebywania ludzi nie mieściły się w zalecanych zakresach zarówno w okresie letnim jak i zimowym. Największe odchylenie od zalecanego zakresu wykazał parametr określający zawartość wilgoci w powietrzu. W znaczącej część obszaru strefy przebywania ludzi zawartość wilgoci przekracza 15,8 g/kg. Wyższą temperaturę powyżej 31,0^{0}C (latem) i powyżej 33^{0}C (zimą) odnotowano w strefie brzegowej w okolicy kanału nawiewnego. W tym samym obszarze prędkość powietrza zmierzono na poziomie 0,29÷0,45m/s, co również przekracza zalecany zakres.

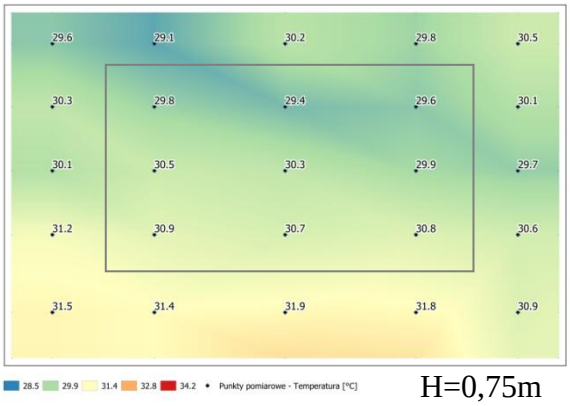
Przestrzenny rozkład temperatury powietrza	Przestrzenny rozkład zawartości wilgoci
Strefa przebywania ludzi – okres letni	
	
Strefa przebywania ludzi – okres zimowy	
	

Rys. 6.15 Przestrzenny rozkład parametrów powietrza w strefie przebywania ludzi – wariant I – okres letni i zimowy

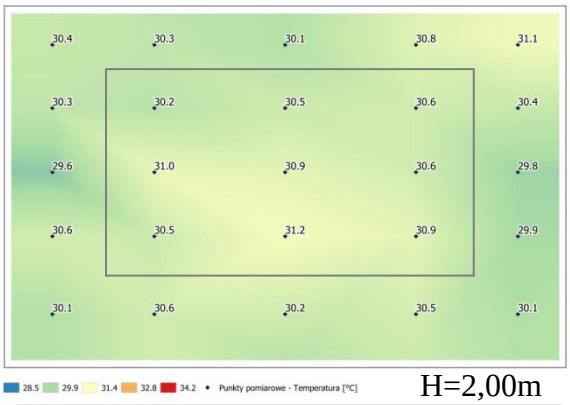
Przestrzenny rozkład temperatury powietrza



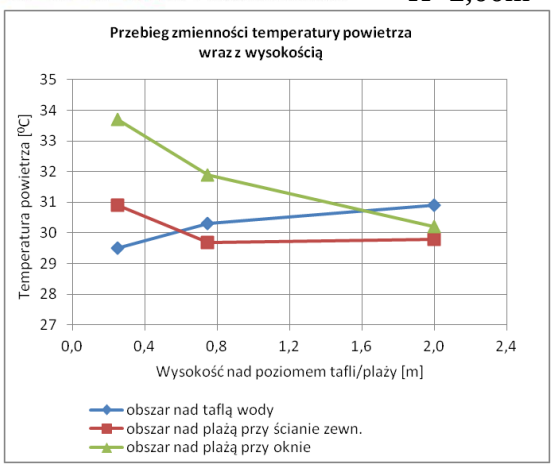
H=0,25m



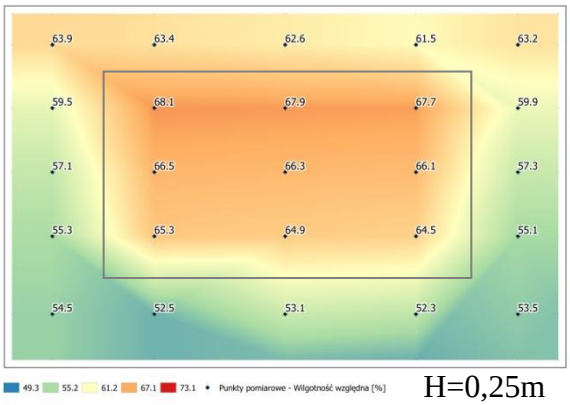
H=0,75m



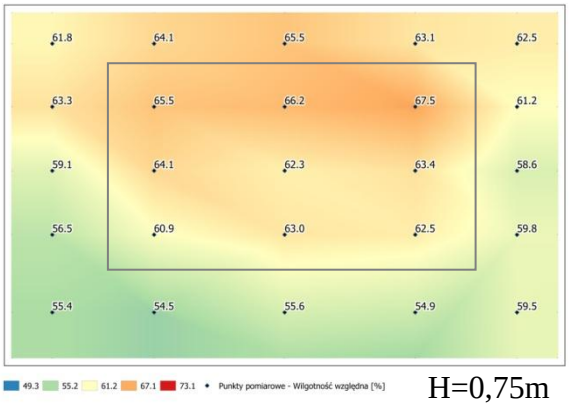
H=2,00m



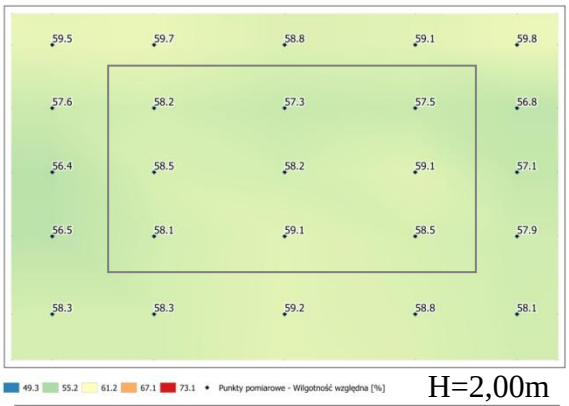
Przestrzenny rozkład wilgotności względnej



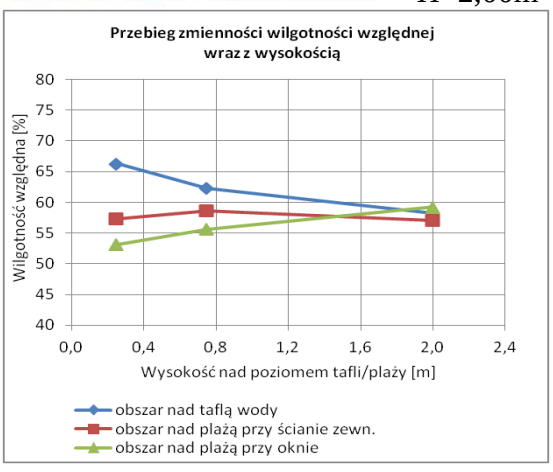
H=0,25m



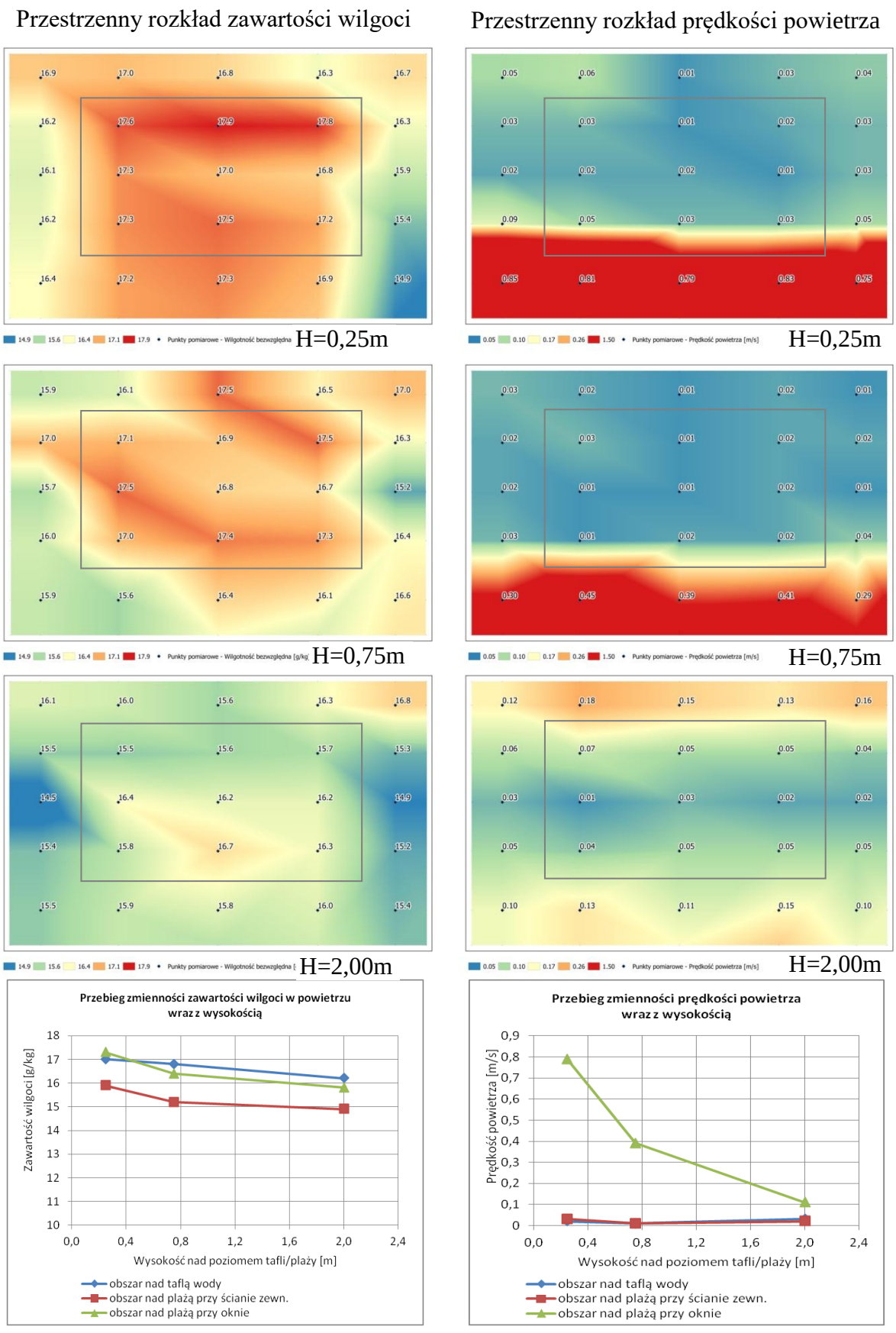
H=0,75m



H=2,00m

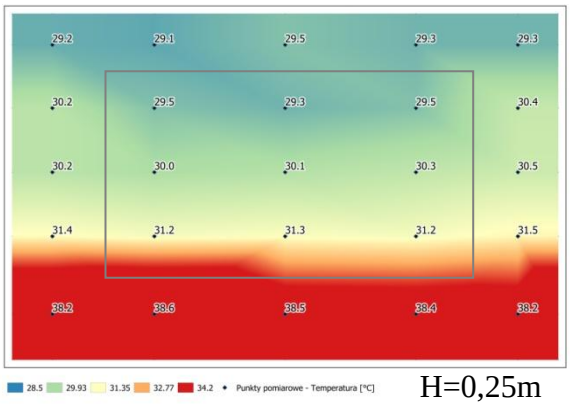


Rys. 6.16 Przestrzenny rozkład temp. i wilgotności względnej powietrza wewn. – wariant I – lato

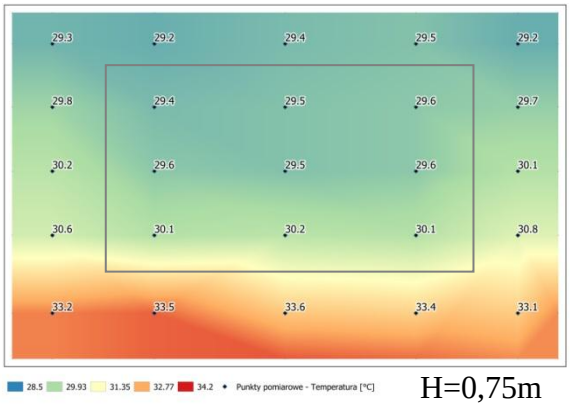


Rys. 6.17 Przestrzenny rozkład zawartości wilgoci i prędkości powietrza – wariant I – lato

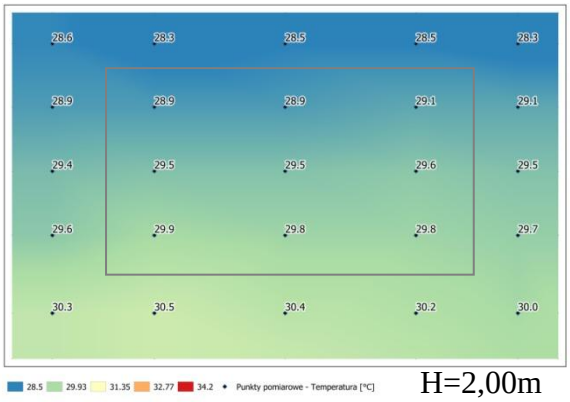
Przestrzenny rozkład temperatury powietrza



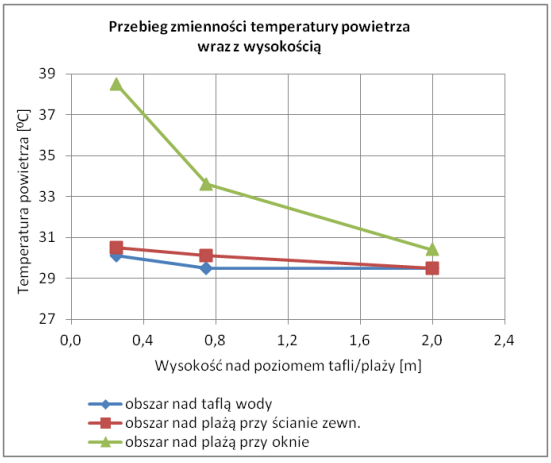
H=0,25m



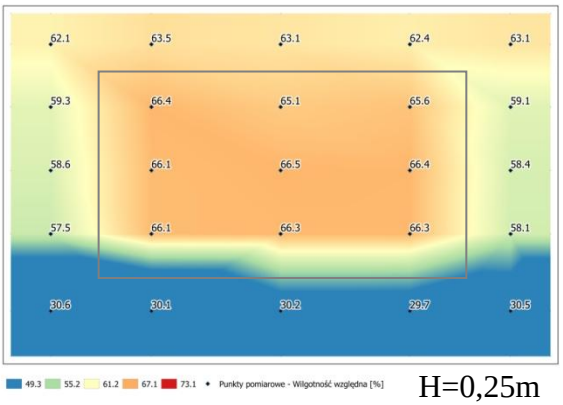
H=0,75m



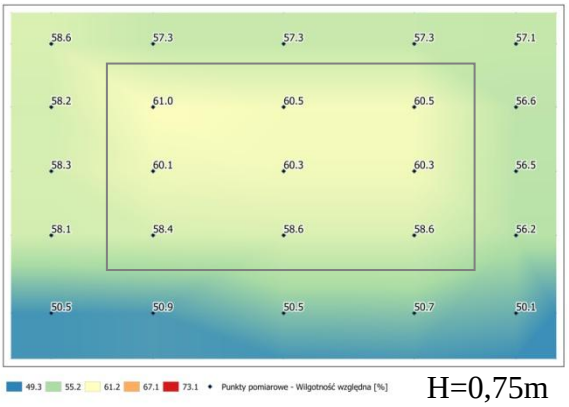
H=2,00m



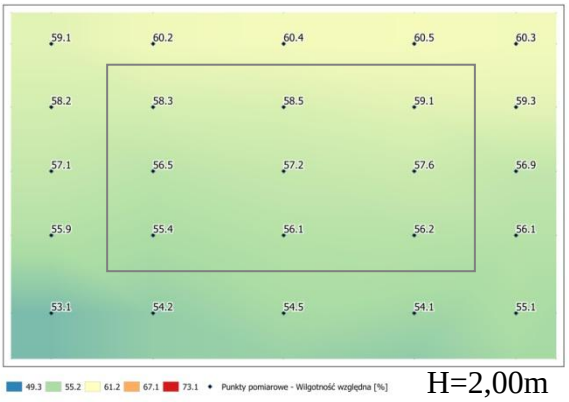
Przestrzenny rozkład wilgotności względnej



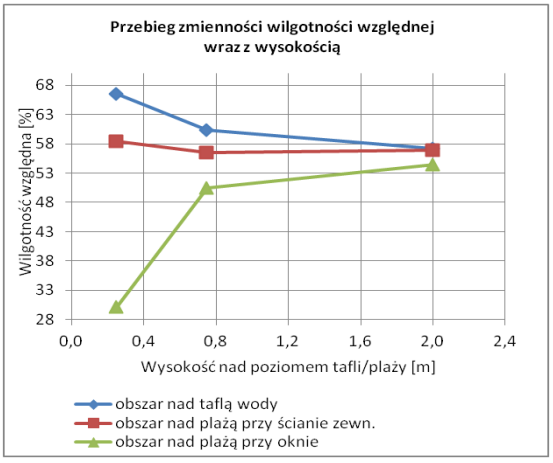
H=0,25m



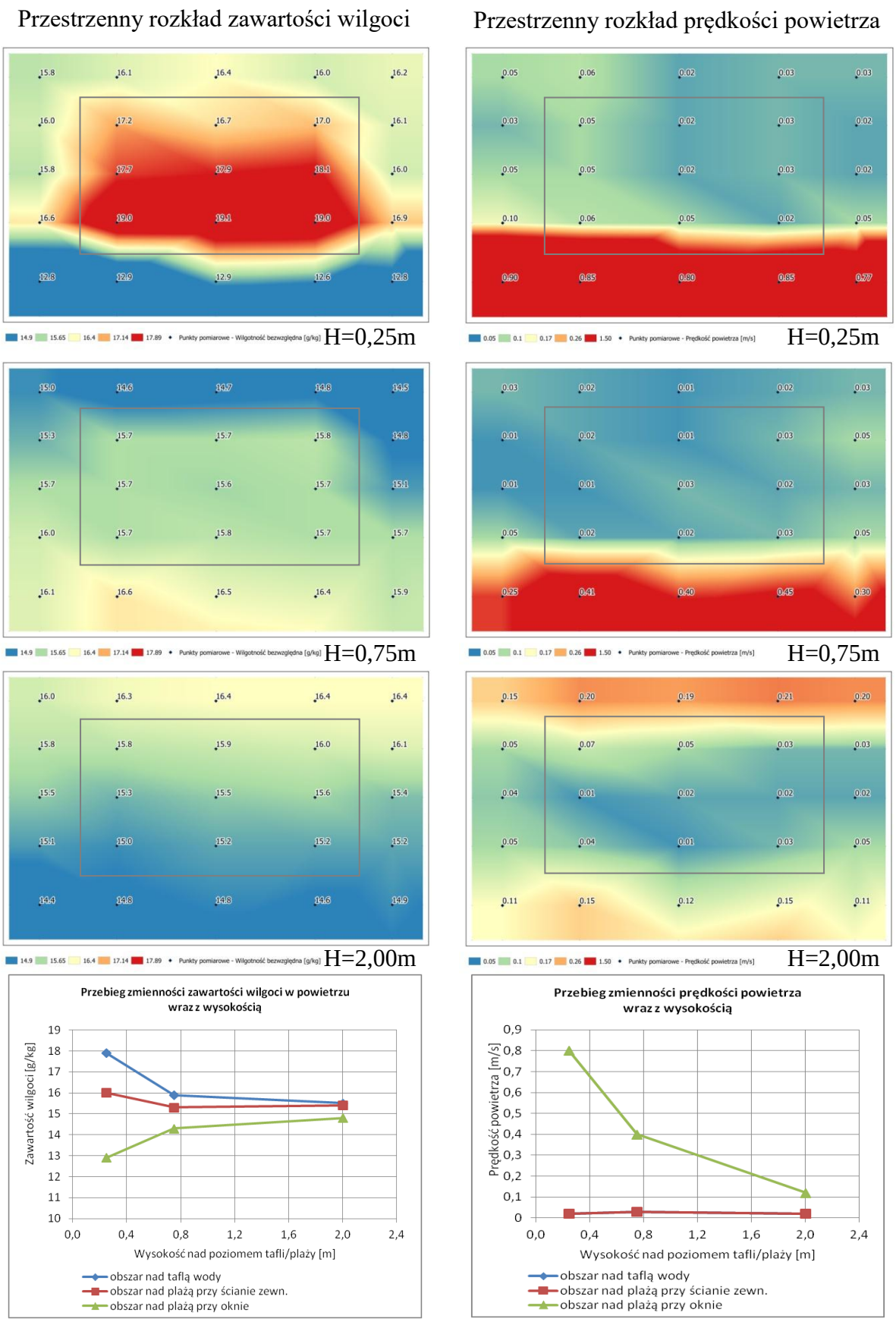
H=0,75m



H=2,00m



Rys. 6.18 Przestrzenny rozkład temp. i wilgotności względnej powietrza wewn. – wariant I – zima

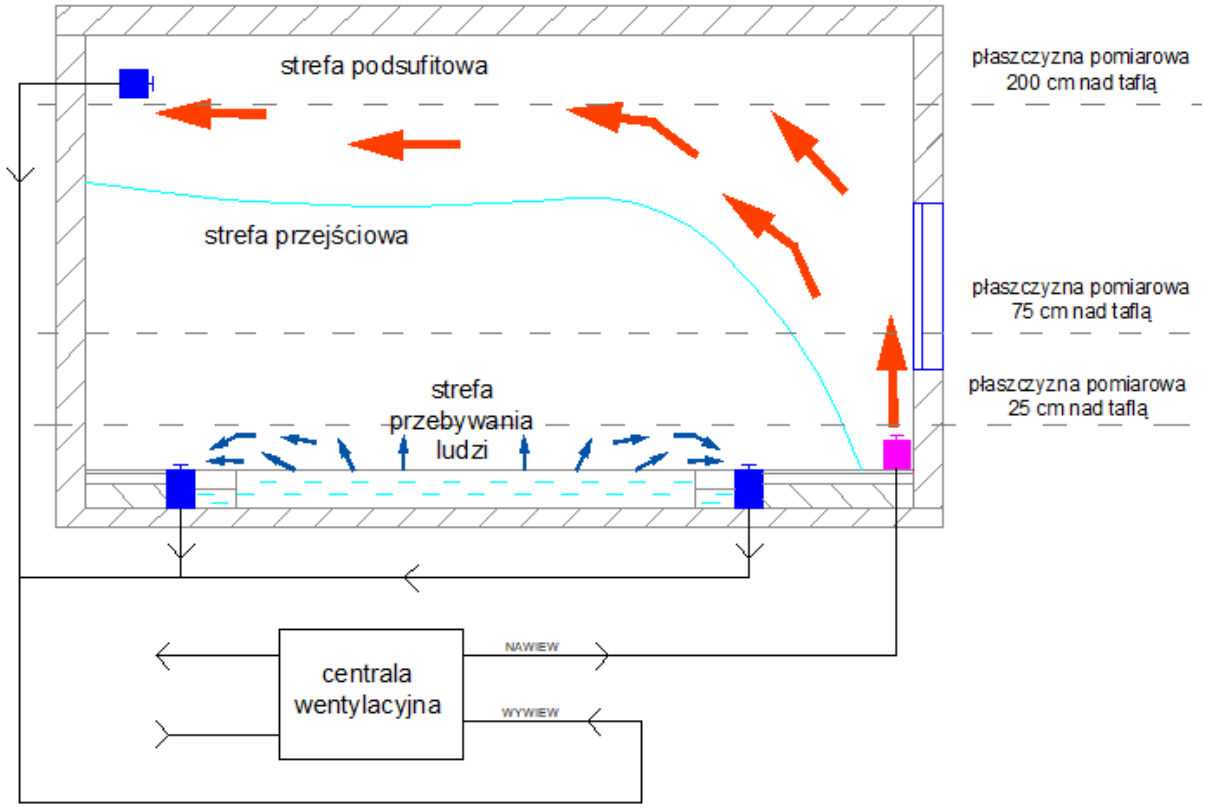


Rys. 6.19 Przestrzenny rozkład zawartości wilgoci i prędkości powietrza – wariant I – zima

Przestrzenny rozkład temperatury powietrza i wilgotności względnej w okresie letnim i zimowym (Rys. 6.15, Rys. 6.16, Rys. 6.18) nie jest równomierny w pomieszczeniu basenowym. Wynika to z jednostronnego nawiewu powietrza ze stosunkowo wysoką prędkością (1,5÷2,0m/s), która determinuje przemieszczanie się mas powietrza pionowo do góry, tworząc tzw. kurtynę. Dalej powietrze jest wyciągane kratkami wywiewnymi omijając strefę przebywania ludzi. Badany układ wentylacyjny (wariant I) nie zapewnia pełnej wymiany objętości powietrza w pomieszczeniu basenowym. Z przeprowadzonych pomiarów wynika, że rozdział powietrza dół-góra sprzyja powstawaniu stref martwych w pomieszczeniu oraz stref nieefektywnie wentylowanych. Potwierdzają to bardzo niskie wartości prędkości powietrza rzędu 0,01÷0,05m/s w znacznym obszarze pomieszczenia (Rys. 6.17) oraz przekroczenia wartości zalecanych pozostałych mierzonych parametrów powietrza (temperatury i wilgotności względnej). Badany układ wentylacyjny nie zapewnia odpowiedniego ruchu powietrza nad taflą wody, gdzie kumulują się zanieczyszczenia gazowe m.in. THM-y.

6.5.2 Pomiary dla wariantu klasycznego z odciągami brzegowymi (II)

W wariancie II uzupełniono wariant klasyczny I o dodatkowe 2 kanały wyciągowe (odciągi brzegowe) usytuowane wzdłuż dłuższego boku niecki. Wprowadzona modyfikacja miała na celu zbadanie czy dodatkowy wywiew powietrza w strefie przebywania ludzi wpłynie na poprawę parametrów powietrza w tym obszarze. Schematyczny rozdział powietrza dla tego wariantu przedstawiono na Rys. 6.20. Powietrze nawiewane jest kanałem nawiewnym (kolor fioletowy) usytuowanym wzdłuż okien na wysokości posadzki. Natomiast powietrze wywiewane jest kanałem wywiewnym (kolor niebieski) zlokalizowanym po przeciwnej stronie pomieszczenia basenowego pod sufitem oraz dwoma kanałami wywiewnymi (kolor niebieski) umieszczonymi wzdłuż rynien przelewowych. Powietrze przygotowywane jest w centrali wentylacyjnej z komorą mieszania i wymiennikiem ciepła.



Rys. 6.20 Przekrój pomieszczenia modelowego podczas prowadzenia pomiarów przy wariancie II

Trudnością projektową stanowiło odpowiednie wykonanie odciągów brzegowych, pod kątem ich odporności na zalewanie wodą basenową. Kanały te wykonano z polipropylenu, w celu zabezpieczenia przed szkodliwym działaniem związków chloru. Kanały poprowadzono ze spadkiem i w najniższym punkcie zamontowano lejek z zaworem spustowym, aby zapewnić możliwość okresowego odwadniania.

Podobnie jak w wariancie I w pomieszczeniu modelowym zarysowała się wyraźna strefa przyokienna i podsufitowa. Powietrze o temperaturze (33÷35^{0}C latem; 40÷45^{0}C zimą) i wilgotności (40÷45% latem; 30÷35% zimą) ze znaczną prędkością (1,5÷2,0m/s) nawiewane jest pionowo wzdłuż przegrody przeszklonej tworząc kurtynę powietrzną.

Przy takim rozdziale powietrza w strefie przebywania ludzi również nie zachodzi efektywna wymiana powietrza, co potwierdziły pomiary w pomieszczeniu modelowym. Wskaźnik efektywności wentylacji w strefie przebywania ludzi wyniósł odpowiednio ($K_{ef(T)}$ = 0,64; $K_{ef(x)}$ = 0,61). Odciągi brzegowe nie spełniły zakładanej funkcji, z uwagi na przekroczenia wartości zalecanej prędkości powietrza. Zauważalny ruch powietrza nad taflą obejmujący wszystkie tory był możliwy do osiągnięcia przy prędkości na kratce wywiewnej rzędu 2,5÷3,0 m/s. Tak wysoka wartość prędkości przepływającego powietrza jest nieakceptowalna zarówno dla ludzi przebywających na skrajnych torach basenu jak i ludzi

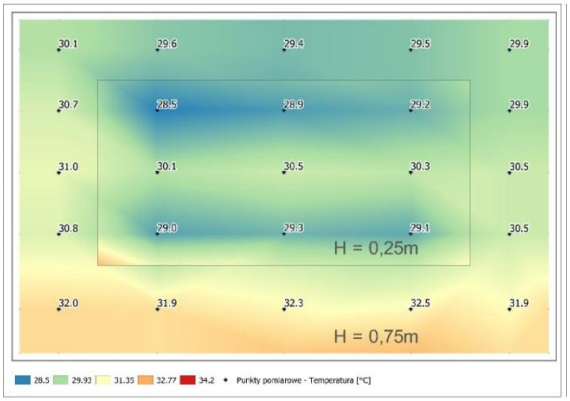
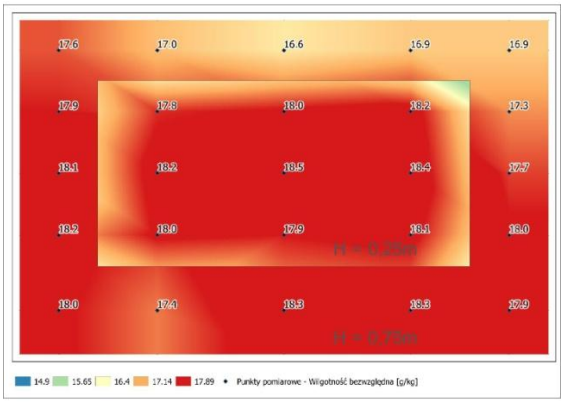
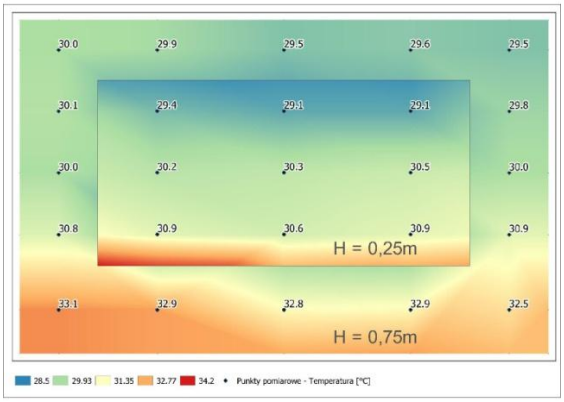
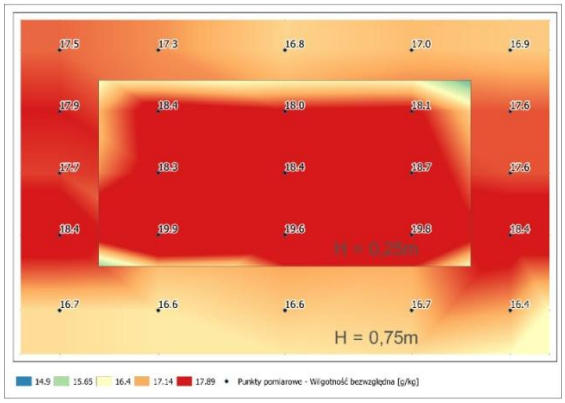
znajdujących się na brzegu. Z kolei redukcja prędkości na kratce wywiewnej pod kątem nie przekroczenia wartości dopuszczalnych nad taflą (<0,4m/s) skutkowała znacznym zmniejszeniem obszaru objętego zasięgiem pracy odciągów brzegowych.

Poniżej przedstawiono zestawienie wyników z pomiarów parametrów powietrza dla okresu letniego i zimowego.

Tab. 6.7 Podsumowanie zmierzonych parametrów – wariant klasyczny z odciągiem brzegowym (II)

Mierzony parametr	Jednostka	Zakres dla powietrza w pomieszczeniu pomiarowym		Zakres dla powietrza w strefie przebywania ludzi		Zakresy zalecane
		lato	zima	lato	zima	
temperatura powietrza	^{0}C	28,5÷34,2	28,1÷37,9	28,5÷32,5	29,1÷33,1	26÷34 [9] 28 [39] 30÷34 [142] 24÷29[124]
wilgotność względna	%	49,3÷73,1	30,9÷71,3	58,5÷73,1	52,5÷71,3	50÷60 [43] 45÷65 [39] 40÷64 [142] 40÷60 [124]
zawartość wilgoci	g/kg	15,5÷20,6	12,5÷19,9	16,6÷18,5	16,4÷19,9	14,1÷15,8 [krzywa duszności wg Lancastera-Castensa-Ruge]
prędkość przepływu powietrza	m/s	0,04÷0,80	0,05÷0,78	0,15÷0,46	0,14÷0,43	0,15÷0,30 [43] ≤ 0,13 [124] 0,15÷ 0,21[139]

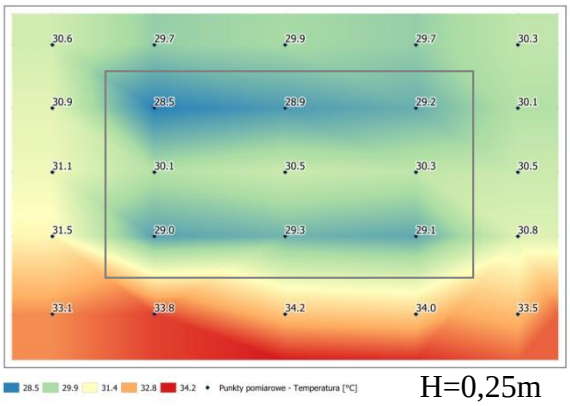
Badania wykazały, że parametry powietrza w strefie przebywania ludzi nie mieściły się w zalecanych zakresach zarówno w okresie letnim jak i zimowym. Wszystkie mierzone parametry powietrza (temperatura, wilgotność względna, prędkość) w znaczącej część obszaru strefy przebywania ludzi przekraczały zalecane zakresy. Bardzo wysoką wilgotność względną powyżej 68% (latem i zimą) odnotowano w strefie nad taflą wody. W tym samym obszarze prędkość powietrza zmierzono na poziomie 0,30÷0,45m/s, co również przekracza zalecany zakres i było przyczyną zwiększonego parowania wody. Zawartość wilgoci w strefie nad taflą wody wyniosła ponad 17,8 g/kg (latem i zimą), co znacznie odbiega od zalecanego zakresu.

Przestrzenny rozkład temperatury powietrza	Przestrzenny rozkład zawartości wilgoci
Strefa przebywania ludzi – okres letni	
	
Strefa przebywania ludzi – okres zimowy	
	

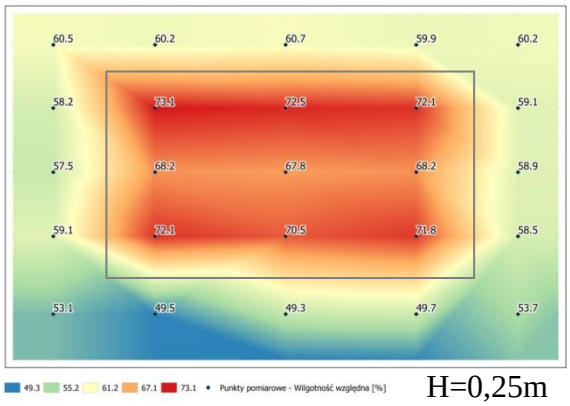
Rys. 6.21 Przestrzenny rozkład parametrów powietrza w strefie przebywania ludzi – wariant II – okres letni i zimowy

Przestrzenny rozkład temperatury powietrza

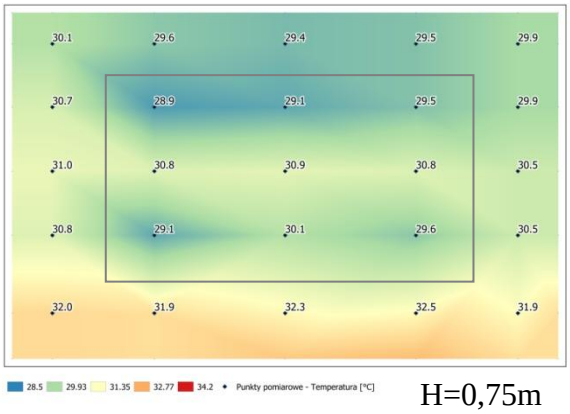
Przestrzenny rozkład wilgotności względnej



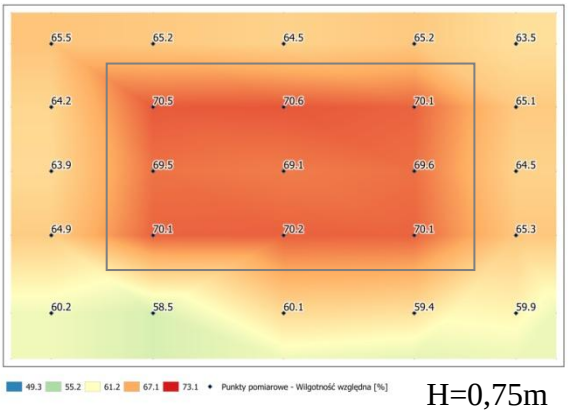
H=0,25m



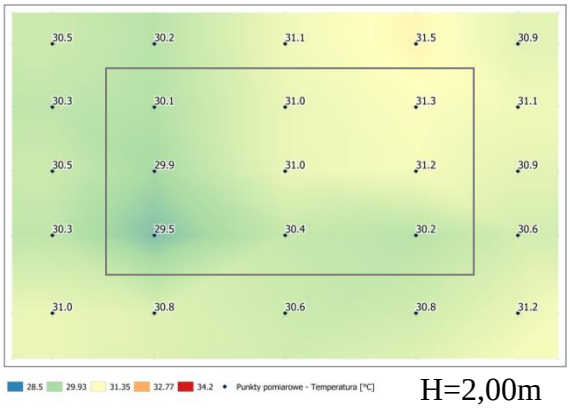
H=0,25m



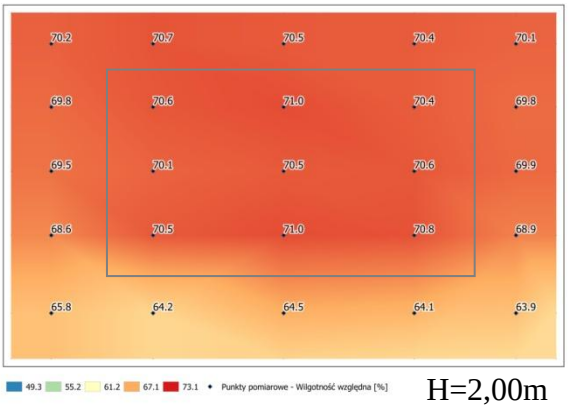
H=0,75m



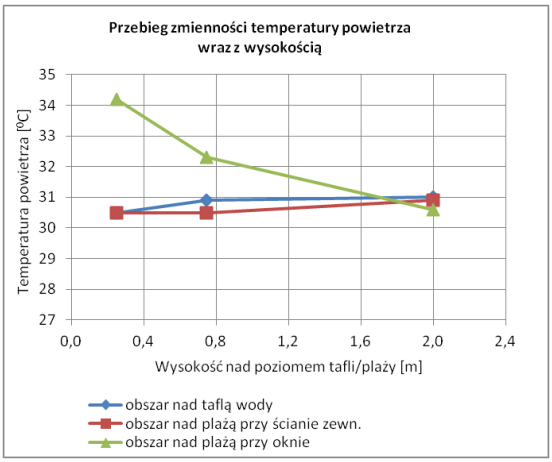
H=0,75m

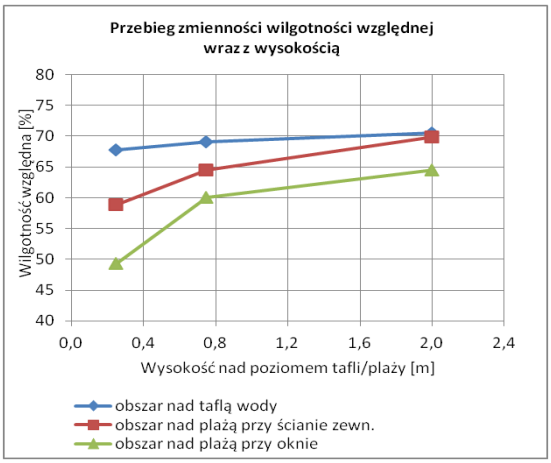


H=2,00m



H=2,00m

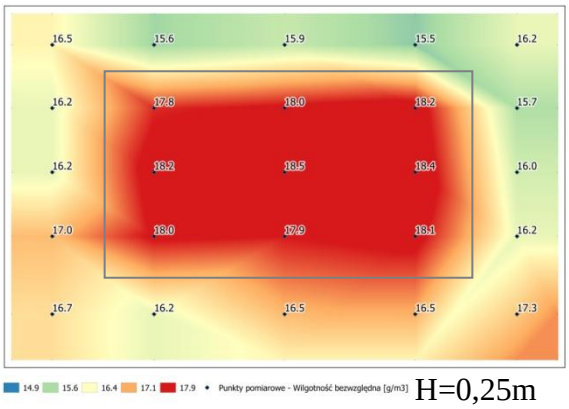




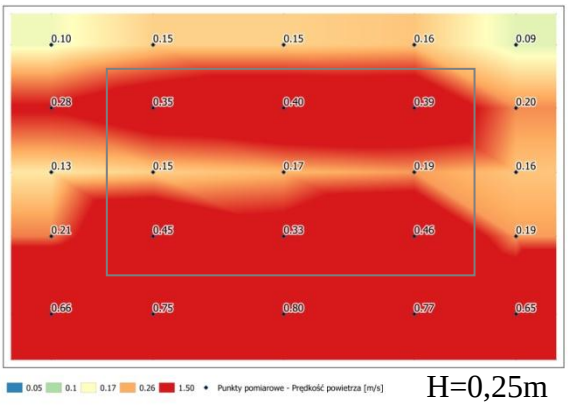
Rys. 6.22 Przestrzenny rozkład temp. i wilgotności względnej powietrza wewn. – wariant II – lato

Przestrzenny rozkład zawartości wilgoci

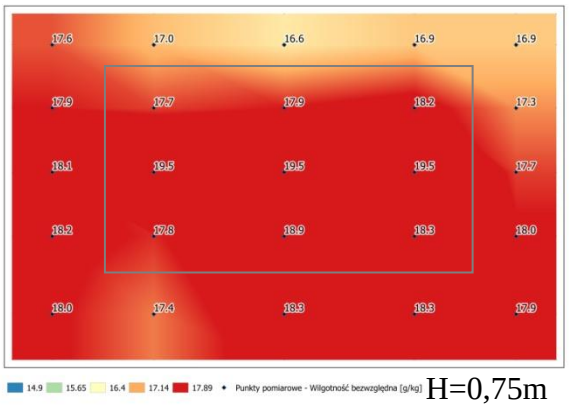
Przestrzenny rozkład prędkości powietrza



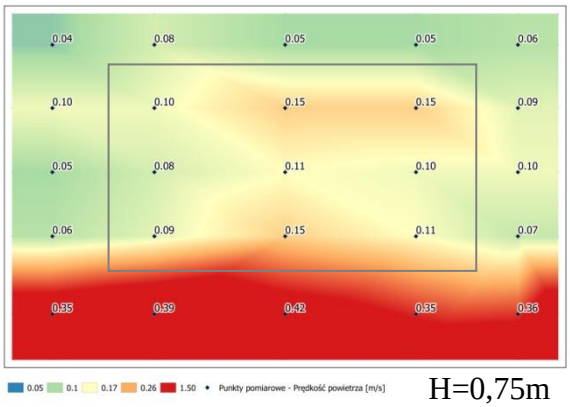
H=0,25m



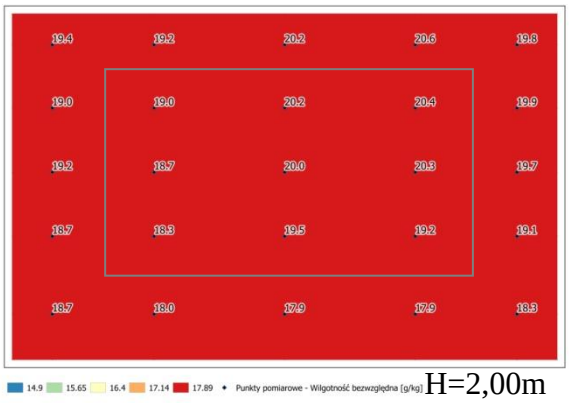
H=0,25m



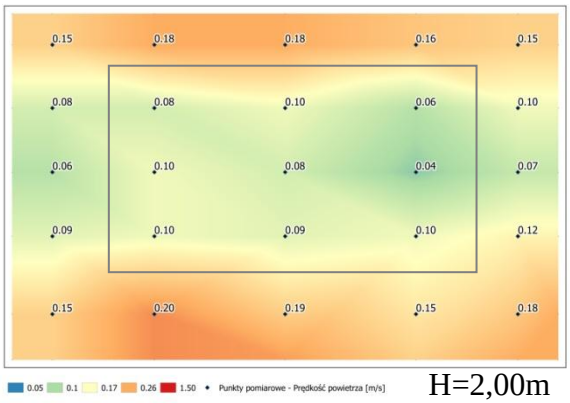
H=0,75m



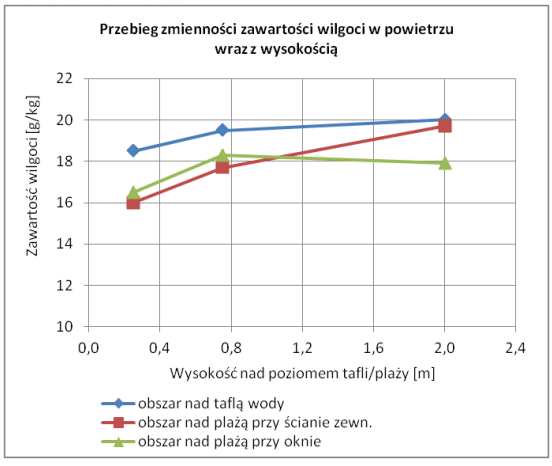
H=0,75m

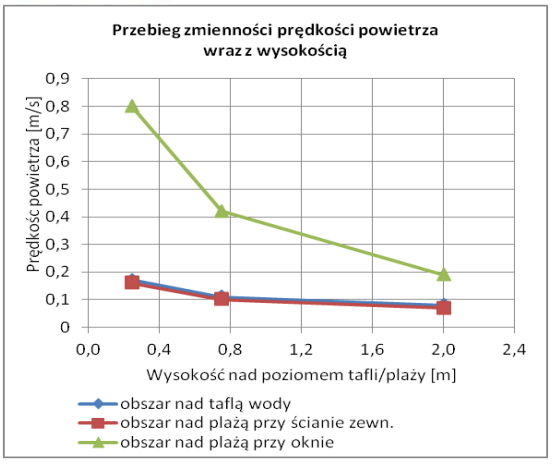


H=2,00m



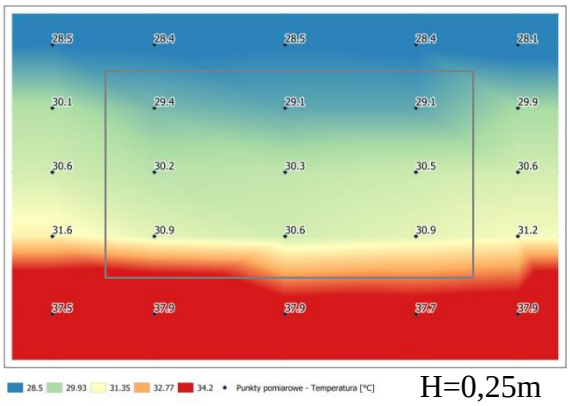
H=2,00m



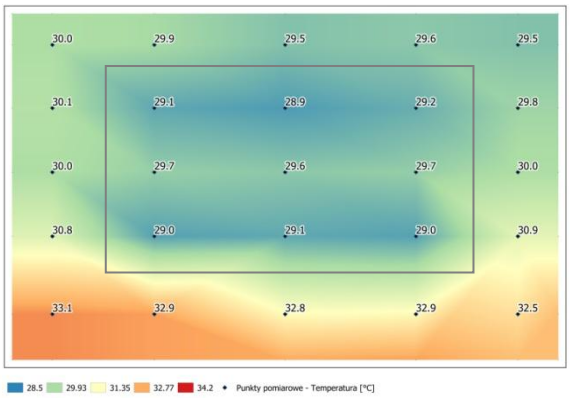


Rys. 6.23 Przestrzenny rozkład zawartości wilgoci i prędkości powietrza – wariant II – lato

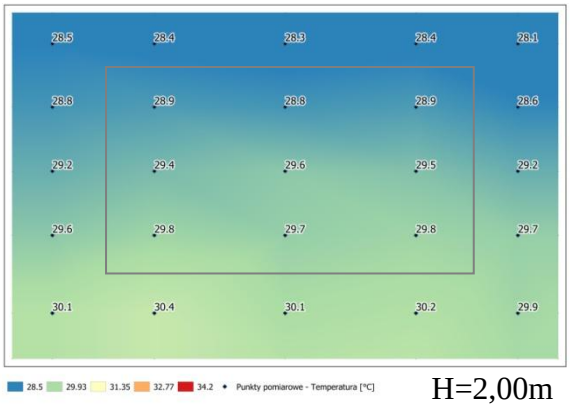
Rozkład przestrzenny temperatury powietrza



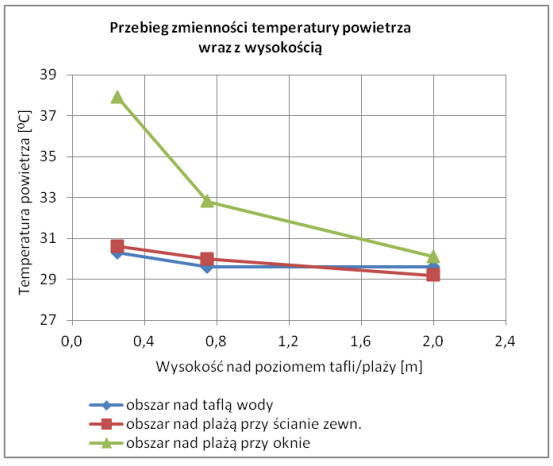
H=0,25m



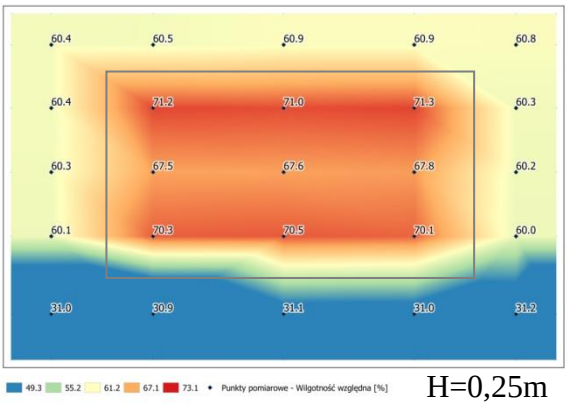
H=0,75m



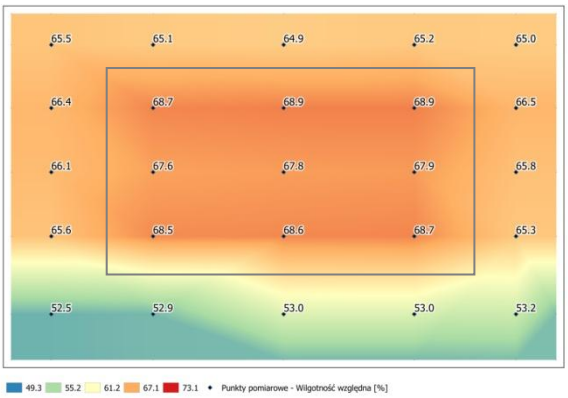
H=2,00m



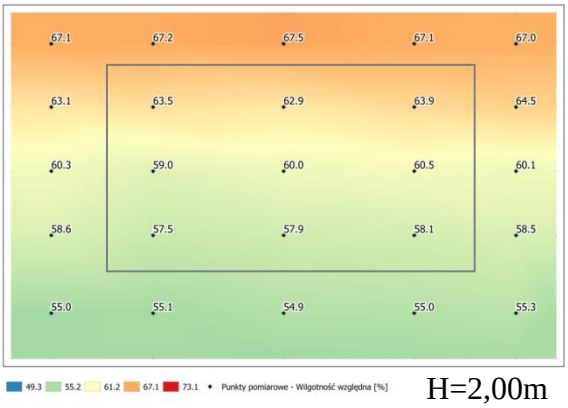
Rozkład przestrzenny wilgotności względnej



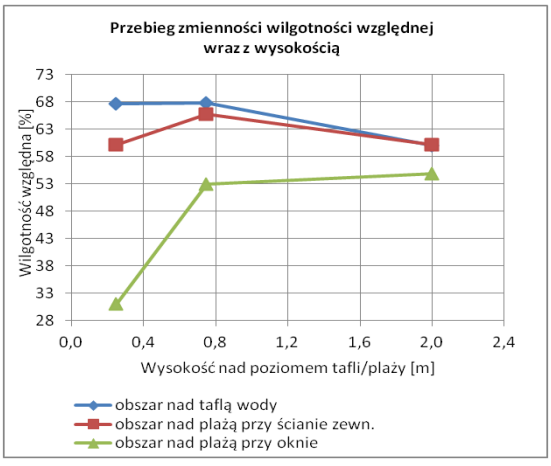
H=0,25m



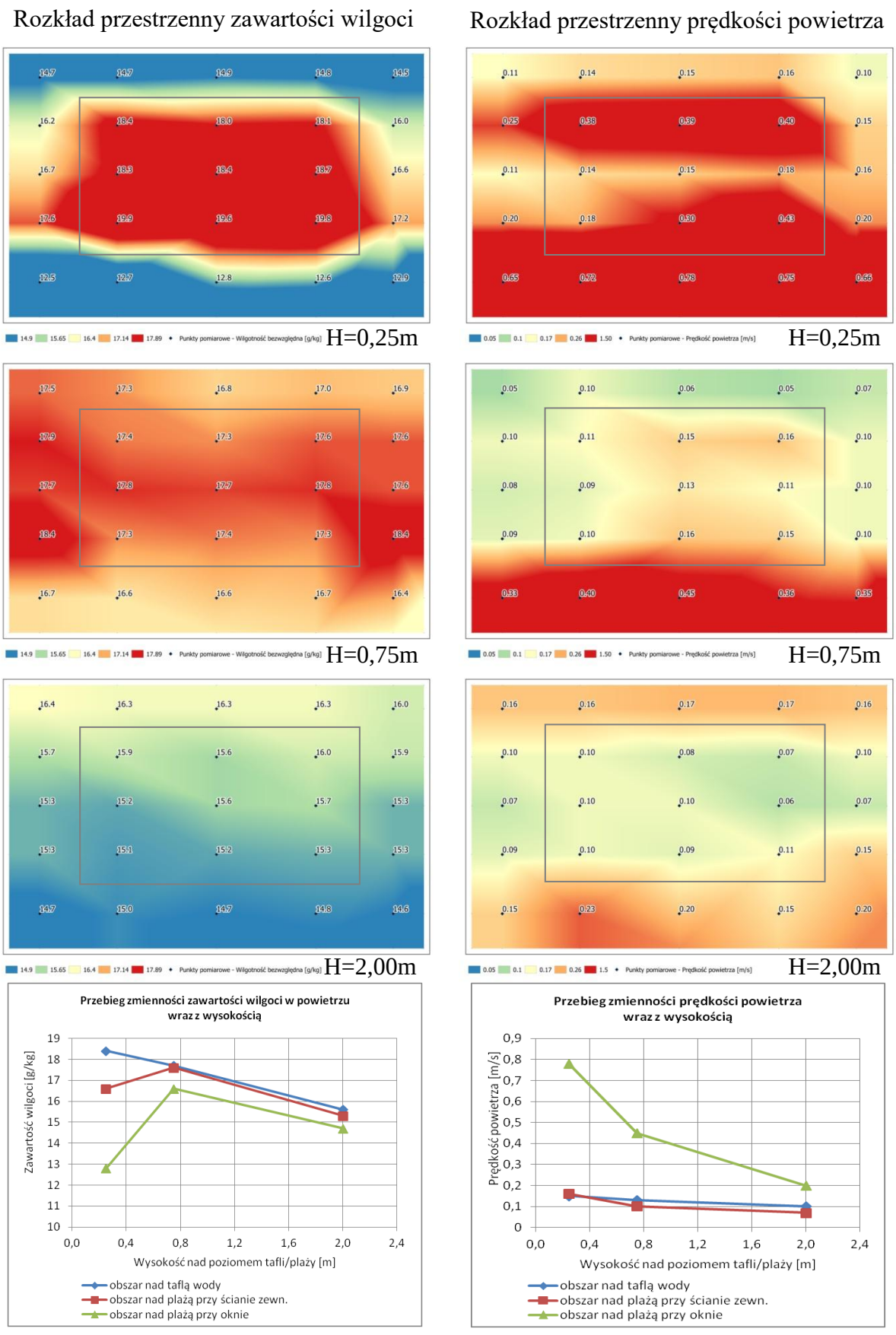
H=0,75m



H=2,00m



Rys. 6.24 Rozkład przestrzenny temp. i wilgotności względnej powietrza wewn. – wariant II – zima



Rys. 6.25 Rozkład przestrzenny zawartości wilgoci i prędkości powietrza – wariant II – zima

Przestrzenny rozkład temperatury powietrza i wilgotności względnej w okresie letnim i zimowym nie jest równomierny w pomieszczeniu basenowym (Rys. 6.21, Rys. 6.22, Rys. 6.24). Wynika to podobnie jak w wariancie I z jednostronnego nawiewu powietrza ze stosunkowo wysoką prędkością (1,5÷2,0m/s), która determinuje przemieszczanie się mas powietrza pionowo do góry, tworząc tzw. kurtynę. Badany układ wentylacyjny (wariant II) nie zapewnia pełnej wymiany objętości powietrza w pomieszczeniu basenowym. Z przeprowadzonych pomiarów wynika, że rozdział powietrza dół-góra z odciągami brzegowymi sprzyja nadmiernemu parowaniu wody, spowodowanemu głównie wysoką prędkością powietrza (0,3-0,45m/s) nad taflą wzdłuż brzegów basenu. Badany układ wentylacyjny sprzyja wymianie powietrza nad taflą, ale jedynie w ograniczonym obszarze pracy odciągów brzegowych.

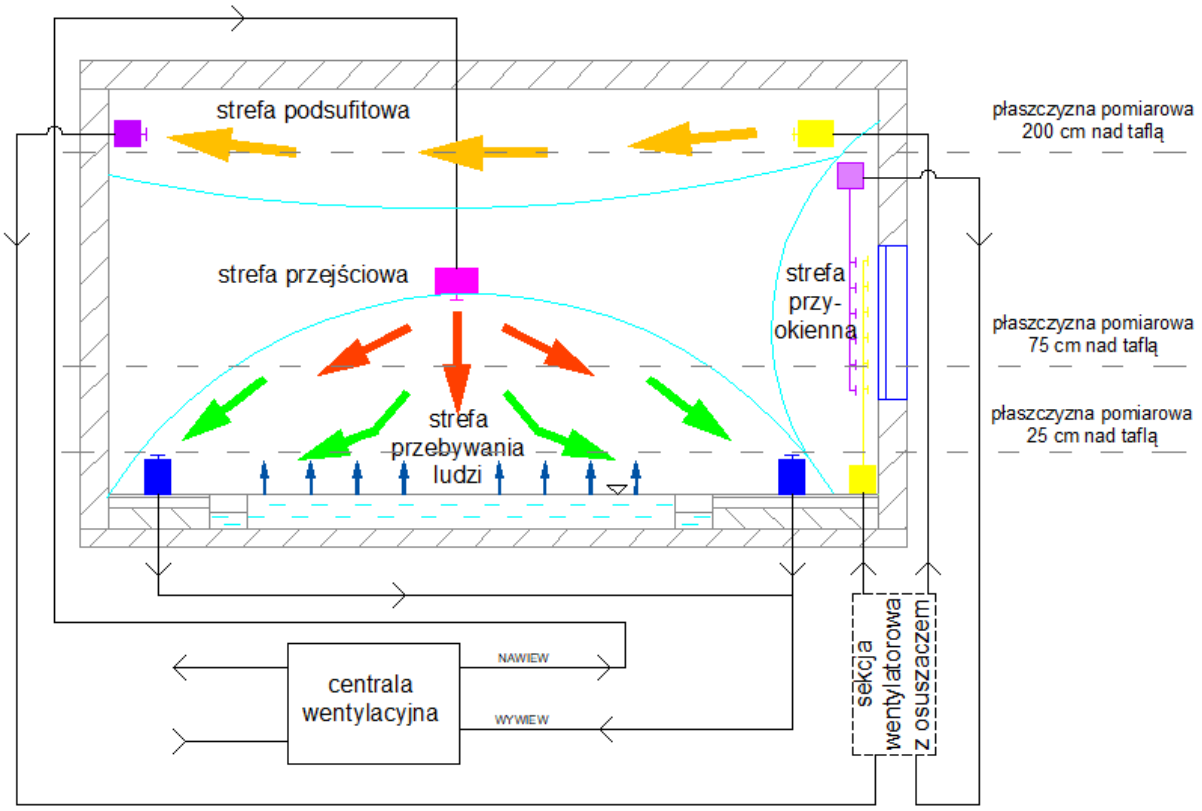
6.5.3 Pomiary dla wariantu góra-dół z układem obiegowym (III)

W tym wariancie system wentylacyjny nawiewno-wywiewny obejmuje dwa układy:

- układ rozdziału powietrza góra-dół obsługujący strefę przebywania ludzi, zasilany powietrzem przygotowanym w centrali wentylacyjnej,
- układ obiegowy wentylujący strefy przyokienną i podsufitową, zasilany powietrzem przygotowywanym w sekcji wentylatorowej z osuszaczem i nagrzewnicą.

Schematyczny rozdział powietrza w pomieszczeniu przedstawiono na Rys. 6.26.

Nawiew powietrza przygotowanego w centrali wentylacyjnej jest realizowany kanałem nawiewnym znajdującym się centralnie nad niecką basenową (kolor różowy), natomiast wywiew kanałami zlokalizowanymi wzdłuż ścian na poziomie posadzki (kolor niebieski). Strumień powietrza nawiewanego jest dobierany pod kątem zapewnienia komfortu cieplnego w strefie przebywania ludzi oraz spełnienia kryterium higienicznego. W pomieszczeniu basenowym funkcję grzewczą pełni system ogrzewania podłogowe oraz pośrednio dodatkowy układ obiegowy, który tworząc kurtyny powietrze redukuje straty ciepła przez przegrody zewnętrzne. Układ obiegowy składa się z dwóch ciągów wentylacyjnych (kolor żółty i fioletowy): jeden w strefie przyokiennej, drugi w strefie podsufitowej. Powietrze obiegowe ma na celu odebrać starty ciepła w pomieszczeniu basenowym oraz zabezpieczyć strefę przyokienną i podsufitową przed wykropleniem się wilgoci.



Rys. 6.26 Przekrój pomieszczenia modelowego podczas prowadzenia pomiarów przy wariancie (III)

Przy pracy układu wentylacyjnego góra-dół (wariant III) w pomieszczeniu basenowym kształtują się strefy o odmiennych wymogach cieplno-wilgotnościowych. Powietrze o temperaturze (29÷32^{0}C latem; 31÷34^{0}C zimą) i wilgotności (45÷50% latem; 40÷45% zimą) nawiewane jest bezpośrednio do strefy przebywania ludzi, gdzie uzyskano parametry bliskie optymalnych (T_{sr} = 29,5^{0}C; $\varphi_{śr}$ = 60,1% (latem); $T_{śr}$ = 29,9^{0}C; $\varphi_{śr}$ = 59,8% (zimą). Natomiast w układzie obiegowym krąży ciepłe i suche powietrze, które ma za zadanie zabezpieczyć przegrody przed wykropleniem wilgoci.

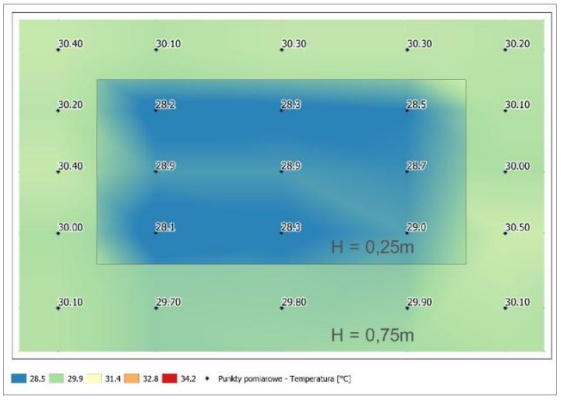
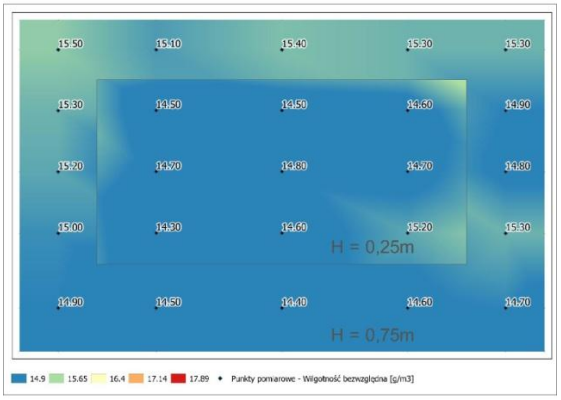
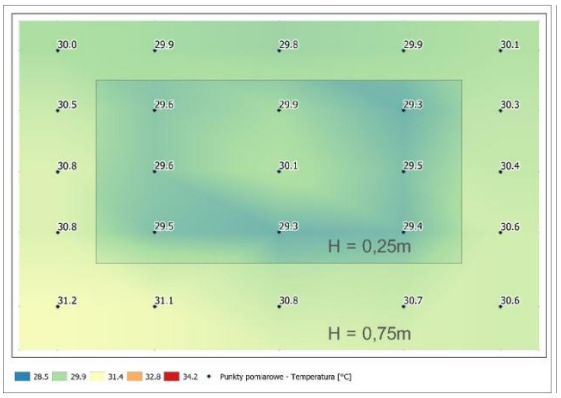
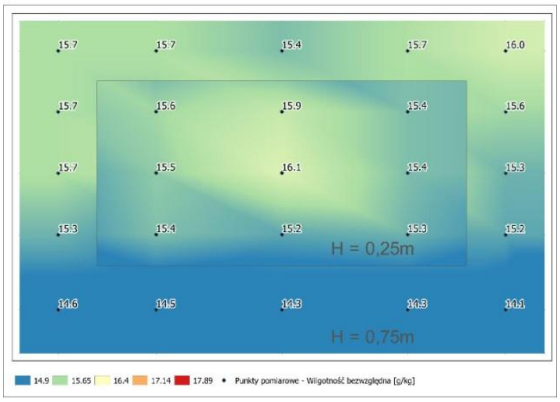
Przy rozdziale powietrza góra-dół w strefie przebywania ludzi zachodzi efektywna wymiana powietrza, co potwierdziły pomiary w pomieszczeniu modelowym. Wskaźnik efektywności wentylacji dla tej strefy wyniósł odpowiednio ($K_{ef(T)}$ =1,11 (latem) i $K_{ef(T)}$ =0,93 (zimą)). Wskaźnik dla lata ma wartość większa od 1, co wynika z pracy więcej niż jednego układu wentylacyjnego w pomieszczeniu modelowym.

Poniżej przedstawiono zestawienie wyników z pomiarów parametrów powietrza dla okresu letniego i zimowego.

Tab. 6.8 Podsumowanie zmierzonych parametrów – wariant (III)

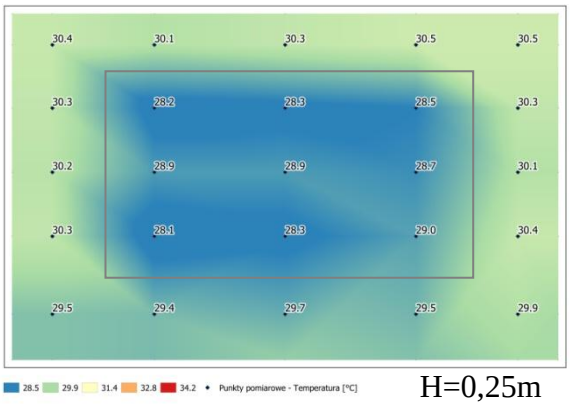
Mierzony parametr	Jednostka	Zakres dla powietrza w pomieszczeniu pomiarowym		Zakres dla powietrza w strefie przebywania ludzi		Zakresy zalecane
		lato	zima	lato	zima	
temperatura powietrza	^{0}C	27,5÷30,5	29,3÷31,5	28,1÷30,5	29,3÷30,1	26÷34 [9] 28 [39] 30÷34 [142] 24÷29[124]
wilgotność względna	%	48,4÷61,0	49,5÷60,1	55,4÷61,0	59,3÷60,1	50÷60 [43] 45÷65 [39] 40÷64 [142] 40÷60 [124]
zawartość wilgoci	g/kg	11,0÷15,8	13,8÷16,1	14,4÷15,5	15,2÷16,1	14,1÷15,8 [krzywa duszności wg Lancastera-Castensa-Ruge]
prędkość przepływu powietrza	m/s	0,08÷1,60	0,08÷1,65	0,10÷0,23	0,10÷0,22	0,15÷0,30 [43] ≤ 0,13 [124] 0,15÷ 0,21[139]

Badania wykazały, że parametry powietrza w strefie przebywania ludzi mieściły się w zalecanych zakresach zarówno w okresie letnim jak i zimowym. Wszystkie mierzone parametry powietrza (temperatura, wilgotność względna, prędkość) w znaczącej część obszaru strefy przebywania ludzi nie przekraczały zalecanych zakresów. Jedynie zmierzone wartość prędkości powietrza w strefie przebywania ludzi nad brzegiem przekraczały nieznacznie wartości zalecane przez [122, [139], ale mieściły się one w zakresie wskazanym przez Kapllera [43].

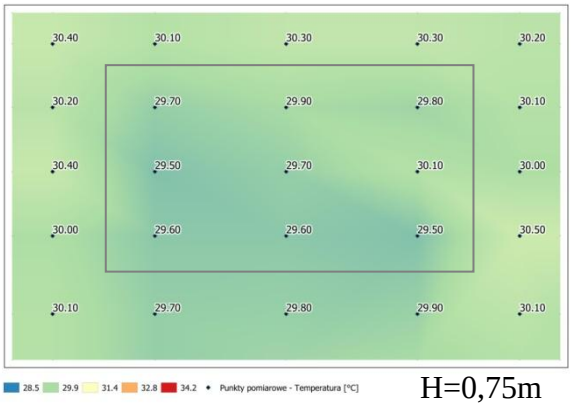
Przestrzenny rozkład temperatury powietrza	Przestrzenny rozkład zawartości wilgoci
Strefa przebywania ludzi – okres letni	
	
Strefa przebywania ludzi – okres zimowy	
	

Rys. 6.27 Przestrzenny rozkład parametrów powietrza w strefie przebywania ludzi – wariant III – okres letni i zimowy

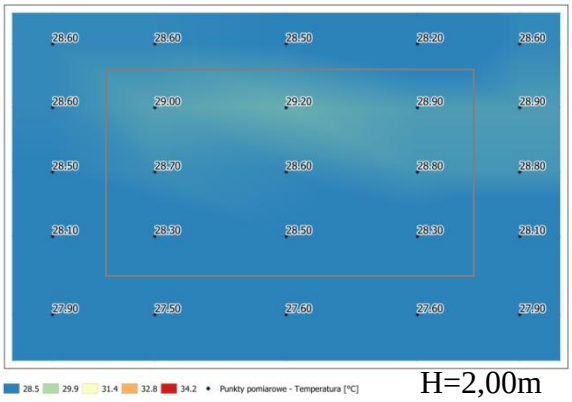
Rozkład przestrzenny temperatury powietrza



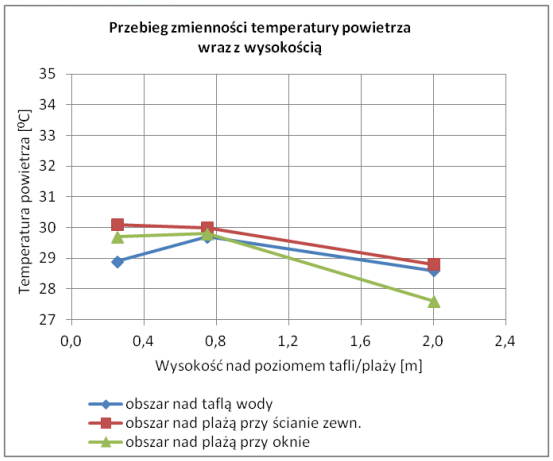
H=0,25m



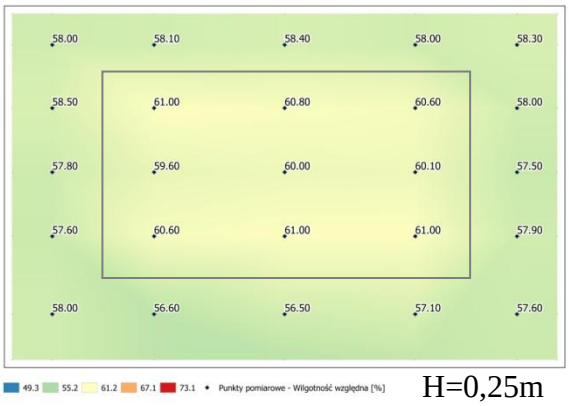
H=0,75m



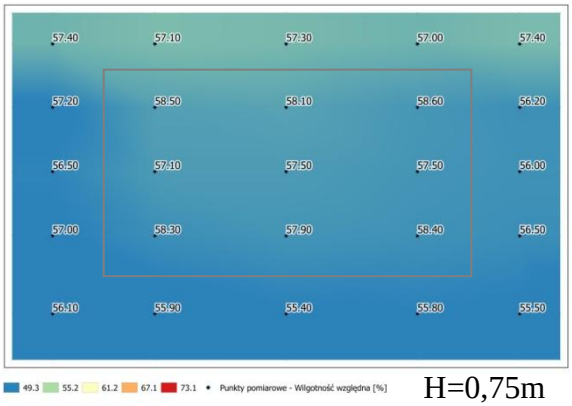
H=2,00m



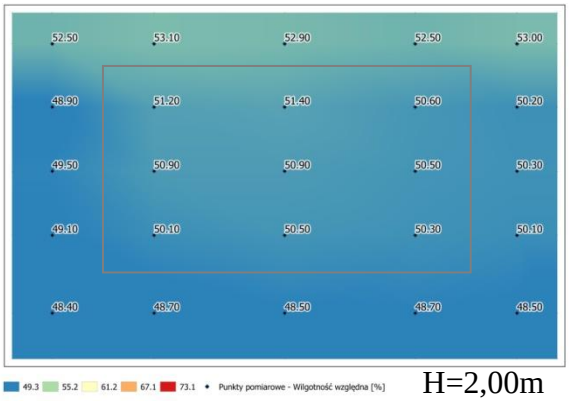
Rozkład przestrzenny wilgotności względnej



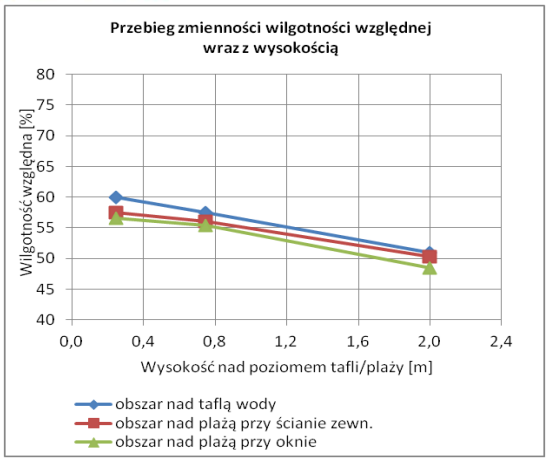
H=0,25m



H=0,75m



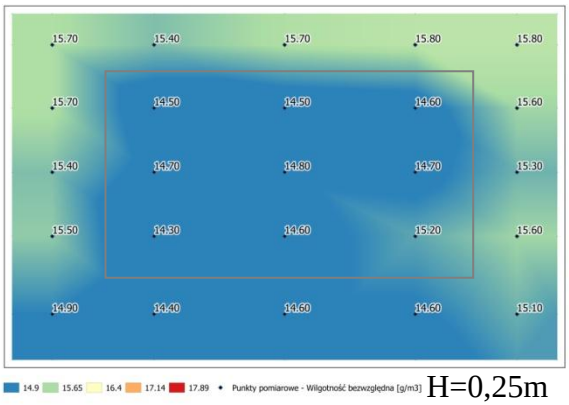
H=2,00m



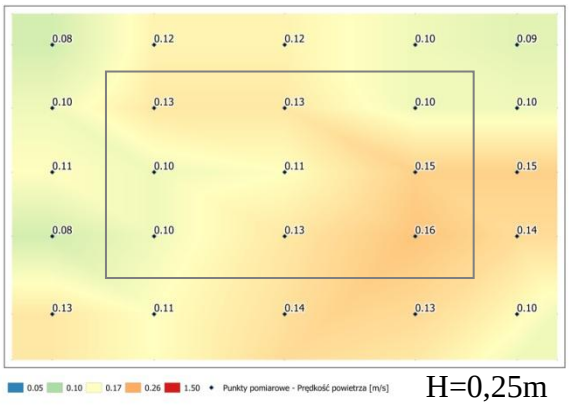
Rys. 6.28 Rozkład przestrzenny temp. i wilgotności względnej powietrza wewn. – wariant III – lato

Rozkład przestrzenny zawartości wilgoci

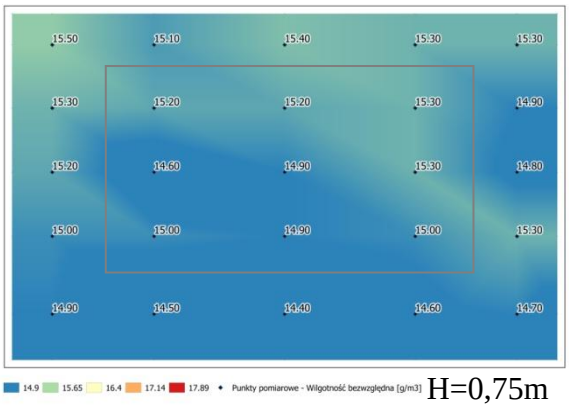
Rozkład przestrzenny prędkości powietrza



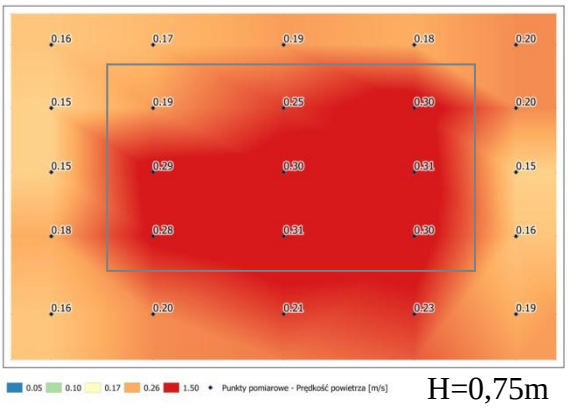
H=0,25m



H=0,25m



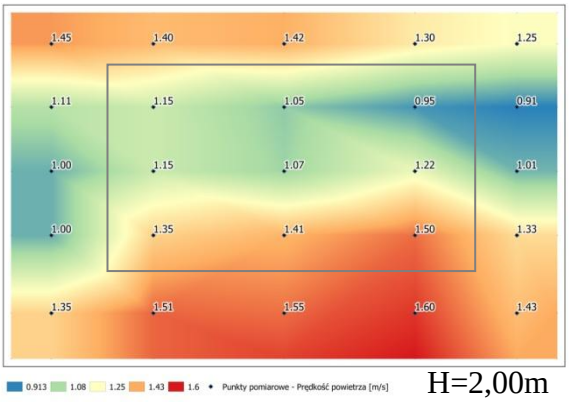
H=0,75m



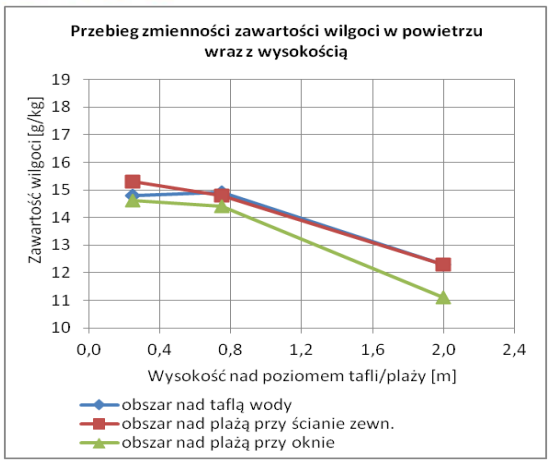
H=0,75m

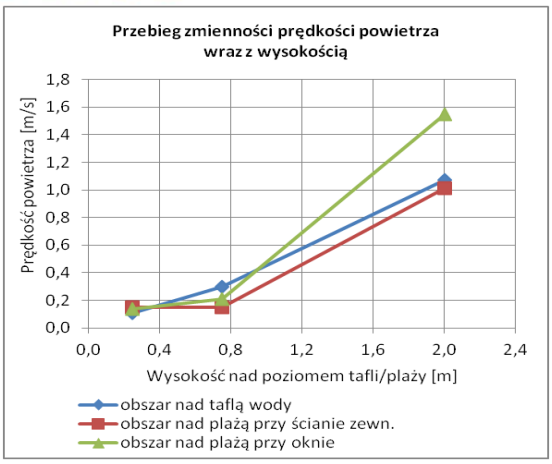


H=2,00m



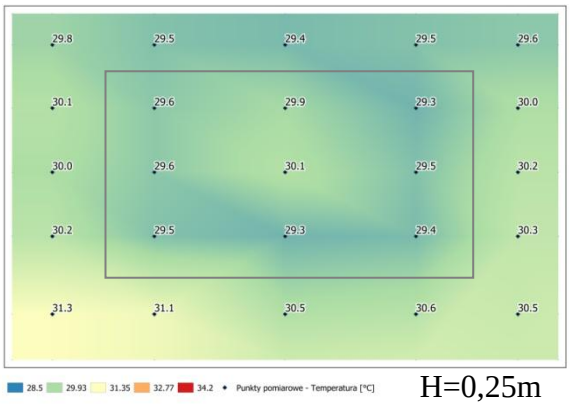
H=2,00m



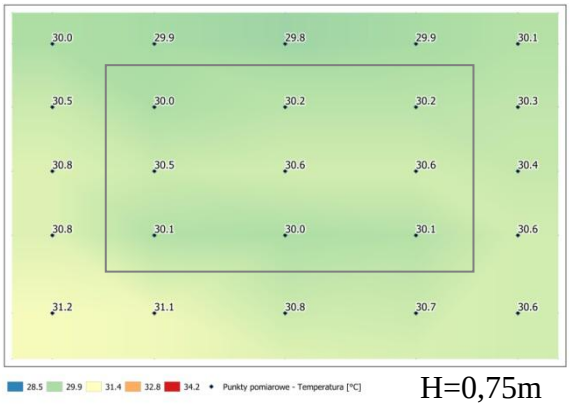


Rys. 6.29 Rozkład przestrzenny zawartości wilgoci i prędkości powietrza – wariant III – lato

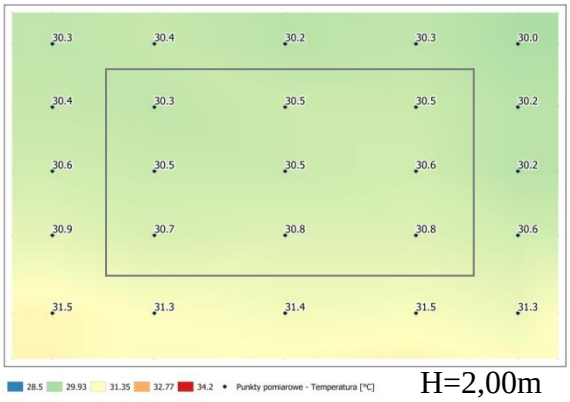
Rozkład przestrzenny temperatury powietrza



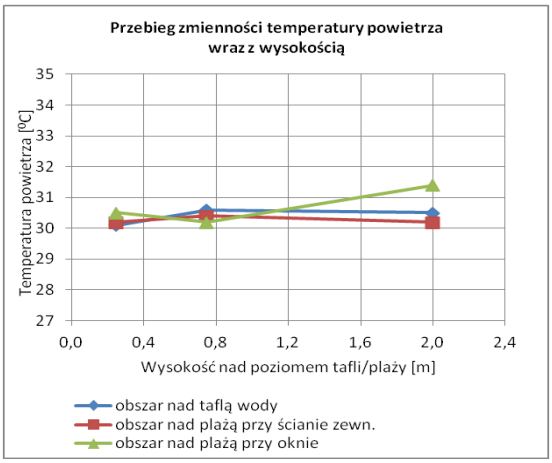
H=0,25m



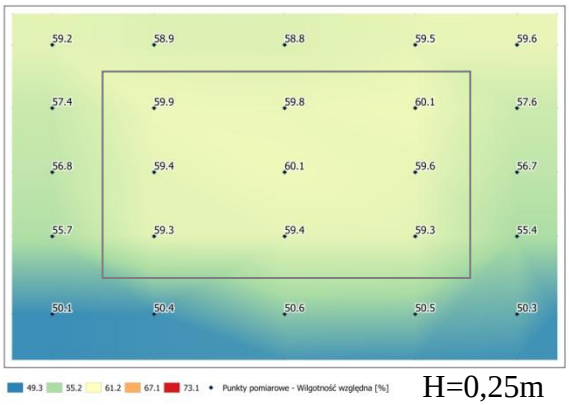
H=0,75m



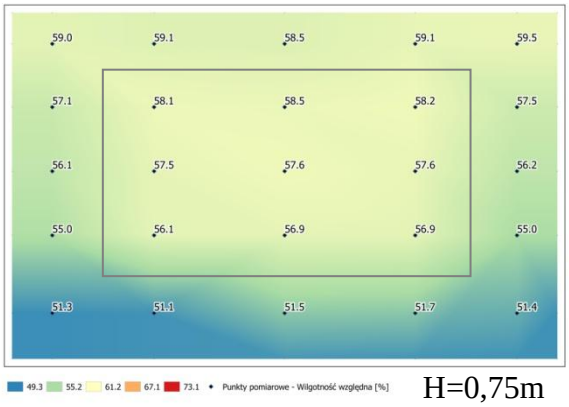
H=2,00m



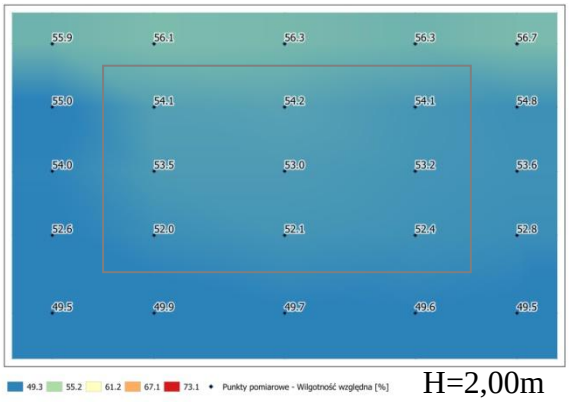
Rozkład przestrzenny wilgotności względnej



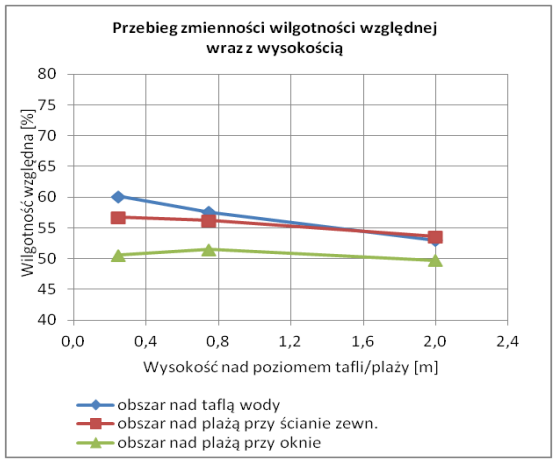
H=0,25m



H=0,75m



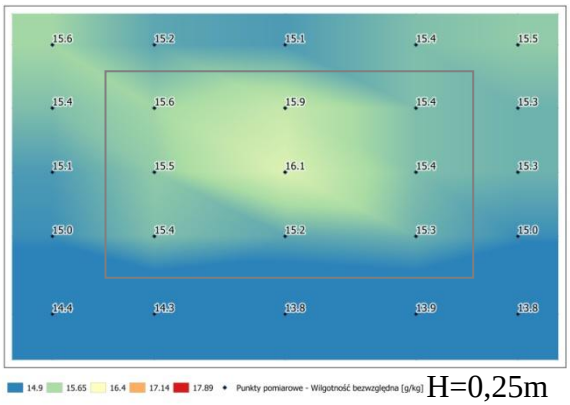
H=2,00m



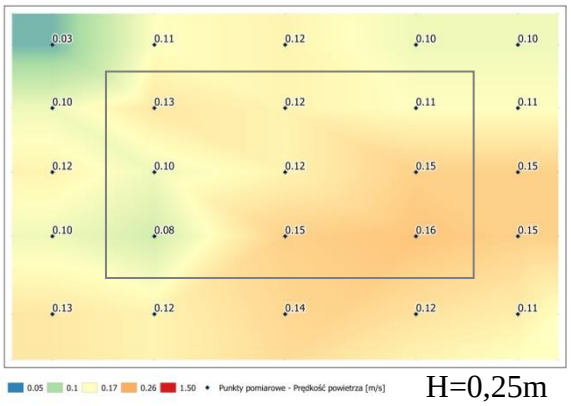
Rys. 6.30 Rozkład przestrzenny temp. i wilgotności względnej powietrza wewn. – wariant III – zima

Rozkład przestrzenny zawartości wilgoci

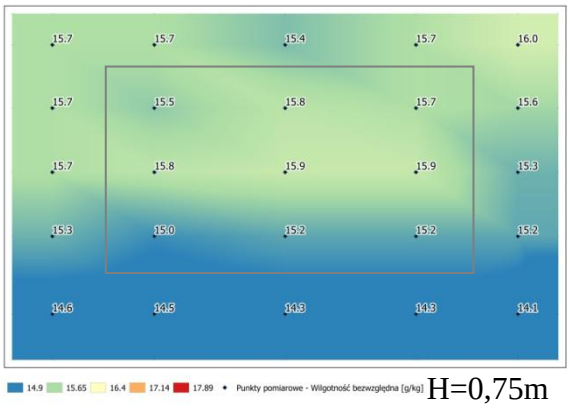
Rozkład przestrzenny prędkości powietrza



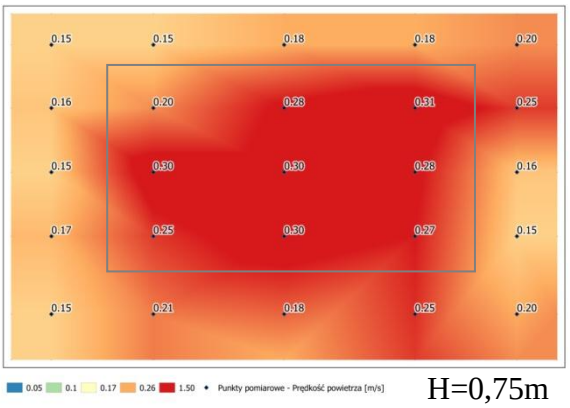
H=0,25m



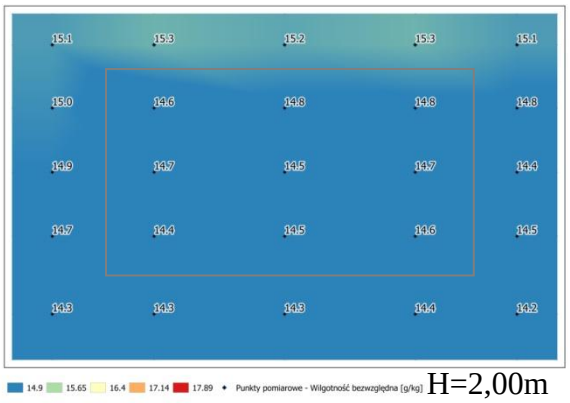
H=0,25m



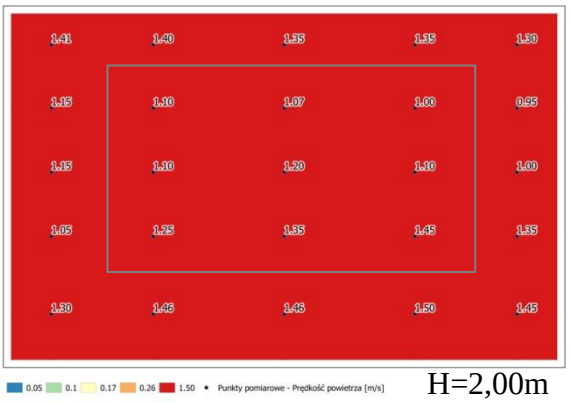
H=0,75m



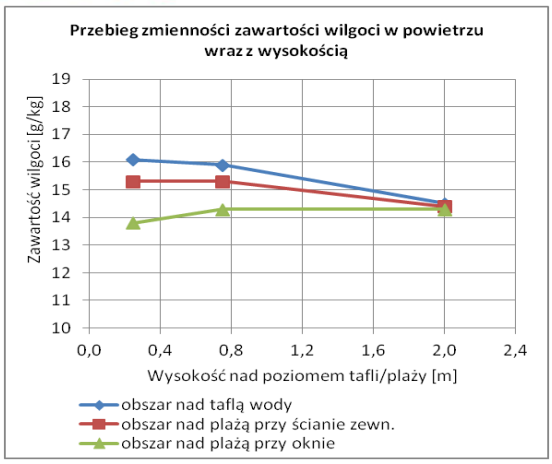
H=0,75m

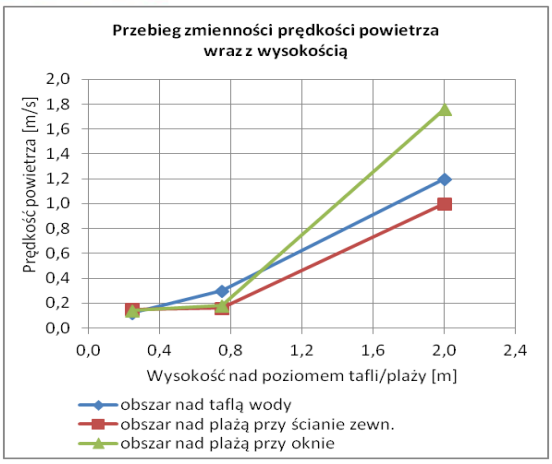


H=2,00m



H=2,00m





Rys. 6.31 Rozkład przestrzenny zawartości wilgoci i prędkości powietrza – wariant III – zima

Przestrzenny rozkład temperatury powietrza i wilgotności względnej w okresie letnim i zimowym wykazuje dużą równomierność w pomieszczeniu basenowym (Rys. 6.27, Rys. 6.28, Rys. 6.30). Obszar nad taflą wody charakteryzuje się niższą temperaturą o ok. $1 \div 1{,}5^{0}C$ niż w obszarze nad brzegiem. Podobnie jest z zawartością wilgoci gdzie różnica waha się w zakresie 0,5÷1g/kg, co wynika z ciągłego procesu parowania wody. Obszar podsufitowy wentylowany jest ze znacznie większą prędkością (0,95÷1,45 m/s) niż w pozostałych wariantach, wynika to z założenia utrzymania kurtyny poziomej, która zabezpiecza sufit przed wykropleniem wilgoci oraz kieruje powietrze do kanału wywiewnego.

Z przeprowadzonych pomiarów wynika, że rozdział powietrza góra-dół z układem obiegowym (wariant III) charakteryzuje się efektywniejszym przepływem powietrza w całej kubaturze pomieszczenia basenowego w porównaniu z układami wariantu I i II. Potwierdzają to wyższe wartości prędkości powietrza rzędu 0,10÷0,30 m/s w znacznym obszarze pomieszczenia (Rys. 6.30) oraz utrzymanie parametrów powietrza (temperatury i wilgotności względnej) w zalecanych zakresach. Badany układ wentylacyjny zapewnia ruch powietrza nad taflą wody, gdzie kumulują się zanieczyszczenia gazowe m.in. THM-y, co daje możliwość ich skutecznego usunięcia z pomieszczenia basenowego.

6.6 Test zastąpienia THM-ów ditlenkiem węgla

Pomiar zawartości THM-ów należy do grupy bardziej skomplikowanych w chemii analitycznej i z reguły nie ma możliwości pomiaru ich stężenia w miejscu poboru próbek. Próbki oznaczane są w specjalistycznym laboratorium Do badania zawartości THM-ów w powietrzu stosuje się chromatografię gazową z detektorem płomieniowo-jonizacyjnym (metoda GC-FID). Do badania zawartości THM w wodzie stosuje się technikę mikroekstrakcji z fazy nadpowierzchniowej (HS-SPME), a następnie chromatograf gazowy z detektorem wychwytu elektronów (GC-ECD) lub chromatograf gazowy ze spektrometrem mas (GC-MS). Istnieje też druga metoda, stosująca szeregowo podłączony chromatograf z detektorem płomieniowo-jonizacyjnym (GC-FID) [28]. Druga metoda jest dokładniejsza od pierwszej, pozwala wykryć stężenia rzędu 0,1 mg/m^3, jest jednak kosztowniejsza, zaś do badań na potrzeby obecnych norm wystarcza pierwsza z metod.

Ze względu na kłopotliwy pomiar THM-ów w wodzie i powietrzu, zdecydowano o wprowadzeniu gazu znacznikowego o podobnych parametrach.

W pracach badawczych najczęściej stosowanymi gazami znacznikowymi są: hel, ditlenek węgla, heksafluorek siarki, tlenek azotu. W Tab. 6.9 zestawiono właściwości fizykochemiczne powyższych gazów.

Do prowadzenia badań w pomieszczeniu modelowym wybrano ditlenek węgla kierując się następującymi zaletami:

- prosty pomiar,
- dostępność urządzeń pomiarowych,
- dobra rozpuszczalność w wodzie,
- lotność, CO_2 uwalnia się z wody do powietrza,
- gęstość większa od powietrza, determinuje kumulacje nad taflą wody.

Przed rozpoczęciem pomiarów parametrów powietrza, ditlenek węgla podawano do wody basenowej za pomocą typowego akwarystycznego zestawu do dozowania CO_2. Zestaw wyposażony był w butlę ciśnieniową z CO_2, reduktor ciśnienia oraz dyfuzor do wtłaczania ditlenku węgla do wody.

Reakcje zachodzące w wodzie po zadozowaniu ditlenku węgla opisują rekcje (2.1÷2.5 w rozdziale 2.3.3). Formy występowania ditlenku węgla zależą od pH wody. W związku z tym, że w wodzie o odczynie poniżej pH=4 występuje wyłącznie rozpuszczony ditlenek węgla, podczas badań utrzymywano niskie pH.

Tab. 6.9 Właściwości fizykochemiczne znaczników gazowych powszechnie stosowanych w pracach badawczych [38]

Typ gazu	Hel	Ditlenek węgla		Heksafluorek siarki	Tlenek azotu
Symbol chemiczny	He	CO_2		SF_6	N_2O
Aparat pomiarowy	chromatograf gazowy	spektro-fotometr	chromatograf gazowy	chromatograf gazowy	spektrofotometr
Dolna granica wykrywalności [ppm]	300×10^{-6}	1×10^{-6}	70×10^{-6}	$0{,}001 \times 10^{-6}$	1×10^{-6}
Dopuszczalne stężenie [ppm]	-	300 x 10-6		300×10^{-6}	5%
Gęstość [kg/m^3]	0,178	1,96		6,17	1,34
Masa molowa [g/mol]	4,0	44,01		146,06	30,01
Uwagi	He jest najmniej aktywnym pierwiastkiem chemicznym	CO_2 jest dobrze rozpuszczalny w wodzie		czysty SF_6 jest gazem bezwładnym. Generuje toksyczny gaz przy temp. > 500^0C	N_2O jest rozpuszczalny w wodzie. Generuje tlen przy podgrzaniu do 250^0C

Rejestrację stężenia CO_2 w pomieszczeniu basenowym rozpoczynano po ustaleniu się stanu nasycenia wody ditlenkiem węgla. Podczas prowadzenia badań proces chlorowania, koagulacji i korekty pH był wyłączony, aby nie zaburzać procesu rozpuszczania CO_2 oraz jego desorpcji do powietrza nad taflą wody.

Podczas serii pomiarowych mierzono stężenie CO_2 w powietrzu i dodatkowo temperaturę wody i powietrza.

Tab. 6.10 Parametry mierzone podczas serii pomiarowych wraz z przyrządami pomiarowymi

Parametr	Jednostki	Przyrząd pomiarowy	Zakres pomiarowy	Dokładność pomiaru
temperatura wody	^{0}C	termometr elektroniczny z sondą (Stalgast)	-50 ÷ 300	± 0,1
temperatura powietrza	^{0}C	sonda pomiarowa AR235 (Apar)	-30 ÷ 80	± 0,2
		miernik wielofunkcyjny 435-4 (Testo)	-50 ÷ 150	± 0,2
CO_2 w powietrzu	ppm CO_2	sonda do pomiaru CO_2 z miernikiem (Testo)	0 ÷ 10000	± (150 + 5% mierzonej wart.)
	ppm CO_2	rejestrator HT-2000 (Outest)	0 ÷ 9999	± (50 + 5% mierzonej wart.)

6.6.1 Badanie występowania związków znacznikowych w powietrzu dla wybranych układów wentylacji

Badania występowania ditlenku węgla w powietrzu przeprowadzono dla 3 wybranych układów wentylacyjnych:

– układ klasyczny (wariant I),
– układ klasyczny z odciągami brzegowymi (wariant II),
– układ góra-dół z układem obiegowym (wariant III).

Dla każdego wariantu przeprowadzono 3 serie pomiarowe na wysokości 0,25m nad taflą wody i 0,75m nad brzegiem (strefa przebywania ludzi pływających i przemieszczających się po brzegu). Zakresy zmierzonych parametrów zestawiono w tabeli Tab. 6.11, Podczas serii pomiarowych średnia wartość temperatury wody wyniosła 28^0C.

Tab. 6.11 Podsumowanie zmierzonych parametrów dla trzech wariant ów

Mierzony parametr	Jednostka	Zakres dla powietrza w obszarze 0,25m nad taflą	Zakres dla powietrza w obszarze 0,75m nad brzegiem
wariant I			
temperatura powietrza	^{0}C	29,2÷33,2	29,5÷30,5
CO_2 w powietrzu	ppm CO_2	>10000 (poza zakresem)	>10000 (poza zakresem)
wariant II			
temperatura powietrza	^{0}C	28,5÷33,8	28,7÷30,5
CO_2 w powietrzu	ppm CO_2	9100 do ponad 10000	8100÷9200
wariant III			
temperatura powietrza	^{0}C	27,5÷30,5	28,1÷29,0
CO_2 w powietrzu	ppm CO_2	7100 ÷8300	6500 ÷7800

Na podstawie analizy wartości stężenia ditlenku węgla w pomieszczeniu basenowym stwierdzono, że rodzaj przyjętego układu wentylacyjnego ma wpływ na przepływ powietrza i usuwanie zanieczyszczeń ze strefy przebywania ludzi.

Badania pokazały, że układ wentylacyjny góra-dół z układem obiegowym (wariant III) najefektywniej usunął stężenie CO_2 ze strefy przebywania ludzi (w płaszczyznach na wysokości 0,25m nad taflą wody i 0,75m nad brzegiem). W stosunku do wariantu II stężenie ditlenku węgla w badanej strefie jest niższe o ok. 2000ppm, a w stosunku do wariantu I o ponad 3000ppm.

Traktując badania przeprowadzone z gazem znacznikowym jako reprezentatywne dla THM-ów stwierdzono, że również w przypadku tego związku najkorzystniejszy jest układ wentylacyjny góra-dół z układem obiegowym (wariant III).

7. Symulacje numeryczne przepływu powietrza

Symulacje numeryczne przeprowadzane w programach CFD (Computational Fluid Dynamics – Obliczeniowa Mechanika Płynów) znalazły szerokie zastosowanie w wielu dziedzinach inżynierii. Coraz częściej wykorzystywane są również w badaniach i projektowaniu instalacji branży sanitarnej HVAC (Heating, Ventilation, Air Conditioning). Analiza CFD daje możliwość m.in. weryfikacji i wizualizacji już istniejących projektów instalacji wentylacyjnych oraz tych dopiero w fazie projektowania. Umożliwia odwzorowanie profilu strugi powietrza nawiewanego do pomieszczeń oraz weryfikacji zakłóceń np. w postaci wewnętrznych zysków ciepła). Takie odwzorowanie pozwala na identyfikację obszarów nieprawidłowo wentylowanych, o parametrach nie spełniających warunków komfortu cieplnego oraz jakości powietrza.

Symulacje numeryczne poprzez prognozowanie profilu przepływu powietrza wentylacyjnego w pomieszczeniach pozwalają m.in. na optymalizację lokalizacji oraz konstrukcji i wymiarów otworów wentylacyjnych [54], co determinuje właściwą pracę układu wentylacyjnego. Należy jednak pamiętać, że pomimo ciągłego rozwoju programów numerycznych, wyniki symulacji są rozwiązaniem przybliżonym i mogą być obarczone błędem. Końcowa weryfikacja w warunkach rzeczywistych czy nawet badawczych jest niezbędna dla uzyskania wiarygodnego rozwiązania. Dlatego też w pracy wyniki symulacji zostały poddane weryfikacji z otrzymanymi danymi podczas przeprowadzonych prac badawczych w pomieszczeniu modelowym.

7.1 Założenia i struktura modelu matematycznego

Analiza CFD opiera się na rozwiązywaniu równań różniczkowych, będących matematycznym zapisem praw zachowania:

- masy – równanie ciągłości przepływu,
- pędu – równanie Naviera-Stokesa,
- energii – równanie energii,

oraz równania dyfuzji i równania stanu.

Są to równania różniczkowe cząstkowe, eliptyczne, w których zmiennymi niezależnymi są współrzędne rozpatrywanego punktu przestrzeni x_i, czyli x, y, z oraz czas τ, a z których wyznaczyć można rozkłady chwilowych wartości następujących zmiennych zależnych:

składowa wektora W celu rozwiązania powyższych równań należy zdefiniować warunki począt
prędkości, ciśnienia i temperatury płynu oraz stężeń zanieczyszczeń gazowych [53].
i brzegowe, geometryczne, kinetyczne oraz cieplne dla modelowanego przepływu w przestrzeni. Z uwagi, że opisywany układ równań różniczkowych cząstkowych jest silnie nieliniowy, trudno go rozwiązać analitycznie, z wyjątkiem bardzo uproszczonych przypadków o ograniczonym zastosowaniu praktycznym. W związku z tym, analiza CFD dla przeprowadzenia obliczeń wykorzystuje metody numeryczne, najczęściej stosowanymi są:

- metoda objętości skończonych (FVM – Finite Volume Method),
- metoda elementów skończonych (FEM – Finite Element Method),
- metoda różnic skończonych (FDM – Finite Difference Method),
- metoda elementów brzegowych (BEM – Boundary Element Method),
- metoda całkowania numerycznego.

Punktem wyjścia dla przeprowadzenia obliczeń zgodnie z powyższymi metodami jest podział rozpatrywanego obszaru ciągłego na skończoną liczbę podobszarów (generacja siatki), a następnie na poszukiwaniu i znalezieniu rozwiązania przybliżonego w tych podobszarach, w sposób iteracyjny.[45]

Analiza CFD dla pomieszczeń z mechaniczną instalacją wentylacyjną, jakimi są m.in. pływalnie, wymaga uwzględnienia w modelu numerycznym specyfiki zachodzących zjawisk fizycznych dla przepływów trójwymiarowych stacjonarnych i niestacjonarnych, w warunkach izotermicznych i nieizotermicznych. [53]. Dodatkowo, w tego typu pomieszczeniach należy uwzględnić turbulentny charakter przepływu powietrza wentylacyjnego, co związane jest z wyborem i zastosowaniem modelu turbulencji, który determinuje sposób zadawania warunków brzegowych na ścianach i ich otoczeniu.

Przeprowadzone prace symulacyjne w solverach CFD wskazują, że dla jakości przeprowadzonych symulacji istotne jest, aby:

- właściwie wprowadzić warunki brzegowe na ścianach modelowanego pomieszczenia, (konstrukcja ścian, strumienie ciepła),
- uwzględnić lokalizację i kształt otworów wentylacyjnych,
- właściwie wprowadzić warunki brzegowe dla strug powietrza nawiewanego,
- uwzględnić emisję zanieczyszczeń gazowy (np. pary wodnej),
- uwzględnić dokładne wymiary i wyposażenie pomieszczenia,
- dobrać odpowiednio siatkę obliczeniową, ze zwróceniem uwagi na strukturę i zagęszczenie.

Modelowanie turbulencji w programach CFD jest realizowane przez tzw. równania RANS (Reynolds Avaraged Navier-Stokes Equations). Są to równania Naviera-Stokesa przekształcone do równania Reynoldsa, które dla płynu nieściśliwego mogą być zapisane w postaci [11]:

$$\rho\left(\frac{\partial \overline{U}_\iota}{\partial t} + U_j\frac{\overline{U}_\iota}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\sigma_{ij}\right) + \overline{F}_\iota\right) \tag{6.1}$$

gdzie:

U – prędkość,
p – ciśnienie,
ρ – gęstość płynu,
F – siła masowa.

Natomiast tensor naprężeń przybiera postać:

$$\sigma_{ij} = -\bar{p}\delta_{ij} + \nu p\left(\frac{\partial \overline{U}_\iota}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{U}_J}{\partial x_i}\right) + (\sigma_T)_{ij} \tag{6.2}$$

Zawiera on dodatkowy, niewystępujący w równaniu Naviera-Stokesa człon, nazywany tensorem naprężeń Reynoldsa:

$$(\sigma_T)_{ij} = -\rho\overline{U_\iota U_J} \tag{6.3}$$

Tensor naprężeń Reynoldsa jest tensorem symetrycznym, co w przypadku układu przestrzennego oznacza, że wartości sześciu z dziewięciu składowych są nieznane. Równanie ciągłości części średniej przybiera postać:

$$\frac{\partial \overline{U}_\iota}{\partial x_i} = 0 \tag{6.4}$$

Równania (6.1) i (6.4) uzupełnione o zależności oparte na modelowaniu, stanowią podstawę modeli turbulentnych RANS. Z uwagi, że równania Naviera-Stokesa są nieliniowe, każdy proces uśredniania generuje dodatkowe niewiadome, które wymagają powiązania z wielkościami średnimi. Ze względu na złożoność niewiadomych występujących w powyższych równaniach, nie można ich rozwiązać nawet po uwzględnieniu warunków brzegowych (układ zostaje niedomknięty) [81]. Do zamknięcia układu wymagane są dodatkowe związki funkcjonalne między naprężeniami Reynoldsa lub współczynnikami efektywnymi, a uśrednionymi parametrami polowymi, co określa się modelami turbulencji. [24]. W solverach CFD do symulacji przepływu płynów głównie wykorzystywane są dwa rodzaje modeli turbulencji:

- modele lepkości turbulentnej - EVM (Eddy Viscosity Models),
- modele naprężeń Reynoldsa - RSM (Reynolds Stress Models).

Do wykonania symulacji numerycznych na potrzeby pracy został wybrany model EVM, który wykorzystuje hipotezę Boussinesqua. Bazuje ona na założeniu, że naprężenia turbulentne są proporcjonalne do prędkości deformacji i wyrażone są za pomocą dynamicznego współczynnika lepkości turbulencji v_t. Na tej podstawie naprężenie Reynoldsa można wyrazić poniżaszą zależnością:

$$\tau_s = -\overline{\rho\vartheta_i\vartheta_j} = \rho\vartheta_t\left(\frac{\delta\overline{V_i}}{\delta x_i} + \frac{\delta\overline{V_j}}{\delta x_j}\right) \tag{6.5}$$

Modele EVM różnią się między sobą sposobem wyznaczania współczynnika lepkości turbulentnej v_i, który opisuje lokalny stan turbulencji i jest zależny od położenia oraz czasu.

Najbardziej znanym i często stosowanym w analizie CFD jest dwurównaniowy model *k-ε*, w którym współczynnik lepkości turbulencji jest wyznaczany przy pomocy dwóch parametrów charakterystycznych dla przepływów turbulentnych:

- energii kinetycznej turbulencji *k*, będącej miarą części energii kinetycznej przepływu, której źródłem są turbulencje prędkości:

$$k = \frac{1}{2}\overline{v_i v_t} \tag{6.6}$$

- szybkości dyssypacji tej energii ε, interpretowanej fizycznie jako szybkość zamiany energii kinetycznej na ciepło w wyniku rozpadu wirów:

$$\varepsilon = v\overline{\frac{\delta v_i \cdot v_t}{\delta x_i \cdot x_t}} \tag{6.7}$$

Oba parametry i współczynnik lepkości turbulencji wiąże zależność:

$$v_i = C_\mu \cdot \frac{k^2}{\varepsilon} \tag{6.8}$$

Wartości parametrów k i ε w modelowanym obszarze można wyznaczyć z równań różniczkowych transportu:

- równania transportu energii kinetycznej turbulencji:

$$\frac{\partial k}{\partial \tau} + V_j\frac{\partial k}{\partial x_j} = v_i\frac{\partial\overline{V_i}}{\partial x_j}\left(\frac{\partial\overline{V_i}}{\partial x_i} + \frac{\partial\overline{V_j}}{\partial x_j}\right) + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(v_i + \frac{v_i}{Pr_k}\right)\frac{\partial k}{x_i}\right] + g_i\beta\frac{v_i}{Pr_i}\frac{\partial\overline{T}}{\partial x_j} - \varepsilon \tag{6.9}$$

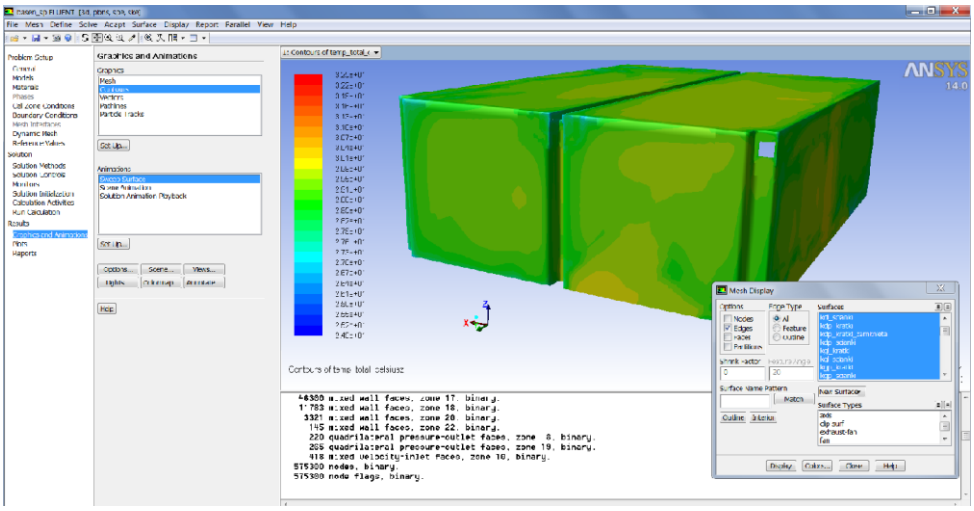
- równanie transportu szybkości dyssypacji energii kinetycznej turbulencji:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau} + \overline{V}_J \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = C_1 \frac{\varepsilon}{k} v_i \left(\frac{\partial \overline{V}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{V}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \overline{V}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(v_i + \frac{v_i}{Pr_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] - C_2 \frac{\varepsilon^2}{k} + C_3 \frac{\varepsilon}{k} g_j \beta \frac{v_i}{Pr_\varepsilon} \frac{\partial \overline{T}}{\partial x_j} \qquad (6.10)$$

Wartość liczb Prandtla: turbulentnej Pr_t, energijnej Pr_k, dyssypacyjnej Pr_ε oraz współczynników C_1, C_2, C_3 występujących w równaniach, określone zostały poprzez eksperyment lub optymalizację komputerową dla różnych rodzajów przepływów [53].

W pracy przyjętym obszarem modelowym zostało zdefiniowane pomieszczenie badawcze, wyposażone w wielowariantową instalację wentylacyjną. W celu odwzorowania warunków zbliżonych do tych panujących podczas przeprowadzania prac pomiarowych, zastosowany model obliczeniowy uwzględnia następujące zjawiska:

- przepływ turbulentny (model turbulencji k-ε),
- konwekcja swobodna,
- transport masy (para wodna),
- wymiana ciepła poprzez przewodzenie na ściankach domeny obliczeniowej.



Rys. 7.1 Widok z programu Ansys Fluent podczas definiowania parametrów

7.2 Wykorzystane oprogramowanie

Dla potrzeb przeprowadzenia symulacji numerycznych wykorzystano program CFD (Computational Fluid Dynamics – Obliczeniowa Mechanika Płynów) umożliwiający szczegółową analizę zagadnień związanych z przepływem płynów (m.in. powietrza wewnątrz pomieszczeń). Program przeprowadza obliczenia bazujące na numerycznym rozwiązywaniu równań różniczkowych opisujących wymianę pędu, bilansu energii i masy. W wyniku obliczeń generowane są dane o przepływie płynu (rozkład pola prędkości, pole ciśnienia), ruchu ciepła (pole temperatury) i masy.

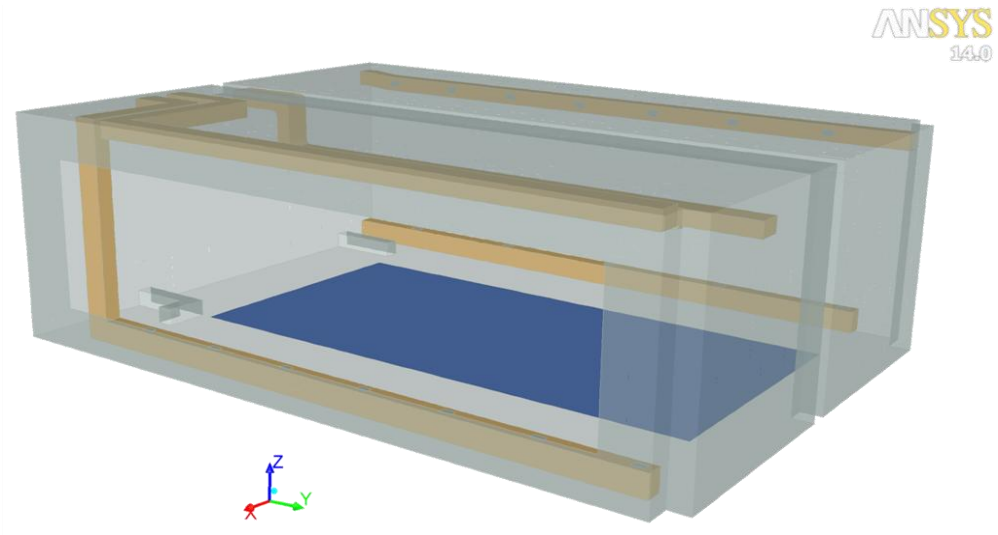
Do wykonania symulacji w ramach pracy został wybrany program Fluent Ansys (wersja 14.0). Wybrana metoda objętości skończonych w oparciu o równania Naviera – Stokesa z uwzględnieniem modelu turbulencji *k-ε* okazała się odpowiednia dla uzyskania profilu parametrów powietrza zbliżonego do wyników otrzymanych w trakcie prac badawczych przeprowadzonych w pomieszczeniu modelowym.

Praca w programie została przeprowadzona w następujących krokach:

- Budowa modelu i siatki obliczeniowej;
- Zdefiniowanie warunków brzegowych;
- Wybór metody obliczeniowej i przeprowadzenie obliczeń;
- Opracowanie wyników obliczeń w postaci pól temperatury, ciśnienia, prędkości;
- Rewizja wyników i ewentualna modyfikacja modelu geometrycznego lub siatki obliczeniowej;

7.2.1 Budowa modelu i siatki obliczeniowej

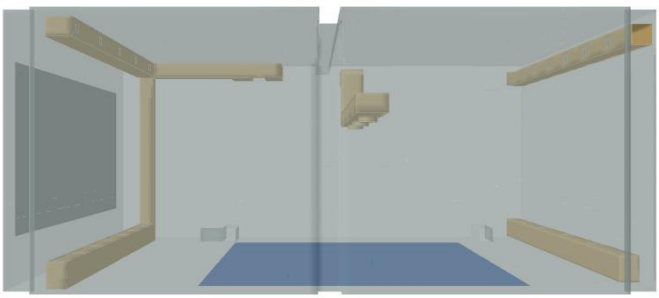
Model geometryczny pomieszczenia modelowego wraz z kanałami wentylacyjnymi został utworzony w programie AutoCad. Następnie model ten został wczytany do programu SpaceClaim, gdzie geometria została oczyszczona i przygotowana pod kątem symulacji. Z programu SpaceClaim geometrię wyeksportowano w formacie STEP *.stp i wczytano do programu DesignModeler dedykowanego do przygotowania geometrii do generacji tetrahedralnej siatki obliczeniowej.



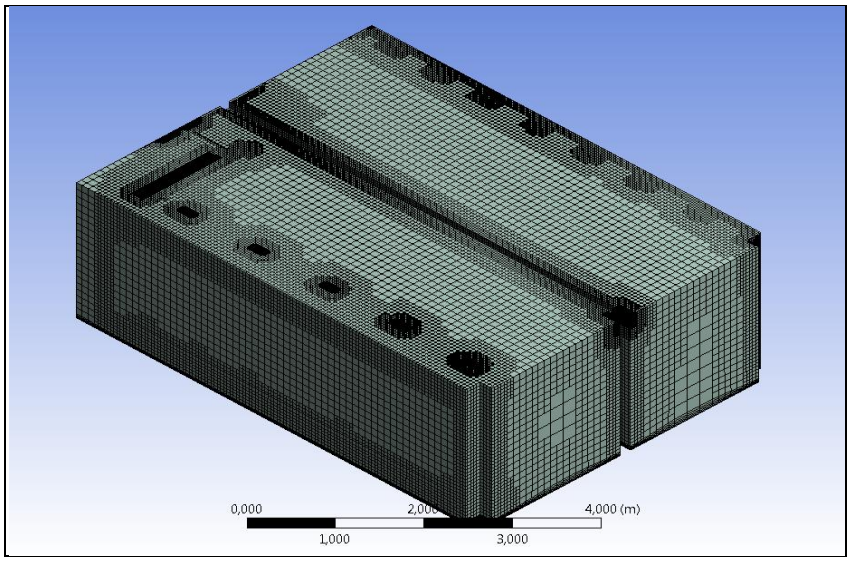
Rys. 7.2 Geometria pomieszczenia – widok ogólny



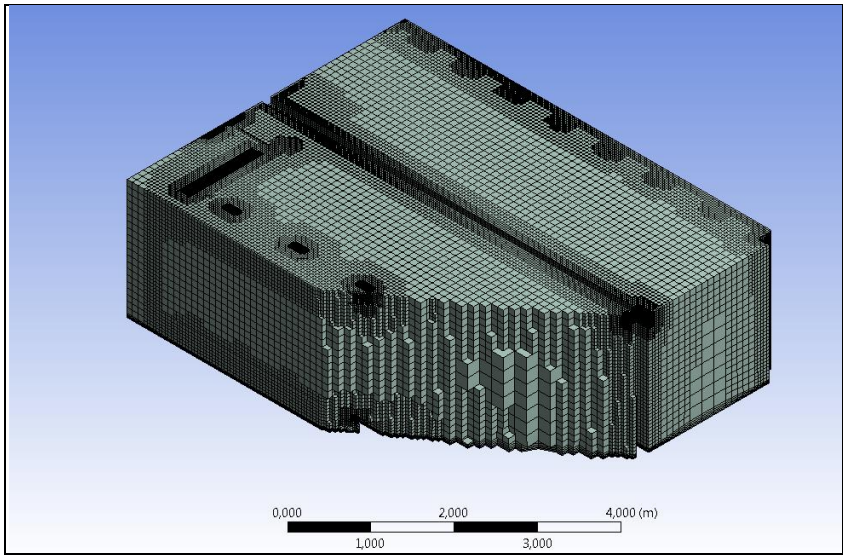
Rys. 7.3 Geometria pomieszczenia – widok wzdłuż dłuższej ściany



Rys. 7.4 Geometria pomieszczenia – widok wzdłuż krótszej ściany



Rys. 7.5 Siatka obliczeniowa



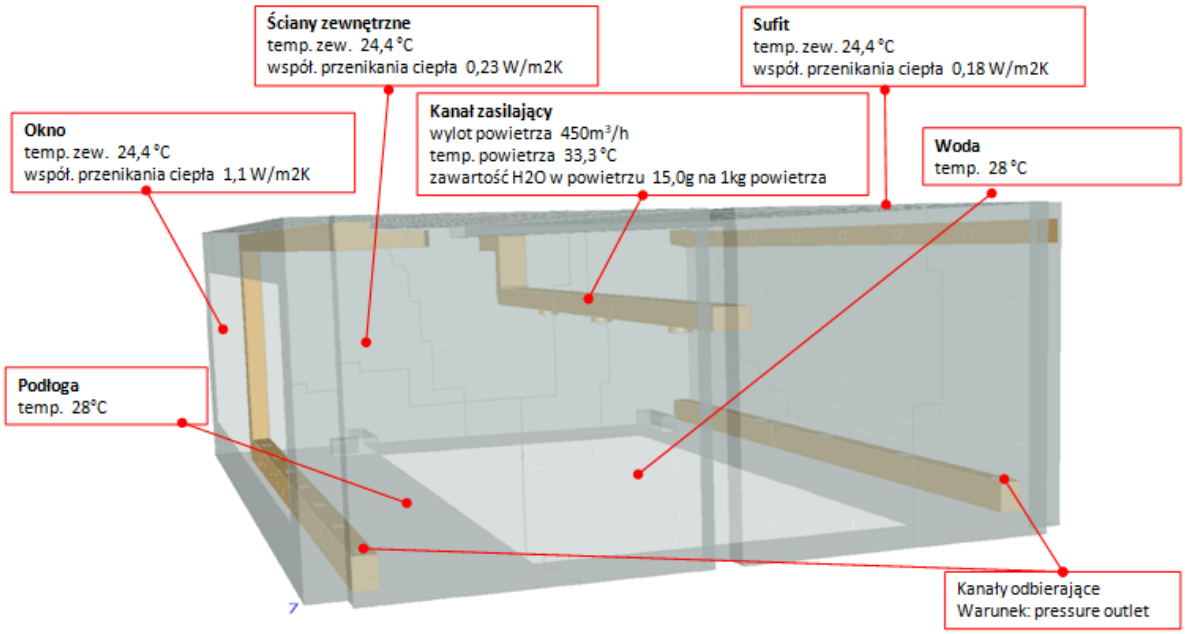
Rys. 7.6 Siatka obliczeniowa - przekrój

Siatka obliczeniowa została zagęszczona w rejonach nagłych zmian kształtu geometrii oraz w rejonach wlotów i wylotów z kanałów wentylacyjnych, gdyż w tych miejscach spodziewano się największych zawirowań powietrza.

7.2.2 Zdefiniowanie warunków brzegowych

Warunkami brzegowymi nazywamy parametry, które stanowią konieczne dane wejściowe symulacji. Dla pomieszczenia basenowego, będącego przedmiotem modelowania w pracy, zadano następujące warunki brzegowe:

- temperatura zewnętrzna powietrza [^{0}C]
- temperatura wewnętrzna powietrza [^{0}C]
- współczynnik przenikania ciepła przegród budowlanych [W/m^{2}K]
- zawartość H_2O w powietrzu wewnętrznym [g $_{H2O}$/kg $_{p.s}$]
- temperatura wody basenowej [^{0}C]



Rys. 7.7 Zadane warunki brzegowe dla jednego z badanych wariantów

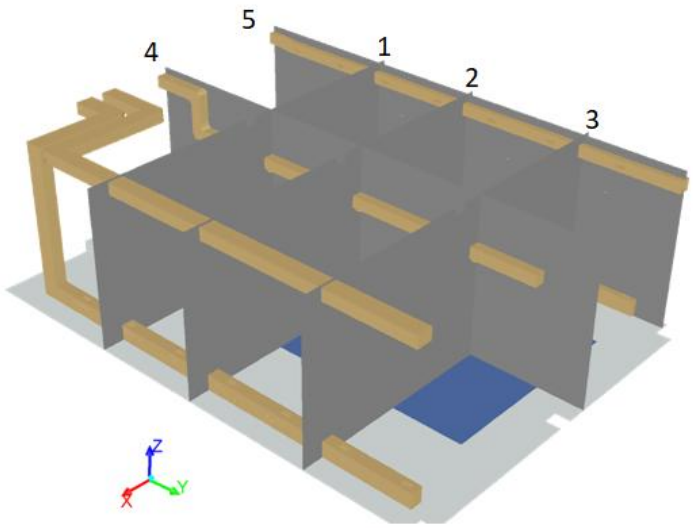
7.2.3 Wybór metody obliczeniowej i przeprowadzenie obliczeń

Dla przeprowadzenia symulacji w programie Ansys Fluent, na potrzeby pracy wybrano metodę objętości skończonych (FVM – Finite Volume Method). Metoda w uproszczeniu polega na podziale rozpatrywanego obszaru ciągłego na skończoną liczbę podobszarów (tworzenie siatki), a następnie na poszukiwaniu i znalezieniu rozwiązania przybliżonego w tych podobszarach [45]. Metoda ta została opracowana do rozwiązywania problemów, w których zasada zachowania ciągłości zmiennej pola w rozpatrywanym obszarze nie musi być spełniona. Metoda FVM opiera się na analizie zachowania zmiennej pola wewnątrz komórek siatki, a nie w węzłach siatki. Podczas obliczeń tą metodą korzysta się z oszacowania całki wewnątrz komórek siatki lub jej wartości średniej - wartość całki podzielona przez objętość

komórki. Wyznaczone wartości zmiennej pola są następnie aktualizowane w kolejnych krokach czasowych, korzystając z funkcji strumienia, który przepływa przez komórki [45]. Obliczenia zostały wykonane dla dwóch wariantów wentylacyjnych z podziałem na pory roku: lato i zima.

7.2.4 Opracowanie wyników obliczeń w postaci pól temperatury, wilgotności względnej, prędkości powietrza

Wyniki obliczeń w programie Fluent generowane są dla każdego elementu siatki numerycznej, co pozwala na trójwymiarową ich wizualizację. Obrazy można tworzyć dla wybranych przekrojów, w celu czytelnego przedstawienia otrzymanych wyników (Rys. 7.8).



Rys. 7.8 Przykładowe pola przekroju do prezentacji wyników obliczeń w programie Fluent Ansys

Pola przekroju do prezentacji wyników obliczeń zostały wybrane w obszarach charakterystycznych m.in.:

- w osi symetrii wentylacyjnych otworów nawiewnych (wpływ turbulencji),
- w otoczeniu ściany zewnętrznej (wpływ zjawiska przenikania ciepła),
- w wysokości 25cm nad taflą wody (strefa przebywania ludzi).

7.2.5 Rewizja wyników i ewentualna modyfikacja modelu geometrycznego lub siatki obliczeniowej

Proces dopracowania jakości siatki oraz doboru pól powierzchni do przeprowadzania obliczeń wiąże się zwykle z koniecznością przeprowadzenia wielu iteracji. Dobór wymiaru siatki obliczeniowej wpływa na ilość punktów pomiarowych. Im więcej przyjmuje się punktów pomiarowych tym wyniki symulacji są dokładniejsze, ale wiąże się to również z wydłużeniem czasu obliczeniowego w programie Fluent Ansys. Rewizja wyników oraz optymalizacja modelu geometrycznego i siatki obliczeniowej przyczyniły się do uzyskania obrazów symulacji zbliżonych do wyników uzyskanych podczas pomiarów w pomieszczeniu modelowym.

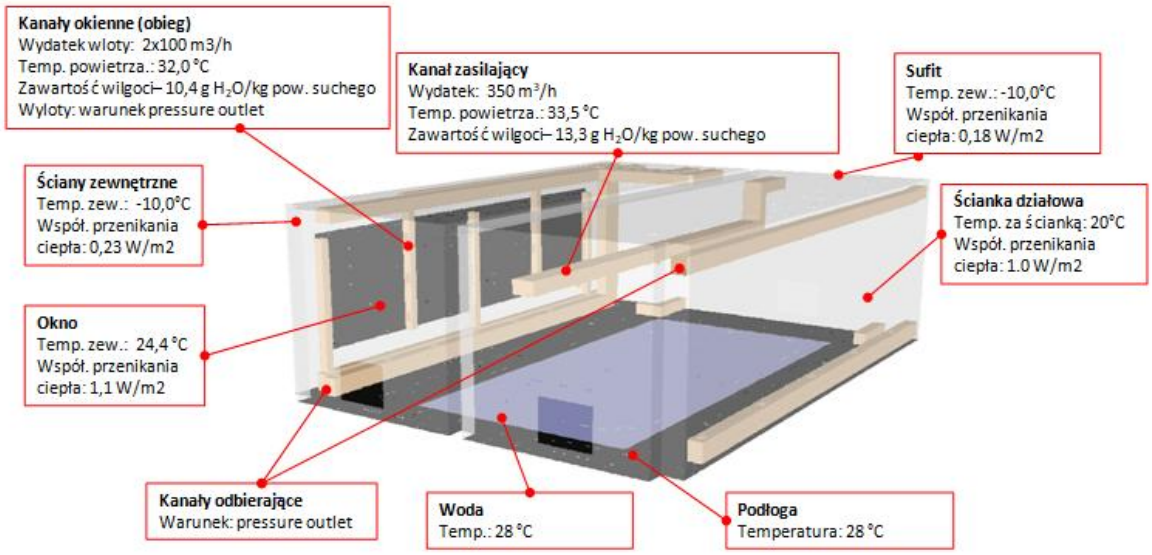
7.3 Symulacje numeryczne dla wybranego układu wentylacyjnego i przyjętego standardu uzdatniania wody

W pracy przedstawiono wyniki symulacji numerycznych przeprowadzonych dla układu wentylacyjnego typu góra-dół z dodatkowym systemem obiegowym. Jest to układ w wariancie III, rekomendowany po przeprowadzeniu pomiarów w modelowym pomieszczeniu basenowym (Wyniki pomiarów zaprezentowano w Rozdziale 6.5).

System wentylacyjny badany podczas symulacji obejmuje dwa układy:

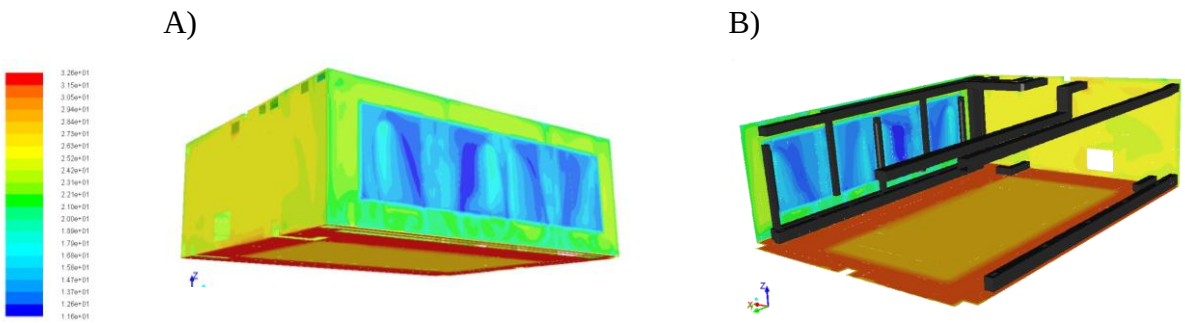
- układ rozdziału powietrza góra-dół obsługujący strefę przebywania ludzi, zasilany powietrzem przygotowanym w centrali wentylacyjnej,
- układ obiegowy wentylujący strefy przyokienną i podsufitową, zasilany powietrzem przygotowywanym w sekcji wentylatorowej z osuszaczem i nagrzewnicą.

Szerszy opis symulowanej instalacji znajduje się w Rozdziale 6.5.3.
Przygotowanie do przeprowadzenia symulacji rozpoczęto od zdefiniowania parametrów brzegowych, co ilustruje Rys. 7.9.

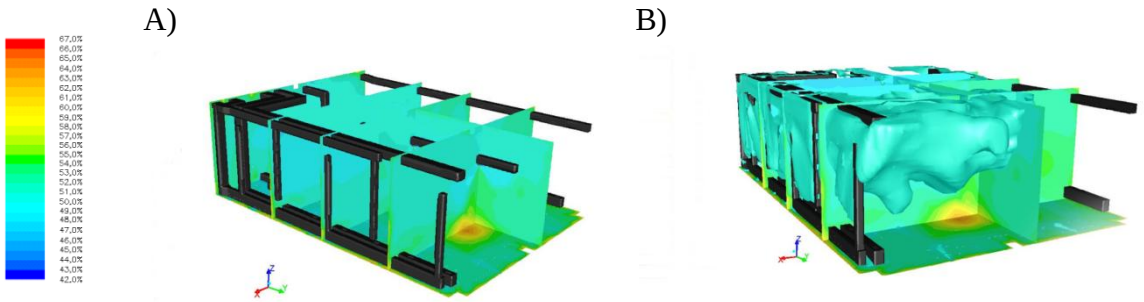


Rys. 7.9 Zadane warunki brzegowe dla układu góra-dół z obiegiem (wariant III) okres zimowy

Wyniki graficzne przeprowadzonych symulacji przedstawiono z podziałem na parametry powietrza (temperaturę, wilgotność względną, prędkość powietrza).

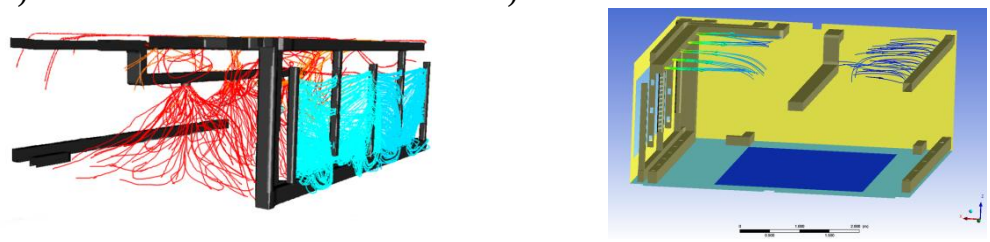


Rys. 7.10 Rozkład temperatury w pomieszczeniu (dane Rys. 7.9):
A) widok z zewnątrz; B) widok od środka pomieszczenia



Rys. 7.11 Profil przestrzenny wilgotności względnej w pomieszczeniu (dane Rys. 7.9):
A) widok w płaszczyznach,
B) widok z wydzieloną strefą na wartości odcięcia 54,1%

A) B)



Rys. 7.12 Linie prądu przepływu powietrza w pomieszczeniu (dane Rys. 7.9):
A) układ z nawiewem do strefy przebywania ludzi oraz przyokienny,
B) układ wentylacyjny podsufitowy

Przedstawione wydruki z programu symulacyjnego potwierdzają przyjęte założenia wynikające z przeprowadzonych badań w basenowym laboratorium modelowym. W pomieszczeniu wydzielają się strefy o odmiennych parametrach powietrza dostosowanych do wymagań stawianych w tych obszarach. W strefie przebywania ludzi utrzymywane są parametry temperatury w zakresie 29,0÷30,0^{0}C, a wilgotności względnej w zakresie 58,5÷60,5% przy prędkości powietrza 0,10÷0,20m/s. Uzyskane zakresy parametrów zapewniają komfort cieplno-wilgotnościowy użytkownikom, mieszczą się w zakresach wskazanych w pracach [9, 39, 43, 124, 139, 142]. W strefie przyokiennej i podsufitowej utrzymywane są parametry temperatury w zakresie 30,5÷31,50C, a wilgotności względnej w zakresie 50,0÷56,0% przy prędkości powietrza 0,15÷1,40m/s.

Powietrze nawiewane do strefy przebywania ludzi przepływa bezpośrednio nad taflę wody i odbierane jest dwoma kanałami wywiewnymi zlokalizowanymi w dolnej części pomieszczenia. Przebieg linii prądu (Rys. 7.12) przedstawia przestrzenny profil przepływu powietrza. Strefa przyokienna i podsufitowa omywana jest powietrzem obiegowym o temperaturze i wilgotności powietrza zapobiegających kondensacji pary wodnej na elementach konstrukcji.

8. Porównanie wyników badań doświadczalnych i symulacji

W niniejszym rozdziale przedstawiono zestawienie porównawcze wyników uzyskanych podczas prowadzenia badań w pomieszczeniu modelowym z wynikami symulacji numerycznych. Analizie porównawczej poddano pola zmierzonych parametrów powietrza (temperatury, wilgotności względnej, zawartości wilgoci) w płaszczyźnie na wysokości 0,25m nad taflą. dla okresu letniego i zimowego.

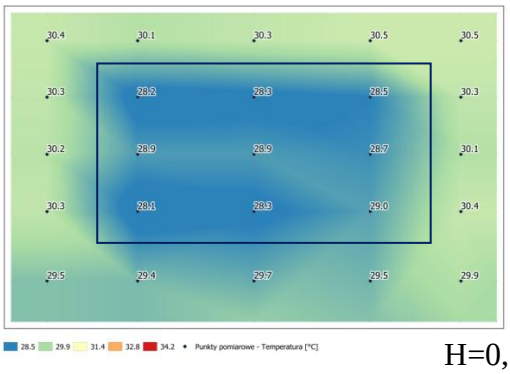
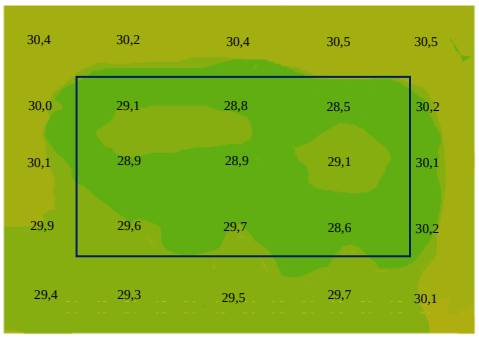
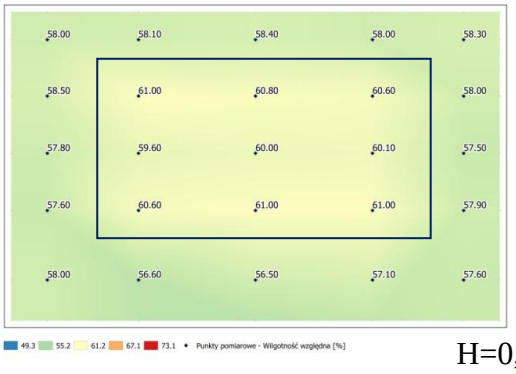
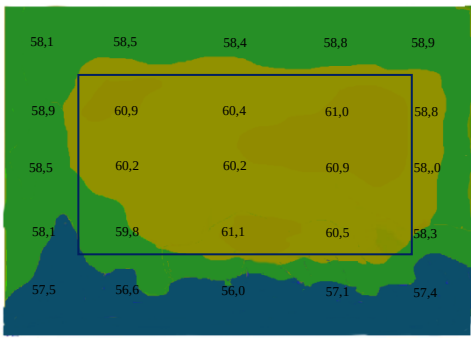
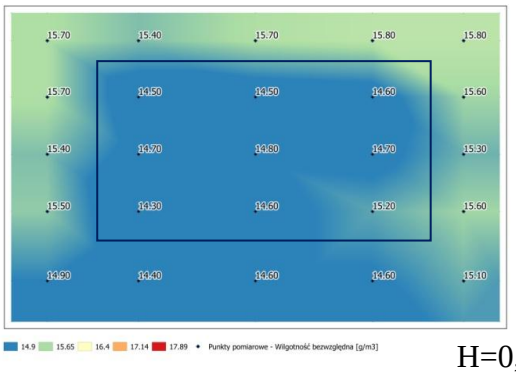
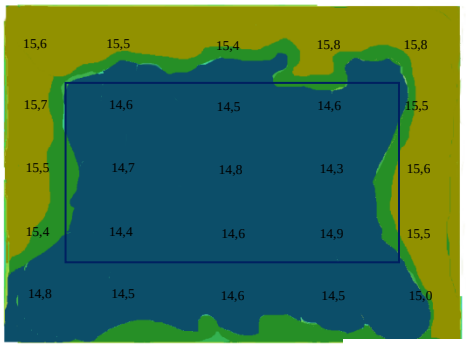
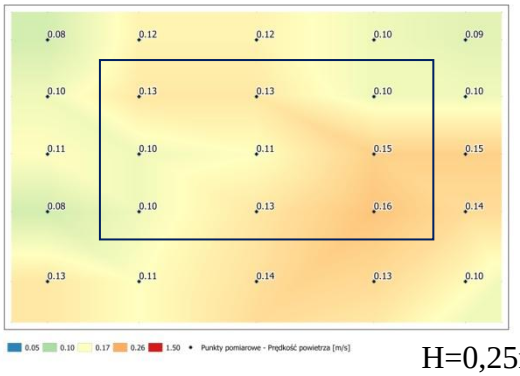
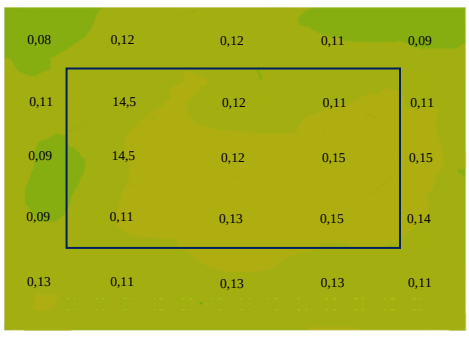
Wyniki symulacji wykazują duży stopień zbieżności z wynikami uzyskanymi podczas badań w pomieszczeniu modelowym. Dobre dopasowanie modelu numerycznego zostało osiągnięte poprzez walidację danymi zmierzonymi w pomieszczeniu modelowym oraz poprzez dobór odpowiedniego wzoru do oszacowania emisji wilgoci z lustra wody. Model emisji wilgoci okazał się najbardziej zbliżony do wzorów wskazanych w zaleceniach niemieckich dla basenów VDI [142].

Dla okresu letniego najlepsze odwzorowanie osiągnięto dla profilu rozkładu temperatury. Większość obszaru pokrywała się z danymi eksperymentalnymi. Różnice w wynikach nie były większe od 0,4K i dotyczyły głównie obszaru nad taflą wody.

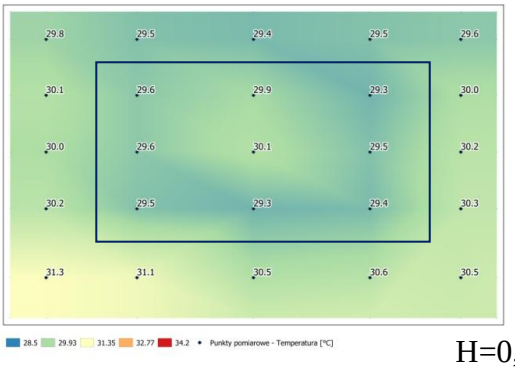
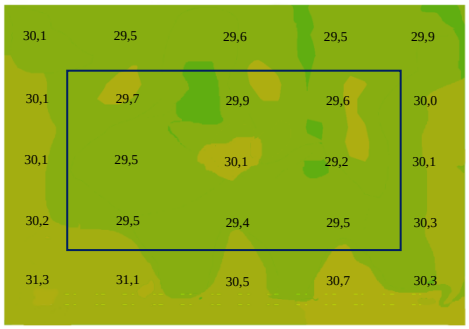
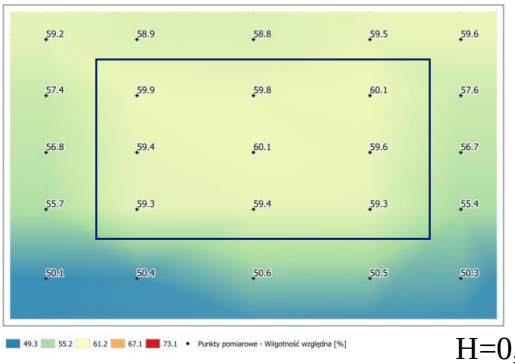
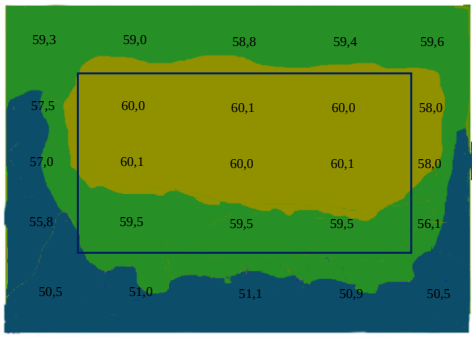
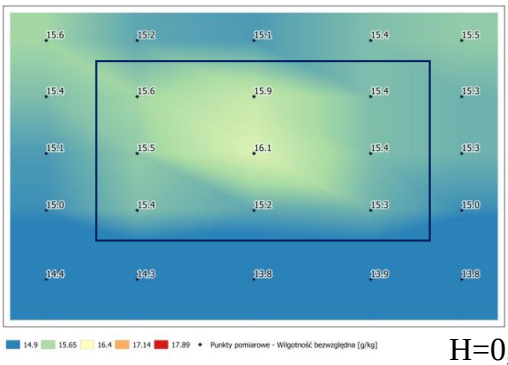
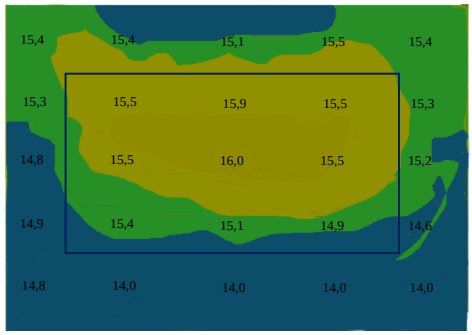
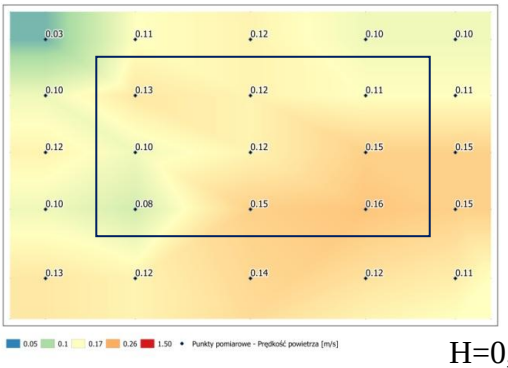
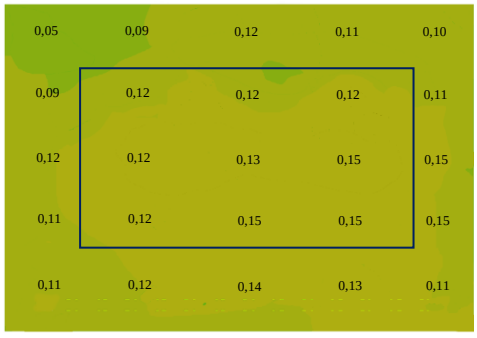
Dla profilu rozkładu wilgotności względnej najwyższe różnice między wynikami wynosiły 0,8%, ale dotyczyły tylko kilku punktów w pomieszczeniu. Dla okresu letniego większość obszaru wykazywała niewielkie wahania w zakresie 0,1÷0,5%.w stosunku do danych eksperymentalnych.

Dla profilu rozkładu zawartości wilgoci najwyższa różnica wyniosła 0,3 $g_{H2O}/kg_{\ p.s.}$, ale dotyczyła tylko kilku punków w pomieszczeniu. Dla reszty obszaru różnice w wynikach wynosiły 0,1÷0,2 $g_{H2O}/kg_{\ p.s.}$ w stosunku do danych eksperymentalnych.

Dobre odwzorowanie osiągnięto również dla profilu prędkości powietrza, różnice w całym obszarze kształtowały się w zakresie 0,01÷0,03 m/s.

Wyniki pomiarów w pom. basenowym	Wyniki symulacji numerycznych
Temperatura powietrza [^{0}C]	
 H=0,25m	 H=0,25m
Wilgotność względna [%]	
 H=0,25m	 H=0,25m
Zawartość wilgoci [g/kg]	
 H=0,25m	 H=0,25m
Prędkość powietrza [m/s]	
 H=0,25m	 H=0,25m

Rys. 8.1 Zestawienie porównawcze wyników pomiarów i symulacji dla wariantu góra-dół z obiegiem dla płaszczyzny pomiarowej na wysokości 0,25m (wariant III) – okres letni

Wyniki pomiarów w pom. basenowym	Wyniki symulacji numerycznych
Temperatura powietrza [^{0}C]	
 H=0,25m	 H=0,25m
Wilgotność względna [%]	
 H=0,25m	 H=0,25m
Zawartość wilgoci [g/kg]	
 H=0,25m	 H=0,25m
Prędkość powietrza [m/s]	
 H=0,25m	 H=0,25m

Rys. 8.2 Zestawienie porównawcze wyników pomiarów i symulacji dla wariantu góra-dół z obiegiem dla płaszczyzny pomiarowej na wysokości 0,25m (wariant III) – okres zimowy

Dla okresu zimowego również najlepsze odwzorowanie osiągnięto dla profilu rozkładu temperatury. Większość obszaru pokrywała się z danymi eksperymentalnymi. Różnice w wynikach nie były większe od 0,3K, ale tylko w jednym punkcie w pomieszczeniu. Większa część obszaru wyników symulacji pokrywała się z wynikami eksperymentalnymi.

Dla profilu rozkładu wilgotności względnej najwyższe różnice między wynikami wynosiły 0,7%, ale dotyczyły tylko jednego punktu w pomieszczeniu. Dla okresu zimowego większość obszaru wykazywała niewielkie wahania w zakresie 0,1÷0,4%.w stosunku do danych eksperymentalnych.

Dla profilu rozkładu zawartości wilgoci najwyższa różnica wyniosła 0,4 g $_{H2O}$/kg $_{p.s.}$, ale dotyczyła tylko kilku punków w pomieszczeniu. Dla reszty obszaru różnice w wynikach symulacji wynosiły 0,1÷0,2 g $_{H2O}$/kg $_{p.s.}$ w stosunku do danych eksperymentalnych.

Dobre odwzorowanie osiągnięto również dla profilu prędkości powietrza, różnice w całym obszarze kształtowały się w zakresie 0,01÷0,03 m/s.

Symulacji numerycznej poddany był układ wentylacyjny góra-dół z dodatkowym układem obiegowym, rekomendowany po przeprowadzeniu badań eksperymentalnych w pomieszczeniu basenowym. Wyniki symulacji numerycznych potwierdziły, że wybrany układ wentylacyjny realizuje efektywną wentylację strefy przebywania ludzi nad tafla wody. Profil rozkładu prędkości przepływu powietrza w pomieszczeniu na wysokości 0,25m nad taflą wody wskazuje na ruch mas powietrza i możliwość usuwania zanieczyszczeń gazowych (m.in. THM-ów) z tej strefy.

9. Podsumowanie i wnioski końcowe

9.1 Podsumowanie

Konieczność wnikliwego badania możliwości i metod redukcji i usuwania związków chemicznych zwanych trihalometanami z obszarów pływalni wynika z ich toksycznego działania na organizm ludzki. Zagadnienia dotyczące tego problemu zostały opublikowane przez autorkę rozprawy w pracach [84, 85, 88]. Obecności tych związków w obszarze pływalni nie da się wyeliminować całkowicie ze względu na przyczyny ich powstawania związane ze specyfiką takiego obiektu. Zagadnienia te zostały szczegółowo omówione w rozprawie w części teoretycznej która zawiera się w rozdziałach 1, 2, uzasadniając konieczność podjęcia badań eksperymentalnych mających na celu ustalenie stężeń tych związków na funkcjonujących obiektach oraz zaprojektowanie i przebadanie instalacji wodnych i wentylacyjnych obniżających ich stężenia,

Po przeprowadzeniu wnikliwej analizy danych literaturowych dotyczących zagadnień zminimalizowania zagrożeń powodowanych występowaniem THM-mów na pływalniach, w wodzie i atmosferze, przeprowadzono badania eksperymentalne. Wnioski wynikające z tej analizy wskazywały, że zmniejszenie zawartości THM- mów na obiekcie pływalni, może się odbyć poprzez maksymalne obniżenie zawartości prekursorów THM-ów w wodzie doprowadzanej do basenów oraz przez jak najbardziej skuteczne usuwanie tych związków z obszaru nad taflą wody basenowej, gdzie z racji właściwości fizycznych zalegają. Uznano, że skuteczne działania mające na celu obniżenie zawartości tych toksycznych związków chemicznych powinny polegać na zbadaniu ich zawartości na istniejących basenach w celu określenia poziomów referencyjnych przed podjęciem modyfikacji, następnie zmodyfikowaniu instalacji w planowy wariantowy sposób, by stwierdzić po powtórnych badaniach skuteczność podjętych działań. Takie postępowanie miało na celu zoptymalizowanie instalacji oczyszczania i uzdatniania wody w zespole basenowym w celu jak najefektywniejszego zmniejszenia zawartości prekursorów THM-ów w wodzie. Drugi etap badań doświadczalnych to optymalizacja instalacji wentylacji hal basenowych. Ta instalacja powinna skutecznie usuwać THM-my w postaci gazowej i aerozolu wodnego, jednocześnie zapewniając komfort użytkownikom. Jej funkcjonowanie ukierunkowane na najskuteczniejsze usuwanie THM-ów znad tafli wody nie powinno także powodować zagrożenia dla elementów konstrukcyjnych w innych obszarach hali poprzez kondensację pary wodnej. Badania zostały przeprowadzone na funkcjonujących obiektach basenowych

oraz w laboratorium zwanym w pracy pomieszczeniem modelowym. Obiekt ten został zbudowany w ramach grantu dofinansowanego z Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka – działanie 1.4–4.1. uzyskanego i kierowanego przez autorkę rozprawy. Grant został zakończony i rozliczony. Pomieszczenie modelowe stanowiło model pływalni w skali 1:5 i umożliwiało wielowariantowe pomiary po wprowadzaniu modyfikacji badanych instalacji zarówno wodnych jak i wentylacyjnych. Przed jego zastosowaniem laboratorium to podległo wielomiesięcznym testom i kalibracjom by jak najdokładniej symulować warunki panujące na rzeczywistych obiektach. Podjęto takie działania, aby parametry powietrza oraz ich wielkości po analizie korespondowały jednoznacznie z wynikami uzyskiwanymi na rzeczywistych pływalniach podlegających modelowaniu. Takie postępowanie sprawia, że wiarygodność uzyskanych wyników jest bardzo duża, a analiza parametrów zależnych uzyskanych na ich podstawie i przedstawionych w pracy jest bardzo wiarygodna. Autorka pracy uważa, że w przypadku obiektów typu kompleksy basenowe, o wielkiej kubaturze i występowaniu wysokich wewnętrznych konstrukcji, wielkości analizowanych parametrów mogą się zmienić i dla takich pływalni należałoby zmodyfikować pomieszczenie modelowe na odwzorowujące konkretną sytuację. W tego typu badaniach instalacji nawiewno-wywiewnych istotnym jest także „efekt skalowania", dobrze znany z aerodynamiki, więc instalacje projektowane w oparciu o takie wyniki powinny zapewniać pewien margines wydajności .

Eksperymentalne wyniki pozwoliły na zbudowanie modeli teoretycznych badanych procesów i w efekcie symulację komputerową.

Cała część doświadczalna i interpretacyjna zawarta jest w pracy praktycznie od początku rozdziału 3-ciego i we wszystkich aspektach: określenia założeń eksperymentów w realizowanych wariantach instalacji, omówienia zbudowanego pomieszczenia badawczego, przedstawienia i analizy uzyskanych wyników i ich interpretacji oraz przeprowadzeniu symulacji komputerowych, oraz konstruktywnych wniosków dla projektantów takich obiektów, rozciąga się do końca pracy.

Uzyskane wyniki zostały opublikowane przez autorkę w trakcie wykonywania pracy [88].

Jednocześnie uzyskane wyniki stanowiły podstawę opracowania i pozwoliły autorce uzyskać wzór użytkowy pt.„Urządzenie wentylacyjne do ściany przeszklonej" [149] oraz zgłoszenie patentowe pt. „Sposób wentylacji hali basenowej i instalacja nawiewno-wywiewna hali basenowej" [148].

9.2 Wnioski końcowe

1. W pracy wykazano, że właściwy dobór systemu uzdatniania wody oraz układu wentylacyjnego pozwala na istotne zmniejszenie występowania THM-ów w środowisku basenów krytych. Zastosowanie dodatkowego modułu filtracyjnego redukującego znaczną część materii organicznej z wody przed chlorowaniem, wpływa na ograniczenie procesu powstawania ubocznych produktów dezynfekcji chlorem w tym THM-ów, czyli eliminuje przyczynę ich powstawania. Zastosowanie układu wentylacyjnego z nawiewem powietrza skierowanym bezpośrednio do strefy przebywania ludzi powoduje ruch masy powietrza nad taflą wody i dalej usuwanie zanieczyszczeń gazowych tam zalegających (m.in. THM-ów) bez ich mieszania w całej kubaturze hali basenowej.
2. W pracy wskazano możliwość zabezpieczenia przegród budowlanych (szczególnie przegrody przeszklonej i sufitu) przed wykropleniem na nich wilgoci, poprzez zastosowanie odrębnych układów wentylacyjnych pracujących na powietrzu obiegowym przygotowywanym w bloku wentylatorowym z osuszaczem i nagrzewnicą.
3. W pracy przeprowadzono badania porównawcze parametrów cieplno-wilgotnościowych dla układów wentylacyjnych w trzech wariantach. Wykorzystanie pomieszczenia modelowego reprezentującego rzeczywisty obiekt basenowy w skali 1:5 pozwoliło uzyskać porównywalny przestrzenny obraz parametrów powietrza dla każdego wariantu. Podobnego podejścia do prowadzenia badań nie spotkano w literaturze. Autorzy głównie przedstawiają wyniki badań przeprowadzonych na obiekcie rzeczywistym wraz z analizą możliwości poprawy układu wentylacyjnego.
4. W pracy przeprowadzono również test zastąpienia THM-ów gazem znacznikowym, który służył porównaniu trzech wariantów układów wentylacyjnych pod kątem usuwania zanieczyszczonych mas powietrza ze strefy przebywania ludzi. Takie rozwiązanie w badaniach poświęconych trihalometanom nie było dyskutowane w literaturze.
5. W pracy w wyniku przeprowadzonych badań w pomieszczeniu modelowym wskazano układ wentylacyjnego góra-dół z obiegiem (wariant III). Korzyścią tego układu jest uzyskanie optymalnych parametrów powietrza w znacznym obszarze strefy przebywania ludzi w okresie zimowym i letnim oraz efektywna wymiana powietrza w tej strefie obejmująca usuwanie zanieczyszczeń gazowych (m.in. THM-ów) w miejscu ich powstawania tj. znad tafli wody.
6. W pracy wykazano, że istnieją możliwości techniczne obejmujące układ uzdatniania wody i system wentylacji, prowadzące do zredukowania stężenia THM-ów w środowisku basenów krytych.

10. Literatura

[1] Abu-Lail L., *Removal of chloroform and MTBE from water by adsorption onto granular zeolites*, praca doktorska Worcester Polytechnic Institute, 2010.

[2] Afifi M.A., Blatchley III E.R., *Sesonal dynamics of water and air chemistry in an indoor chlorinated swimming pool*. Water Research 68, 2015, 771–783.

[3] Aggazzotti G., Fantuzzi G., Righi E., Predieri G., *Blood and breath analyses as biological indicators of exposure to trihalomethanes in indoor swimming pools*, Science of Total Environment, 1998, nr 217, s.155–163.

[4] Aggazzotti G., Fantuzzi G., Righi E., Predieri G., *Environmental and biological monitoring of chloroform in indoor swimming pools*, Journal of Chromatography A, 1995, nr 710, s.181–90.

[5] Aggazzotti G., at, *Chlorination by-products (CBPs) in drinking water and adverse pregnancy outcomes in Italy*, Journal of Water Health, 2004, nr 2, s.1-15.

[6] Ahlert B., Bayas N., Umwelt und Gesundheit, 4, 118 (1998).

[7] American Conference of Governmental Industrial Hygienists, 2007.

[8] Banga B., Magazyn Instalatora, 6, 70, 2003.

[9] Besler G., *Mikroklimat krytych basenów kąpielowych*, COW, 6/1974.

[10] Bingham E., Cohrssen, B., Powell C.H., Patty's Toxicology Volumes 1-9 5th ed. John Wiley & Sons. New York, 2001.

[11] Bogusławski A., Drobniak S., Tyliszczak A., *Turbulencja od losowości do determinizmu,* Instytut Maszyn Cieplnych, Politechnika Częstochowska, 2008.

[12] Bożym M., Kłosak-Bazan I., Wzorek M., *Analyzing THM Concentrations in Selected Indor Swimming Pool Waters in the Opole Region,* Polish Journal of Environmental Study, 2018, vol.27, nr 3, s.1001-1008.

[13] Caro J., Gallego M., *Alveolar air and urine analyses as biomarkers of exposure to trihalomethanes in an indoor swimming pool*, Environmental Science&Technology, 2008a, nr 42, s.5002-7.

[14] Caro J., Gallego M., *Assessment of exposure of workers and swimmers to trihalomethanes in an indoor swimming pool*, Environmental Science&Technology, 2007, nr 41, s.4793-8.

[15] Cassan D., Mercier B., Castex F., Rambaud A., *Effects of medium-pressure UV lamps radiation on water quality in a chlorinated indoor swimming pool*, Chemosphere, 2006, nr 62, s.1507-1513.

[16] Chaalal O., A *Simple process for removing chloroform from water*, Chemical Innovation vol.30, nr 12, 2000, s.45-46.

[17] Chao C.Y.H., Tung T.C.W., Niu J.L., Pang S.W., Lee R.Y.M., Building and Environment, 34, 319, 1999.

[18] Chu H., Nieuwenhuijsen M.J., *Distribution and determinants of trihalomethane concentrations in indoor swimming pools,* Occupational and Environmental Medicine, 2002, nr 59, s.243–7.

[19] Dąbrowski Ł., *Zastosowanie modeli fugatywnościowych do opisu procesów rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń środowiska,* Inżynieria i Ochrona Środowiska, 2013, 16, 4, s.445-457.

[20] Dobrowolski S., *Klimatyzacja oraz regulacja automatyczna urządzeń klimatyzacyjnych na krytych basenach kąpielowych*, COW, 3/1974.

[21] Dong J.Z., Glass J.N., Moldoveanu S.C., Journal of Microcolumn Sepratations, 12, 142, 2000.

[22] Dyck R., Sadiq R., i inni, *Trihalomethane exposures in indoor swimming pools: A level III fugacity model*, Water Research, 2011, nr 45, s.5084-5098.

[23] E Y., Bai H., et al., *Effect of chloride on the formation of volatile disinfection byproducts in chlorinates swimming pools*. Water Research 105, 413–420, 2016.

[24] Elsner W. J., *Turbulencja przepływów*, PWN, Warszawa, 1987.

[25] Erdinger L., Kühn K.P., Kirch F., Feldhues R., Fröbel T., Nohynek B., i inni, *Pathways of trihalomethane uptake in swimming pools,* International Journal of Hygiene and Environmental Health, 2004, nr 207, s.571–5.

[26] Fantuzzi G., Righi E., Predieri G., Ceppelli G., Gobba F., Aggazzotti G., *Occupational exposure to trihalomethanes in indoor swimming pools,* Science of Total Environment, 2001, nr 264, s.257–65.
[27] Fayer R., Morgan U., Upton S.J., *Epidemiology of Cryptosporidium: Transmission, detection and identification,* International Journal for Parasitology, 2000, vol. 30, nr 12–13, s. 1315–1322.
[28] Ferencowicz J.,*Wentylacja i klimatyzacja*, Arkady Warszawa, 1962.
[29] Gälli R., McCarty P.L., *Biotransformation of 1,1,1 trichloroethane, trichloromethane and tetrachloromethane by Clostridium sp., Appl*., Environmental Microbiol., vol.55, nr 5, 1989, s.837-844.
[30] Gierak A., Charmas B., Leboda R., *Oznaczanie trihalometanów w wodzie*, Ochrona Środowiska 4, 1993, s.23-29.
[31] Hamidin N., Yu Q.J., Connell D., *Human health risk assessment of chlorinated disinfection by-products in drinking water using a probabilistic approach*, Water Research, 2008, nr 42, s.3263-74.
[32] Hansen M.S., Spiliotopoulou A., et al., *Effect of ozonation of swimming pool water on formation of volatile disinfection by-products – A laboratory study.* Chemical Engineering Journal 289, 277–285, 2016.
[33] Harrison P.T.C., Science of the Total Environment, 249, 103, 2000.
[34] Helaleh M.I.H., Ngudiwaluyo S., Korenaga T., Tanaka K., Talanta, 58, 649, 2002.
[35] Hrynaszkiewicz T., Kucharski M., *Model matematyczny do obliczania stężenia THM w chlorowanej wodzie*, Ochrona Środowiska, 2000/3(78). s.7.
[36] Napiórkowska A., Isańska-Ćwiek A., *Wentylacja krytych basenów w hotelach*, Chłodnictwo&Klimatyzacja, 2006.
[37] Jacobs J.H., Spaan S., et al., *Exposure to trichloramine and respiratory symptoms in indoor swimming pool workers.* European Respiratory Journal 29, 690–698, 2007.
[38] Jankowski T. *Znaczniki gazowe w ocenie emisji zanieczyszczeń przenoszonych powietrzem*, Bezpieczeństwo pracy, 02/2009, s. 14-17.
[39] Jaskólski M., Micewicz Z., *Wentylacja i klimatyzacja hal krytych pływalni*, IPPU MIASTA 2000, Gdańsk 2000.
[40] Judd S.J., Bullock G., *The fate of chlorine and organic materials in swimming pools*, Chemosphere, 2003, nr 51, s.869-879.
[41] Kaiser K., *Tlenek i dwutlenek węgla w pomieszczeniach*, Rynek Instalacyjny, 9/2010, 2010.
[42] Kajak Z., *Hydrobiologia - Limnologia. Ekosystemy Wód Śródlądowych*, PWN, Warszawa, 2001.
[43] Kapller H. P., *Baseny Kąpielowe*, Arkady Warszawa, 1977.
[44] Khan Z.U., Khan M.A.Y., Chandy R., Scharma P.N., Mycophatologia, 146, 25, 1999.
[45] Kmiotek M., *Przegląd solverów numerycznych stosowanych w mechanice obliczeniowej,* Scientific Bulletin of Chełm Secion of Mathematics and Computer Science, 1, 2008, s.151-158.
[46] Kolaszewski A., Taras P., *Ogólne zasady sporządzania bilansu cieplnego*, Ustroń, 2/1999.
[47] Kołwzan B., Adamiak W., Grabas K., Paweł-Czyk A., *Podstawy mikrobiologii w ochronie środowiska,* Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2005.
[48] Kończalik J., *Chemiczne zagrożenia zdrowia dzieci w środowisku pomieszczeń zamkniętych w Polsce*, X Konferencja Naukowa-Uwarunkowania środowiskowe zdrowia dzieci, 17, Legnica, 2001.
[49] Kowal A., Świderska-Bróż M., *Oczyszczanie wody*, PWN, 2009, s. 616-646.
[50] Kozdroń-Zabiegała B., Namieśnik J., Przyjazny A., Indoor Environ, 4, 189, 1995.
[51] Lee J., Ha K., Zoh K., *Characteristicd of trihalomethane (THM) production and associated health risk assessment in swimming pool waters treated with different disinfection methods.* Science of the Total Environment 2009, nr 407, s.1990–7.
[52] Lévesque B., Ayotte P., LeBlanc A., Dewailly E., Prud'Homme D., Lavoie R., i inni, *Evaluation of dermal and respiratory chloroform exposure in humans*, Environmental Health Perspectives, 1994, nr 102, s.1082–7.

[53] Lipska B., *Kontrola jakości numerycznego modelowania przepływu powietrza w pomieszczeniach wentylowanych*, Zeszyty naukowe Politechniki Śląskiej, 1718, Gliwice, 2006.
[54] Lipska B., Nawrocki W., *Wpływ wybranych wielkości na obraz przepływu powietrza w pomieszczeniach wentylowanych*, COW 12, 20-26, 2002.
[55] Lourencetti C., Ballester C., Fernández P., Marco E., Prado C., Periago J.F., i inni, *New method for determination of trihalomethanes in exhaled breath: applications to swimming pool and bath environments*, Analytica Chimica Acta, 2010, nr 662, s.23–30.
[56] Lourencetti C., Grimalt J.O. i inni, *Methods for analysis of trihalomethanes in water, air and exhaled breath:Applications to swimming pool and bath environments*, National Insitute of Safety and Hygiene at Work, Murcia, 2008.
[57] Lourencetti C., Grimalt J.O. i inni, *Trihalomethanes in chlorine and bromine disinfected swimmning pools:Air-water distributions and human exposure*, Environmental International 45, 2012, s.59-67.
[58] Mackay D., *Multimedia Environmental Models*, The Fugacity Approach, CRC Press LLC, 2001.
[59] Mackay D., Paterson S., *Calculating fugacity*, Environmental Science & Technology, 1981, 15, 9, 1006-1014.
[60] Mackay D., Paterson S., *Fugacity revisited*, Environmental Science & Technology, 1982, 16, 12, s.654A-660A.
[61] Manahan S.E., Toksykologia środowiska, PWN , 2006, s. 412-419.
[62] Matheiu-Nolf M., Clinical Toxicology, 40, 483, 2002.
[63] Matuszewska R., *Pierwotniaki pasożytnicze z rodzaju Cryptosporidium i Giardia. Część I. Występowanie w środowisku wodnym i zagrożenia zdrowotne*, Roczniki Państwowego Zakładu Higieny, 2007, vol. 58, nr 3, s.489–598.
[64] Maziarka S.: *Wymagania sanitarne i przeciwepidemiczne dla basenów kąpielowych. Ministerstwo Zdrowia i Opieki Społecznej*, Departament Inspekcji Sanitarnej, Warszawa 1986, nr EN-4435-26/86.
[65] McGrath J.J., Wong W.C., Cooley J.D., Straus D.C., Current Microbiology, 38, 33, 1999.
[66] Miles A.M., Singer P.C. i inni, *Comparison of Trihalomethanes In Tap Water and Blood*, Environmental Science&Technology, vol.36, nr 8, 2002, s. 1692-1698.
[67] Molhave L., Schnaider T., i inni, Atmos Environment, 34, 4767, 2000.
[68] Mołczan M., Szlachta M., Karpińska A., Biłyk A., *Zastosowanie absorbancji właściwej w nadfiolecie (SUVA) w ocenie jakości wody*, Ochrona Środowiska, nr 4, 2006, s. 12-16.
[69] Morawska L., Zhang J., Chemosphere 49, 1045, 2002.
[70] Nawrocki J., Biłozor S., *Uzdatnianie wody. Procesy chemiczne i biologiczne*, PWN, 2000, s.266-277.
[71] Nickmilder M., Bernard A.M., *Ecological association between childhood asthma and availability of indoor chlorinated swimming pools in Europe*, Occupational and Environmental Medicine, 2007, nr 64, s.37-46.
[72] Nieuwenhuijsen M.J., Northstone K., Golding J., *Swimming and birth weight*, Epidemiology, 2002, nr 13, s.725-8.
[73] Nitter T.B., Svendsen K.vH., *Modelling the concentration of chloroform in the air of Norwegian swimming pool facility-A repeated measures study*, Science of the Total Environment, 2019, 664, 1039-1044.
[74] Norback D., Bjornsson E., Janson C., Widstrom, Boman G., Occupational and Environmental Medicine, 52, 38, 1995.
[75] Nowakowski E., *Parowanie wody w basenach kąpielowych*, COW, 9/1992.
[76] Ott W.R., Roberts J.W., Świat Nauki, 4, 72, 1998.
[77] Panyakapo M., Soontornchai S., Paopuree P., *Cancer risk assessment from exposure to trihalomethanes in tap water and swimming pool water*, Journal of Environmental Sciences, 2008, nr 20, s.372-378.
[78] Państwowa Inspekcja Sanitarna, *Wytyczne Głównego Inspektoratu Sanitarnego w sprawie wymagań jakości wody oraz warunków sanitarno-higienicznych na pływalniach*, Warszawa, 2014.

[79] Park Y. G., *Impact of Ozonation on Biodegradation of trihalomethanes in biological filtration system,* Journal of Industrial and Engineering Chemistry, vol.7, nr 6, 2001, s. 349-357.
[80] Pedersen A., *Water quality swimming pool technology*, Danish Technological Institute, 2012.
[81] Paszko M., Łygas K., *Współczesne metody modelowania przepływów turbulentnych w otoczeniu poruszajacego się autobusu miejskiego,* Autobusy, 12, 2016, s. 1269-1272.
[82] Pełech A., *Wentylacja i klimatyzacja. Podstawy*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2008.
[83] Perkins P.H., *Swimming pools*, 2000.
[84] Piotrowska A., Szczechowiak E., *Trihalometany w środowisku krytego basenu kąpielowego*, COW 45/10, 2014, 294-302.
[85] Piotrowska A., Szczechowiak E., *Wpływ systemu uzdatniania wody i układu wentylacji na obecność trihalometanów w środowisku krytego basenu kąpielowego*, COW 45/11, 2014, 432-439.
[86] Przyk E., Zabiegała B, Namieśnik J., Chem. Inż. Ekol., 8, 917, 2001.
[87] Ratajczak K., *Układy wentylacyjne krytych basenów kąpielowych w aspekcie energooszczędności*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań, 2016.
[88] Ratajczak K., Piotrowska A., *Pool water disinfection by-products and the possibilities of reducing their impact on the health of users,* Geomatics and Environmental Engineering, 3, 2019 (w druku).
[89] Recknagel H., Sprenger E., Schramek E. *Poradnik Ogrzewanie i klimatyzacja*, EWFE, Gdańsk, 1994.
[90] Richardson S.D. i in., *What's in the Pool? A Comprehensive Identification of Disinfection By-Products and Assessment of Mutagenicity of Chlorinated and Brominated Swimming Pool Water*. Environ Health Perspect, 2010, 118(11), 1523–1530.
[91] Richardson S.D., Thruston Jr A.D., Caughran T.V., Chen P.H., Collette T.W., Floyd T.L., i inni, *Identification of new ozone disinfection byproducts in drinking water*, Environmental Science&Technology, 1999, nr 33, s.3368-77.
[92] Roadman M.J., Scudlark J.R., Meisinger J.J., llman W.J., Atmospheric Environment, 37, 2317, 2003.
[93] Rook, J.J., *Formation of Haloforms during Chlorination of Natural Waters*, Water Treatment and Examination, 1974, nr 23, 234-243.
[94] Ross D., Environmental Technology, 17, 147, 1996.
[95] Rushall B., *Swimmers asthma: serious health problem with chlorinated pools*, Journal of the National Sport Medicine Institute in UK, 2003, nr 12.
[96] Saidan M., Rawajfeh K., Fayyad M., *Investigation of factors affecting THMs formationin drinking water*, University of Jordan, 2012.
[97] Samadi M.T., Nasseri, S. i inni, *Removal of chloroform from Tehran drinking water by GAC and Air Stripping columns*, Iranian J Env Health Sci Eng, vol.1, nr 1, 2004, s. 5-12.
[98] Schmalz C., Frimmel F.H., Zwiener C., *Trichloramine in swimming pools – Formation and mass transfer*. Water Reearch 45, 2011, 2681–2690.
[99] Siemiński M., Środowiskowe zagrożenie zdrowia, PWN, Warszawa, 2001.
[100] Silva Z., Rebelo H. i inni, *Trihalomethanes in Lisbon indoor swimming pools: Occurrence, determining factors, and health risk classification*, Journal of toxicology and Environmental Health, vol.75, nr 13-15, s.878-892.
[101] Słoniewicz I., Kaflak J., Stężenie THM-ów i oksydantów w powietrzu hal basenowych, IV Sympozjum Naukowo-Techniczne Instalacje Basenowe, 2003, s.307-315.
[102] Smith H., Rose J., Waterborne cryptosporidiosis: Currenttatus. *Parasitology Today* 1998, vol. 14, nr 1, s. 14–22.
[103] Sokołowski C., *Wymagania sanitarno-higieniczne dla krytych pływalni*, Warszawa, 1988, s.20.
[104] Sopel R., Mincewicz G., *Wybrane pojęcia z alergologii* – Encyklopedia Badań Medycznych, Wyd. Medyczne Makmed, Gdańsk, 1996.
[105] Stępniewska A., Praca magisterska, *Analiza kształtowania się wilgotności powietrza w hali basenowej. Projekt instalacji klimatyzacyjnej krytego basenu sportowego*, Warszawa, 2008.

[106] Stottmeister E., Disinfection by-products in German swimming pool waters. In: 2nd International Conference on Pool water Quality and Treatment, 1998, Cranfield University.
[107] Stottmeister E., Naglitsch F., Occurrence of disinfection by-products in swimming pools. Umweltmedizinischer Informationsdienst 2, 1996, 21-29.
[108] Szponar A., Szponar B., Magazyn Instalatora, 4, 64, 2003.
[109] Śliwowski L., Lis A., Wybrane problemy mikroklimatu wnętrz, Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja, nr 3/2002, 2002.
[110] Trussell R.R., Umphres, M.D., *The Formation of Trihalomethane,* Jour. AWWA, vol. 70, nr 11, 1978, s.604-612.
[111] Villanueva C.M., Cantor K.P., Grimalt J.O., Malats N., Silverman D., Tardon A., i inni, Bladder cancer and exposure to water disinfection by-products through ingestion, bathing, showering and swimming pool attendance, American Journal of Epidemiology, nr 165, 2007, s.148–56.
[112] Webster E., Mackay D., Wania F., Arnot J., Gobas F., Gouin T., Hubbarde J., Development and Application of Models of Chemical Fate in Canada, nr. 200501, Canadian Environmental Modelling Network Trent University, Ontario, Canada 2005.
[113] Weisel C., Shepard T., Chloroform exposure and the body burden associated with swimming in chlorinated pools, Water contamination and health, New York, 1994, s.135-148.
[114] Weng S., Blatchley E., Disinfection by-product dynamics in a chlorinated, indoor swimming pool under conditions of heavy use: National swimming competition, Water Research, nr 45, 2011, s.5241-8.
[115] Wilczyńska-Poźniak D., Paszkiewicz M., Sanepid, 4, 10, 2002.
[116] Wnukowicz Z., Klimatyzacja małych obiektów basenowych w hotelach i pensjonatach, Chłodnictwo&Klimatyzacja, Wydanie Specjalne 2005, s.2-6.
[117] Zabiegała B., Partyka M., Namieśnik J., *Rozdział 25. Jakość powietrza wewnętrznego - analityka i monitoring,* Nowe horyzonty i wyzwania w analityce i monitoring środowiskowym. Centrum Doskonałości Analityki i Monitoringu Środowiskowego, Gdańsk, 539-561, 2003.
[118] Zarzycki R., Pustelnik P. i inni, *Usuwanie chloroform z wody na węglu aktywnym*, Ochrona Środowiska 4, 1993, s.35-38.
[119] Zbieć E., Dojlido J.R., *Uboczne produkty dezynfekcji wody*, Ochrona Środowiska, 1999/3, s.37.
[120] Zhong L., Goldberg M.S., Gao Y.T., Jin F., Cancer Causes and Control, 10, 607, 1999.
[121] http://www.ruralfamilymedicine.org.
[122] Materiały reklamowe firmy Agrob Buchtal „Wielka księga basenów", 2014.

Normy, rozporządzenia

[123] Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). *Toxicological Profile for Bromoform and Dibromochloromethane (Update).* Atlanta, GA: U.S. Department of Public Health and Human Services, 2005, Public Health Service.
[124] ASHRAE-American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, 2011. ASHRAE Handbook-HVAC Applications, Atlanta.
[125] DIN 19643: Aufbereitung von Schwimm- und Badebeckenwasser, Düsseldorf 1997.
[126] Dyrektywa Rady Wspólnot Europejskich z dnia 15 lipca 1980.
[127] Dz.U. 2007 nr 61 poz. 417 Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 29 marca 2007 r. w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi.
[128] Dz.U. 2010 nr 72 poz. 466 Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 20 kwietnia 2010 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi.
[129] Dz.U nr 122/2006, poz. 851 Obwieszczenie Ministra Zdrowia z dnia 4 maja 2006 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu ustawy o Państwowej Inspekcji Sanitarnej.
[130] Dz.U. 2015, poz. 2016 Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 9.11.2015r. w sprawie wymagań, jakim powinna odpowiadać woda na pływalniach.

[131] Dz.U. 2017, poz. 2285 Rozporządzenie Ministra Infrastruktury i Budownictwa z dnia 14 listopada 2017 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie.
[132] Dz.U. 2018, poz. 1286 Rozporządzenie Ministra Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 12 czerwca 2018 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy.
[133] Dz.U. nr 126/2001 r., poz. 1384 Ustawa z dnia 6 września 2001 r. o chorobach zakaźnych i zakażeniach .
[134] Dz.U. nr 212, poz. 1263 Ustawa o Państwowej Inspekcji Sanitarnej z 14 marca 1985 r.
[135] FINA facility rules 2013-2017.
[136] International Agency for Research on Cancer. IARC monograph on the evaluation of carcinogenic risks to humans. Some drinking-water disinfectants and contaminants, including arsenic. Lyon, France: IARC Press; 2004, s.512.
[137] PN-EN 15251:2012, *Parametry wejściowe środowiska wewnętrznego dotyczące projektowania i oceny charakterystyki energetycznej budynków, obejmujące jakość powietrza wewnętrznego, środowisko cieplne, oświetlenie i akustykę,* 2012, Polski Komitet Normalizacyjny.
[138] PN-EN 12831:2006 *Instalacje ogrzewcze w budynkach -- Metoda obliczania projektowego obciążenia cieplnego,* 2006, Polski Komitet Normalizacyjny.
[139] PN-EN 7730:2006 *Ergonomia środowiska termicznego. Analityczne wyznaczanie i interpretacja komfortu termicznego z zastosowaniem obliczania wskaźników PMV i PPD oraz kryteriów miejscowego komfortu termicznego*, 2006, Polski Komitet Normalizacyjny.
[140] PN-EN ISO 12569:2004 *Izolacja cieplna w budynkach. Określanie wymiany powietrza w budynkach. Metoda gazu znacznikowego*, 2004. Polski Komitet Normalizacyjny.
[141] US Environmental Protection Agency, Health Risk Assessment/Characterization of the Drinking Water Disinfection Byproduct Chloroform, 1998.
[142] VDI 2089. Blatt 1: Etwurf. Technische Gebäudeausrüstung von Schwimmbädern. Hallenbäder. - Berlin:Verlag Beuth GmbH, 2003.
[143] WHO Publications, Air Quality Guidelines for Europe, European Series nr 91, WHO, Kopenhag, 2000.
[144] *Wymagania sanitarnohigieniczne dla krytych pływalni*, DZP MZiOS i PZITS, Warszawa 1998.
[145] *Wytyczne w sprawie wymagań jakości wody oraz warunków sanitarno-higienicznych na pływalniach* wydane przez Głównego Inspektora Sanitarnego, Warszawa, 2014.
[146] *Zalecenia dotyczące wymagań sanitarno-higienicznych dla obiektów basenowych i jakości wody w basenach przeznaczonych dla niemowląt i dzieci w wieku od 6 m-cy do 3 lat*. Narodowy Instytut Zdrowia Publicznego – Państwowy Zakład Higieny, Zakład Higieny Komunalnej, Warszawa, 2007.
[147] https://pl.wikipedia.org/wiki/Dwutlenek_w%C4%99gla (04.2019)

Patenty i wzory użytkowe

[148] Stępniewska A. (Piotrowsk A.), Staniaszek W., Wasiak R., *Sposób wentylacji hali basenowej i instalacja nawiewno-wywiewna hali basenowej,* zgłoszenie patentowe nr 398656.
[149] Stępniewska A. (Piotrowska A.), Ziemiński M., *Urządzenie wentylacyjne do ściany przeszklonej,* wzór użytkowy, nr prawa wyłącznego 067288, 2014.

11. Załączniki

ZAŁĄCZNIK A – wyciąg z Rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 9.11.2015r. w sprawie wymagań, jakim powinna odpowiadać woda na pływalniach (Dz.U. 2015, poz. 2016).

Tab. 11.1 Wymagania fizykochemiczne, jakie powinna spełniać woda na pływalniach – potencjał redox [130]

Parametr	Jedn.	Woda w niecce basenowej[1)]		Woda w nieckach basenowych wyposażonych w urządzenia wytwarzające aerozol wodno-powietrzny		Woda w nieckach basenowych udostępnianych do nauki pływania dla niemowląt i małych dzieci do lat 3	
		min	max	min	max	min	max
Potencjał redox przy elektrodzie Ag/AgCl 3,5m KCl							
woda słodka							
a) $6,5 \leq pH \leq 7,3$	mV	750	-	750	-	720	-
b) $7,3 < pH \leq 7,6$	mV	770	-	770	-	750	-
woda słona[2)]							
a) $6,5 \leq pH \leq 7,3$	mV	700	-	700	-	700	-
b) $7,3 < pH \leq 7,8$	mV	720	-	720	-	720	-

Objaśnienia:
1) z uwzględnieniem brodzików do zabaw dziecięcych

Tab. 11.2 Częstotliwość pobierania próbek wody z natrysków [130]

Liczba Legionella sp. w 100ml	Ocena skażenia	Badanie
≤100 $\leq 10^2$	brak/znikome	Po 1 roku lub po 3 latach[1)]
>100≤1 000 $10^2 – 10^3$	średnie	Po 4 tygodniach, jeżeli wynik badania nie ulegnie zmianie, należy przeprowadzić czyszczenie i dezynfekcję, powtórzyć badanie po 1 tygodniu, następnie po 1 roku.
>1 000≤10 000 $10^3 – 10^4$	wysokie	Po 1 tygodniu od czyszczenia i dezynfekcji, następnie co 3 miesiące[2)]
>10 000 $>10^4$	bardzo wysokie	Po 1 tygodniu od czyszczenia i dezynfekcji, następnie co 3 miesiące[2)]

Objaśnienia:
1) Jeżeli w kolejnych badaniach w odstępach rocznych stwierdzono < 100 jtk/100ml.

2) Jeżeli w kolejnych dwóch badaniach wykonanych w odstępach trzech miesięcy stwierdzono < 100 jtk/100ml, to następne badanie można wykonać za rok.

Dodatkowo postępowanie dezynfekcyjne (dezynfekcja termiczna lub chemiczna) powinno zostać ponadto podjęte zawsze:

a) W przypadku wyłączenia instalacji wodociągowej na czas dłuższy niż 1 miesiąc.
b) Jeżeli instalacja lub jej część została wymieniona lub prace konserwacyjne mogły prowadzić do jej zanieczyszczeń.

Tab. 11.3 Metodyki referencyjne analiz wody na pływalniach – parametry mikrobiologiczne, dla których określono metody analizy [130]

Lp.	Parametry	Granica wykrywalności[1)]	Referencyjna metoda analizy
1.	*Escherichia coli*	1/100ml	Filtracja membranowa lub NPL
2.	*Pseudomonas aeruginosa*	1/100ml	Filtracja membranowa lub NPL
3.	*Legionella sp.*	1/100ml	Filtracja membranowa
4.	*Ogólna liczba mikroorganizmów w 36±2^{o}C po 48h*	1/1ml	Metoda płytkowa (posiew wgłębny)
5.	Gronkowce koagulazododatnie	1/100ml	Filtracja membranowa

Objaśnienia:

1) Granica wykrywalności dla metod mikrobiologicznych – najmniejsza wykryta liczba mikroorganizmów (wyrażona w jtk lub NPL), zawartych w danej objętości wody.

Tab. 11.4 Metodyki referencyjne analiz wody na pływalniach – parametry chemiczne, dla których określono charakterystykę wykonania analiz [130]

Lp.	Parametry	Poprawność [% wartości parametrów][1)]	Precyzja [% wartości parametrów][2)]	Granica wykrywalności [% wartości parametrów][3)]	Warunki
1.	Azotany	10	10	10	-
2.	Barwa	10	10	10	-
3.	Chlor wolny	10	10	10	-
4.	Chlor związany	10	10	10	-
5.	Glin	10	10	10	-
6.	Kwas izocyjanurowy[4)]	20	20	20	-
7.	Mętność	25	25	25	-
8.	Ozon	25	25	25	-
9.	Stężenie jonów wodorowych PH	2,5	2,5	Nie dotyczy	-
10.	THM	25	25	10	-

11.	Całkowita zawartość węgla organicznego (TOC)	25	25	25	
12.	Utlenialność	25	25	10	5)
13.	Żelazo	10	10	10	-

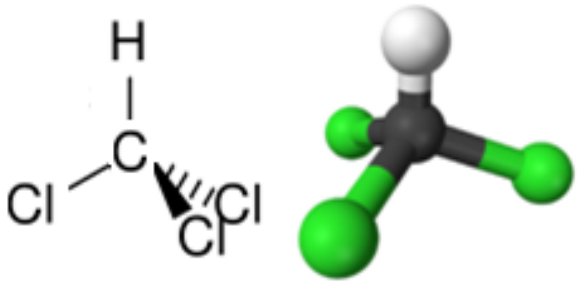
Objaśnienia:

1) Poprawność jest błędem systematycznym i jest to stopień zgodności miedzy średnim wynikiem uzyskanym w szeregu powtórzeń a wartością prawdziwą mierzonej wartości.
2) Precyzja jest błędem przypadkowym i zwykle wyrażana jest jako odchylenie standardowe (wewnątrz i miedzy partiami) rozkładu wyników od średniej; aprobowana precyzja stanowi dwukrotność współczynnika zmienności wyrażonego w procentach.
3) Granica wykrywalności dla parametrów chemicznych – wartość trzykrotnego odchylenia standardowego wyznaczonego dla serii analiz próbek o niskim stężeniu badanego parametru lub pięciokrotnego odchylenia standardowego wyznaczonego dla serii analiz prób ślepych.
4) 0,001 mg/l metodą GC-TID ze specyficznym płomieniem, detektorem termojonowym; 0,05 mg/l metodą chromatografii cieczowej techniką faz odwróconych z detekcją UV(HPLC-UVPAD); 0,09 mg/l metodą GC-MS –z monitorowaniem jonoselektywnym.
5) Indeks nadmanganianowy – utlenianie powinno być przeprowadzone w ciągu 10 min. w temp. 100^{o}C w środowisku kwaśnym z wykorzystaniem nadmanganianu potasu.

ZAŁĄCZNIK B – Charakterystyka THM-ów – wyciąg z artykułu - Piotrowska A., Szczechowiak E., *Trihalometany w środowisku krytego basenu kąpielowego*, COW 45/10, 2014, 294-302.

„ […] ***Trichlorometan***

Trichlorometan (chloroform – $CHCl_3$) jest najpopularniejszym składnikiem THM-ów (udział w mieszaninie 71-72%). Jego strukturę chemiczną pokazano na Rys. 11.1. Zdania co do szkodliwości trichlorometanu są podzielone. Wprawdzie trichlorometan jest zaliczany do najmniej toksycznych halogenków alkinowych, dawniej był produkowany w ilościach kilkuset milionów kilogramów rocznie [61]. Jednakże, jest on trwały w atmosferze i jest substancją chemiczną w dużym stopniu zubożającą stratosferę w ozon, dlatego jego produkcja została w znacznym stopniu ograniczona. Jest on jednym z najbardziej popularnych przemysłowych rozpuszczalników chlorowanych. Dawniej, był stosowany w medycynie, jako dodatek do past do zębów, syropów na kaszel, maści oraz jako anestetyk. Został wycofany z powodu szkodliwego oddziaływania na serce i trzustkę, dochodziło również do przypadków śmiertelnych.



Rys. 11.1 Struktura chemiczna trichlorometanu ($CHCl_3$)

Działanie trichlorometanu na organizm człowieka jest zależne od steżenia i czasu działania. Przykładowo ekspozycja na wysoką dawkę chloroformu ok.:

- 40 000 ppm może skutkować śmiercią,
- 30 000 ÷ 1 500 ppm może wywołać efekt narokzy,
- < 1 500 ppm może wywołać zawroty głowy, ból głowy, ogólne zmęczenie.

Śmiertelna dawka doustna chloroformu to 10 ml (14,8 g), która powoduje zatrzymanie akcji serca lub układu oddechowego [141].

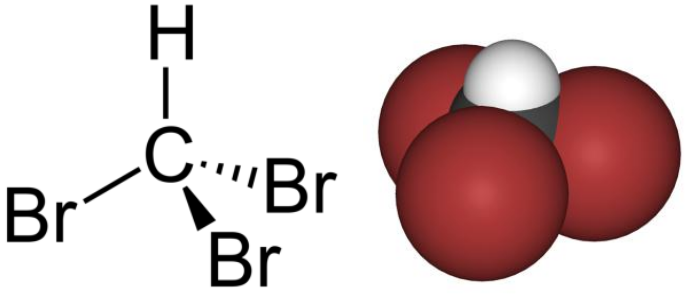
Długotrwała ekspozycja, nawet na niską dawkę chloroformu, może wywołać uszkodzenie wątroby (gdzie chloroform jest metabilizowany to fosgenu), nerek, systemu nerwowego.

Trudności jakie przedstawia ocena toksycznego działania trichlorometanu wynikają także z niejednoznacznego związku między jego zawartością w wodzie basenowej a przyswajalnością przez człowieka. Grupa naukowców z Uniwersytetu Północnej Karoliny [66] stwierdziła, że „związek pomiędzy zawartością THM-ów w wodzie i ich przyswajalnością, a zatem obecnością we krwi, nie jest liniowy, co wynika ze splotu wielu czynników", takich jak temperatura wody i otaczającego powietrza, zawartość jonów bromkowych w otoczeniu, długość czasu ekspozycji (chwilowa/długotrwała), różna jednostkowa przyswajalność THM-ów.

Obecnie w polskim prawodawstwie limitowana jest ilość chloroformu na dopuszczalnym poziomie 8 mg/m^3 w środowisku pracy. Natomiast dopuszczalna zawartość chloroformu w wodzie wynosi 30 mg/m^3, a całkowita zawartość THM-ów nie może przekraczać 100 mg/m^3 (do roku 2008 było 150 mg/m^3) [130], ale zgodnie z dyrektywą Rady Wspólnot Europejskich „stężenie THM powinno być tak niskie jak to tylko możliwe" [126]. Ze zgromadzonych materiałów wynika, że w warunkach basenowych ekspozycja na drogi oddechowe ma najmocniejszy związek z zawartością chloroformu we krwi i jego toksycznym działaniem [56].

Tribromometan

Tribromometan (bromoform – $CHBr_3$) występuje zarówno w wodzie, jak i w powietrzu, jednak w wyraźnie mniejszej ilości niż chloroform (udział 4-5% w mieszaninie THM-ów). Jego strukturę chemiczną pokazano na Rys. 11.2.



Rys. 11.2 Struktura chemiczna tribromometanu ($CHBr_3$)

Toksyczność bromoformu jest znacznie niższa od chloroformu. Związek ten szybko paruje z wody do powietrza, może być rozkładany przez bakterie. Tribromometan może być absorbowany wskutek inhalacji oraz przez skórę. Działa drażniąco na układ oddechowy, oczy i skórę oraz może powodować dysfunkcję układu nerwowego oraz wątroby [7].

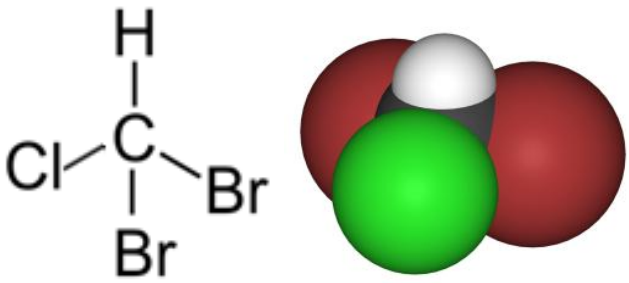
Na początku dwudziestego wieku w Stanach Zjednoczonych, bromoform był podawany jako środek uspokajający dla dzieci chorych na krztusiec [10]. Niestety, zanotowano kilka zgonów spowodowanych przypadkowym przedawkowaniem. Najbardziej widocznym objawem klinicznym w tych przypadkach śmiertelnych była głęboka depresja, która objawiała się nieświadomością, otępieniem i utratą odruchów. Śmierć była zwykle wynikiem niewydolności oddechowej. Śmiertelne dawki były w zakresie 20÷40 kropli (150-300 mg/kg) dziennie.

Międzynarodowa Agencja Badań nad Rakiem (IARC) uznała, że bromoform nie jest klasyfikowany jako rakotwórczy dla człowieka, z kolei Agencja Ochrony Środowiska (EPA) zaliczyła bromoform, jako prawdopodobny czynnik rakotwórczy u ludzi.

Dibromochlorometan

Dibromochlorometan ($CHBr_2Cl$) występuje zarówno w wodzie, jak i w powietrzu, jednak w wyraźnie mniejszej ilości niż chloroform (udział 9-10% w mieszaninie THM-ów). Jego strukturę chemiczną pokazano na Rys. 11.3. Toksyczność dibromochlorometanu jest zbliżona do toksyczności bromoformu. Podobnie jak bromoform szybko paruje z wody i może ulec rozpadowi w kontakcie z bakteriami oraz promieniami słonecznymi.

Ekspozycja na duże stężenie dibromochlorometanu spowalnia normalne czynności mózgu i powoduje senność, ale zazwyczaj objawy ustępują w ciągu jednego dnia. Bardzo duże stężenia mogą spowodować utratę przytomności, a nawet śmierć.



Rys. 11.3 Struktura chemiczna dibromochlorometanu ($CHBr_2Cl$)

Badania przeprowadzone na zwierzętach [123] wykazały, że ekspozycja na duże stężenia dibromochlorometanu powodują uszkodzenie wątroby i nerek. Ekspozycja na niskie stężenia nie wydaje się poważnie wpływać na mózg, wątrobę lub nerki. Nie ma jednoznacznych dowodów na działanie kancerogenne dibromochlorometan u ludzi, ponieważ nie przeprowadzono stosownych badań. Badania na zwierzętach wskazują, że długotrwałe przyjmowanie dibromochlorometanu, może powodować raka wątroby i nerek.

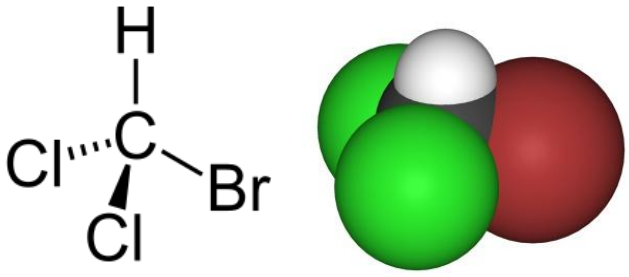
Międzynarodowa Agencja Badań nad Rakiem (IARC) uznała, że dibromochlorometan nie jest klasyfikowany, jako rakotwórczy dla człowieka, z kolei Agencja Ochrony Środowiska (EAP) w Stanach Zjednoczonych zaliczyła dibromochlorometan, jako rakotwórczy.

Dawniej był stosowany jako środek zmniejszający palność oraz jako półprodukt w przemyśle chemicznym. Obecnie jest on stosowany jedynie jako odczynnik laboratoryjny. Małe ilości dibromochlorometanu produkowane są w oceanie przez glony.

Bromodichlorometan

Bromodichlorometan ($CHBrCl_2$) występuje zarówno w wodzie, jak i w powietrzu, jednak w wyraźnie mniejszej ilości niż chloroform (udział 14-15% w mieszaninie THM-ów). Jego strukturę chemiczną pokazano na Rys. 11.4. Nie ma jednoznacznych informacji na temat szkodliwości bromodichlorometanu dla zdrowia człowieka, lecz badania na zwierzętach wykazały, że wysokie stężenie w wodzie bądź w powietrzu może uszkodzić wątrobę i nerki oraz wpływać negatywnie na mózg. Badania na szczurach i myszach wykazały kancerogenne działanie tego związku na wątrobę, nerki i jelito grube, w związku z tym, Departament Zdrowia i Opieki Społecznej w Stanach Zjednoczonych planuje sklasyfikować bromodichlorometan, jako substancję kancerogenną dla ludzi.

Dawniej był on stosowany jako środek zmniejszający palność, rozpuszczalnik do tłuszczów i wosków oraz z powodu jego dużej gęstości – jako środek do separacji związków mineralnych. Obecnie stosuje się go tylko jako reagent lub półprodukt w chemii organicznej.”



Rys. 11.4 Struktura chemiczna bromodichlorometanu ($CHBrCl_2$)

Spis tabel

Tab. 2.1 Zalecane zakresy temperatury wody basenowej w zależności od przeznaczenia 12
Tab. 2.2 Zakresy zalecanej temperatury powietrza wg różnych źródeł 13
Tab. 2.3 Zakresy zalecanej wilgotności względnej powietrza wg różnych źródeł 14
Tab. 2.4 Zakresy zalecanej wilgotności względnej powietrza wg różnych źródeł 17
Tab. 2.5 Wymagania mikrobiologiczne, jakim powinna odpowiadać woda na pływalniach [130] 19
Tab. 2.6 Wymagania fizykochemiczne, jakie powinna spełniać woda na pływalniach [130] 20
Tab. 2.7 Dodatkowe wymagania fizykochemiczne, jakie powinna spełniać woda na pływalniach [130] 21
Tab. 2.8 Częstotliwość pobierania próbek wody doprowadzanej do pływalni, wprowadzanej do niecki basenowej i w nieckach basenowych[1),2)] [130] 22
Tab. 2.9 Potencjalny wpływ zanieczyszczeń fizycznych środowiska wewnętrznego na ludzkie samopoczucie i zdrowie [117] 25
Tab. 2.10 Potencjalny wpływ zanieczyszczeń biologicznych powietrza wewnętrznego na ludzkie samopoczucie i zdrowie [117] 25
Tab. 2.11 Potencjalny wpływ zanieczyszczeń chemicznych powietrza wewnętrznego na ludzkie samopoczucie i zdrowie [117] 27
Tab. 2.12 Skład suchego czystego powietrza 30
Tab. 2.13 Ilość ditlenku węgla wydzielanego przez człowieka w zależności od temperatury i wysiłku fizycznego [109]) 31
Tab. 2.14 Strumień powietrza zewnętrznego wymagany do utrzymania w pomieszczeniu stężenia CO_2 na poziomie 0,5% [89] 31
Tab. 2.15 Zestawienie porównawcze związków klasyfikowanych jako suma THM-ów 39
Tab. 2.16 Zestawienie zebranych wyników pomiarów THM-ów w wodzie i powietrzu w basenach krytych (źródło podano w tabeli) 48
Tab. 3.1 Porównanie modeli fugatywnościowych [19] 55
Tab. 3.2 Parametry wykorzystane do obliczenia szybkości ubytku chloroformu z wody do powietrza 57
Tab. 4.1 Przykładowa struktura złoża wielowarstwowego o wysokości 1200mm 62
Tab. 4.2 Zestawienie wyników pomiarów przeprowadzonych na trzech basenach (wartości średniomiesięczne) 70
Tab. 4.1 Zestawienie różnych typów układów wentylacyjnych projektowanych dla hal basenowych 83
Tab. 6.1 Podstawowe parametry technologiczne doświadczalnej stacji uzdatniania wody 89
Tab. 6.2 Parametry mierzone na doświadczalnej stacji uzdatniania wody wraz z przyrządami pomiarowymi 92
Tab. 6.3 Parametry wybranej żywicy jonowymiennej (żywica IV) 93
Tab. 6.4 Podsumowanie zmierzonych parametrów dla układów uzdatniania wody typ I i typ II 95
Tab. 6.5 Parametry powietrza mierzone podczas prac badawczych 96
Tab. 6.6 Podsumowanie zmierzonych parametrów – wariant klasyczny (I) 100
Tab. 6.7 Podsumowanie zmierzonych parametrów – wariant klasyczny z odciągiem brzegowym (II) 108
Tab. 6.8 Podsumowanie zmierzonych parametrów – wariant (III) 116
Tab. 6.9 Właściwości fizykochemiczne znaczników gazowych powszechnie stosowanych w pracach badawczych [38] 124

Tab. 5.10 Parametry mierzone podczas serii pomiarowych wraz z przyrządami pomiarowymi 124
Tab. 6.11 Podsumowanie zmierzonych parametrów dla trzech wariant ów 125
Tab. 11.1 Wymagania fizykochemiczne, jakie powinna spełniać woda na pływalniach – potencjał redox [130] 153
Tab. 11.2 Częstotliwość pobierania próbek wody z natrysków [130] 153
Tab. 11.3 Metodyki referencyjne analiz wody na pływalniach – parametry mikrobiologiczne, dla których określono metody analizy [130] 154
Tab. 11.4 Metodyki referencyjne analiz wody na pływalniach – parametry chemiczne, dla których określono charakterystykę wykonania analiz [130] 154

Spis rysunków

Rys. 2.1 Krzywa duszności wg Lancastera-Castensa-Ruge (z powiększonym dla pływalni zakresem wynikającym z lekkiego odzienia kąpiących się osób) [20] 15
Rys. 2.2 Temperatura punktu rosy w funkcji temp. powietrza wewn. i wilgotności względnej [105] 16
Rys. 2.3 Udziały procentowe procesów dezynfekcji wody basenowej stosowanych w Polsce 35
Rys. 2.4 Uboczne chloroorganiczne produkty dezynfekcji wody [70] 36
Rys. 2.5 Udział zawartości poszczególnych THM-ów w wodzie basenowej i powietrzu w hali basenowej – na podstwie badań przeprowadzonych w 4 halach basenowych [56] 38
Rys. 2.6 Zestawienie wyników pomiarów THM w wodzie wg różnych źródeł (podanych na rysunku) 41
Rys. 2.7 Graficzna zależność między czasem reakcji, a stężeniem THM-ów w wodzie [96] 42
Rys. 2.8 Graficzna zależność między dawką chloru a stężeniem THM-ów w wodzie [96] 43
Rys. 2.9 Graficzna zależność między dawką chloru a stężeniem THM-ów w wodzie [96] 44
Rys. 2.10 Krzywa chlorowania do punktu przełamiania [49] 44
Rys. 2.11 Graficzna zależność między zawartością OWO a stężeniem THM-ów w wodzie [96] 45
Rys. 2.12 Graficzna zależność między temperaturą wody a stężeniem THM-ów [96] 46
Rys. 2.13 Graficzna zależność między liczbą użytkowników basenu a stężeniem THM-ów 47
Rys. 2.14 Graficzne zestawienie wyników pomiarów ∑THM-ów w wodzie i powietrzu w basenach krytych wg różnych źródeł (podanych na rysunku) 49
Rys. 3.1 Obciążenie środowiska basenowego THM-ami 50
Rys. 3.2 Sposoby przenikania THM-ów w środowisku basenowym do organizmu człowieka [22] 51
Rys. 3.4 Procentowy udział różnych dróg przenikania chloroformu do organizmu człowieka w środowisku basenowym [22] 52
Rys. 3.5 Zestawienie porównawcze wyników obliczeń stężenia chloroformu (dominującego związku wśród THM-ów) w powietrzu i wodzie - uzyskanch w trzech modelach obliczeniowych, ... 53
Rys. 4.1 Główne zanieczyszczenia wprowadzane do wody basenowej 61
Rys. 4.2 Przykłady 5-ciu najczęściej stosowanych układów technologicznych uzdatniania wody basenowej 61
Rys. 4.3 Układ technologiczny systemu uzdatniania wody dla basenu I [85] 68
Rys. 4.4 Układ technologiczny systemu uzdatniania wody dla basenu II [85] 69
Rys. 4.5 Układ technologiczny systemu uzdatniania wody dla basenu III [85] 69
Rys. 4.6 Porównanie uzyskanych wyników pomiarów chloru związanego dla wszystkich 3 basenów z max wartością dopuszczalną zg. z zaleceniami zawartymi w rozporządzeniu [88, 130] 71
Rys. 4.7 Zestawienie wyników pomiarów chloru wolnego i związanego dla basenu typu I w porównaniu z max wartościami dopuszczalnymi zg. z zaleceniami zawartymi w rozporządzeniu [88, 130] 72
Rys. 4.8 Zestawienie wyników pomiarów chloru wolnego i związanego dla basenu II w porównaniu z max wartościami dopuszczalnymi zg. z zaleceniami zawartymi w rozporządzeniu [88, 130] 72
Rys. 4.9 Zestawienie wyników pomiarów chloru wolnego i związanego dla basenu III w porównaniu z max wartościami dopuszczalnymi zg. z zaleceniami zawartymi w rozporządzeniu [88, 130] 73
Rys. 5.1 Przelew w niecce basenowej [122] 75
Rys. 5.2 Układ rozdziału powietrza wentylacyjnego – typu dół-góra I 77

Rys. 5.3 Układ wentylacyjny z nawiewem do strefy przebywania ludzi i wywiewem 78
Rys. 5.4 Układ wentylacyjny z nawiewem i wywiewem usytuowanymi pod stropem 78
Rys. 5.5 Układ rozdziału powietrza wentylacyjnego z nawiewem po obu stronach niecki,..... 80
Rys. 5.7 Układ rozdziału powietrza wentylacyjnego z obniżonym nawiewem – typ góra-dół I..... 81
Rys. 5.8 Układ rozdziału powietrza wentylacyjnego ze strefowym systemem obiegowym 82
Rys. 6.1 Zdjęcie obiektu modelowego, w którym zostały przeprowadzone badania doświadczalne 85
Rys. 6.2 Obiekt modelowy – zdjęcie pomieszczenia basenowego..... 86
Rys. 6.3 Obiekt modelowy – zdjęcie pomieszczenia wentylatorowego 86
Rys. 6.4 Obiekt modelowy – zdjęcie pomieszczenia technologicznego..... 87
Rys. 6.5 Schemat modelowego pomieszczenia basenowego (wydruk z programu AutoCad) 87
Rys. 6.6 Układ technologiczny doświadczalnej instalacji uzdatniania wody basenowej 88
Rys. 6.7 Schemat technologiczny doświadczalnej instalacji wentylacji w pomieszczeniu modelowym 90
Rys. 6.8 Analiza porównawcza skuteczności usuwania substancji organicznych z wody 93
Rys. 6.9 Układ technologiczny stacji pilotowej (typ I) 94
Rys. 6.10 Układ technologiczny stacji pilotowej (typ II)..... 94
Rys. 6.11 Podział pomieszczenia modelowego na obszary pomiarowe 97
Rys. 6.12 Podział pomieszczenia modelowego na płaszczyzny poziome 98
Rys. 6.13 Rzut poziomy pomieszczenia modelowego z zaznaczonym kanałem nawiewnym 99
Rys. 6.14 Przekrój pomieszczenia modelowego ze schematycznym rozdziałem powietrza podczas prowadzenia pomiarów przy wariancie klasycznym (I) 100
Rys. 6.15 Przestrzenny rozkład parametrów powietrza w strefie przebywania ludzi – wariant I – okres letni i zimowy 101
Rys. 6.16 Przestrzenny rozkład temp. i wilgotności względnej powietrza wewn. – wariant I – lato 102
Rys. 6.17 Przestrzenny rozkład zawartości wilgoci i prędkości powietrza – wariant I – lato 103
Rys. 6.18 Przestrzenny rozkład temp. i wilgotności względnej powietrza wewn. – wariant I – zima 104
Rys. 6.19 Przestrzenny rozkład zawartości wilgoci i prędkości powietrza – wariant I – zima 105
Rys. 6.20 Przekrój pomieszczenia modelowego podczas prowadzenia pomiarów przy wariancie II 107
Rys. 6.21 Przestrzenny rozkład parametrów powietrza w strefie przebywania ludzi – wariant II – okres letni i zimowy 109
Rys. 6.22 Przestrzenny rozkład temp. i wilgotności względnej powietrza wewn. – wariant II – lato..... 110
Rys. 6.23 Przestrzenny rozkład zawartości wilgoci i prędkości powietrza – wariant II – lato..... 111
Rys. 6.24 Rozkład przestrzenny temp. i wilgotności względnej powietrza wewn. – wariant II – zima 112
Rys. 6.25 Rozkład przestrzenny zawartości wilgoci i prędkości powietrza – wariant II – zima 113
Rys. 6.26 Przekrój pomieszczenia modelowego podczas prowadzenia pomiarów przy wariancie (III) 115
Rys. 6.27 Przestrzenny rozkład parametrów powietrza w strefie przebywania ludzi – wariant III – okres letni i zimowy 117
Rys. 6.28 Rozkład przestrzenny temp. i wilgotności względnej powietrza wewn. – wariant III – lato 118
Rys. 6.29 Rozkład przestrzenny zawartości wilgoci i prędkości powietrza – wariant III – lato 119
Rys. 6.30 Rozkład przestrzenny temp. i wilgotności względnej powietrza wewn. – wariant III – zima..... 120
Rys. 6.31 Rozkład przestrzenny zawartości wilgoci i prędkości powietrza – wariant III – zima..... 121

Rys. 7.1 Widok z programu Ansys Fluent podczas definiowania parametrów 131
Rys. 7.2 Geometria pomieszczenia – widok ogólny 133
Rys. 7.3 Geometria pomieszczenia – widok wzdłuż dłuższej ściany 133
Rys. 7.4 Geometria pomieszczenia – widok wzdłuż krótszej ściany 133
Rys. 7.5 Siatka obliczeniowa 134
Rys. 7.6 Siatka obliczeniowa - przekrój 134
Rys. 7.7 Zadane warunki brzegowe dla jednego z badanych wariantów 135
Rys. 7.8 Przykładowe pola przekroju do prezentacji wyników obliczeń w programie Fluent Ansys 136
Rys. 7.9 Zadane warunki brzegowe dla układu góra-dół z obiegiem (wariant III) okres zimowy 138
Rys. 7.10 Rozkład temperatury w pomieszczeniu (dane Rys. 7.9): 138
Rys. 7.11 Profil przestrzenny wilgotności względnej w pomieszczeniu (dane Rys. 7.9): 138
Rys. 7.12 Linie prądu przepływu powietrza w pomieszczeniu (dane Rys. 7.9): 139
Rys. 8.1 Zestawienie porównawcze wyników pomiarów i symulacji dla wariantu góra-dół z obiegiem dla płaszczyzny pomiarowej na wysokości 0,25m (wariant III) – okres letni 141
Rys. 8.2 Zestawienie porównawcze wyników pomiarów i symulacji dla wariantu góra-dół z obiegiem dla płaszczyzny pomiarowej na wysokości 0,25m (wariant III) – okres zimowy 142
Rys. 11.1 Struktura chemiczna trichlorometanu ($CHCl_3$) 156
Rys. 11.2 Struktura chemiczna tribromometanu ($CHBr_3$) 157
Rys. 11.3 Struktura chemiczna dibromochlorometanu ($CHBr_2Cl$) 158
Rys. 11.4 Struktura chemiczna bromodichlorometanu ($CHBrCl_2$) 159