

Zbigniew WNUKOWICZ

Efektywność energetyczna instalacji klimatyzacyjnych dla hal basenowych

1. Wprowadzenie

Ośrodki basenowe kojarzą się nam zwykle z odpoczynkiem, zabawą sportem bądź rehabilitacją. Rosnące wymagania klientów oraz coraz większa konkurencja zmuszają projektantów tych obiektów do ciągłego podnoszenia ich jakości, szczególnie w zakresie różnorodności świadczonych usług, estetyki wnętrz i komfortu. Ośrodki basenowe, ze względu na swoją specyfikę, są jednymi z najbardziej energochłonnych obiektów z dziedziny rekreacji. Dlatego, w dobie rosnących cen energii, zastosowanie rozwiązań technicznych gwarantujących niskie jej zużycie, w sposób zasadniczy wpływa na obniżenie kosztów eksploatacji, podnosząc konkurencyjność obiektu.

Zużycie energii zależy głównie od typu i sprawności zastosowanych urządzeń, chociaż nie bez znaczenia jest sposób ich wykorzystania oraz wartość utrzymywanych parametrów pracy (głównie wydajności urządzeń oraz parametrów wody basenowej i powietrza w hali z basenem). W opracowaniu porównamy zużycie ciepła i energii elektrycznej w instalacjach wentylacyjnych i klimatyzacyjnych przy zastosowaniu różnych rozwiązań.

2. Elementy zużycia ciepła i energii elektrycznej w ośrodku basenowym, zależne od funkcjonowania instalacji wentylacyjnej lub klimatyzacyjnej hali basenowej

Poniżej przedstawiono główne elementy zużycia ciepła w ośrodku basenowym, pozostające w zależności od skutków funkcjonowania instalacji wentylacyjnej bądź klimatyzacyjnej hali basenowej:

- a) Straty ciepła na wentylację (ciepło zużywane do podgrzania powietrza zewnętrznego, wprowadzanego do wnętrza budynku przez systemy wentylacyjne).
- b) Straty przenikania poprzez przegrody budowlane (ciepło zużywane do ogrzewania hali basenowej).
- c) Ciepło zużywane na utrzymanie stałej temperatury wody w basenie, stygnącej głównie na skutek parowania
- d) Ciepło zużywane do podgrzania świeżej wody, którą uzupełniane są ubytki z basenu, wynikające z wychłapania, parowania, czy płukania filtrów. Technicznie ciepło związane z elementem „c” i „d” dostarczane jest zazwyczaj za pomocą wspólnego wymiennika.

Straty ciepła na wentylację zależą przede wszystkim od typu i jakości (sprawności, precyzji) zastosowanych urządzeń wentylacyjnych i klimatyzacyjnych dlatego temu tematowi poświęcimy najwięcej miejsca w niniejszym opracowaniu.

Straty przenikania przez przegrody budowlane hali basenowej, chociaż technicznie związane z instalacją wentylacyjną (klimatyzacyjną), wykorzystywaną w większości obiektów do ogrzewania hal basenowych, w praktyce zależne są od tej instalacji tylko w

niewielkim stopniu, wynikającym z precyzji utrzymywania temperatury powietrza w hali basenowej.

Ciepło związane z utrzymaniem stałej temperatury wody w basenie zależy przede wszystkim od parametrów powietrza (temperatury i wilgotności) w hali basenowej, a więc od skutków działania instalacji klimatyzacyjnej. Ponadto niektóre basenowe centrale klimatyzacyjne wyposażone są w instalacje chłodnicze z dodatkowym skraplaczem chłodzonym wodą. W rozwiązaniach tych część ciepła odzyskanego z powietrza w procesie osuszania przekazywana jest do wody basenowej.

Ciepło potrzebne do podgrzania świeżej wody, uzupełnianej do basenu, nie zależy ani od jakości instalacji klimatyzacyjnej ani od skutków jej działania. Istnieją jednak basenowe centrale klimatyzacyjne, wyposażone w instalacje chłodnicze z dodatkowym skraplaczem chłodzonym wodą, zasilającą basen. Systemy te ograniczają zużycie ciepła przez wymiennik wody basenowej oraz poprawiają wydajność osuszania powietrza w centrali.

Urządzenia wentylacyjne i klimatyzacyjne są jednym z głównych odbiorów energii elektrycznej w ośrodku basenowym. Najwięcej energii zużywają sprężarki układów chłodniczych i wentylatory. W opracowaniu przedstawimy rozwiązania techniczne pozwalające na ograniczanie zużycia energii elektrycznej przez te urządzenia.

3. Rola instalacji wentylacyjnej i klimatyzacyjnej w ośrodku basenowym

Głównym zadaniem instalacji wentylacyjnej i klimatyzacyjnej jest utrzymywanie odpowiedniej jakości powietrza w hali basenowej, poprzez:

- usuwanie nadmiaru wilgoci
- usuwanie zanieczyszczeń chemicznych
- ogrzewanie bądź chłodzenie

Dodatkowe funkcje, jakie pełni instalacja wentylacyjna, to:

- zabezpieczenie okien oraz elementów konstrukcyjnych budynku przed zawilgoceniem
- ograniczenie rozprzestrzeniania się wilgoci do sąsiednich pomieszczeń
- ograniczenie odparowania wody z powierzchni basenu
- utrzymanie odpowiedniej temperatury posadzki i t.p.

Nieustanne parowanie wody z niecki, silnie zależne od parametrów powietrza oraz duża emisja związków chloru, szkodliwych dla samej struktury budowlanej, nie pozwalają na wyłączenie tej instalacji nawet wtedy, gdy w ośrodku nie ma klientów.

4. Znaczenie parametrów powietrza w hali basenowej

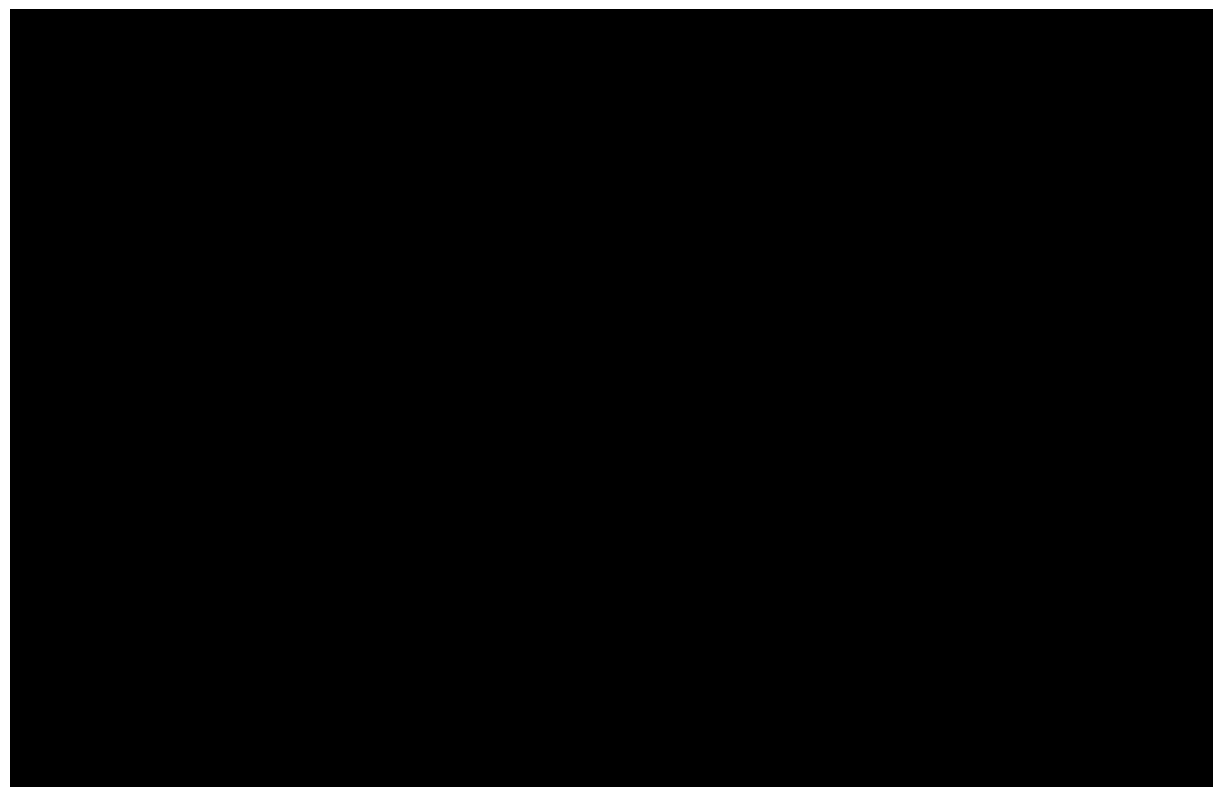
Parametry powietrza wewnątrz hal basenowych znacznie różnią się od parametrów powietrza w innych pomieszczeniach. Przeciętnie jeden kilogram powietrza w hali basenowej zawiera ponad 15g wilgoci, a więc dwukrotnie więcej, niż powietrze w pomieszczeniu mieszkalnym czy biurowym. W stosunku do pomieszczeń biurowych wyższa o 8 do 10 °C jest również temperatura powietrza w hali basenowej i wynosi zazwyczaj 30°C.

Dlaczego właśnie takie parametry powietrza zalecane są dla hal basenowych?

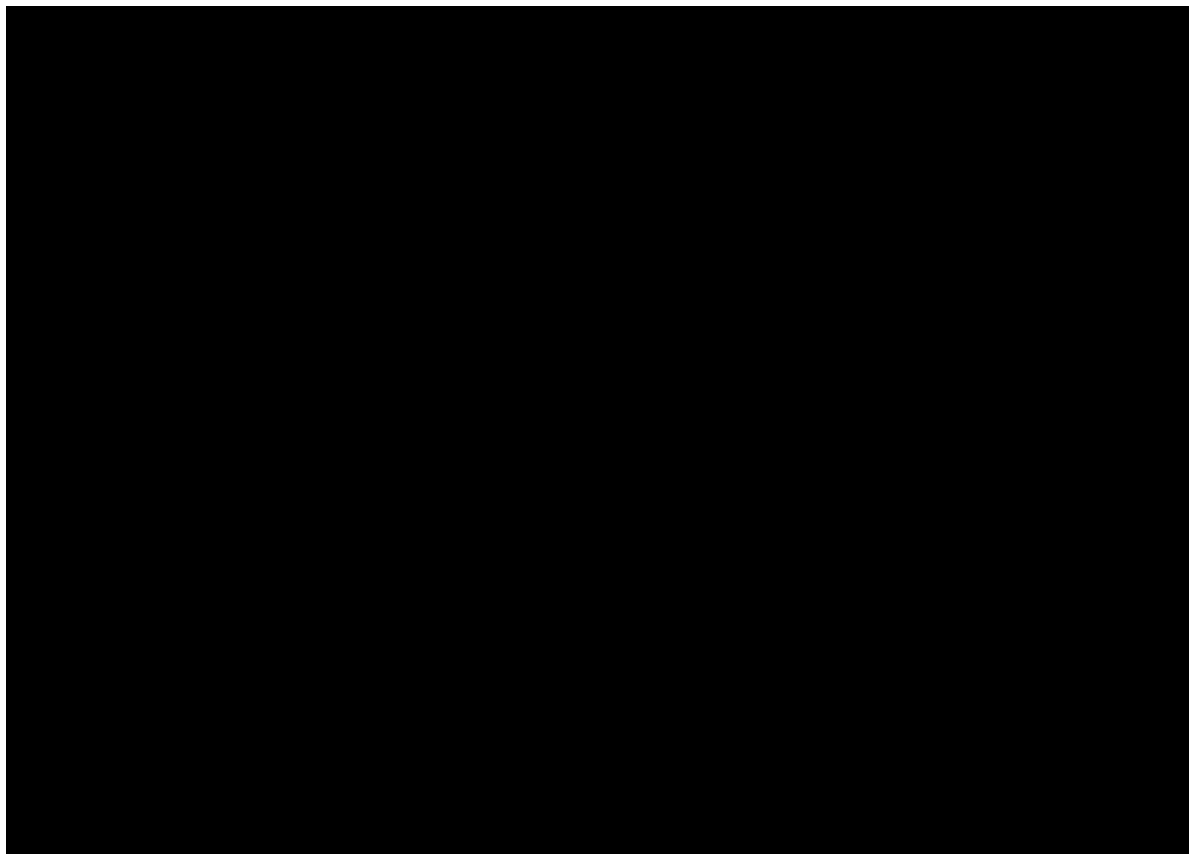
Wartości tych parametrów mają bowiem znaczący wpływ na warunki komfortu, trwałość budynku i zużycie energii.

A mianowicie:

- Intensywność parowania wody z niecki proporcjonalna jest do różnicy ciśnień cząsteczkowych pary wodnej na powierzchni wody i w powietrzu w hali, a więc istnieje ścisła zależność intensywności parowania od parametrów wody i powietrza. Im niższa jest temperatura bądź wilgotność powietrza tym bardziej intensywne parowanie z powierzchni basenu. Intensywność parowania zależy również od falowania powierzchni wody, czyli od stopnia wykorzystania basenu. Poniżej przedstawiono zależność odparowania wody z niecki od temperatury i wilgotności powietrza w hali basenowej (wykresy dla okresu podczas kąpieli i poza kąpielą).



Większe odparowanie wody z powierzchni basenu to także większe straty ciepła z niecki basenowej. Poniżej przedstawiono straty ciepła z niecki na skutek parowania w funkcji parametrów powietrza w hali basenowej.



Z większym odparowaniem wody ściśle związana jest konieczność bardziej wydajnego osuszania powietrza, a więc większej straty ciepła i energii elektrycznej w systemie wentylacyjnym (temat ten rozwinięty będzie w dalszej części opracowania). Dla ograniczenie parowania i związanego z nim zużycia energii należałoby więc maksymalnie podnosić parametry powietrza w hali basenowej.

- Temperatura punktu rosy zależy ściśle od wilgotności i temperatury powietrza i jest tym wyższa, im wyższe są te parametry. Dla zalecanej w halach basenowych temperatury powietrza 30°C i wilgotności 55% temperatura punktu rosy wynosi aż 20°C, co oznacza kondensację pary wodnej na każdym elemencie o temperaturze niższej od 20°C. Dla zmniejszenia ryzyka zawilgocenia elementów konstrukcji budynku należałoby maksymalnie obniżyć parametry powietrza w hali basenowej.
- U osób ubranych tylko w stroje kąpielowe i mokrych zachodzi silne parowanie wody z powierzchni skóry, powodując jej schładzanie. Niska wilgotność bądź temperatura powietrza będzie wzmagać to zjawisko, powodując uczucie chłodu. Z kolei wysoka wilgotność lub temperatura powietrza powoduje uczucie duszności. Warunki komfortu w hali basenowej stanowią więc wąski przedział parametrów powietrza.

Parametry powietrza w hali basenowej są więc wynikiem kompromisu pomiędzy komfortem, kosztami eksploatacji a ryzykiem zawilgocenia budynku. Wartość tych parametrów może i powinna być dostosowana do konkretnego obiektu, ale przy ich ustalaniu należy uwzględnić powyższe zależności.

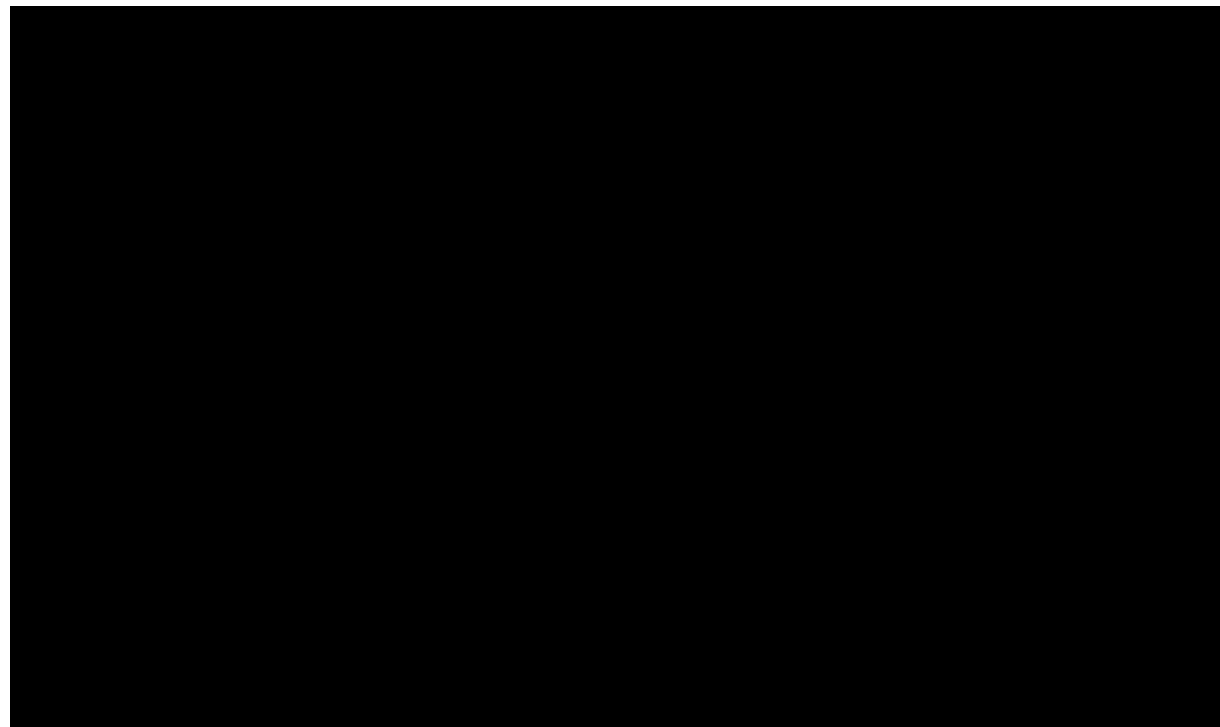
5. Metody ograniczania zużycia ciepła przez instalację wentylacyjną hali basenowej

5.1. Zmienny udział powietrza zewnętrznego i recyrkulacyjnego

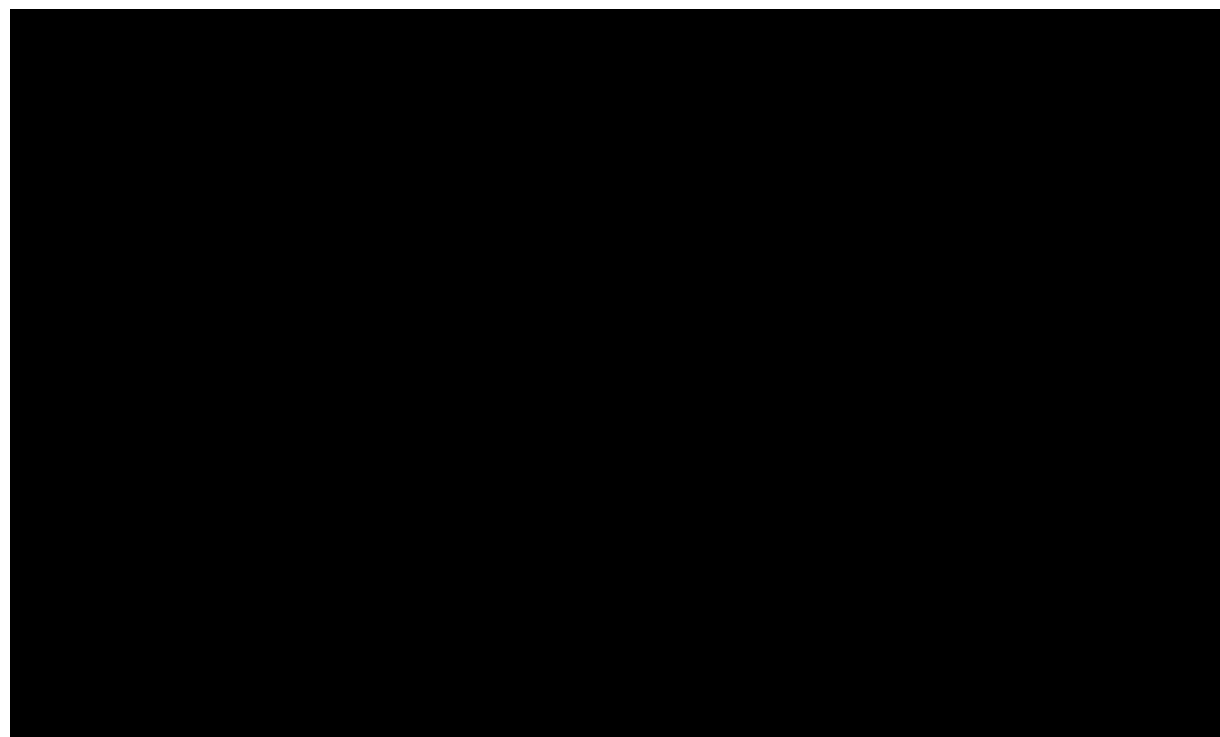
Podczas kąpieli w ośrodku basenowym wielkość strumienia powietrza zewnętrznego, wentylującego halę basenową, powinna gwarantować skuteczną wentylację ze względów sanitarnych oraz zapewnić skuteczne usuwanie nadmiaru wilgoci z powietrza w hali. W okresie poza kąpielą emisja wilgoci z basenu jest kilkakrotnie mniejsza, niż podczas kąpieli. Strumień powietrza wentylacyjnego, niezbędny do asymilacji zysków wilgoci, jest w tym okresie również kilkakrotnie mniejszy. Dlatego w systemach klimatyzacji hal basenowych w celu ograniczenia zużycia energii oraz dla zapewnienia odpowiedniej (nie za wysokiej ale i nie za niskiej) wilgotności powietrza w hali stosuje się zmienny udział powietrza zewnętrznego i recyrkulacyjnego (udział ten zmieniany jest automatycznie w sposób ciągły lub według algorytmu PWM). Takie rozwiązanie znajduje tym bardziej swoje uzasadnienie ze względu na różną, zależnie od pory roku, zdolność powietrza zewnętrznego do asymilacji wilgoci i związane z tym różne zapotrzebowanie na powietrze zewnętrzne.

Prostym sposobem na dalsze ograniczenie zużycia energii może być ograniczenie parowania wody z niecki basenowej w porze nocnej poprzez podniesienie parametrów powietrza. Takie działanie spowoduje wprawdzie przekroczenie warunków komfortu, ale gdy nie ma w ośrodku klientów, nie ma to żadnego znaczenia. Jedynym ograniczeniem tej metody jest ryzyko zawilgocenia budynku. Ryzyko to zależy jednak nie tylko od temperatury punktu rosy, ale również od temperatury na zewnątrz budynku i jest tym mniejsze, im wyższa jest ta temperatura. W okresie utrzymywania się na zewnątrz budynku odpowiednio wysokich temperatur można więc bezpiecznie podnosić parametry powietrza (temperaturę lub wilgotność) w hali basenowej. W praktyce stosuje się automatyczne podnoszenie nastawy wilgotności powietrza w hali basenowej w okresie poza kąpielą do wartości zależnej od temperatury zewnętrznej. Nie stosuje się podwyższania temperatury powietrza, gdyż wiązałoby się to z dodatkowym zużyciem energii.

Poniżej przedstawiono procentowy udział powietrza zewnętrznego w centrali z recyrkulacją w stosunku do strumienia powietrza zewnętrznego w centrali bez recyrkulacji, w funkcji temperatury zewnętrznej. Uwzględniono okres podczas kąpieli i okres poza kąpielą. Dla central z recyrkulacją w okresie kąpieli przyjęto stałą nastawę wilgotności 55% i temperatury 30°C, w okresie poza kąpielą przyjęto nastawę wilgotności zmienianą w funkcji temperatury zewnętrznej od 55% (dla $t_z = -20^\circ\text{C}$) do 70% (dla $t_z = +30^\circ\text{C}$) i stałą nastawę temperatury 30°C.



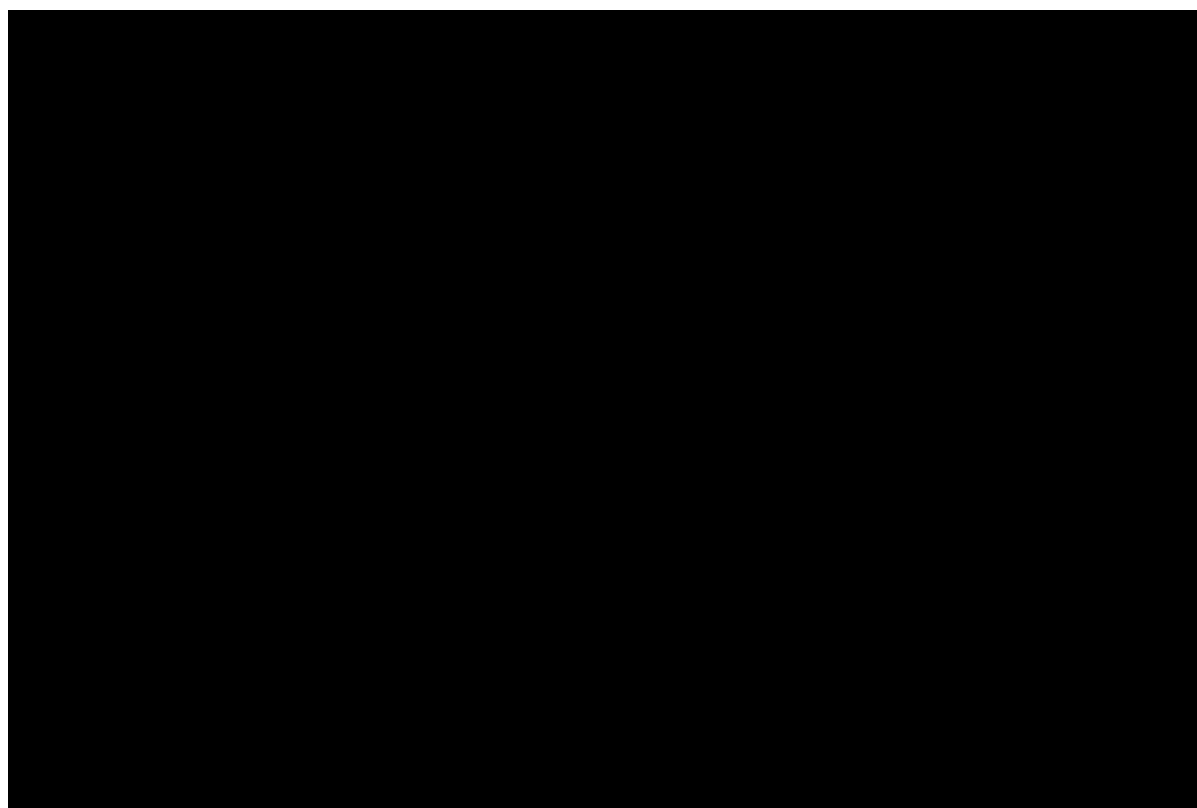
Dla podanych wyżej strumieni powietrza zewnętrznego wyznaczono relatywne straty ciepła na wentylację w funkcji temperatury powietrza zewnętrznego w odniesieniu do strat ciepła centrali bez recyrkulacji przy temperaturze zewnętrznej -20°C . Analiza dotyczy central o jednakowym współczynniku odzysku ciepła z usuwanego powietrza. Wyniki zestawiono na wykresie.



Roczne zużycie ciepła na wentylację hali basenowej przy zastosowaniu centrali ze stałą nastawą wilgotności powietrza, z recyrkulacją i zmiennym udziałem powietrza zewnętrznego, sterowanym zależnie od potrzeb związanych z osuszaniem powietrza, wyniesie zaledwie około **11%** w stosunku do ciepła zużytego przez centralę bez recyrkulacji.

Przy zastosowaniu centrali automatycznie podnoszącej wilgotność powietrza w porze nocnej oszczędności wyniosą dodatkowo około 13% w stosunku do całkowitego zużycia ciepła dla wentylacji w hali basenu, z pominięciem strat przenikania (dla okresu użytkowania wynoszącego 15 godzin w ciągu doby).

Zwiększanie nastawy wilgotności powietrza w okresie poza kąpielą ogranicza również zużycie ciepła do podgrzewu wody basenowej. Przedstawiono to na poniższym wykresie.



Przy zastosowaniu tej metody uzyskujemy do 25% oszczędności ciepła zużywanego do podgrzewu wody w basenie.

5.2. Odzysk ciepła z powietrza usuwanego

Duża zawartość wilgoci w powietrzu w hali basenowej uzasadnia stosowanie wysokosprawnego bloku odzysku ciepła z powietrza usuwanego, umożliwiającego odzysk zarówno ciepła jawnego jak i ogromnej ilości ciepła utajonego w wyniku zachodzącej w wymienniku kondensacji. Odzysk ciepła utajonego z powietrza usuwanego zapobiega jego

głębokiemu schłodzeniu, dzięki czemu znacznie obniża się temperatura ryzyka szronienia. Umożliwia to pełne wykorzystanie wymienników o sprawności temperaturowej przekraczającej 80% nawet przy bardzo niskich temperaturach powietrza zewnętrznego. Warto zwrócić uwagę, że w systemie o sprawności 80% straty ciepła są 2,5 krotnie mniejsze w stosunku do systemu o sprawności 50%.

Najczęściej stosowane urządzenia do odzysku ciepła:

- wymienniki krzyżowe
- wymienniki glikolowe
- rurki ciepła
- systemy chłodzenia mechanicznego

Ze względu na dużą zawartość wilgoci w usuwanym powietrzu nie zaleca się w instalacjach basenowych stosowania wymienników regeneracyjnych, gdyż występuje w nich poważne ryzyko oblodzenia.

W centralach wyposażonych w systemy chłodzenia mechanicznego efektywność energetyczną należy rozpatrywać biorąc pod uwagę zarówno zużycie ciepła jak i energii elektrycznej, oraz ich relacje cenowe.

Należy podkreślić, że katalogowe parametry centrali, w tym również sprawność wymienników ciepła, uzyskiwane są tylko przy dokładnie wyregulowanych nominalnych przepływach powietrza. Niewłaściwe proporcje strumieni powietrza zewnętrznego i usuwanego w bloku odzysku ciepła mogą być spowodowane np.:

- złym wyregulowaniem instalacji
- zabrudzeniem jednego z filtrów powietrza
- płynną zmianą udziału powietrza zewnętrznego i recyrkulacyjnego w centrali, w której nie zastosowano pomiaru i automatycznej regulacji wydajności powietrza nawiewanego i wywiewanego.

Niewłaściwe proporcje strumieni powietrza w bloku odzysku ciepła obniżają skuteczność wymiany ciepła, zmniejszając tym samym efektywność cieplną instalacji wentylacyjnej.

5.3. Osuszanie powietrza z zastosowaniem chłodzenia mechanicznego

Oprócz omówionej wyżej metody osuszania powietrza wewnętrznego poprzez rozcieńczanie go (wentylację) powietrzem zewnętrznym stosuje metodę osuszania z wykorzystaniem chłodzenia mechanicznego. Metoda ta umożliwia prowadzenie procesu osuszania w recyrkulacji, bez udziału powietrza zewnętrznego. Stosowanie jej możliwe jest wyłącznie w porze nocnej, gdyż w okresie użytkowania pływalni konieczne jest wentylowanie hali basenowej ze względów sanitarnych. Metoda ma swoje ograniczenia w lecie ze względu na wydzielane w procesie osuszania duże ilości ciepła, związanego z wykraplaniem wilgoci oraz z przetwarzaniem na ciepło zużytej w kompresorze energii elektrycznej.

Bardziej rozbudowane centrale klimatyzacyjne wyposażone są w zarówno wymiennik rekuperacyjny jak i instalację chłodzenia mechanicznego. System ten umożliwia skuteczne prowadzenie procesu osuszania w recyrkulacji, bez udziału powietrza zewnętrznego, przy stosunkowo niedużym zużyciu energii elektrycznej. Wysoką sprawność procesu osuszania, ponad dwukrotnie większą w stosunku do central bez wymienników rekuperacyjnych, uzyskuje się dzięki dwustopniowemu schładzaniu powietrza. Wstępne schłodzenie następuje

w wymienniku do odzysku ciepła (np. w wymienniku krzyżowym), końcowe w parowniku instalacji chłodniczej. Tego typu rozwiązania generują mniejsze ilości ciepła, mają więc ograniczenia pracy w węższym zakresie temperatur zewnętrznych.

W celu umożliwienia pracy instalacji chłodniczych w pełnym zakresie temperatur zewnętrznych oraz w celu poprawy sprawności energetycznej stosuje się instalacje chłodnicze wyposażone w dodatkowe skraplacze chłodzone wodą basenową lub wodą świeżą, uzupełniającą ubytki w basenie. Uzyskuje się nawet 15% poprawę sprawności instalacji.

6. Sprawność elektryczna instalacji klimatyzacyjnej

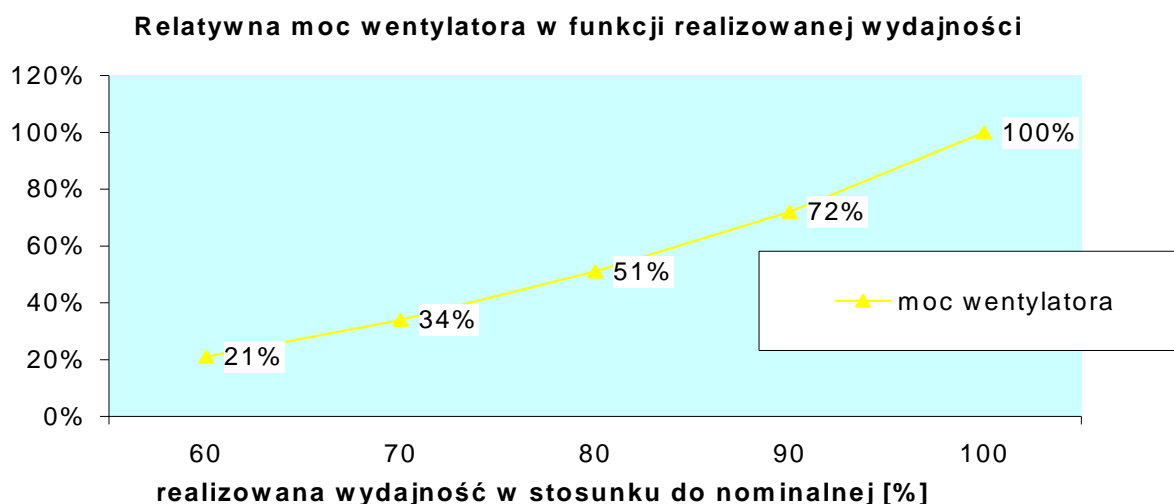
Głównym elementem, decydującym o sprawności elektrycznej instalacji klimatyzacyjnej jest dopasowanie sprężu dyspozycyjnego centrali do faktycznych strat ciśnienia w przewodach wentylacyjnych. Najwyższą sprawność zapewniają centrale wyposażone w falownikowe napędy z elektronicznym pomiarem i regulacją wydajności, gdyż umożliwiają dostosowanie mocy wentylatorów do faktycznych strat przepływu powietrza przez instalację. Zastosowanie wentylatorów z przepływem diagonalnym pozwala dodatkowo na obniżenie wewnętrznych oporów przepływu przez centralę, równomierny przepływ powietrza przez wymienniki ciepła (nagrzewnicę, rekuperator) oraz zmniejszenie gabarytów centrali. W układach bez napędów falownikowych należy wyregulować przepływ powietrza za pomocą przepustnic, przy czym nadwyżka mocy wentylatorów związana z zapasem sprężu dyspozycyjnego centrali jest mocą bezpowrotnie i nie efektywnie traconą. O zużyciu energii elektrycznej w układach klimatyzacji decyduje również typ i sprawność zastosowanych pomp ciepła i wentylatorów.

6.1. Sprawność zespołów wentylatorowych

Pierwszym istotnym czynnikiem wpływającym na sprawność zespołów wentylatorowych jest sprawność samych wentylatorów, wynikająca z typu zastosowanych wentylatorów oraz obranego dla nich punktu pracy. Waha się ona od czterdziestu kilku do osiemdziesięciu kilku procent.

Innym czynnikiem obniżającym o kilka procent sprawność zespołu wentylatorowego jest przekładnia pasowa. Zastosowanie wentylatorów bez przekładni pasowej (z wirnikiem wentylatora osadzonym na wale silnika) nie tylko podnosi ich sprawność ale ze względu na brak obciążeń poprzecznych dla łożysk wydłuża ich żywotność i zwiększa niezawodność.

Najbardziej skutecznym sposobem na ograniczenie zużycia energii elektrycznej jest wprowadzenie funkcji pracy dyżurnej. Moc wentylatorów proporcjonalna jest do iloczynu wydajności powietrza i wytwarzanego sprężu. Poniżej przedstawiono zależność mocy wentylatora w stosunku do mocy nominalnej w funkcji wydajności powietrza (przy założeniu niezmiennego konfiguracji elementów, przez które przetłaczane jest powietrze).



Z przeprowadzonej analizy dla ośrodka basenowego użytkowanego przez 15 godzin w ciągu doby wynika, że stosowanie funkcji pracy dyżurnej powoduje oszczędności energii elektrycznej nawet o 70% (dla centrali automatycznie dostosowującej swoją wydajność do faktycznych potrzeb) lub o blisko 30% (dla centrali, w której funkcja pracy dyżurnej załączana jest zegarem wyłącznie w ciągu nocy). Dla pływalni o wymiarach niecki 25 x 12,5 m przeciętna moc elektryczna pobierana przez wentylatory podczas pracy nominalnej wynosi $2 \times 4,5 \text{ kW} = 9 \text{ kW}$. Roczne zużycie energii elektrycznej przy pracy nominalnej wyniesie zatem ponad 78 000 kWh. Zastosowanie odpowiednich systemów regulacji w omawianym obiekcie może obniżyć koszty eksploatacji w skali roku nawet o 20 tys. złotych.

Wydajności pośrednie, wynikające z racji realizowanych funkcji ogrzewania bądź osuszania, uzyskiwane są bądź poprzez regulację dwustawną (cyklicznie przełączana jest wydajność nominalna i dyżurna) bądź poprzez regulacją płynną, realizowaną z zastosowaniem elektronicznych regulatorów napięcia lub falowników. Regulacja płynna pozwala na uzyskanie dodatkowych 5 % oszczędności w stosunku do regulacji dwustawnej.

6.2. Regulacja wydajności systemu wentylacyjnego

Kalibracja wydajności instalacji wentylacyjnej może odbyć się w dwojaki sposób:

- Poprzez dopasowanie oporów przepływu przez instalację za pomocą przepustnic regulacyjnych do sprężu dyspozycyjnego centrali przy założonej wydajności powietrza. Wentylatory pobierały będą moc nominalną z sieci zasilającej.
- Poprzez dopasowanie sprężu dyspozycyjnego centrali do faktycznych oporów instalacji przy założonej wydajności powietrza. Dopasowanie sprężu centrali do rzeczywistych oporów przepływu przez instalację wymaga zastosowania elektronicznych regulatorów prędkości obrotowej (regulatorów napięcia lub falowników). Redukcja sprężu centrali wiąże się ze zmniejszeniem mocy pobieranej przez wentylatory. Przykładowo redukcja sprężu o 100 Pa powoduje obniżenie mocy wentylatorów o ponad 11%.

Pomiar i płynna, automatyczna regulacja wydajności powietrza nawiewanego i wywiewanego gwarantują zachowanie proporcji pomiędzy wydajnością powietrza świeżego i usuwanego w związku z różnym udziałem powietrza zewnętrznego i recyrkulacyjnego oraz w związku z różnym stopniem zabrudzenia się filtrów powietrza (filtr wywiewu zazwyczaj brudzi się znacznie szybciej w stosunku do filtra powietrza świeżego). Centrale z

elektroniczną regulacją wydajności mają również możliwość elastycznego ustawienia „dyżurnej” wydajności powietrza, co ma istotne znaczenie w układach klimatyzacyjnych z kurtynowym nawiewem wzdłuż okien. Odpowiednio ustawiony przepływ powietrza wyeliminuje kondensację pary wodnej na szybach podczas trybu pracy „dyżurnej”.

Brak systemu elektronicznej regulacji wydajności może spowodować powstanie nadciśnienia w hali basenu i „wypchnięcia” wilgotnego powietrza do sąsiednich pomieszczeń. Złe proporcje wydajności nawiewu i wywiewu powodują również obniżenie sprawności cieplnej bloku odzysku ciepła i zwiększają ryzyko szronienia.

7. Podsumowanie

Powyższe zależności wskazują na konieczność stosowania precyzyjnych systemów regulacji wilgotności i temperatury powietrza w hali basenowej. Rachunek ekonomiczny kosztów inwestycyjnych i kosztów eksploatacji potwierdza zasadność stosowania regulacji ciągłej z algorytmem PID. Zastosowanie płynnej regulacji wydajności oraz wysokosprawnych wentylatorów czy układów sprężarkowych ograniczy do minimum zużycie energii elektrycznej. Wykorzystanie systemów mikroprocesorowych do optymalizacji parametrów pracy centrali w zależności od aktualnych potrzeb może w znacznym stopniu podnieść efektywność energetyczną, gwarantując jednocześnie odpowiednie warunki komfortu dla klientów oraz bezpieczeństwo struktury budowlanej obiektu basenowego.