



Aneta Biała*

Analiza porównawcza wentylacji naturalnej i mechanicznej na przykładzie domu jednorodzinnego

A comparative analysis of natural and mechanical ventilation on the example of a single family house

Wprowadzenie

Problem wyboru właściwego systemu wentylacji w budynkach jest niezwykle istotny głównie ze względu na to, że skład i jakość powietrza w pomieszczeniu, w jakim przebywa człowiek, zmienia się i pogarsza na skutek wielu czynników, takich jak oddawanie ciepła, parowanie, pocenie się, zanieczyszczenia gazowe i pyłowe [1], [2]. Zapewnienie odpowiedniej ilości świeżego powietrza jest niezbędne do prawidłowego funkcjonowania budynku, a co istotniejsze – organizmu człowieka. We współczesnym budownictwie zarówno stolarka, jak i przegrody budowlane są coraz bardziej szczelne, co może skutkować brakiem poprawnej wymiany powietrza w przypadku nieodpowiednio dobranej wentylacji. Kluczowe jest dokonanie właściwego wyboru jeszcze na etapie projektu, co pozwala w sposób znaczący ograniczyć koszty jej budowy.

W pierwszej części artykułu przedstawiono i krótko scharakteryzowano dostępne w budownictwie mieszkalnym systemy wentylacji. Zgodnie z *Rozporządzeniem Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie* (WT) [3] największą dowolność pod względem wyboru rodzaju wentylacji mają budynki mieszkalne jednorodzinne i z tego powodu stały się one przedmiotem szczególnej uwagi autorki publikacji. W dalszej części pracy skupiono się na dwóch rodzajach

Introduction

The problem of choosing the right ventilation system in buildings is extremely important mainly due to the fact that the composition and quality of the air in the room, where a person stays, changes and deteriorates due to many factors, such as heat dissipation, evaporation, sweating, gas pollution and dust [1], [2]. Providing the right amount of fresh air is necessary for the proper functioning of a building, and more importantly – the human body. In modern construction, both window frames and building partitions are becoming more and more airtight, which may result in the lack of proper air exchange in the event of inadequately selected ventilation. The key is to make the right choice at the design stage, which significantly reduces the cost of its construction.

The first part of the article presents and briefly characterizes ventilation systems available in residential buildings. According to the Ordinance of the Minister of Infrastructure of April 12, 2002 on the technical conditions to be met by buildings and their location (WT) [3], single-family residential buildings have the greatest freedom in terms of choosing the type of ventilation, and therefore they have become the subject of special attention to the author of the publication. Later in the article, we focus on two types of ventilation, i.e., gravity and mechanical with a heat recovery system, which are most frequently chosen in single-family houses. In the available source literature, numerous studies can be found on both gravity and mechanical ventilation, but they are considered separately. One can distinguish here the research by Szymon Firłąg

* ORCID: 0000-0002-8967-046X. Wydział Architektury Politechniki Poznańskiej / Faculty of Architecture, Poznan University of Technology, e-mail: aneta.biala@put.poznan.pl

wentylacji: grawitacyjnej i mechanicznej z odzyskiem ciepła, które są najczęściej wybierane w budynkach jednorodzinnych. W dostępnej literaturze przedmiotu można znaleźć liczne opracowania dotyczące zarówno wentylacji grawitacyjnej, jak i wentylacji mechanicznej, jednakże rozpatrywanych oddzielnie. Wyróżnić można tutaj badania Szymona Firląga skupiające się na działaniu wentylacji grawitacyjnej w ocenie mieszkańców na przykładzie budynku wielorodzinnego [4] czy sposobów jej usprawniania [5]. W przypadku wentylacji mechanicznej wielu autorów referatów i artykułów bada przede wszystkim jej efektywność i wpływ na redukcję zapotrzebowania ciepła na cele grzewcze [6]–[9]. W artykule skupiono się głównie na ocenie wentylacji grawitacyjnej w porównaniu z wentylacją mechaniczną z odzyskiem ciepła. Badanie zostało wykonane przy uwzględnieniu trzech kryteriów: kosztów inwestycyjno-eksploatacyjnych, jakości powietrza nawiewanego oraz zapotrzebowania na ciepło na cele grzewcze. W ramach przeprowadzonej analizy podjęto próbę określenia, który typ analizowanych systemów wentylacji jest najkorzystniejszy dla budynków jednorodzinnych.

Przegląd rodzajów wentylacji w budownictwie jednorodzinnym

W Polsce dominującym systemem wentylacyjnym w budownictwie mieszkaniowym jest wentylacja grawitacyjna (il. 1) [10].

Niezbędna przy wyborze wentylacji grawitacyjnej jest znajomość zasad jej działania. Zależy ona bowiem od dwóch czynników zewnętrznych. Pierwszym z nich jest różnica gęstości i temperatury między powietrzem zewnętrznym a wewnętrznym. W okresie zimowym powietrze wewnętrzne ma wyższą temperaturę i mniejszą gęstość niż powietrze zewnętrzne. Latem różnica temperatur jest znikoma, co powoduje ograniczoną wymianę powietrza w budynku bądź kompletny jej brak. W takim wypadku można polegać tylko na drugim czynniku zewnętrznym, jakim jest siła wiatru. Powietrze zewnętrzne jest „wdmuchiwane” poprzez otwory nawiewne do pomieszczenia, a przepływ powietrza jest wymuszany siłą naturalną. W przypadku braku obydwóch wyżej wymienionych czynników zewnętrznych wentylacja grawitacyjna nie istnieje [4].

Wraz ze wzrostem wymagań dotyczących powietrza zaczęto stosować rozwiązania mechaniczne. Ideą wentylacji mechanicznej jest dostarczenie w sposób ciągły odpowiedniej ilości świeżego powietrza do pomieszczeń oraz usunięcie z nich powietrza zanieczyszczonego. Istnieją trzy zasadnicze rodzaje wentylacji mechanicznej.

Pierwszą z nich jest wentylacja mechaniczna wywiewna (il. 2a). Opiera się ona na montażu wentylatorów na przewodach wentylacyjnych w pomieszczeniach o wzmożonej emisji zanieczyszczeń lub wilgotności. W takim wypadku nawiew do budynku w dalszym ciągu następuje drogą naturalną, poprzez nieszczelności bądź nawiewniki w oknach. Coraz częściej ten typ jest stosowany w budownictwie wielorodzinnym, ze względu na większą skuteczność niż wentylacja grawitacyjna przy jednoczesnym

focusing on the effect of gravity ventilation in the assessment of residents on the example of a multi-family building [4] or ways to improve it [5]. In the case of mechanical ventilation, many authors of papers and articles primarily study its effectiveness and impact on the reduction of heat demand for heating purposes [6]–[9]. The article focuses primarily on the assessment of gravity ventilation in comparison with mechanical ventilation with a heat recovery system. The study was performed taking into account three criteria i.e. investment and operating costs, supply air quality and heat demand for heating purposes. As part of the analysis, an attempt was made to determine which type of the analyzed ventilation systems is the most favorable for single-family buildings.

Overview of types of ventilation in single-family housing

In Poland, a dominant ventilation system in housing construction is gravity ventilation (Fig. 1) [10].

Being aware of its operation is essential when choosing gravity ventilation. It depends on two external factors. The first is the density and temperature difference between the outside and inside air. In winter, indoor air is warmer and less dense than outdoor air. In summer, the temperature difference is negligible, which results in limited or no air exchange in the building. In this case, we can only rely on the second external factor, which is the force of the wind. Outside air is “blown” through the inlet openings into the room, and the air flow is forced by natural force. In the absence of both of the above-mentioned external factors, gravity ventilation does not exist [4].

As air requirements increased, mechanical solutions began to be used. The idea of mechanical ventilation is to continuously provide the right amount of fresh air to rooms and remove polluted air from them. There are three main types of mechanical ventilation.

The first is mechanical exhaust ventilation (Fig. 2a). It is based on the installation of fans on ventilation ducts in rooms with increased emissions of pollutants or humidity. In this case, the air supply to the building continues naturally, through leaks or diffusers in the windows. More and more often, this type is used in multi-family housing, due to its greater efficiency than gravity ventilation, while maintaining a certain user’s decision-making process regarding the air supply.

A less popular solution is mechanical supply ventilation (Fig. 2b). In this system, fresh air is forced inside, while polluted air is removed naturally. The air intake, usually located on the roof, ensures that the right amount of air is collected. The resulting over pressure in the building causes the air in it to be “pushed out” to the outside through leaks in building partitions. Unfortunately, the tighter the building, the less effective this type of ventilation is.

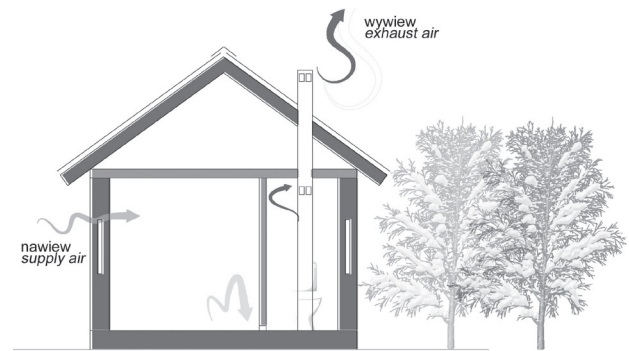
Both, exhaust and supply ventilations are to some extent dependent on the natural ventilation solutions used in the building. Only the combination of these two methods gives full independence, and thus the greatest control over the air in the building. The supply and exhaust ventilation

zachowaniu pewnej decyzyjności użytkownika dotyczącej nawiewu.

Mniej popularnym rozwiązaniem jest wentylacja mechaniczna nawiewna (il. 2b). W tym systemie to nawiew świeżego powietrza jest wymuszany, natomiast usuwanie zanieczyszczonego następuje naturalnie. Umiejscowiona, najczęściej na dachu, czerpnia powietrza zapewnia pobieranie jego odpowiedniej ilości. Wytworzone dzięki temu nadciśnienie w budynku powoduje „wypychanie” znajdującego się w nim powietrza na zewnątrz poprzez nieszczelności w przegrodach budowlanych. Niestety im szczelniejszy budynek, tym mniejsza skuteczność tego typu wentylacji.

Zarówno wentylacja wywiewna, jak i nawiewna są w pewnym sensie zależne od zastosowanych naturalnych rozwiązań wentylacyjnych w budynku. Dopiero połączenie ze sobą tych dwóch sposobów daje pełną niezależność, a co za tym idzie największą kontrolę nad powietrzem znajdującym się w budynku. Wentylacja nawiewno-wywiewna zapewnia nie tylko usuwanie powietrza, ale również kontroluje napływ świeżego, oczyszczonego powietrza do pomieszczeń. Aby system sprawnie działał, potrzebna jest rozbudowana sieć kanałów połączona z centralą wentylacyjną odpowiedzialną za przepływ zarówno powietrza nawiewanego, jak i wywiewanego. Napływ świeżego powietrza jest nieprzerwany i odbywa się niezależnie od ingerencji człowieka. Wskazane jest, aby wszystkie okna i inne przegrody były szczelne. Nie ma jednak konieczności stosowania dodatkowych rozwiązań konstrukcyjnych, ponieważ każdy nowo projektowany budynek ma odpowiedni stopień szczelności. Nie ma również potrzeby montowania nawiewników okiennych i okresowego otwierania okien oraz przewietrzania pomieszczeń. Dzięki zamontowanym w centrali filtrom oczyszczającym powietrze nawiewane ma o wiele lepsze parametry jakościowe, jest wolne od kurzu i zanieczyszczeń.

Alternatywnym rozwiązaniem dla wyżej wymienionych systemów jest wentylacja hybrydowa. Zapewnia ona odpowiednią wymianę powietrza dzięki połączeniu wentylacji

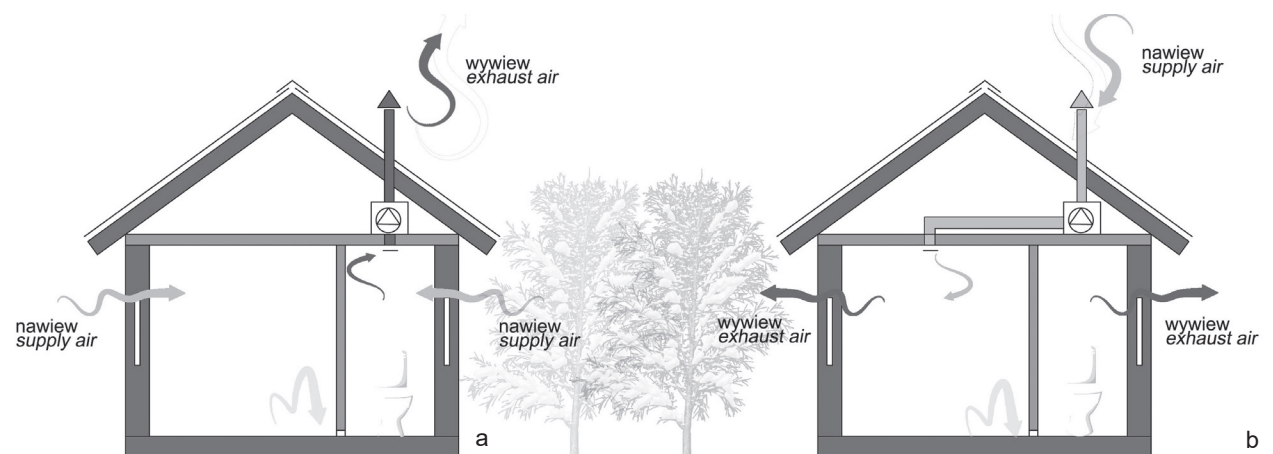


Il. 1. Schemat ideowy działania wentylacji grawitacyjnej (oprac. A. Biała)

Fig. 1. Schematic diagram of the operation of gravity ventilation (elaborated by A. Biała)

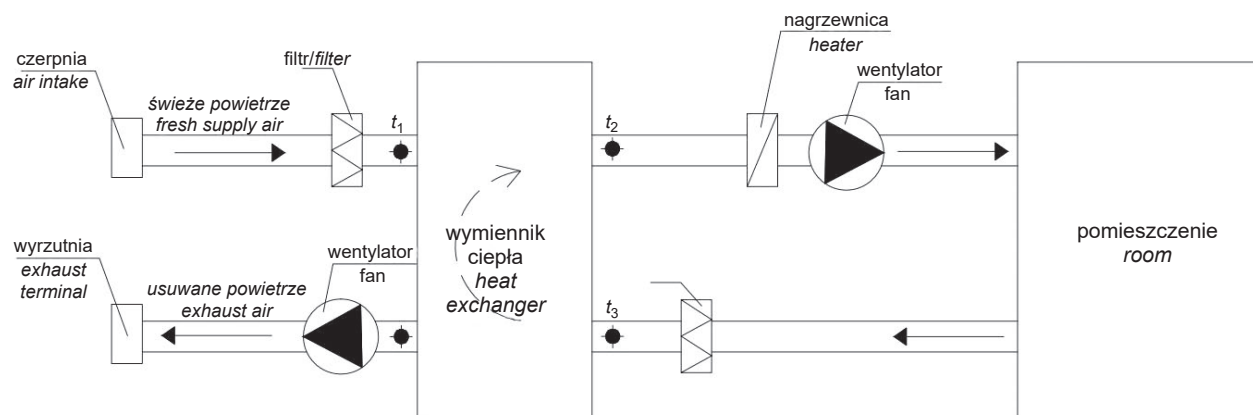
ensures not only the removal of air, but also controls the inflow of fresh, purified air into the rooms. For the system to work efficiently, an extensive network of ducts is needed, connected to an air handling unit (AHU) responsible for the flow of both supply and exhaust air. The inflow of fresh air is uninterrupted and takes place regardless of human interference. It is advisable that all windows and other partitions be tight. However, there is no need to use additional construction solutions, because each newly designed building has an appropriate degree of tightness. There is also no need to install window ventilators and periodically open windows and air the rooms. Thanks to the air purifying filters installed in the AHU, the supplied air has much better quality parameters, it is free from dust and dirt.

An alternative solution to the above-mentioned systems is hybrid ventilation. It ensures adequate air exchange thanks to the combination of gravity and mechanical ventilation, which complement each other. Under favorable weather conditions, the air exchange occurs naturally, but when they are insufficient, mechanical support is



Il. 2. Uproszczone schematy wentylacji mechanicznej: a) wywiewnej, b) nawiewnej (oprac. A. Biała)

Fig. 2. Simplified diagrams of mechanical ventilation: a) exhaust, b) supply air (elaborated by A. Biała)



Il. 3. Schemat ideowy instalacji wentylacji z odzyskiem ciepła; t_1 – temperatura powietrza zewnętrznego, t_2 – temperatura powietrza za wymiennikiem ciepła, t_3 – temperatura powietrza wewnętrznego (oprac. A. Biała)

Fig. 3. Schematic diagram of mechanical ventilation with a heat recovery system; t_1 – outside air temperature, t_2 – air temperature after the heat exchanger, t_3 – inside air temperature (elaborated by A. Biała)

grawitacyjnej i mechanicznej, które wzajemnie się uzupełniają. Przy korzystnych warunkach atmosferycznych wymiana powietrza następuje naturalnie, a gdy są one niewystarczające, włącza się wspomaganie mechanicznie. Możliwe jest ono dzięki montażowi odpowiednich wentylatorów niskociśnieniowych w formie nasad kominowych na szczycie kanałów wentylacji naturalnej [11].

Niezależnie od przyjętej metody, wentylacja polega na wymianie ogrzanego już powietrza wewnętrznego na świeże, ale zarazem chłodne powietrze zewnętrzne. Ponownie musi ono zostać ogrzane do odpowiedniej temperatury, co powoduje znaczne straty ciepła. W dzisiejszych czasach budownictwo idzie w stronę energooszczędności i ekologii. Koniecznością stało się stawianie budynków o jak najniższym współczynniku zapotrzebowania na energię pierwotną (EP)¹. Według obowiązujących przepisów wynosi on obecnie 95 kWh/(m²·rok). Od stycznia 2021 r. nowe budynki mieszkalne nie będą mogły natomiast zużywać więcej niż 70 kWh/(m²·rok) [3]. Aby sprostać nowym wymaganiom, zaczęto stosować rozwiązania ograniczające straty ciepła z budynku. Żaden z wymienionych powyżej rodzajów wentylacji nie pozwala jednak na ich ograniczenie. Prawidłowo działająca wentylacja, zarówno grawitacyjna, jak i mechaniczna generuje nawet do 25% całkowitych strat ciepła w budynkach o dobrej izolacyjności przegród budowlanych [12]. Powszechnym rozwiązaniem tego problemu stała się technologia odzysku ciepła, stosowana wyłącznie w systemie wentylacji mechanicznej nawiewno-wywiewnej.

System ten opiera się na zastosowaniu wymiennika ciepła zainstalowanego w centrali wentylacyjnej. Świeże powietrze pobierane jest z zewnątrz za pomocą czerpni oraz transportowane jednym zbiorczym kanałem do

aktivated. It is possible thanks to the installation of appropriate low-pressure fans in the form of chimney pots on the top of the natural ventilation ducts [11].

Regardless of the method adopted, ventilation consists in replacing the already heated indoor air with fresh, but also cool outdoor air. It must again be heated to a suitable temperature, which causes a significant heat loss. Nowadays, construction is moving towards energy efficiency and ecology. It has become a necessity to construct buildings with the lowest possible coefficient of demand for primary energy (EP)¹. According to the applicable regulations, it is currently 95 kWh/(m²·a). From January 2021, new residential buildings will not be able to consume more than 70 kWh/(m²·a) [3]. In order to meet the new requirements, solutions began to reduce heat losses from a building. However, none of the above-mentioned types of ventilation can limit these losses. Properly functioning ventilation, both gravitational and mechanical, generates up to 25% of total heat loss in buildings with good insulation of building partitions [12]. The heat recovery technology, used only in the mechanical supply and exhaust ventilation system, has become a common solution to this problem.

This system is based on the use of a heat exchanger installed in the air handling unit. Fresh air is taken from the outside by means of the air intake and then transported through one collective channel to the ventilation unit. This is where the heat exchanger is located and the heat exchange takes place between the air extracted from the rooms (heated) and the fresh air taken from the outside (cool). There are various variants of heat exchangers available on the market, differing mainly in design and efficiency, which ranges from 67 to 90% [6], [7].

¹ Roczne zapotrzebowanie na nieodnawialną energię pierwotną uwzględnia oprócz energii końcowej dodatkowe nakłady nieodnawialnej energii pierwotnej na dostarczenie do budynku każdego wykorzystanego nośnika energii lub energii. Uzyskane niskie wartości wskazują na nieznaczne zapotrzebowanie na energię i tym samym wysoką efektywność energetyczną budynku i zużycie energii chroniące zasoby naturalne i środowisko.

¹ An annual demand for non-renewable primary energy takes into account, apart from final energy, an additional outlay of non-renewable primary energy for delivering each energy carrier or energy to the building. The low values which are obtained suggest an insignificant energy demand and thus high energy efficiency of the building and such energy use that protects natural resources and the environment.

centrali wentylacyjnej. To tam znajduje się wymiennik ciepła, w którym następuje wymiana pomiędzy powietrzem wyciąganym z pomieszczeń (ogrzany) a świeżym, pobranym z zewnątrz (chłodnym). Na rynku dostępne są różne warianty wymienników ciepła, różniące się przede wszystkim konstrukcją i sprawnością, która waha się przedziale od 67 do 90% [6], [7].

Współczesne problemy związane z wentylacją

Aby wentylacja obiektu działała sprawnie, niezbędne są dwa ściśle ze sobą powiązane elementy – odpowiedni nawiew i wywiew. Brak odpowiedniej świadomości i wiedzy nie tylko w praktyce budowlanej, ale również u samych użytkowników wpływa na nieodpowiednią wymianę powietrza. Badania Firląga przeprowadzone w formie ankiety na grupie mieszkańców budynku wielorodzinnego wykazały, że większość osób niepoprawnie korzysta z wentylacji grawitacyjnej, ograniczając napływ świeżego powietrza przez zamykanie nawiewników [4]. Zbyt mała ilość dostarczonego do pomieszczeń świeżego powietrza przekłada się przede wszystkim negatywnie na zdrowie i samopoczucie użytkowników. Pojawiają się bóle głowy, zmęczenie czy nawet podrażnienie skóry, nosa czy gardła. Nieodpowiednia wentylacja lokali trwająca przez długi czas wpływa niekorzystnie nie tylko na człowieka, ale również na budynek i jego wyposażenie. Do poważniejszych skutków należy zaliczyć wnikanie wilgoci do ścian, pęcznienie drewnianych podłóg czy pojawianie się grzybów i pleśni w okolicach okien czy za meblami [4], [12].

Wraz z definiowaniem problemu niewystarczającego nawiewu pojawiły się również próby jego rozwiązania. Wietrzenie pomieszczeń poprzez otwieranie szeroko okien na krótki czas nie jest formą nawiewu samą w sobie, ale tylko tak można zyskać pewność, że nastąpiła wymiana całej objętości powietrza wewnętrznego i tym samym pozbyliśmy się niechcianej wilgoci i zanieczyszczeń z powietrza. Kluczowa jest tutaj systematyczność i intensywność. Aby zapewnić odpowiedni komfort, należy wietrzyć wszystkie pomieszczenia w domu, w tym głównie sypialnie po nocy i bezwzględnie łazienki po kąpieli. Dobrym nawykiem jest też wietrzenie całego domu po dłuższej nieobecności.

Kolejnym sposobem na dostarczenie do domu świeżego powietrza jest mikrowentylacja. Obecnie każda stolarka okienna wyposażona jest w taki system. Polega on na rozszczelnianiu ramy okien uchylnych. Dopływ świeżego powietrza zapewniony jest poprzez szczelinę między ramą a skrzydłem powstałą po przekręceniu klamki od pozycji poziomej w górę o 45 stopni. Mikrowentylacja nie jest jednak rozwiązaniem docelowym. Nie można jej w żaden sposób kontrolować ani wpłynąć na jej intensywność. Nie zastąpi ona odpowiedniego nawiewu, a jedynie może go wspomóc. Główną wadą tego rozwiązania jest brak świadomości wśród samych użytkowników. Większość z nich nie wie, na jakiej zasadzie działa mikrowentylacja, bądź świadomie jej po prostu nie używa [13].

Wraz z narastaniem skali problemu, koniecznością stał się montaż układów kontrolowanego napływu powietrza – nawiewników okiennych. Od 2009 r. architekt musi dobrać okna i osprzęt okienny zgodnie z założeniami

Contemporary problems related to ventilation

For the ventilation of a building to work efficiently, two closely related elements are necessary – adequate air supply and exhaust. Lack of appropriate awareness and knowledge not only in construction practice, but also in the users themselves, affects inadequate air exchange. Firląg's research conducted in the form of a survey on a group of residents of a multi-family building showed that most people use gravity ventilation incorrectly, limiting the inflow of fresh air by closing the air inlets [4]. An insufficient amount of fresh air supplied to the rooms has a negative impact on the health and well-being of users. Headaches, fatigue and even irritation of the skin, nose or throat appear. Inadequate ventilation of premises lasting for a long time adversely affects not only people, but also the building and its equipment. The more serious effects include penetration of moisture into the walls, swelling of wooden floors, and the appearance of fungi and mold around windows or behind furniture [4], [12].

Along with defining the problem of insufficient ventilation, there have also been attempts to solve it. Airing the rooms by opening windows wide for a short time is not a form of air supply in itself, but it is the only way to be sure that the entire volume of internal air has been replaced and thus we get rid of unwanted moisture and pollution from the air. Regularity and intensity are key here. To ensure adequate comfort, all rooms in the house should be ventilated, mainly bedrooms after a night and the bathrooms after a shower. It is also a good habit to air the entire house after a long absence.

Another way to bring fresh air into your home is through micro-ventilation. Currently, each window frame is equipped with such a system. It consists in unsealing the frame of tilt windows. Fresh air supply is provided through the gap between the frame and the sash after turning the handle from the horizontal position upwards by 45 degrees. However, micro-ventilation is not the final solution. You cannot control it in any way or influence its intensity. It is not a substitute for adequate airflow, but can only support it. The main disadvantage of this solution is the lack of awareness among the users themselves. Most of them do not know how micro-ventilation works, or they simply do not use it consciously [13].

With the increasing scale of the problem, it became necessary to install controlled air inflow systems – window diffusers. Since 2009, the architect has to select windows and window accessories in accordance with the design assumptions of the ventilation system. Diffusers are small, simple devices mounted in windows or external walls of a building. A distinction can be made between devices with constant flow or regulated flow, which can be manual or automatic. Manual adjustment allows the user to limit the intensity of air exchange as desired. It is especially useful during intense frosts when excessive heat losses should be limited. The automatic ones, on the other hand, adjust the air flow depending on changes in temperature, humidity, or air pressure.

The choice of the type of ventilation in a building should be carefully considered and preceded by a thorough

projektowymi systemu wentylacji. Nawiewniki to niewielkie, proste urządzenia montowane w oknach lub zewnętrznych ścianach budynku. Wyróżnić można urządzenia o przepływie stałym lub regulowanym, które mogą być ręczne lub automatyczne. Ręczna regulacja umożliwia użytkownikowi ograniczenie intensywności wymiany powietrza wedle uznania. Szczególnie przydatne jest to w czasie intensywnych mrozów, kiedy należy ograniczyć nadmierne straty ciepła. Automatyczne natomiast same dostosowują przepływ powietrza w zależności od zmian temperatury, wilgotności czy ciśnienia powietrza.

Wybór rodzaju wentylacji obiektu powinien być prześlany i poprzedzony dokładną analizą wad i zalet każdego z nich. Jednym z ważniejszych kryteriów podczas wyboru jest nakład inwestycyjny danego systemu. W artykule skupiono się na analizie wentylacji grawitacyjnej i mechanicznej. Porównanie kosztów tych dwóch systemów nie jest jednak powszechne i uniwersalne dla każdego budynku. Związane jest to głównie z dużą dysproporcją cenową poszczególnych elementów systemów. Wentylacja mechaniczna jest rozwiązaniem droższym, głównie ze względu na bardziej złożoną budowę i konieczność kupna jednostki wentylacyjnej. Cena rekuperacji dla danego obiektu jest ściśle powiązana z jego architekturą i układem funkcjonalnym. Dla każdego obiektu w zależności od powierzchni użytkowej, liczby kondygnacji i pomieszczeń, w których niezbędne są kominy wywiewne, koszty zarówno wentylacji naturalnej, jak i mechanicznej znacznie od siebie odbiegają. Podstawowym błędem jest jednak założenie, że wentylacja grawitacyjna jest darmowa. Należy pamiętać, że wentylację mechaniczną wykonuje się zamiast wentylacji grawitacyjnej.

Niezbędnym elementem każdej wentylacji jest odpowiedni nawiew świeżego powietrza. Ważnym aspektem dla wielu inwestorów w wyborze wentylacji naturalnej jest jej bezobsługowość. W nowych budynkach nie jest tak bezobsługowa jak była kiedyś. Przewietrzanie pomieszczeń 2–3 razy na dobę wydaje się czasochłonne i co najważniejsze – trzeba o tym pamiętać. Skutkiem przewietrzania jest chwilowe wyziębienie mieszkania, co dla wielu osób jest nieakceptowalne i dlatego się one na to nie decydują. Stosowanie mikrowentylacji w oknach również wymaga pewnej rutyny w jej stosowaniu. Instalacja nawiewników manualnych wymaga okresowego kontrolowania ilości napływającego powietrza, a większość osób niepoprawnie z nich korzysta, często zamykając dopływ powietrza, zwłaszcza zimą [4]. Bezobsługowym rozwiązaniem jest tylko instalacja nawiewników z automatyczną regulacją. Z tego powodu w przeprowadzonej analizie uwzględniono montaż higroskopijnych nawiewników okiennych we wszystkich niezbędnych pomieszczeniach. Z założenia powinny one zapewnić minimalny napływ świeżego powietrza przy możliwie najbardziej komfortowym użytkowaniu systemu.

Metoda badawcza

Obiektem badań był projekt parterowego budynku mieszkalnego na etapie realizacji budowy o łącznej powierzchni użytkowej 185 m². Jego uproszczony rzut został

analysis of advantages and disadvantages of each of them. One of the most important criteria when selecting is the investment cost of a given system. The article focuses on the analysis of gravity and mechanical ventilation. However, the cost comparison of the two systems is not universal for every building. This is mainly due to the large price disproportionate of individual system components. Mechanical ventilation is a more expensive solution, mainly due to the more complex structure and the necessity to buy an air handling unit. The recuperation price for a given building is closely related to its architecture and functional layout. Depending on the usable area, the number of stories and rooms where exhaust chimneys are necessary, the costs of both natural and mechanical ventilation differ significantly for each building. A basic mistake, however, is to assume that gravity ventilation is free. It should be noted that mechanical ventilation is performed instead of gravity ventilation.

An indispensable element of any ventilation is an adequate supply of fresh air. An important aspect for many investors in choosing natural ventilation is its maintenance-free operation. In new buildings, it is not as maintenance-free as it used to be. Airing the rooms 2–3 times a day seems time-consuming and most importantly – you have to remember about it. Ventilation results in temporary cooling of the apartment, which is unacceptable for many people and they do not decide to do so. The use of micro-ventilation in windows also requires some routine in its using. Installation of manual air vents requires periodic control of the amount of incoming air, and most people use them incorrectly, often closing the air supply, especially in winter [4]. The maintenance-free solution is only the installation of automatic diffusers. For this reason, the analysis included the installation of hygroscopic window diffusers in all necessary rooms. In principle, they should ensure a minimum inflow of fresh air with the most comfortable use of the system.

Research method

The subject of the research was the design of a one-story residential building at the construction stage with a total usable area of 185 m², a simplified plan view of which is shown in Figure 4. The building was designed in a traditional technology. All U heat transfer coefficients of building partitions and joinery comply with the requirements of WT [3]. The research was conducted in 2018, and the building is located in Poznań. In order to make an accurate comparison of the two ventilation systems in a single-family building, the research work was divided into three stages.

The first part of the research focused on the compilation of the investment costs of gravity ventilation in the analyzed building and comparing them with the costs of mechanical ventilation with a heat recovery system. The results of the research were based on individual valuations collected by the author of the article. The cost of individual system elements was based on retail prices from the current manufacturers' offers. In the case of remuneration for contractors (so-called labor), inquiries were sent to compa-



przedstawiony na ilustracji 4. Budynek zaprojektowano w technologii tradycyjnej. Wszystkie współczynniki przenikania ciepła U przegród budowlanych i stolarki są zgodne z wymaganiami WT [3]. Badania zostały przeprowadzone w 2018 r., a budynek zlokalizowany jest w Poznaniu. W celu dokonania dokładnego porównania dwóch systemów wentylacji w budynku jednorodzinym prace badawcze podzielono na trzy etapy.

W pierwszej części badań skupiono się na zestawieniu kosztów inwestycyjnych wykonania wentylacji grawitacyjnej w badanym obiekcie i porównaniu ich z kosztami wykonania wentylacji mechanicznej z odzyskiem ciepła. Wyniki badań zostały oparte na zebranych przez autorkę artykułu indywidualnych wycenach. Koszt poszczególnych elementów systemowych oparto na cenach detalicznych z aktualnych ofert producentów. W przypadku wynagrodzeń dla wykonawców (tzw. robocizna) kierowano zapytania ofertowe do firm specjalizujących się w montażu danego systemu. Otrzymane w ten sposób dane można uznać za wiarygodne ze względu na to, że pytania były kierowane od prywatnego inwestora, a firmy nie były świadome badania. Zapytania ofertowe wysyłano do co najmniej trzech różnych producentów i wybierano najniższe ceny z otrzymanych odpowiedzi. Należy podkreślić, że wyceny obowiązywały w okresie wiosenno-letnim 2018 r. i były aktualne na terenie Poznania i okolic. W przypadku kosztów eksploatacyjnych przyjęto ceny prądu zgodnie z aktualnym cennikiem dystrybutora energii elektrycznej, a zużycie na podstawie karty katalogowej dobieranego rekuperatora.

Drugim etapem badań było porównanie wentylacji grawitacyjnej i mechanicznej z odzyskiem ciepła pod względem jakości powietrza. Poniższą analizę oparto na danych

niezależnych specjalistów w dziedzinie instalacji danego systemu. The data obtained in this way can be considered reliable due to the fact that the questions were directed from a private investor and the companies were not aware of the research. Inquiries were sent to at least three different producers and the lowest prices were selected from the responses received. It should be emphasized that the valuations were valid in the spring and summer 2018 and were valid in Poznań and its vicinity. In the case of operating costs, electricity prices were assumed in accordance with the current electricity distributor's price list, and consumption was based on the catalog card of the selected recuperator.

The second stage of the research was to compare gravity and mechanical ventilation with a heat recovery system in terms of air quality. The following analysis is based on measurement data from the station located at Dąbrowskiego Street in Poznań from 2018 [14]. They were selected and constituted the input data for the performed calculations and analyses. The list includes air pollutants which, according to the author of the publication, have a significant impact on the air cleanliness. Actual data may differ from those given in the summary due to the fact that environmental factors also affect air pollution. Worse air quality can be observed in the dense downtown development around busy streets and definitely better in loose buildings with surrounding greenery. Regardless of the location, however, the problem with air cleanliness intensifies during the heating season (November to March). This is mainly due to the common use of solid fuel stoves by individual consumers [15].

In order to determine the heat demand for heating purposes of the analyzed building, which is the third stage of the research, the methodology of determining the energy

pomiarowych ze stacji zlokalizowanej przy ul. Dąbrowskiego w Poznaniu z 2018 r. [14]. Zostały one poddane selekcji i stanowiły dane wyjściowe do przeprowadzonych obliczeń i analiz. Do zestawienia wybrano zanieczyszczenia, które zdaniem autorki publikacji mają znaczący wpływ na stan czystości powietrza. Rzeczywiste dane mogą odbiegać od podanych w zestawieniu ze względu na to, że na zanieczyszczenie powietrza mają również wpływ czynniki środowiskowe. Gorszą jakość powietrza można zaobserwować w gęstej zabudowie śródmiejskiej w okolicy ruchliwych ulic, a zdecydowanie lepszą w luźnej zabudowie z okoliczną zielenią. Niezależnie jednak od lokalizacji problem z czystością powietrza nasila się w sezonie grzewczym (od listopada do marca). Spowodowane to jest głównie powszechnym stosowaniem przez indywidualnych odbiorców pieców na paliwo stałe [15].

W celu określenia zapotrzebowania ciepła na cele grzewcze analizowanego obiektu, będącego trzecim etapem badań, wykorzystano metodologię wyznaczania charakterystyki energetycznej budynku. Proces ten został przedstawiony w *Rozporządzeniu Ministra Infrastruktury i Rozwoju z dnia 27 lutego 2015 r. w sprawie metodologii wyznaczania charakterystyki energetycznej budynku lub części budynku oraz świadectw charakterystyki energetycznej* [16]. Obliczenia zostały wykonane w sposób uproszczony, który może wpłynąć na dokładność otrzymanych wyników, jednakże ze względu na założenia nie zniekształca on w sposób istotny wyników obliczeń. Podstawowe dane obiektu były bowiem takie same w obu przypadkach, a jedyną różnicą był sposób wentylacji obiektu. Założono, że źródłem ciepła w analizowanym budynku jest piec gazowy kondensacyjny niskoemisyjny do 30 kW. Dane zestawiono w postaci tabeli i obliczono szacunkowy roczny koszt ogrzewania na podstawie ceny gazu dla odbiorcy indywidualnego ze strony dostawcy paliwa.

Wyniki badań

Koszty wentylacji obiektu mieszkalnego

Standardowy dom jednorodzinny, w zależności od układu, wyposażony jest zazwyczaj w dwa do trzech kominów. Aby zapewnić prawidłową wentylację naturalną w rozważanym obiekcie, należałoby wymurować trzy oddzielne kominy, każdy zawierający po trzy kanały wentylacyjne zgodnie z ilustracją 3. Cena wentylacji naturalnej rozbita jest na wiele mniejszych składowych, które często nie są rozpatrywane razem, dlatego prawdopodobnie wiele osób nie zdaje sobie sprawy z ich istnienia. Całościowy koszt takiej wentylacji składa się z trzech elementów: budowy komina, jego obróbki ponad powierzchnią dachu oraz wyposażenia budynku w odpowiedni osprzęt. Według wyliczeń koszt systemowych pustaków wentylacyjnych potrzebnych do wymurowania jednego komina wraz z niezbędną zaprawą oszacowano na mniej więcej 568 zł. Koszt pracy wykwalifikowanego murarza wyniósłby natomiast około 550 zł. W kosztach należy również ująć niezbędne materiały i robociznę za wykończenie komina ponad powierzchnią dachu. Powszechnie wykonuje się je z cegły

performance of the building was used. This process was presented in the Regulation of the Minister of Infrastructure and Development on the methodology for determining the energy performance of a building or part of a building and energy performance certificates [16]. The calculations were performed in a simplified manner, which may affect the accuracy of the obtained results, however, due to the assumptions, it does not significantly distort the results of the calculations. The basic data of the object was the same in both cases and the only difference was the way the object was ventilated. It was assumed that the heat source in the analyzed building is a low-emission gas condensing furnace up to 30 kW. The data is compiled in the form of a table and the estimated annual cost of heating was calculated based on the gas price for an individual customer from the fuel supplier.

Results

Residential ventilation costs

A standard single-family house, depending on the layout, is usually equipped with two to three chimneys. To ensure proper natural ventilation in the considered house, three separate chimneys should be built, each with three ventilation ducts, as shown in Figure 3. The price of natural ventilation is broken down into many smaller components, which are often not considered together, which is why many people probably are not aware of their existence. The total cost of such ventilation consists of three elements, i.e. the construction of the chimney, its processing above the roof surface and providing the building with appropriate equipment. According to calculations, the cost of the system ventilation blocks needed to build one chimney with the necessary mortar was estimated at approximately PLN 568. The cost of the work of a qualified bricklayer would be around PLN 550. The costs should also include the necessary materials and labor for finishing the chimney above the roof surface. They are commonly made of clinker bricks, which, together with the employees' remuneration, gives about PLN 820 for one chimney. The necessary roofing work is the cost of 300 PLN per piece. To sum up, the costs of building three chimneys for the analyzed house are PLN 2,664 for materials and PLN 4,060 for labor. However, it should be remembered that in order to receive the total expenditure on gravity ventilation, the costs of equipment, such as exhaust grilles, rotating chimney cowl or inspection doors, which in the analyzed case amount to PLN 3,030, should also be included. It is necessary to purchase hygroscopic diffusers, the price of which ranges from PLN 200–250 per item. The above analysis shows that the total cost of gravity ventilation for the analyzed house, equipped with three separate 6 m high brick chimneys, is PLN 9,754. It is worth noting that the cost of accessories, which is often not taken into account in the valuations, accounts for over 30% of the price of the entire installation. Omitting this element can significantly lower the total financial outlay on gravity ventilation, which is crucial when comparing it with a mechanical ventilation system.

klinkierowej, co łącznie z wynagrodzeniem pracowników daje około 820 zł za jeden komin. Niezbędna obróbka blacharska to koszt rzędu 300 zł za sztukę. Podsumowując, koszty budowy trzech kominów dla analizowanego domu wynoszą 2664 zł za materiały oraz 4060 zł za robociznę. Należy jednak pamiętać, że aby otrzymać całkowity wydatek na wentylację grawitacyjną, należy również wliczyć koszty osprzętu, takie jak kratki wywiewne, obrotowe kominiki nasadowe czy drzwiczki rewizyjne, które w analizowanym przypadku wynoszą 3030 zł. Niezbędny jest zakup nawiewników higrosterowalnych, których cena waha się w granicach 200–250 zł za sztukę. Z powyższej analizy wynika, że całkowity koszt wentylacji grawitacyjnej dla analizowanego domu, wyposażonego w trzy oddzielne murowane kominy o wysokości 6 m wynosi 9754 zł. Warto zwrócić uwagę, że koszt osprzętu, który często nie jest brany pod uwagę w wycenach, stanowi ponad 30% ceny

The second option was to equip the house with a ventilation system with a heat recovery system. In this case, an extensive network of ventilation ducts and the purchase of an appropriate central unit are necessary. The cost estimate includes the popular PE-FLEX duct system with the necessary accessories, the total cost of which was PLN 3,960. A very important step in the recuperation system is the selection of an appropriate central unit. Its prices vary greatly depending on performance, design, or manufacturer. For the purposes of the analysis, a recuperator with a capacity of 400 m³/h and a counter-current cross arrangement was selected. The prices of such devices start from about PLN 6,000 and this has been included in the cost estimate. The installation of the entire installation by a professional company was estimated at PLN 2,500. Therefore, the total cost of the installation is PLN 12,660.

Tabela 1. Koszty inwestycyjne wentylacji naturalnej (oprac. A. Biała)
Table 1. Investment cost of natural ventilation (elaborated by A. Biała)

Element <i>Element</i>	Nazwa <i>Name</i>	Cena jednostkowa <i>Unit price [PLN]</i>	Liczba sztuk <i>Number of items</i>	Cena <i>Price [PLN]</i>
Materiały budowlane <i>Building materials</i>	pułstak systemowy went. <i>ventilation system block</i>	532/szt./pcs.	3	1596
	zaprawa do montażu <i>mortar</i>	36	3	108
	cegła klinkierowa <i>clinker brick</i>	3/szt./pcs.	300	900
	fuga spoinowa <i>grout</i>	60PLN/25kg	1	60
Razem materiały budowlane: <i>Building materials – total:</i>				2664
Osprzęt <i>Equipment</i>	nasada kominowa <i>chimney cowl</i>	120	8	960
	drzwiczki rewizyjne <i>inspection door</i>	20/szt./pcs.	8	160
	kratki wywiewne <i>exhaust grilles</i>	12/szt./pcs.	5	60
	nawiewniki okienne higrosterowalne <i>humidity-controlled window diffusers</i>	200/szt./pcs.	7	1400
	wentylatory łazienkowe <i>bathroom fans</i>	150/szt./pcs.	3	450
Razem osprzęt: <i>Equipment total:</i>				3030
	Obróbka blacharska komina <i>Chimney flashing</i>	300/szt./pcs.	3	900
	Robocizna: prace murarskie komina (92,25/mb) <i>Labor: chimney furnishing works (92.25/m)</i>			1660
	Robocizna: wykończenie komina <i>Labor: chimney finish</i>			1500
	Razem wentylacja naturalna (3 kominy) <i>Total natural ventilation (3 chimneys)</i>			9754

całej instalacji. Pominięcie tego elementu może znacząco zaniżyć całkowity nakład finansowy na wentylację grawitacyjną, co jest kluczowe w przypadku porównania jej z systemem wentylacji mechanicznej.

Drugim wariantem było wyposażenie domu w system wentylacji z odzyskiem ciepła. W takim wypadku konieczna jest rozbudowana sieć przewodów wentylacyjnych oraz zakup odpowiedniej jednostki centralnej. W kosztorysie uwzględniono popularny system przewodów PE-FLEX wraz z niezbędnym osprzętem, którego całkowity koszt wyniósł 3960 zł. Bardzo ważnym etapem w systemie rekuperacji jest dobranie odpowiedniej jednostki centralnej. Jej ceny bardzo się od siebie różnią w zależności od wydajności, konstrukcji czy producenta. Na potrzeby analizy wybrano rekuperator o wydajności 400 m³/h o układzie krzyżowym przeciwprądowym. Ceny takich urządzeń zaczynają się od około 6000 zł i taką przyjęto do kosztorysu. Montaż całej instalacji przez profesjonalną firmę wyceniony został na 2500 zł. Łącznie za całą instalację należy zatem zapłacić 12 660 zł.

W przypadku obydwóch typów wentylacji analiza kosztów została wykonana na podstawie materiałów kupionych

In the case of both types of ventilation, the cost analysis was performed on the basis of materials purchased by the investor himself at retail prices, i.e. without using comprehensive services of construction and assembly companies. The valuation made by a professional company dealing with the comprehensive installation of recuperation amounted to PLN 14,500 in the cheapest version. The materials in it were valued at PLN 5,400, which is over 30% more expensive than in the case of individual calculations based on the current consumption during construction. The cheapest recuperator cost PLN 6,345 in the valuation, which is comparable to the price used in the calculations.

The main advantage of gravity ventilation is its free use. Therefore, the table below presents the estimated annual operating costs of using mechanical ventilation in the tested facility. The calculations assume electricity consumption by a recuperator of 70 W and the electricity price in line with the tariff in force in 2018. The total cost of electricity needed to operate the central unit was estimated at PLN 356/year. The analysis also takes into account the cost of filters that need to be replaced

Tabela 2. Koszty inwestycyjne wentylacji mechanicznej z odzyskiem ciepła (oprac. A. Biała)
Table 2. Investment cost of mechanical ventilation with a heat recovery system (elaborated by A. Biała)

Element <i>Element</i>	Nazwa <i>Name</i>	Cena jednostkowa <i>Unit price [PLN]</i>	Ilość/liczba sztuk <i>Number of items</i>	Cena <i>Price [PLN]</i>
Osprzęt <i>Building materials</i>	rura PE-FLEX <i>PE-FLEX ducts</i>	7/m	200 m	1400
	przewód spiro-ocieplany <i>spiro-insulated ducts</i>	8/m	20 m	160
	czerpnia i wyrzutnia <i>Air Intake and exhaust terminal</i>	45/szt./pcs.	2 szt./pcs.	90
	nawiewniki – anemostat <i>Intake diffusers – anemostat</i>	8/szt./pcs.	6 szt./pcs.	48
	Wywiewniki – anemostat <i>Exhaust diffusers – anemostat</i>	8/szt./pcs.	9 szt./pcs.	72
	skrzynka rozprężna PE-FLEX <i>plenum box PE-FLEX</i>	62/szt./pcs.	15 szt./pcs.	930
	skrzynka rozdzielcza <i>distribution box</i>	500 + 400	1 + 1	900
	elementy łączeniowe <i>connecting elements</i>	10% ceny osprzętu <i>10% of equipment price</i>		360
Materiały razem: <i>Materials – Total:</i>				3960
Jednostka centralna – rekuperator <i>Air handling unit – recuperator</i>				6000
Robocizna <i>Labor</i>				2500
Projekt <i>Project</i>				200
Razem wentylacja mechaniczna <i>Mechanical ventilation – Total:</i>				12 660

samodzielnie przez inwestora po cenach detalicznych, czyli bez korzystania z kompleksowych usług firm budowlano-montażowych. Wycena wykonana przez profesjonalną firmę zajmującą się kompleksowym montażem rekuperacji wynosiła w najtańszej wersji 14 500 zł. Materiały w niej wyceniono na 5400 zł, czyli o ponad 30% drożej niż w przypadku wyliczeń indywidualnych opartych na aktualnym ich zużyciu podczas budowy. Najtańszy rekuperator natomiast w wycenie kosztował 6345 zł, co jest porównywalne z ceną przyjętą w obliczeniach.

Główną zaletą wentylacji grawitacyjnej jest jej darmowe użytkowanie. W poniższym zestawieniu przedstawiono zatem szacunkowe roczne koszty eksploatacyjne użytkowania wentylacji mechanicznej w badanym obiekcie. W obliczeniach przyjęto pobór energii elektrycznej przez rekuperator na poziomie 70 W, natomiast cenę prądu zgodnie z obowiązującą w 2018 r. taryfą. Łączny koszt energii elektrycznej potrzebnej do działania jednostki centralnej oszacowano na poziomie 356 zł/rok. W analizie uwzględniono również koszt filtrów, które należy wymieniać dwa razy w roku. W przypadku wyboru standardowego filtra klasy G4 jest to 300 zł rocznie, natomiast wymiana filtra klasy F9 to 400 zł na rok. Do obliczeń przyjęto ceny oryginalnych produktów, nie uwzględniając cen zamienników. Całościowe koszty eksploatacyjne wentylacji mechanicznej oszacowano zatem na poziomie 656–756 zł na rok w zależności od zastosowanych filtrów. Do analizy nie wzięto pod uwagę kosztów naprawy urządzenia. Większość producentów udziela kilkuletniej gwarancji na swoje produkty, a elementami mogącymi ulec awarii są wentylatory oraz automatyka sterująca. Żywotność systemu szacuje się na 10–15 lat.

Jakość powietrza nawiewanego

Istotnym problemem w dużych miastach Polski jest koncentracja zanieczyszczeń w warstwie przyziemnej, najczęściej powiązana z obecnością smogu, składającego się głównie pyłu zawieszonego w porze grzewczej [15]. W poniższym zestawieniu wzięto pod uwagę pył PM10 i pył drobny PM2,5. Wartość graniczna zgodnie z *Rozporządzeniem Ministra Środowiska z dnia 24 sierpnia 2012 r. w sprawie poziomów niektórych substancji w powietrzu* wynosi dla pyłu PM10 $40 \mu\text{m}^3$, natomiast dla PM2,5 – $20 \mu\text{m}^3$ [17].

Badanie polegało na określeniu potencjalnego zanieczyszczenia w nawiewanym powietrzu w zależności od wyboru rodzaju wentylacji w obiekcie. W przypadku wentylacji grawitacyjnej przyjęto, że powietrze nawiewane ma taki sam skład zanieczyszczeń co powietrze zewnętrzne, natomiast wentylacja mechaniczna z odzyskiem ciepła ma wbudowane filtry oczyszczające powietrze, a stopień filtracji zależy od klasyfikacji filtra. Standardowo jednostki centralne wbudowane mają filtry dokładne klasy G4, które zatrzymują 50–90% większych zanieczyszczeń. Aby mieć pewność filtracji pyłu PM10, należy wybrać filtr bardzo dokładny, klasy co najmniej F7, który zatrzymuje 90–95% pyłu PM10 i 80–85% pyłu PM2,5. Zgodnie z katalogami producentów średni koszt 2 filtrów klasy G4 wynosi 150 zł, natomiast klasy F7 200 zł.

Tabela 3. Koszty eksploatacyjne wentylacji mechanicznej z odzyskiem ciepła (oprac. A. Biała)
Table 3. Operating cost of mechanical ventilation with a heat recovery system (elaborated by A. Biała)

Koszty eksploatacyjne <i>Operating costs</i>	
Zużycie prądu przez rekuperator <i>Electricity consumption by recuperator</i>	613,2 kWh/rok <i>613,2 kWh/a</i>
Cena prądu <i>The price of electricity</i>	13 gr/kWh <i>0,13 PLN/kWh</i>
Koszt energii elektrycznej <i>Electricity cost</i>	355,65 zł/rok <i>355,65 PLN/a</i>
Filtr klasy G4 2 szt. <i>G4 class filter 2 pcs.</i>	$2 \times 150 \text{ zł} = 300 \text{ zł/rok}$ $2 \times 150 \text{ PLN} = 300 \text{ PLN/a}$
Filtr klasy F7 2 szt. <i>F7 class filter 2 pcs.</i>	$2 \times 200 \text{ zł/400 zł/rok}$ $2 \times 200 \text{ PLN/400 PLN/a}$

twice a year. If you choose a standard G4 class filter, it is PLN 300 per year, while the replacement of a F9 class filter is PLN 400 per year. The prices of original products were used for the calculations, excluding the prices of substitutes. The total operating costs of mechanical ventilation were therefore estimated at PLN 656–756 per year, depending on the filters used. The cost of repairing the device was not included in the analysis. Most manufacturers provide a several-year warranty on their products and the elements that may fail are fans and control automatics. The service life of the system is estimated at 10–15 years.

Supply air quality

A significant problem in large Polish cities is the concentration of pollutants at the ground level, most often associated with the presence of smog, consisting mainly of particulate matter during the heating season [15]. In the table below, PM10 dust and PM2.5 fine dust were taken into account. The limit value according to the Regulation of the Minister of Environment of 24 August 2012 on the levels of certain substances in the air is $40 \mu\text{m}^3$ for PM10, and $20 \mu\text{m}^3$ for PM2.5 [17].

The study consisted in determining the potential contamination in the supplied air depending on the choice of the type of ventilation in the building. In the case of gravity ventilation, it was assumed that the supplied air has the same composition of pollutants as the outside air, while mechanical ventilation with heat recovery system has built-in air purifying filters, and the degree of filtration depends on the filter classification. As standard, the central units have G4 class fine filters, which trap 50–90% of larger contaminants. To ensure the filtration of PM10 dust, choose a very fine filter, at least class F7, which holds 90–95% of PM10 and 80–85% of PM2.5. According to the manufacturers' catalogs, the average cost of two G4 class filters is PLN 150, and the F7 class filter is PLN 200.

Tabela 4. Poziom zanieczyszczeń w powietrzu nawiewanym (oprac. A. Biała)
Table 4. Level of pollution in the supply air (elaborated by A. Biała)

Miesiąc <i>Month</i>	Pył zawieszony PM10 <i>Particulate matter PM10 [µg/m³]</i>		Pył zawieszony PM2,5 <i>Particulate matter PM2,5 [µg/m³]</i>	
	wentylacja grawitacyjna <i>gravity ventilation</i>	wentylacja mechaniczna z filtrem F7 <i>mechanical ventilation with F7 filter</i>	wentylacja grawitacyjna <i>gravity ventilation</i>	wentylacja mechaniczna z filtrem F7 <i>mechanical ventilation with F7 filter</i>
Styczeń <i>January</i>	34	<u>3,4</u>	–	–
Luty <i>February</i>	49(!)	<u>4,9</u>	–	–
Marzec <i>March</i>	44(!)	<u>4,4</u>	–	–
Kwiecień <i>April</i>	29	<u>2,9</u>	–	–
Maj <i>May</i>	26	<u>2,6</u>	–	–
Czerwiec <i>June</i>	22	<u>2,2</u>	13	<u>2,6</u>
Lipiec <i>July</i>	22	<u>2,2</u>	13	<u>2,6</u>
Sierpień <i>August</i>	21	<u>2,1</u>	<u>11</u>	<u>2,2</u>
Wrzesień <i>September</i>	23	<u>2,3</u>	15	<u>3,0</u>
Październik <i>October</i>	36	<u>3,6</u>	27(!)	<u>5,4</u>
Listopad <i>November</i>	50(!)	<u>5,0</u>	47(!)	<u>9,4</u>
Grudzień <i>December</i>	33	<u>3,3</u>	32(!)	<u>6,4</u>

Legenda: podkreślona kursywa – miesiące z jakością powietrza określaną zgodnie z rozporządzeniem [17] mianem „bardzo dobra”; wykrzyknik – miesiące, w których przekroczone zostały wartości dopuszczalne.

Legend: underlined italics – months with the air quality defined in accordance with the Regulation [17] as “very good”; exclamation – months in which the limit values were exceeded.

W tabeli 4 przedstawiono wyniki średniomiesięcznych pomiarów stężenia zanieczyszczeń pyłów PM10 i PM2,5 w roku 2018 [14] oraz ich zredukowaną wartość w przypadku zastosowania filtrów klasy F7. Na potrzeby analizy przyjęto 90% skuteczność filtrów. Podkreślono kursywą zaznaczono miesiące z jakością powietrza określaną zgodnie z rozporządzeniem [17] mianem „bardzo dobra”. Wartość pyłu PM10 w tym przypadku musi mieścić się poniżej 20 µm/m³, natomiast PM2,5 poniżej 13 µm/m³. Wykrzyknikiem zaznaczono natomiast miesiące, w których przekroczone zostały wartości dopuszczalne.

W przypadku budynku wyposażonego w wentylację mechaniczną jakość powietrza nawiewanego przez cały rok jest na bardzo wysokim poziomie, średnia wartość obecności pyłu PM10 wynosi 3,25 µm/m³, a maksymalna nie przekracza 5 µm/m³. W przypadku pyłu PM2,5 maksymalna wartość nie przekracza 10 µm/m³, niestety opracowano to na podstawie częściowych danych, dlatego nie podano wartości średniorocznej. W przypadku wentylacji

Table 4 shows the results of the average monthly measurements of the concentration of PM10 and PM2.5 pollutants in 2018 [14] and their reduced value in the case of using F7 class filters. For the purposes of the analysis, 90% filter efficiency was assumed. The months with the air quality defined in accordance with the Regulation [17] as “very good” are marked in underlined italics. In this case, the PM10 dust value must be below 20 µm/m³, and PM2.5 below 13 µm/m³. The exclamation mark indicates the months in which the limit values were exceeded.

In the case of a building equipped with mechanical ventilation, the quality of the supplied air is very high throughout the year, the average value of PM10 dust is 3.25 µm/m³ and the maximum value does not exceed 5 µm/m³. In the case of PM2.5 dust, the maximum value does not exceed 10 µm/m³, unfortunately it was based on partial data, therefore the annual average value was not given. In the case of gravity ventilation, it can be seen that in 2018, in the case of PM2.5, the air quality was

Tabela 5. Zestawienie zapotrzebowania na energię na cele grzewcze (oprac. A. Biała)
Table 5. Energy requirements for heating purposes (elaborated by A. Biała)

	Wentylacja grawitacyjna <i>Gravity ventilation</i>	Wentylacja mechaniczna (odzysk 55%) <i>Mechanical ventilation (heat recovery 55%)</i>	Wentylacja mechaniczna (odzysk 86%) <i>Mechanical ventilation (heat recovery 86%)</i>
Roczne zapotrzebowanie na energię użytkową dla celów ogrzewania i wentylacji [kWh/rok] <i>Annual useful energy demand for heating and ventilation purposes [kWh/a]</i>	17 374	12 356	10 916
	100%	71%	63%
Koszt ogrzewania rocznego – paliwo gazowe (13 gr/kWh) <i>Annual heating cost – gas fuel (0.13 PLN/kWh)</i>	2259 PLN	1606 PLN	1419 PLN

grawitacyjnej można zauważyć, że w 2018 r. w przypadku pyłu PM_{2,5} tylko w jednym miesiącu jakość powietrza była „bardzo dobra”. W sezonie grzewczym wartości przekraczały normy, a ich maksymalna wartość wynosiła 47 µm/m³, natomiast średnia wartość pyłu PM₁₀ wynosiła 32,5 µm/m³ a maksymalna 50 µm/m³.

Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, że jakość powietrza nawiewanego do pomieszczeń w przypadku wentylacji mechanicznej jest zdecydowanie lepsza niż w przypadku wentylacji grawitacyjnej. Ma to znaczenie przede wszystkim w sezonie grzewczym, dlatego w tym wypadku zalecane by było stosowanie filtrów co najmniej klasy F9. W powyższej analizie nie wzięto pod uwagę zanieczyszczeń powstających w wyniku użytkowania pomieszczeń.

Zapotrzebowanie na ciepło na cele grzewcze

Ostatnim elementem badań było porównanie wentylacji pod względem rocznego zapotrzebowania na ciepło na cele grzewcze i oszacowanie jego kosztów na podstawie metodologii wyznaczania świadectw energetycznych [16]. Na potrzeby analizy przyjęto, że badany obiekt jest dobrze ocieplony, a źródłem ciepła jest niskoemisyjny piec kondensacyjny na paliwo gazowe. Ze względu na różną sprawność odzysku ciepła, w obliczeniach przyjęto dwa warianty, minimalną i maksymalną deklarowaną przez producenta sprawność jednostki centralnej. W wyniku przeprowadzonych obliczeń stwierdzono, że dom wyposażony w wentylację grawitacyjną szacunkowo na ogrzewanie zużywa 17 374 kWh energii rocznie, co daje koszt 2259 zł. Wentylacja mechaniczna redukuje te koszty średnio o 33% (29–37%), przy czym oszczędność na rachunkach wychodzi przeciętnie 747 zł. Należy zwrócić uwagę, że podane wyliczenia są prawdziwe tylko dla badanego obiektu z konkretną specyfikacją technologiczną i dla innego obiektu mogą się znacząco różnić.

Podsumowanie

Szczegółowe porównanie dwóch analizowanych w artykule systemów wentylacyjnych stosowanych w budownictwie jednorodzinym przedstawiono w tabeli 6.

“very good” in only one month. In the heating season, the values exceeded the norms, and their maximum value was 47 µm/m³, while the average value of PM₁₀ dust was 32.5 µm/m³ and the maximum value was 50 µm/m³. Based on the obtained results, it can be concluded that the quality of the air supplied to the rooms in the case of mechanical ventilation is definitely better than in the case of gravity ventilation. This is especially important during the heating season, so in this case it would be recommended to use filters of at least F9 class. The above analysis did not take into account the pollution generated by the use of the premises.

Heat demand for heating purposes

The last element of the research was to compare ventilation in terms of the annual heat demand for heating purposes and to estimate its costs on the basis of the methodology for determining energy certificates [16]. For the purposes of the analysis, it was assumed that the tested object is well insulated and the heat source is a low-emission condensing gaseous boiler. Due to the different efficiency of heat recovery, two variants were adopted in the calculations, the minimum and maximum efficiency of the central unit declared by the manufacturer. As a result of the performed calculations, it was found that a house equipped with gravity ventilation consumes 17,374 kWh of energy per year for heating, which costs PLN 2,259. Mechanical ventilation reduces these costs by an average of 33% (29–37%) and the average savings on bills are PLN 747. It should be noticed that the given calculations are true only for the tested object with a specific technological specification and may differ significantly for another object.

Summary

A detailed comparison of the two ventilation systems used in single-family housing analyzed in the article is presented in Table 6.

Natural ventilation is a more favorable choice in terms of investment costs. There are no elements powered by electricity, which makes the entire system trouble-free

Tabela 6. Zestawienie wyników porównania wentylacji grawitacyjnej i mechanicznej (oprac. A. Biała)
 Table 6. Summary of the results of the comparison of gravity and mechanical ventilation (elaborated by A. Biała)

Kryterium <i>Criteria</i>	Wentylacja grawitacyjna <i>Gravity ventilation</i>	Wentylacja mechaniczna z odzyskiem ciepła <i>Mechanical ventilation with heat recovery system</i>
Koszty inwestycyjne <i>Investment costs [PLN]</i>	9754	12 660
Koszty eksploatacyjne [PLN/rok] <i>Operating costs [PLN/a]</i>	0	756
Jakość powietrza <i>Air quality</i>	lato: akceptowalna zima: zła/bardzo zła <i>summer: acceptable winter: poor/very poor</i>	bardzo dobra <i>very good</i>
Koszty ogrzewania [PLN/rok] <i>Heating costs [PLN/a]</i>	2259	1606–1419

Korzystniejszym wyborem pod względem kosztów inwestycyjnych jest wentylacja naturalna. Nie występują tutaj też żadne elementy zasilane energią elektryczną, co sprawia, że cały system jest w tym zakresie bezawaryjny. Szacunkowe koszty inwestycyjne tego systemu w porównaniu z rekuperacją dla badanego domu są mniejsze o 2906 zł. Odnosząc jednak tę kwotę do całościowego kosztu budowy domu, należy stwierdzić, że nie jest ona znacząca. Ważnym kryterium brany w tej części badań pod uwagę były również koszty eksploatacyjne. Przy wentylacji mechanicznej należy pamiętać o kosztach wymiany filtrów i zużycia energii elektrycznej, które dla analizowanego obiektu mieściły się w granicach 756 zł rocznie, natomiast w wentylacji grawitacyjnej one nie występują.

Budynki wyposażone w wentylację mechaniczną z odzyskiem ciepła charakteryzują się przede wszystkim wyższym komfortem użytkownika pomieszczeń. Związane to jest głównie ze stałym dopływem lepszej jakości powietrza. Wentylacja grawitacyjna polega na bezpośrednim pobieraniu powietrza zewnętrznego, co w przypadku okresu grzewczego może wpłynąć szkodliwie na zdrowie mieszkańców ze względu na obecność w powietrzu licznych zanieczyszczeń. Reasumując, pod względem jakości nawiewanego powietrza wentylacja mechaniczna przynosi zdecydowanie więcej korzyści.

Porównanie omawianych typów wentylacji pod kątem zapotrzebowania na cele grzewcze sugeruje, że najbardziej wskazanym w tym przypadku wyborem jest wentylacja mechaniczna. Przedstawione wyniki analizy potwierdzają, że zastosowanie odzysku ciepła zmniejsza zapotrzebowanie energetyczne o mniej więcej 30% w porównaniu z wentylacją grawitacyjną. Dla badanego przypadku oszczędności roczne wynoszą średnio 747 zł.

Wnioski

Wybór odpowiedniego typu wentylacji w przypadku omawianego budownictwa jednorodzinne powinno być poprzedzone dokładną analizą pod różnymi względami. W artykule zaproponowano następujące kryteria porównawcze: koszty inwestycyjno-eksploatacyjne, jakość

in this respect. The estimated investment costs of this system, compared to recuperation for the house under study, are lower by PLN 2,906. However, when relating this amount to the total cost of building a house, it should be stated that it is not significant. Operating costs were also an important criteria taken into account in this part of the research. With mechanical ventilation, one should remember about the costs of filter replacement and electricity consumption, which for the analyzed facility were within the limits of PLN 756 per year, while in gravity ventilation they do not occur.

Buildings equipped with mechanical ventilation with a heat recovery system are primarily characterized by higher comfort of use of rooms. This is mainly due to the constant inflow of better quality air. Gravity ventilation consists in the direct intake of outside air, which in the case of the heating period may have a detrimental effect on the health of the inhabitants due to the presence of numerous pollutants in the air. Summing up, in terms of the quality of supplied air, mechanical ventilation brings more benefits.

The comparison of the discussed types of ventilation in terms of the demand for heating purposes suggests that the most appropriate choice in this case is mechanical ventilation. The presented results of the analysis confirm that the use of a heat recovery system reduces the energy demand by approximately 30% compared to gravity ventilation. In the case under examination, annual savings amount to an average of PLN 747.

Conclusions

Choosing the right type of ventilation in the case of the analyzed single-family housing should be preceded by a thorough analysis in various respects. The article proposes the following comparative criteria: investment and operating costs, supply air quality and energy demand for heating purposes. Considering the results of individual analyzes separately, it is not possible to answer the research question unequivocally, and therefore they should be treated together, as they are interrelated and complement each other.

powietrza nawiewanego oraz zapotrzebowanie energii na cele grzewcze. Rozpatrując wyniki z poszczególnych analiz osobno, nie można jednoznacznie odpowiedzieć na pytanie badawcze, dlatego powinny być one traktowane łącznie, gdyż są ze sobą powiązane i się uzupełniają.

Na podstawie wykonanych badań i analiz stwierdzono, że w obecnie projektowanych i wznoszonych budynkach jednorodzinnych należy odchodzić od wentylacji grawitacyjnej na rzecz wentylacji mechanicznej z odzyskiem ciepła. Powyższą tezę można uargumentować następującymi stwierdzeniami:

1. Poprzez zastosowanie odpowiednich filtrów wentylacja mechaniczna oczyszcza powietrze zewnętrzne z pyłów i zanieczyszczeń w przeciwieństwie do wentylacji grawitacyjnej. Ze względu na coraz bardziej zanieczyszczone powietrze zewnętrzne, zwłaszcza w okresie grzewczym, jest to niezwykle istotne.

2. Odzysk ciepła zmniejsza w sposób znaczący zapotrzebowanie na energię na cele grzewcze. Obecnie jest to jeden z elementów powszechnie promowanego ograniczenia zużycia energii w sektorze budownictwa.

3. Na podstawie obliczeń można stwierdzić, że koszty eksploatacyjne wentylacji mechanicznej zasadniczo pokrywają się z kwotą oszczędności na rachunkach za ogrzewanie. Dodatkowym nakładem pieniężnym jest tylko różnica w kosztach budowy.

4. W przypadku zastosowania coraz bardziej popularnych w budownictwie jednorodzinnych paneli fotowoltaicznych można ograniczyć koszty energii elektrycznej potrzebnej na działanie rekuperacji.

Based on the performed tests and analyzes, it was found that in currently designed and erected single-family houses, gravity ventilation should be abandoned in favor of mechanical ventilation with heat recovery. The above thesis can be substantiated with the following statements:

1. By using appropriate filters, mechanical ventilation cleans the outside air from dust and impurities, as opposed to gravity ventilation. Due to the increasingly polluted outside air, especially during the heating season, it is extremely important.

2. Heat recovery significantly reduces the energy demand for heating purposes. It is now one of the elements of the widely promoted reduction of energy consumption in the construction sector.

3. Based on the calculations, it can be concluded that the operating costs of mechanical ventilation are broadly in line with the savings on heating bills. The extra money is the only difference in investment costs.

4. In the case of using more and more popular photovoltaic panels in single-family housing, we can reduce the costs of electricity needed for recuperation.

Translated by
Aneta Biała

Bibliografia/References

- [1] Grandjean E., *Ergonomia mieszkania: aspekty fizjologiczne i psychologiczne w projektowaniu*, Arkady, Warszawa 1978.
- [2] Nantka B.M., *Wentylacja naturalna i mechaniczna warunkiem poprawnego użytkowania obiektów kubaturowych*, Szkolenie seminaryjne Polskiego Zrzeszenia Inżynierów i Techników Sanitarnych, oddział w Katowicach, Katowice 2014.
- [3] *Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie*, Dz.U. 2002, Nr 75, poz. 690, z późn. zm., <http://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=WDU20020750690> [accessed: 18.08.2020].
- [4] Firląg S., *Działanie wentylacji grawitacyjnej w ocenie mieszkańców*, „Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja” 2017, t. 48, nr 8, 340–344, doi: 10.15199/9.2017.8.7.
- [5] Firląg S., Miszczuk A., *Efektywność działania wentylacji naturalnej i możliwości jej usprawnienia*, „Rynek Instalacyjny” 2016, t. 6, 68–72.
- [6] Grygier G., Szyperski P., *Wytyczne dla instalacji wentylacyjnej z odzyskiem ciepła (systemu rekuperacji) w domach jednorodzinnych*, Stowarzyszenie Polska Wentylacja, Warszawa 2011, http://www.wentylacja.org.pl/upload/files/rekuperacja_do_kor.pdf [accessed: 18.08.2020].
- [7] Rybka K., *Odzysk ciepła z wentylacji – luksus czy konieczność*, „Rynek Instalacyjny” 2016, t. 6, 57–60.
- [8] Müller J., *Ile kosztuje wentylacja w budynku pasywnym?*, „Rynek Instalacyjny” 2012, t. 9, 58–60.
- [9] Strzeszewski M., *Określanie zapotrzebowania na ciepło do wentylacji w przypadku stosowania odzysku ciepła z powietrza wywiewanego, bez nagrzewnic powietrza*, [w:] T. Jędrzejewska-Scibak, J. Sowa (red.), *Problemy jakości powietrza wewnątrz w Polsce 2003*, Wydawnictwa Instytutu Ogrzewnictwa i Wentylacji Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2004, 335–342.
- [10] Gaczoł T., *Podciśnieniowy i nadciśnieniowy system wentylacji grawitacyjnej*, „Czasopismo Inżynierii Łądowej, Środowiska i Architektury” 2016, t. 33, z. 63, 85–93, doi: 10.7862/rb.2016.189.
- [11] Antczak-Jarząbska R., Niedostatki M., *Nasada kominowa sposobem intensyfikacji wydajności wentylacji grawitacyjnej w budynkach mieszkalnych*, „Acta Scientiarum Polonorum. Architectura” 2019, t. 18, nr 1, 99–108, doi: 10.22630/asp.2019.18.1.12.
- [12] Rutkowska G., Klepak O., Podawca K., *Problemy strat ciepła w istniejących budynkach jednorodzinnych w kontekście błędów wykonawczych*, „Rocznik Ochrona Środowiska” 2013, t. 15, cz. 3, 2625–2639.
- [13] Baron J., *Zasady prawidłowego działania wentylacji grawitacyjnej*, <http://www.psm.pila.pl/pdf/prezentacja-wentylacja.pdf> [accessed: 18.08.2020].
- [14] <https://powietrze.poznan.wios.gov.pl> [accessed: 18.08.2020].
- [15] Kostrz M., Satora P., *Związki odpowiedzialne za zanieczyszczenie powietrza*, „Inżynieria Ekologiczna” 2017, Vol. 18, Iss. 6, 89–95, doi: 10.12912/23920629/79820.
- [16] *Rozporządzenie Ministra Infrastruktury i Rozwoju z dnia 27 lutego 2015 roku w sprawie metodologii wyznaczania charakterystyki energetycznej budynku lub części budynku oraz świadectw charakterystyki energetycznej*, Dz.U. 2015, poz. 376 z późn. zm., <http://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=WDU20150000376> [accessed: 18.08.2020].
- [17] *Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 24 sierpnia 2012 r. w sprawie poziomów niektórych substancji w powietrzu*, Dz.U. 2012, poz. 1031, <http://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=WDU20120001031> [accessed: 18.08.2020].

Streszczenie

Tematem artykułu jest analiza porównawcza i próba określenia, który z omawianych typów wentylacji jest najkorzystniejszy w przypadku budynków jednorodzinnych. We wstępie przedstawiono podstawowe wiadomości dotyczące systemów wentylacyjnych stosowanych w budownictwie mieszkaniowym. Starano się przybliżyć jej współczesne problemy wynikające głównie z braku wystarczającego nawiewu świeżego powietrza. Druga część artykułu poświęcona jest analizie porównawczej wentylacji grawitacyjnej i mechanicznej z odzyskiem ciepła przy uwzględnieniu trzech kryteriów: kosztów inwestycyjno-eksploatacyjnych, jakości powietrza nawiewanego do pomieszczeń i zapotrzebowania na energię na cele grzewcze. Przedmiotem badań był projekt budynku jednorodzinny o powierzchni 185 m². W pracy wykorzystano wykonane przez autorkę kosztorysy budowy systemów wentylacyjnych aktualne na rok 2018, dane pomiarowe z wojewódzkiego Inspektoratu Ochrony Środowiska w Poznaniu i metodologię wyznaczania charakterystyki energetycznej budynków.

Słowa kluczowe: wentylacja naturalna, wentylacja mechaniczna, odzysk ciepła, wymiana powietrza, rekuperacja

Abstract

The paper presents a comparative analysis and an attempt to determine which of the analyzed types of ventilation is the most advantageous for single-family buildings. At first basic information on ventilation systems used in residential buildings is presented. Attempts have been made to bring its contemporary problems, resulting mainly from the lack of sufficient fresh air supply. The second part of the article is devoted to the comparative analysis of gravitational and mechanical ventilation with heat recovery system taking into account 3 criteria: investment and operating costs, quality of the air supplied to rooms and energy demand for heating purposes. The subject of the research was the design of a single-family building with an area of 185 m². The paper uses the author's cost estimates of the construction of ventilation systems valid for 2018, measurement data from the provincial Inspectorate of Environmental Protection in Poznan as well as the methodology of determining the energy performance of buildings.

Key words: natural ventilation, mechanical ventilation, heat recovery, air exchange, recuperation