

# Parowanie wody ze swobodnego zwierciadła przy różnej organizacji wymiany powietrza w hali basenowej

Politechnika Wrocławska

3 marca 2025



## Spis treści

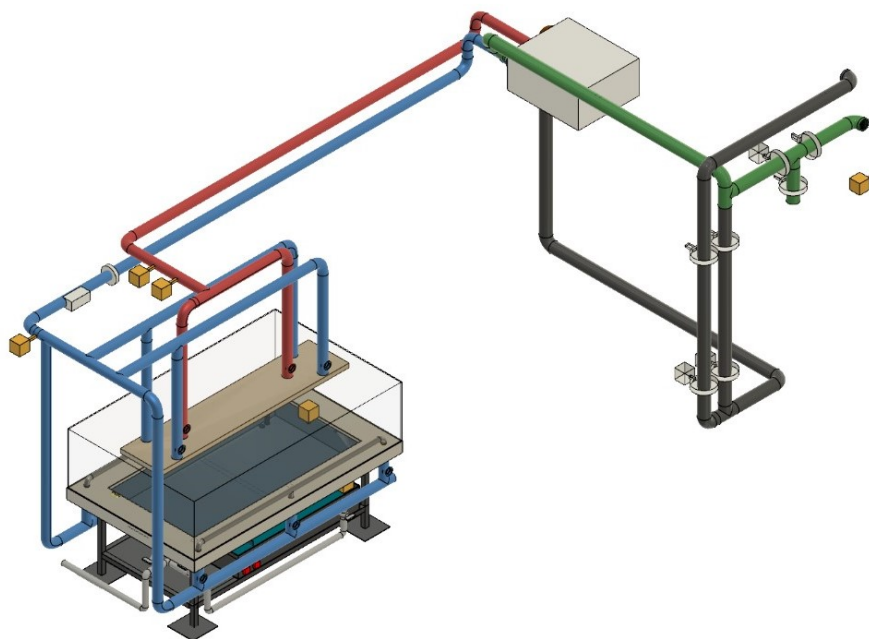
<b>1</b>	<b>Informacje podstawowe</b>	<b>2</b>
1.1	Sprzęt i narzędzia wykorzystywane podczas ćwiczenia . . . . .	2
1.2	Cel ćwiczenia . . . . .	3
1.3	Problematyka, przebieg ćwiczenia . . . . .	3
1.4	Jak się przygotować do ćwiczenia? . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Realizacja ćwiczenia</b>	<b>4</b>
2.1	Wprowadzenie . . . . .	4
2.2	Stanowisko pomiarowe . . . . .	6
2.3	Przebieg ćwiczenia . . . . .	9
<b>3</b>	<b>Zakres opracowania</b>	<b>9</b>
<b>4</b>	<b>Oznaczenia</b>	<b>12</b>

# 1 Informacje podstawowe

W sekcji *informacje podstawowe* zebrano wyłącznie najważniejsze i bardzo skondensowane informacje dotyczące ćwiczenia. Warto bardzo dokładnie zapoznać się z tym krótkim fragmentem tekstu.

## 1.1 Sprzęt i narzędzia wykorzystywane podczas ćwiczenia

Stanowisko pomiarowe umożliwiające badanie emisji wilgoci ze swobodnego i wzburzonego zwierciadła wody dla różnych systemów organizacji wymiany powietrza w hali basenowej zlokalizowane jest w pomieszczeniu nr 332 w budynku C-6 Politechniki Wrocławskiej. W laboratorium znajduje się model krytego basenu pływackiego o wymiarach 25 x 12,5 m (powierzchni lustra wody) wykonany w skali 1:15. Model 3D stanowiska badawczego przedstawiono na Rysunku 1.



Rysunek 1: Model 3D stanowiska badawczego

Podczas ćwiczenia studenci będą pracowali z oprogramowaniem Asix, za pomocą którego możliwa jest wizualizacja, nadzór oraz sterowanie parametrami pracy centrali wentylacyjnej i instalacji basenowej. W celu sprawnego wykonania niezbędnych obliczeń podczas zajęć zaleca się korzystanie z arkusza kalkulacyjnego, opcjonalnie z kalkulatora.

## 1.2 Cel ćwiczenia

Przeprowadzenie ćwiczenia wiąże się z realizacją następujących celów:

1. ugruntowanie wiedzy dotyczącej możliwych przemian stanu powietrza przy kontakcie z wodą w hali basenowej;
2. przypomnienie wytycznych związanych z projektowaniem instalacji wentylacyjnej w halach basenowych;
3. zdobycie umiejętności wyznaczania emisji wilgoci z lustra wody;

## 1.3 Problematyka, przebieg ćwiczenia

Ćwiczenie polega na wyznaczeniu emisji wilgoci ze swobodnego lustra wody w warunkach konwekcji wymuszonej dla różnych wariantów organizacji wymiany powietrza oraz różnych strumieni powietrza wentylującego w hali basenowej.

### Ważne

Ćwiczenie ma na celu uświadomienie Studentom, jaki wpływ na warunki powietrza panujące w hali basenowej (lub innym obiekcie charakteryzującym się dużą emisją wilgoci) ma zaprojektowany system wentylacji oraz jakie mogą być negatywne konsekwencje niedotrzymania odpowiednich parametrów powietrza w pomieszczeniu.

## 1.4 Jak się przygotować do ćwiczenia?

Przed rozpoczęciem zajęć należy zapoznać się z dalszą częścią instrukcji. Na zajęcia należy przynieść ze sobą laptop z arkuszem kalkulacyjnym lub kalkulator (przynajmniej jeden na grupę zajęciową).

## 2 Realizacja ćwiczenia

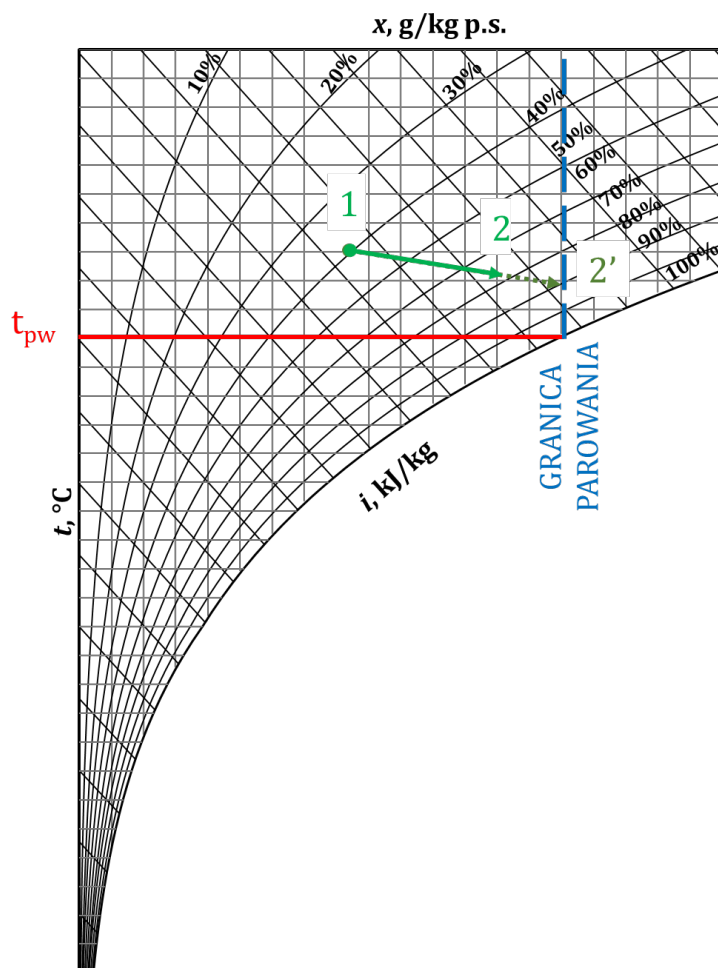
W sekcji *realizacja ćwiczenia* opisano bardziej szczegółowo kluczowe kwestie związane z przeprowadzaniem ćwiczenia. Część tekstu powstała w oparciu o doświadczenia uczestników poprzednich edycji ćwiczeń, aby eliminować najczęstsze błędy popełniane podczas realizacji ćwiczenia.

### 2.1 Wprowadzenie

Cechą charakterystyczną obiektów takich jak hale basenowe jest duża emisja wilgoci powstałej w wyniku parowania z powierzchni lustra wody oraz zwilżonych posadzek. Zapewnienie odpowiednich parametrów powietrza w pomieszczeniu związane jest więc z odbieraniem nadmiernej ilości wilgoci. Wyznaczenie zysków wilgoci podczas projektowania systemu wentylacji w obiektach basenowych jest bardzo trudne. Wynika to zarówno ze złożoności procesu parowania, jak i ze zmiennych warunków, jakie panują w hali basenowej. Na intensywność parowania wody wpływ mają takie czynniki jak:

- wielkość powierzchni lustra wody,
- temperatura wody i powietrza w pomieszczeniu oraz ich wzajemne relacje,
- prędkość przepływu powietrza nad lustrem wody związana z zastosowanym systemem wentylacji,
- stopień zwilżenia posadzek i ich temperatura,
- liczba użytkowników basenu oraz ich rodzaj aktywności,
- dodatkowe atrakcje wodne, takie jak zjeżdżalnie, fontanny, kaskady, itp.

Sam proces parowania wody jest związany z różnicą ciśnień cząstkowych pary wodnej zawartej w powietrzu oraz w warstwie granicznej. Warstwa graniczna to cienka warstwa występująca na styku lustra wody z powietrzem tworząca mieszaninę powietrza nasyconego parą wodną o temperaturze równej temperaturze powierzchni wody i wilgotności względnej  $RH=100\%$ . Odparowanie wilgoci ze zbiornika wody następuje wtedy, gdy ciśnienie cząstkowe pary wodnej w powietrzu jest niższe od prężności pary wodnej w warstwie granicznej (Rysunek 2). Z kolei intensywność parowania jest tym większa, im większa jest różnica tych ciśnień cząstkowych.



Rysunek 2: Przykładowe przemiany stanu powietrza przy kontakcie z wodą w hali basenowej. 1 – stan początkowy powietrza, 2 – przykładowy stan końcowy powietrza, 2' – graniczny stan końcowy powietrza

W przypadku braku odpowiedniej wentylacji hali basenowej może dojść do sytuacji, w której powietrze osiągnie taką zawartość wilgoci, że ciśnienia cząstkowe pary wodnej w powietrzu i w warstwie granicznej będą sobie równe (przemiana 1-2' na Rysunku 2) – jest to granica parowania. W takiej sytuacji jednak wilgotność względna powietrza będzie zbyt duża i przekroczy dopuszczalny zakres parametrów w obiektach basenowych. Podstawowym parametrem przy projektowaniu krytych obiektów basenowych jest temperatura wody. Przykładowe wartości temperatury wody podano w poniższej tabeli.

Tabela 1: Zakresy temperatury wody w basenie w zależności od przeznaczenia obiektu

Przeznaczenie	Temperatura wody, °C
Basen sportowy	24÷28
Basen rekreacyjny	26÷30
Basen dla dzieci	28÷32

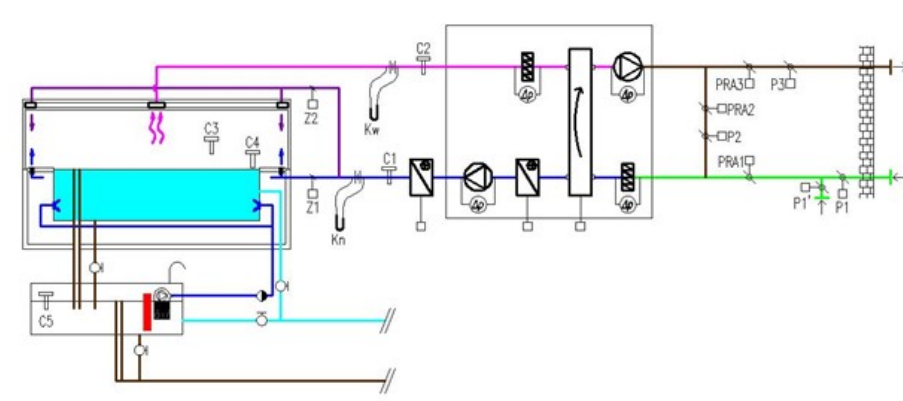
Przyjmuje się, że temperatura powietrza w hali basenowej powinna być o  $\Delta t=2\div 3$  K wyższa od temperatury wody. Z kolei podstawową zależność pozwalającą wyznaczyć wymagany strumień powietrza wentylującego można przedstawić za pomocą równania:

$$V_{went} = \frac{W}{(x_w - x_n)\rho} \quad (1)$$

Różnica zawartości wilgoci powinna wynosić maksymalnie ok. 4÷5 g/kg.

## 2.2 Stanowisko pomiarowe

W laboratorium znajduje się model krytego basenu pływackiego o wymiarach 25 x 12,5 m (powierzchni lustra wody) wykonany w skali 1:15. Schemat technologiczny stanowiska przedstawiono na Rysunku 3. Część wodna modelu składa się z dwóch niecek basenowych – zbiornika górnego (280,5 dm<sup>3</sup>) o wymiarach 1,65 x 0,85 x 0,2 m, czyli właściwej niecki kąpielowej oraz zbiornika dolnego przelewowego (210 dm<sup>3</sup>) o wymiarach 1,2 x 0,9 x 0,2 m. Niecki basenowe wykonano z blachy stalowej nierdzewnej łączonej za pomocą spawania i ustawiono je na konstrukcji wsporczej. Hala basenowa wykonana została ze szkła organicznego (plexiglasu o przezroczystości powyżej 95% i odporności na długotrwały wpływ temperatury do 50°). Charakterystyczne wymiary modelu podane zostały w Tabeli 2.

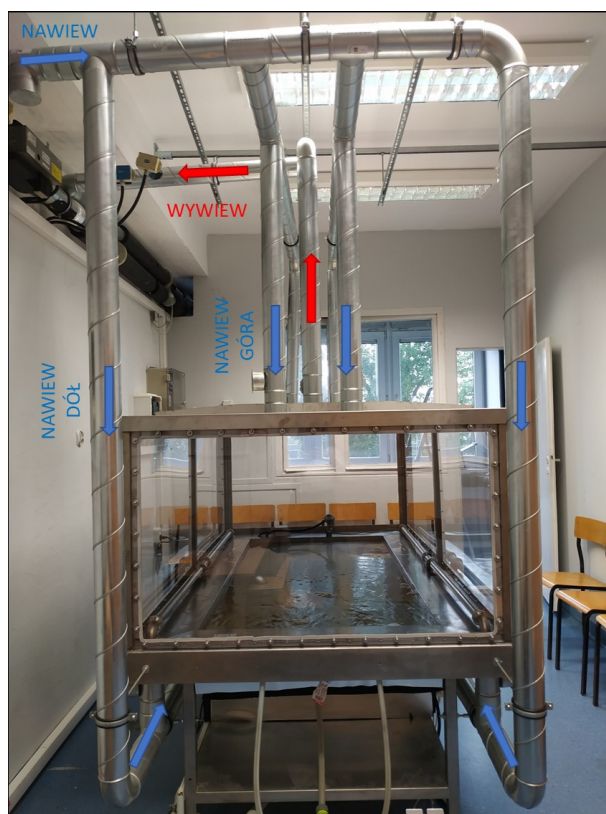


Rysunek 3: Schemat technologiczny stanowiska badawczego

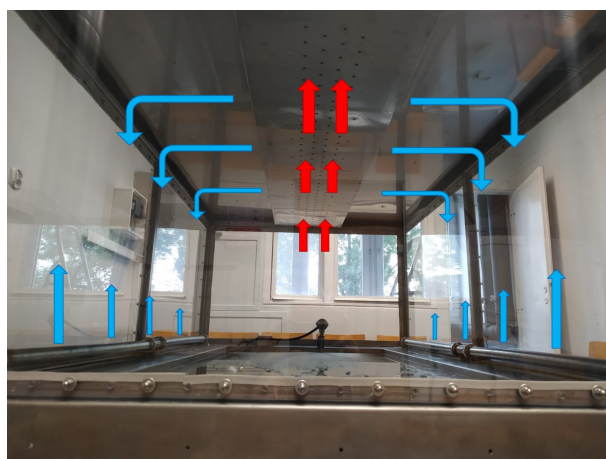
Tabela 2: Charakterystyczne wymiary modelu

Parametry	Wymiary obiektu rzeczywistego	Wymiary modelu (skala 1:15)
CZĘŚĆ WODNA		
Szerokość niecki	12,5 m	0,833 m $\approx$ 0,85 m
Długość niecki	25,0 m	1,667 m $\approx$ 1,65 m
Głębokość niecki	2,0 m	0,133 m $\approx$ 0,15 m Przyjęto: 0,20 m
Powierzchnia lustra wody	312,5 m <sup>2</sup>	1,4025 m <sup>2</sup> = 140,25 dm <sup>2</sup>
CZĘŚĆ POWIETRZNA		
Szerokość hali	17,8 m	1,25 m
Długość hali	32,5 m	2,05 m
Wysokość hali	9,0 m	0,60 m

Powietrze zewnętrzne pobierane jest poprzez czerpnię ścienną zlokalizowaną na elewacji budynku C-6 w pomieszczeniu 332 bądź opcjonalnie z pomieszczenia w celu wykonywania prób dymowych. W celu odwzorowania warunków rzeczywistych zaprojektowano podmieszanie powietrza usuwanego. Mieszanka powietrza kierowana jest do centrali wentylacyjnej. Centrala wentylacyjna wyposażona została w filtry powietrza, wymiennik obrotowy, nagrzewnicę elektryczną, wentylatory. Za centralą wentylacyjną zastosowano dodatkową nagrzewnicę elektryczną kanałową prod. Termex o mocy 800 W. Powietrze nawiewane może być do hali basenowej za pomocą 3 systemów (Rysunki 4-5). System 1. zakłada organizację wymiany powietrza typu dół-góra, 2. system zakłada organizację wymiany powietrza w pomieszczeniu typu góra-góra, a w 3. systemie powietrze jest nawiewane dołem oraz górą równocześnie i usuwane górą. Różne sposoby organizacji wymiany powietrza w pomieszczeniu umożliwiają badania wpływu organizacji wymiany powietrza na odparowanie wody z modelu. Przepustnice Z1 oraz Z2 służą do przełączania systemów. W hali basenowej w systemie z dolnym nawiewem powietrza jako elementy nawiewne zastosowano szyny szczelinowe. W systemie z nawiewem górnym powietrze nawiewane jest poprzez otwory  $\phi 10$  mm znajdujące się w bocznych ściankach sufitu podwieszanego. Powietrze wywiewane jest za pomocą otworów  $\phi 10$  mm z przestrzeni międzysufitowej i następnie kierowane jest do centrali wentylacyjnej, później częściowo powietrze jest kierowane na podmieszanie, a pozostały strumień usuwany za pomocą wyrzutni ściennej zlokalizowanej na elewacji budynku. Kanały wentylacyjne w obrębie modelu wykonane zostały z przewodów okrągłych typu Spiro z blachy stalowej ocynkowanej.



Rysunek 4: Instalacja wentylacji mechanicznej nawiewno-wywiewnej w hali basenowej



Rysunek 5: Warianty systemów organizacji wymiany powietrza w hali basenowej



Pomiar temperatury i wilgotności względnej powietrza nawiewanego i wywiewanego mierzony jest czujnikami C1 (Ctp4, Cfi4) i C2 (Ctp6, Cfi6). Pomiar temperatury oraz wilgotności względnej powietrza w modelu odbywa się za pomocą czujnika C3 (Ctp3, Cfi3). Pomiar temperatury powietrza w warstwie granicznej mierzony jest za pomocą czujnika C4 (Ctp0). Do pomiaru temperatury wody w modelu zastosowano czujnik temperatury C5 (Ctw).

### 2.3 Przebieg ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest wyznaczenie emisji wilgoci ze swobodnego lusta wody w warunkach konwekcji wymuszonej dla różnych wariantów organizacji wymiany powietrza oraz różnych strumieni powietrza wentylującego w hali basenowej. Określenie emisji wilgoci ze swobodnego zwierciadła wody należy przeprowadzić dla temperatur wody  $t_{pw}=26\div 29^{\circ}\text{C}$  i odpowiadającym im temperatur powietrza w pomieszczeniu hali, zachowując stałą różnicę temperatur w zakresie  $\Delta t=2\div 3^{\circ}\text{C}$ . Pomiaru powinny zostać wykonane na stanowisku badawczym w 6 lub 9 seriach, a każda z nich powinna zawierać po 5 powtórzeń. Poniżej zestawiono wartości zadane poszczególnych parametrów w każdej serii pomiarowej.

Tabela 3: Opis parametrów poszczególnych serii pomiarowych

Wartość	Seria 1	Seria 2	Seria 3	Seria 4	Seria 5	Seria 6
Vwent, m <sup>3</sup> /h	50	50	50	40	40	40
tn, °C	30	30	30	30	30	30
tpw, °C	27	27	27	27	27	27
Nawiewu	góra	góra+dół	dół	góra	góra+dół	dół
Wywiewu	góra	góra	góra	góra	góra	góra

Dla każdego pomiaru odczytano następujące parametry:

Tabela 4: Tabela z danymi pomiarowymi

$V_n$	$t_n$	$RH_n$	$V_w$	$t_w$	$RH_w$	$t_{pw}$
m <sup>3</sup> /h	°C	%	m <sup>3</sup> /h	°C	%	°C

## 3 Zakres opracowania

Zadaniem studentów jest opracowanie wyników pomiarów i ich przedstawienie w formie sprawozdania. Sprawozdanie powinno zawierać następujące elementy:

- Wyznaczenie przyrostu zawartości wilgoci powietrza wentylującego dla każdego pomiaru:

$$\Delta x = x_w - x_n, kg/kg_{p.s} \quad (2)$$

Obliczając zawartość wilgoci w powietrzu, należy skorzystać z zależności:

$$x = 0,622 \frac{RH \cdot p_{pn}}{p_b - RH \cdot p_{pn}}, kg/kg_{p.s} \quad (3)$$

przy czym RH należy podstawić w formie liczby dziesiętnej.

Z kolei ciśnienie pary nasyconej zależy bezpośrednio od temperatury strumienia powietrza i można je odczytać z tablic lub wyznaczyć ze wzoru:

$$p_{pn} = 6,112 \cdot \exp \frac{17,67 \cdot t}{t + 243,5}, hPa \quad (4)$$

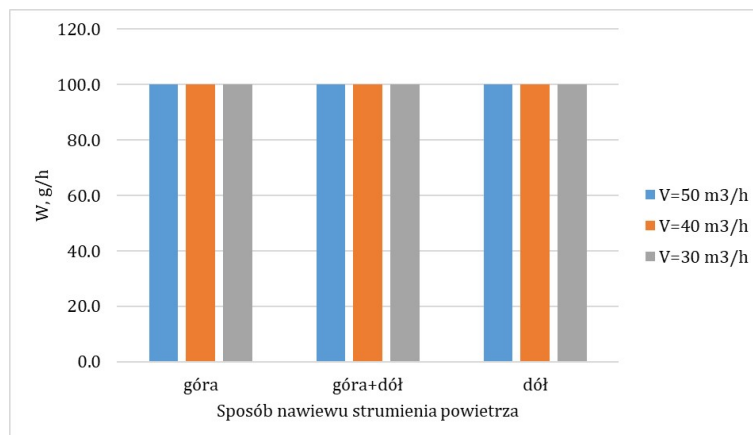
przy czym temperatura powinna być wyrażona w °C.

- Wyznaczenie strumienia emisji wilgoci w hali basenowej W dla każdego pomiaru korzystając z przekształconej zależności 1, a następnie wyznaczenie średniego strumienia emisji wilgoci dla każdej serii pomiarowej jako średniej arytmetycznej z 5 pomiarów w danej serii. Wartość strumienia emisji wilgoci wyrazić w jednostce g/h. W przypadku różnic między zmierzonymi wartościami  $V_n$  i  $V_w$  strumień powietrza wentylującego  $V_{went}$  przyjąć jako średnią arytmetyczną:

$$V_{went} = \frac{V_n + V_w}{2} \quad (5)$$

Tabele z wynikami obliczeń należy zamieścić w sprawozdaniu.

- Przedstawienie wyników obliczeń strumienia wilgoci w każdej serii pomiarowej w formie wykresu kolumnowego. Przykładowa konstrukcja wykresu:



Rysunek 6: Porównanie strumieni emisji wilgoci ze swobodnego zwierciadła wody różnych systemów nawiewu powietrza oraz różnych wartości strumienia powietrza wentylującego

- Opisanie obserwacji i wniosków. Należy w nich uwzględnić:
  - wpływ sposobu organizacji wymiany powietrza na strumień emisji wilgoci + uzasadnienie,
  - wpływ wartości strumienia powietrza wentylującego na strumień emisji wilgoci + uzasadnienie.
- Dodatkowo należy odpowiedzieć na pytania:
  - Czy uzyskany w pomiarach przyrost zawartości wilgoci w powietrzu mieści się w dopuszczalnym zakresie?
  - Który system organizacji wymiany powietrza oraz strumień powietrza wentylującego powinien być zalecony dla badanego układu? Odpowiedź uzasadnić.
  - Jakie konsekwencje może mieć zbyt duża wilgotność powietrza w hali basenowej?
  - Czy wzburzenie zwierciadła wody miałyby wpływ na intensywność parowania wody? Czy strumień emisji wilgoci byłby większy/mniejszy/nie zmieniłby się względem strumienia uzyskanego podczas badania swobodnego zwierciadła wody? Dlaczego?

## 4 Oznaczenia

$t_n$  - temperatura powietrza nawiewanego, ° C

$t_w$  - temperatura powietrza wywiewanego, ° C

$t_p$  - temperatura powietrza w pomieszczeniu, ° C

$t_{pw}$  - temperatura powierzchni wody w basenie, ° C

$V_n$  - strumień objętości powietrza nawiewanego, m<sup>3</sup>/s

$V_w$  - strumień objętości powietrza wywiewanego, m<sup>3</sup>/s

$V_{went}$  - strumień objętości powietrza wentylującego, m<sup>3</sup>/s

$RH_n$  - wilgotność względna powietrza nawiewanego, %

$RH_w$  - wilgotność względna powietrza wywiewanego, %

$RH_p$  - wilgotność względna powietrza w pomieszczeniu, %

$x_n$  - zawartość wilgoci w powietrzu nawiewanym, kg/kg p.s.

$x_w$  - zawartość wilgoci w powietrzu wywiewanym, kg/kg p.s.

$p_b$  - ciśnienie barometryczne, przyjmując  $p_b=1013$  hPa

$p_{pn}$  - ciśnienie pary nasyconej, hPa

$\rho$  - gęstość powietrza, kg/m<sup>3</sup>

$W$  - strumień masy emisji wilgoci, kg/s