

POLITECHNIKA BIAŁOSTOCKA

BIAŁYSTOK UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**CIVIL AND
ENVIRONMENTAL
ENGINEERING**

**BUDOWNICTWO
I INŻYNIERIA
ŚRODOWISKA**



POLITECHNIKA BIAŁOSTOCKA

CIVIL AND
ENVIRONMENTAL
ENGINEERING

BIAŁYSTOK UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

BUDOWNICTWO
I INŻYNIERIA
ŚRODOWISKA

**Czasopismo jest kontynuacją Zeszytów Naukowych Politechniki Białostockiej
serii Budownictwo, wydawanych w latach 1983-2009.**

redaktor naczelny editor-in chief KATARZYNA ZABIELSKA-ADAMSKA	z-ca redaktora naczelnego editor RAFAŁ MIŁASZEWSKI
sekretarz / secretary MARIA J. SULEWSKA	

rada naukowa
editorial board

Grzegorz BAŁ (Poland), Stanisław BIEDUGNIS (Poland), Eugeniusz DEMBICKI (Poland), Lech J. DZIENIS (Poland), Maciej GRYCZMAŃSKI (Poland), Jozef HULLA (Slovakia), Anatoli HURYNOVICH (Bielorus), Jerzy W. JASIEŃKO (Poland), Oleg KAPLIŃSKI (Poland), Czesław MIEDZIAŁOWSKI (Poland), Waldemar MIODUSZEWSKI † (Poland), Alexei PERVOV (Russia), Janusz R.RAK (Poland), Žymantas RUDŽIONIS (Lithuania), Sally A. SHOOP (USA), Sławomir A. SORKO (Poland), Dariusz WANATOWSKI (The United Kingdom-China), Józefa WIATER (Poland), Olena S. VOLOSHKINA (Ukraine)

REDAKCJA
BUDOWNICTWO I INŻYNIERIA ŚRODOWISKA

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska
Politechnika Białostocka
ul. Wiejska 45A
15-351 Białystok

EDITORIAL OFFICE
CIVIL AND ENVIROMENTAL ENGINEERING

Faculty of Civil and Environmental Engineering
Bialystok University of Technology
Wiejska 45A Street
15-351 Bialystok

e-mail: biswbis@pb.edu.pl
www.biswbis.pb.edu.pl

© copyright by
Politechnika Białostocka Bialystok University of Technology

Białystok 2017

Nakład	Circulation
150 egzemplarzy	150 copies

Skład i łamanie: Andrzej Leonczuk
Druk i oprawa: Volumina.pl Daniel Krzanowski

**Czasopismo publikuje artykuły
i komunikaty techniczne
z następującej tematyki:**
budownictwo, inżynieria środowiska,
kształtowanie środowiska

Publikowane są także:
Raporty z konferencji, recenzje książek,
Materiały reklamowe

**The journal accepts for publication papers
and technical notes tha describe
orginal works or ideas on:**
Civil engineering, Enviromental engineering,
Environmental management.

Besides, it publishes:
reports of conferences and workshops,
book reviews, advertising materials.

Wytyczne dla autorów, streszczenia I artykuły
są dostępne na stronie www.biswbis.pb.edu.pl

Instructions to authors, abstracts and full papers
can be obtained from www.biswbis.pb.edu.pl

Spis treści

Katarzyna GŁADYSZEWSKA-FIEDORUK, Tomasz BOBRYK

Modernizacja ogrzewania domu jednorodzinnego na ogrzewanie powietrzne

Modernization of a single-pipe water heating system into an air heating system in a single family house 113

Jacek KARPIESIUK, Tadeusz CHYŻY

Wyniki wybranych badań wytrzymałości międzyfazowej lekkiego grzejnika płaszczyznowego z rozpraszaczami ciepła

The results of selected interface strength of lightweight radiant heater with dissipating elements..... 123

Michał MARCHACZ, Antonina ŻABA

Badania czasu pogłosu wnętrza kaplicy Niepokalanego Poczęcia Najświętszej Marii Panny w Warszawie

Investigations of the reverberation time in interior of the Immaculate Conception

of the Blessed Virgin Mary's chapel in Warsaw..... 133

Justyna TOPOLAŃSKA, Dorota Anna KRAWCZYK

Gruntowy powietrzny wymiennik ciepła typu żwirowego jako przykład wykorzystania OZE

przy budynkach jednorodzinnych – efekty energetyczne i ekonomiczne

Ground air heat exchanger of gravel type as an example of using renewable energy sources

in single family buildings – energy and economic effects..... 141

Daniel ZIELEPUZA

Analiza ekonomiczna zabezpieczenia głębokiego wykopu

Economical analysis of a deep excavation supporting systems..... 149

Antonina ŻABA, Michał MARCHACZ

Badania czasu pogłosu kaplicy Karmelitańskiej w dawnym pałacu Kazanowskich w Warszawie

Investigations of the reverberation time in Carmelite's chapel placed in Kazanowski's former palace in Warsaw..... 155

MODERNIZACJA OGRZEWANIA DOMU JEDNORODZINNEGO NA OGRZEWANIE POWIETRZNE

Katarzyna GŁADYSZEWSKA-FIEDORUK^{a*}, Tomasz BOBRYK

^a Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45 A, 15-351 Białystok

^b Kamssoft Podlasie Sp. z o.o. (Zambrów)

Streszczenie: W artykule omówiono możliwości modernizacji lub inwestycji dotyczących ogrzewania domów jednorodzinnych. Porównano ogrzewanie nadmuchowe (powietrzne), ogrzewanie grzejnikowe oraz ogrzewanie płaszczyznowe pod względem nośników energii, elementów grzejnych, bezwładności układu, awaryjności, kosztów eksploatacji, wpływu na estetykę wnętrz oraz możliwość rozbudowy o funkcje wentylacji i klimatyzacji. Podano również alternatywne urządzenia wspomagające ogrzewanie domu, takie jak: gruntowe wymienniki ciepła oraz kolektory słoneczne. Omówiono wykonany projekt ogrzewania domu jednorodzinnego ogrzewaniem powietrznym z wykorzystaniem pieca nadmuchowego i centrali wentylacyjnej z odzyskiem ciepła za pomocą GWC. Zaprojektowano także współpracę instalacji wywiewnej z okapem kuchennym. Jako system podgrzewu ciepłej wody użytkowej zaproponowano instalację solarną z pojemnościowym podgrzewaczem. W artykule podano również koszty inwestycyjne oraz eksploatacyjne dla zaproponowanego rozwiązania. Celem artykułu było omówienie zagadnień oraz przepisów dotyczących ogrzewania nadmuchowego oraz odzysku ciepła za pomocą gruntowych wymienników ciepła. Ponadto celem było zaprezentowanie wykonanych rozwiązań i wskazanie zasadności stosowania ogrzewania nadmuchowego w domach jednorodzinnych

Słowa kluczowe: ogrzewanie budynków; ogrzewanie powietrzne; alternatywne ogrzewanie.

1. Wstęp

Człowiek budując dom jednorodzinny lub remontując go chce zapewnić sobie i swojej rodzinie najlepsze warunki do życia. W dobie rosnących cen energii chce również zmniejszyć koszty utrzymania swojego domu. Modernizuje instalację centralnego ogrzewania, wymienia okna na nowe – szczelne, ociepla ściany i stropy. Zamyka swój dom, który staje się „superszczelny”. Zastanawia się nad wentylacją. Na rynku dostępnych jest wiele sprawdzonych rozwiązań. Naprzeciw jego wszystkim potrzebom wychodzi ogrzewanie nadmuchowe. Znakomicie zastępuje klasyczne ogrzewanie grzejnikami oraz zaspokaja potrzebę skutecznego wentylowania pomieszczeń.

Instalacje centralnego ogrzewania są coraz bardziej nowoczesne. Do wyboru jest coraz więcej jednostek grzewczych, rodzajów paliwa, materiałów użytych do budowy instalacji oraz automatyki. Dostępne są także alternatywne źródła energii odnawialnej. Większość opiera się na ogrzewaniu wodnym – klasycznie grzejnikami (te także są coraz bardziej udoskonalane). Nowym rozwiązaniem jest ogrzewanie nadmuchowe coraz częściej stosowane w hotelach, restauracjach, salach kinowych, dużych halach, a także w budownictwie

mieszkalnym, szczególnie w domach jednorodzinnych. Ogrzewanie powietrzne jest chętnie wybierane spośród innych systemów, gdyż może zapewnić komfort cieplny zarówno zimą, jak też latem – pełniąc funkcję klimatyzacji.

Wielu autorów wspominało jak ważne w budżecie domowym są koszty utrzymania domów jednorodzinnych pod względem termicznym. Na te koszty składają się straty ciepła związane z ogrzewaniem i wentylacją lub ogrzewaniem powietrznym (Baranowski i Ferdyn-Grygierek, 2013) oraz aspekty ekonomiczne związane z energetyką (Kępa, 2014) wpływające bezpośrednio na koszty eksploatacyjne zaprojektowanych urządzeń.

W artykule zaprezentowano projekt ogrzewania domu jednorodzinnego: ogrzewaniem powietrznym z wykorzystaniem pieca nadmuchowego i centrali wentylacyjnej z odzyskiem ciepła (Bobryk, 2012). Wybrano ogrzewanie powietrzne ze względu na właściwości powietrza jakie można osiągnąć poprzez ogrzewanie nadmuchowe, które jednocześnie realizuje zadania wentylacji (González i in., 2014). Dodatkowo nie występuje zjawisko przypiekania kurzu i rozwoju roztoczy, co pozytywnie wpływa na domowników (Kramer i in., 2014). Jako system podgrzewu ciepłej wody użytkowej zaproponowano

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: k.gladyszewska@pb.edu.pl

instalację solarną z pojemnościowym podgrzewaczem.

Celem pracy jest wykonanie projektu ogrzewania nadmuchowego domu jednorodzinnego z odzyskiem ciepła w gruntowym wymienniku ciepła, określenie nakładów inwestycyjnych i eksploatacyjnych oraz wskazanie zasadności stosowania zaproponowanych rozwiązań.

2. Przegląd literatury

2.1. Komfort cieplny

Jednym z podstawowych warunków prawidłowego funkcjonowania organizmu ludzkiego jest stworzenie i utrzymanie w pomieszczeniach i budynkach odpowiednich warunków cieplnych. Oznacza to w praktyce konieczność okresowego doprowadzenia do nich ciepła w ilościach niezbędnych dla wytworzenia i zachowania tych warunków. Jednocześnie stawia się szereg wymagań dotyczących produkcji i dostawy tego typu rodzaju energii (Nantka, 2006; Pieńkowski i in., 1999). Głównym zadaniem ogrzewania pomieszczeń przeznaczonych na stały pobyt ludzi w okresie zimowym jest doprowadzenie do względnej równowagi pomiędzy organizmem ludzkim a otoczeniem oraz zapewnienie człowiekowi odpowiednich warunków cieplno-fizjologicznych, zależnie od rodzaju i przeznaczenia pomieszczenia (Nantka, 2006).

Głównymi parametrami komfortu cieplnego są (Fanger i Toftum, 2002; Toftum i in., 2004; Kowalczyk, 2010; Gładyszewska-Fiedoruk i Krawczyk, 2015):

- temperatura powietrza wewnętrznego,
- średnia temperatura promieniowania,
- prędkość powietrza w pomieszczeniu,
- wilgotność powietrza.

Wymienione parametry stanowią średnią wartość w obszarze przebywania ludzi. Stan komfortu cieplnego określa również norma PN-EN ISO 7730:2006 *Ergonomia środowiska termicznego. Analityczne wyznaczanie i interpretacja komfortu termicznego z zastosowaniem obliczania wskaźników PMV i PPD oraz kryteriów miejscowego komfortu termicznego* poprzez:

- gradienty temperatury,
- asymetrię temperatury promieniowania,
- stopień turbulencji przepływu powietrza.

Odpowiedni dobór instalacji grzewczej i wentylacyjnej oraz oporu cieplnego i powierzchni okien pozwala pominąć wpływ tych czynników na stan komfortu cieplnego. Jednak w przypadku biernego wykorzystania promieniowania słonecznego ich oddziaływanie jest zazwyczaj bardzo istotne.

Podstawowe parametry opisujące komfort cieplny zależą od przeznaczenia danego pomieszczenia, współczynników przenikania ścian, stropów, okien i stopnia przeszklenia oraz rodzaju zastosowanej instalacji grzewczej, a głównie rodzaju grzejników wodnej instalacji centralnego ogrzewania. Właściwe ze względu na komfort cieplny wartości prędkości i wilgotności powietrza w okresie sezonu grzewczego powinny spełniać

ograniczenia $\leq 0,2$ m/s i 30-70%. Uzyskanie odpowiedniej jakości powietrza wewnętrznego wiąże się z doprowadzeniem do pomieszczeń stosownego strumienia powietrza świeżego, wyrażonego na przykład liczbą wymian, przy założeniu właściwego rozdziału powietrza (Gładyszewska-Fiedoruk i Krawczyk, 2015; Danielewicz i Golecki, 2010; Recknagel i in. 1994).

2.2. Ogrzewanie powietrzne

W ogrzewaniu powietrznym nośnikiem ciepła, dostarczającym do pomieszczenia moc cieplną, jest powietrze. Jest ono podgrzewane do 60-80°C, miesza się z powietrzem znajdującym się w pomieszczeniu, podwyższając jego temperaturę i następnie jest nawiewane do pomieszczenia (Recknagel i in., 2008; Rastogi i in., 2015). Ogrzewanie powietrzne można podzielić na dwa podstawowe systemy:

- powietrzne grawitacyjne (obecnie niestosowane),
- powietrzne z pobudzeniem mechanicznym.

W domach jednorodzinnych z powodzeniem stosuje się ogrzewanie powietrzne z pobudzeniem mechanicznym. Przepływ powietrza jest wymuszony działaniem wentylatora (odpowiednik pompy w ogrzewaniu wodnym pompowym). Dzięki wentylatorowi można zmniejszyć wymiary przewodów i osiągnąć mniejszą bezwładność cieplną. Istnieje większa możliwość regulacji temperatury i strumienia objętości powietrza (Yu i in., 2014; Koczyk, 2005).

System ogrzewania powietrznego (Pieńkowski i in., 1999) składa się z:

- nadmuchowego kotła grzewczego – jako paliwo stosowane mogą być: gaz ziemny, gaz płynny, olej opałowy lub energia elektryczna; spaliny usuwane przez przewód kominowy; wentylator zasysa z zewnątrz budynku powietrze, które w sekcji grzewczej opływa rozgrzaną komorę spalania, nagrzewa się i ciepłe wydychiwane jest do pomieszczenia poprzez głowice swobodnego nadmuchu lub system kanałów; może być też oczyszczane przez filtry; jedną z możliwości jest też zastosowanie kotła kondensacyjnego lub pompy ciepła typu powietrze-powietrze, źródłem ciepła może być też kominek;
- kanałów rozprowadzających – ciepłe powietrze doprowadzane jest kanałami do poszczególnych pomieszczeń, kanały instalowane są na poddaszach nieużytkowych, w podłodze, nad sufitami podwieszanymi;
- kratek nadmuchowych – stanowią one zakończenie kanałów rozprowadzających; wyposażone są w przepustnice umożliwiające ręczną regulację strumienia doprowadzanego powietrza;
- czerpni zewnętrznej – dostarcza świeże powietrze do systemu; umieszczona jest w zewnętrznej ścianie budynku;
- czerpni wewnętrznej – zbiera usuwane powietrze z pomieszczeń i odprowadza je do zasilania palnika lub komory paleniskowej;

- automatyki – proces ogrzewania powietrzem może być sterowany za pomocą mikroprocesora (możliwa regulacja temperatury nadmuchu, stabilizacja temperatury w pomieszczeniu, sterowanie procesem spalania paliwa); możliwe jest ustawianie programów dobowych, tygodniowych i innych.

Elementy systemu ogrzewania nadmuchowego są nie tylko urządzeniami odpowiedzialnymi za temperaturę. Cały system można rozwijać i modyfikować. Dostępne są także urządzenia, bądź zespoły urządzeń, które poprawiają jakość powietrza.

Wady systemu ogrzewania nadmuchowego (Krygier i in., 2000; Dąbrowska, 2008):

- konieczność stosowania kanałów wentylacyjnych o znacznych przekrojach; do ogrzewania powietrznego nadają się najlepiej budynki o budowie szkieletowej, o niskiej akumulacyjności cieplnej (w przestrzeni budynku szkieletowego łatwo schować przewody);
- kratki nawiewne lub anemostaty powinny być tak umieszczone, aby wypływający z nich strumień powietrza nie był skierowany bezpośrednio na osobę przebywającą w pomieszczeniu;
- słyszalny szum przepływającego powietrza;
- w budynkach użyteczności publicznej, służby zdrowia wymagane są dodatkowo filtry węglowe lub jonizowane, które mają za zadanie w 100% oczyścić powietrze;
- konieczność wymiany filtra raz w sezonie lub co 2 lata.

2.3. Ogrzewanie powietrzem jako wentylacja

Posiadacze ogrzewania nadmuchowego mogą z łatwością wyposażyć swój dom w rekuperator, ograniczając jednocześnie nakłady inwestycyjne, gdyż do wentylacji używane są kanały systemu nadmuchowego (Albers i in., 2007).

Rekuperator ma za zadanie zapewnienie stałej wentylacji budynku. Dzięki zastosowaniu tego urządzenia straty ciepła są zminimalizowane. Obecnie, gdy budynki są bardzo szczelne, a urządzenia grzewcze posiadają bardzo wysoką sprawność, nie można dopuścić do strat ciepła związanych z wymianą powietrza. Strat te wynoszą nawet 80% wszystkich strat ciepła budynku. Rekuperator dostarcza świeże powietrze do pomieszczenia z zewnątrz budynku oraz usuwa zużyte powietrze, jednocześnie odzyskując do 95% ciepła. Każdy rekuperator zawiera dwa wentylatory: nawiewny i wywiewny, zadaniem których jest dostarczanie powietrza świeżego oraz odbieranie powietrza zużytego. Głównym elementem urządzenia jest wymiennik ciepła, gdzie dwa strumienie powietrza (świeże i zużyte) przepływają w sąsiadujących komorach. Strumienie powietrza zużytego i świeżego nie mieszają się, natomiast ciepło z powietrza zużytego przejmowane jest przez świeże powietrze (www.ogrzewanie-nadmuchowe.pl).

2.4. Porównanie systemów grzewczych

Cechy użytkowe systemów grzewczych podano w tabeli 1. Analizując tabelę można określić swoje preferencje odnośnie systemu grzewczego oraz poznać wady i zalety przedstawionych rozwiązań.

Tab. 1. Cechy użytkowe systemów grzewczych

Cecha	Ogrzewanie nadmuchowe	Ogrzewanie grzejnikowe	Ogrzewanie płaszczyznowe
Nośnik energii	Powietrze	Woda	Woda
Element grzejny	Kratka nadmuchowa	Grzejnik	Podłoga, ściana, sufit
Bezwładność	Niska Odczuwalny efekt ogrzewania po kilku minutach od uruchomienia	Średnia Odczuwalny efekt ogrzewania po kilku godzinach od uruchomienia	Wysoka Odczuwalny efekt ogrzewania po wielu godzinach od uruchomienia
Usterkowość	Niska Brak wody w układzie	Średnia Możliwość wystąpienia awarii związanych z obecnością wody, jak kamień kotłowy, korozja, itp.	Średnia Możliwość wystąpienia awarii związanych z obecnością wody, jak kamień kotłowy, korozja, itp.
Koszty eksploatacji	Niskie Niska bezwładność, brak czynników pośrednich, programowanie co do minuty	Średnie Duża bezwładność i konieczność przekazywania ciepła z wody do powietrza	Średnie Duża bezwładność i konieczność przekazywania ciepła z wody do powietrza
Wpływ na estetykę wnętrza	Niski Kratki nadmuchowe mogą być umieszczone w podłodze, ścianie lub suficie	Duży Grzejniki ograniczają możliwości aranżacji wnętrza, wielkość okien, itp.	Średni Ograniczony wybór materiałów na podłogę, kłopoty z ustawieniem mebli
Możliwość rozbudowy o funkcje wentylacji i klimatyzacji	Tak	Nie	Nie

2.5. Alternatywne metody ogrzewania domu

Gruntowe wymienniki ciepła

Celem znacznego ograniczenia kosztów ogrzewania i optymalizacji pracy systemu rekuperacji oraz ogrzewania powietrznego stosuje się gruntowe wymienniki ciepła (GWC) w wersji rurowej, płytowej lub ze złożem żwirowym.

Gruntowe wymienniki ciepła zapewniają dopływ do budynku świeżego powietrza o stabilnych parametrach w ciągu całego roku. W okresie zimowym powietrze jest wstępnie ogrzewane i nawilżane (nawilżanie tylko w GWC żwirowym). Tak przygotowane powietrze chroni rekuperator i piec przed zamrożeniem oraz ogranicza negatywny wpływ suchego powietrza na śluzówki. W okresie letnim, GWC schładza i osusza powietrze, dzięki czemu w upalne dni w domu można w wyraźny sposób poprawić warunki mikroklimatu, uzyskując bardzo tani w eksploatacji system klimatyzujący pomieszczenia. Pracę GWC w układach wentylacji nawiewno-wywiewnej z odzyskiem ciepła w aspekcie ekonomicznym można rozpatrywać tylko w dwóch okresach: zimowym i letnim (www.ogrzewanie-nadmuchowe.pl, www.gruntowy-wymiennik-ciepła.pl).

Dobrze zaprojektowany i wykonany GWC niezależnie od warunków zewnętrznych podgrzewa powietrze wentylacyjne do około $+2^{\circ}\text{C}$. Daje to możliwość znacznego ograniczenia kosztów inwestycyjnych instalacji grzewczej, mocy kotłowni, jak również ciągłe i rosnące oszczędności eksploatacyjne. Dodatkowo wstępne podgrzanie powietrza zabezpiecza wymienniki ciepła central wentylacyjnych przed zamarzaniem, co znacznie podnosi sprawność procesu rekuperacji.

W okresie letnim GWC może zapewnić pokrycie zapotrzebowania na chłód w zakresie niezbędnym do utrzymania komfortu klimatycznego wewnątrz pomieszczeń. Brak odczucia duszności wymaga, aby powietrze wentylacyjne za GWC było odpowiednio chłodne. Należy jednak zaznaczyć, że dla dużych zysków ciepła wentylowanego obiektu należy przeprowadzić inną organizację powietrza, a mianowicie zastosować recyrkulację części powietrza (jeśli to dopuszczalne) przez wymiennik. Uzyskuje się wówczas znaczną oszczędność wielkości GWC lub obniżenie temperatury nawiewu o około $2-3^{\circ}\text{C}$.

Zalety gruntowego wymiennika ciepła (www.gruntowy-wymiennik-ciepła.pl):

- schładzanie budynku w upalne dni,
- wspomaganie regulacji wilgotności w budynku przez cały rok,
- dogrzewanie powietrza wentylacyjnego zimą,
- filtracja wstępna powietrza,
- ochrona urządzeń wewnętrznych przed zamrożeniem.

Kolektory słoneczne

Zadaniem kolektora słonecznego jest pobieranie energii z promieniowania słonecznego bezpośredniego, rozproszonego i odbitego, a następnie przekazywanie jej do instalacji grzewczej.

Kolektor płaski składa się z:

- przezroczystego pokrycia (najczęściej ze szkła strukturalnego);
- absorbera (obecnie z blachy miedzianej pokrytej powłoką selektywną pochłaniającą 95% padającego na niego promieniowania),
- wymiennika ciepła (zwykle rurki miedziane przylutowane do absorbera),
- izolacji (przeważnie wełna mineralna).

Promienie słoneczne ogrzewają umieszczony w kolektorze absorber, który pochłania promieniowanie słoneczne i zamienia je w ciepło. Poprzez węzownice (wymennik ciepła) płyn grzewczy oddaje ciepło podgrzewając wodę. Pod absorberem kolektor izolowany jest wełną mineralną, a od góry przykryty szybą solarną, odporną na grad. Całość zamknięta jest w obudowie aluminiowej (Joudi i Farhan, 2014; Jakhar i in., 2015).

Kolektory próżniowe są najnowszym, wysoko zaawansowanym produktem techniki solarnej. Jest to 30% sprawniejszy od kolektorów płaskich w okresach wiosennym i jesienno-zimowym. Wysoka sprawność kolektorów próżniowych wynika ze zdolności kolektora próżniowego do absorbowania promieniowania rozproszonego oraz ograniczania strat ciepła dzięki próżni istniejącej między dwiema rurami szklanymi kolektora. Powłoka absorbująca w kolektorach rurowych znajduje się najczęściej na zewnętrznej powierzchni wewnętrznej rury. Zapewnia to absorpcję promieni słonecznych nawet przy ostrym kącie padania promieni słonecznych (www.gruntowy-wymiennik-ciepła.pl).

Wykonane z miedzi rurki ciepła wewnątrz kolektora są fabrycznie napełnione cieczą o niskiej temperaturze parowania. Podczas ogrzewania rur przez słońce ciecz ta zaczyna parować i ciepło konwekcyjnie przechodzi do końcówki rury kondensatora umiejscowionej w kanale zbiorczym będącym wymiennikiem ciepła. Poprzez kondensator ciepło oddawane jest najpierw do płynu przepływającego przez kanał zbiorczy a następnie przekazywane do zbiornika ciepłej wody. Kolektory z rurkami ciepła to najbardziej efektywny typ kolektorów próżniowych (www.gruntowy-wymiennik-ciepła.pl).

3. Dane ogólne budynku jednorodzinnego i instalacji ogrzewania

Obiekt jest parterowym domem jednorodzinnym położonym w Zambrowie. Jest to wykonany w technologii tradycyjnej budynek murowany z betonu komórkowego o grubości 24 cm, ocieplany styropianem o grubości 15 cm.

Charakterystyka budynku:

- powierzchnia zabudowy – $125,36\text{ m}^2$,
- powierzchnia całkowita – $125,36\text{ m}^2$,
- powierzchnia użytkowa – $102,51\text{ m}^2$,
- wysokość maksymalna – $8,50\text{ m}$,
- długość maksymalna – $12,74\text{ m}$,
- szerokość maksymalna – $9,84\text{ m}$,
- wysokość pomieszczeń – $2,70\text{ m}$.

Dla spełnienia wymaganych parametrów powietrza w poszczególnych pomieszczeniach oraz wymogów technologicznych zaprojektowano instalację ogrzewania powietrznego budynku domu jednorodzinnego złożoną z wentylacyjnej centrali nawiewno-wywiewnej z odzyskiem ciepła i gazowego pieca nadmuchowego oraz zespołu urządzeń i przewodów do transportu oraz rozdziału powietrza. Celem modernizacji było wykonanie instalacji wentylacyjnej. Ponieważ dom jest mały nie było możliwości technicznej wykonania dwóch oddzielnych instalacji – instalacji centralnego ogrzewania i instalacji wentylacyjnej. Zdecydowano się na jedną instalację spełniającą obie funkcje. Projekt instalacji ogrzewania powietrznego obejmuje pomieszczenia ujęte w tabeli 2, a bilans ciepła w domu podano w tabeli 3. Nasłonecznienie określono na podstawie literatury (Recknagel i in., 1994). Pominęto zyski od urządzeń elektrycznych, ze względu na ich niewielki udział procentowy w całkowitych zyskach ciepła.

Bilans zapotrzebowania na energię cieplną określono na podstawie normy PN-B-02025:2001 *Obliczanie sezonowego zapotrzebowania na ciepło do ogrzewania budynków mieszkalnych i zamieszkania zbiorowego* i podano w tabeli 4. Zestawienie strumieni powietrza wentylacyjnego zamieszczono w tabeli 5, a zestawienie nawiewników i wywiewników podano w tabeli 6.

Latem nie przyjęto do sumy zysków ciepła zysków od oświetlenia, gdyż oświetlenie jest używane w okresach, gdy zyski ciepła od nasłonecznienia są małe.

Do obliczeń przyjęto 604 m³/h powietrza wentylacyjnego. Na podstawie obliczeń całkowitej projektowej straty ciepła (PN-EN 12831:2006 *Instalacje ogrzewcze w budynkach. Metoda obliczania projektowego obciążenia cieplnego*) w celu wstępnego dogrzewu powietrza dobrano nadmuchowy kondensacyjny piec grzewczy z zamkniętą komorą spalania, o sprawności ponad 106%, charakteryzujący się wyjątkowo cichą pracą oraz bardzo niską awaryjnością. Z uwagi na pracę przez większość czasu w trybie słabego ogrzewania, zużywa on do 80% mniej energii, niż piece jednostopniowe. Piec posiada płynną regulację obrotów wentylatora, dwustopniowy palnik oraz mechaniczny filtr powietrza. Przy doborze pieca brano pod uwagę potrzeby użytkowników. Zdecydowano się na ten model, ponieważ spełniał wszystkie oczekiwania inwestora.

Przewody i inne wyposażenie dodatkowe

Zaprojektowana instalacja kanałowa wykonana jest w specjalnej technologii zapewniającej cichy i sprawny przesył powietrza przy jednoczesnej dobrej izolacji termicznej. Kanały ogrzewania nadmuchowego prowadzono w posadzce ocieplonej styropianem. Kanały wywiewne zostały poprowadzone na poddaszu. Układ posiada cyfrowy sterownik z funkcją kontroli wilgotności, czujnikiem temperatury zewnętrznej i regulacją wydajności wentylacji. Dzięki cyfrowej komunikacji z piecem sterownik w pełni kontroluje jego pracę oraz umożliwia pełną diagnostykę i kalibrację systemu.

Tab. 2. Charakterystyka pomieszczeń z ogrzewaniem powietrznym

Numer pomieszczenia	Nazwa pomieszczenia	Powierzchnia [m ²]	Wysokość [m]	Kubatura [m ³]	Nawiew [m ³ /h]	Wywiew [m ³ /h]
1	Wiatrołap	4,58	2,7	12	25	25
2	Holl	7,3	2,7	20	39	39
3	WC	1,41	2,7	4	8	8
4	Garderoba	2,74	2,7	7	15	15
5	Pokój	12,1	2,7	33	65	65
6	Pokój	14,71	2,7	40	79	79
7	łazienka	8,65	2,7	23	47	47
8	kuchnia	11,7	2,7	32	111	111
9	pomieszczenie gospodarcze	6,02	2,7	16	33	33
10	salon	33,3	2,7	90	180	180
Razem				277	601	601

Tab. 3. Zestawienie zysków ciepła

Źródło	Zima			Lato		
	Ciepło [W]	Wilgoć [kg/s]	CO ₂ [kg/s]	Ciepło [W]	Wilgoć [kg/s]	CO ₂ [kg/s]
Ludzie	194	0,000051	0,000029	140	0,000066	0,000029
Oświetlenie	410			-		
Nasłonecznienie	-			450		
Razem	604	0,000051	0,000029	590	0,000066	0,000029

Tab. 4. Bilans zapotrzebowania na energię ciepłą

Miesiąc	N_d	Tem,m [°C]	Q_D [GJ/rok]	Q_{iw} [GJ/rok]	Q_g [GJ/rok]	Q_{ve} [GJ/rok]	h_{H,g_n}	Q_{sol} [GJ/rok]	Q_{int} [GJ/rok]	Q_{H,n_d} [GJ/rok]
Styczeń	31	-4,8	4,85	0	1,42	4,11	0,959	0,68	2,57	7,26
Luty	28	-4,2	4,27	0	1,34	3,6	0,917	1,37	2,32	5,82
Marzec	31	-0,3	3,92	0	1,42	3,22	0,831	2,25	2,57	4,55
Kwiecień	30	6,6	2,4	0	1,21	1,81	0,638	2,84	2,49	2,02
Maj	10	12,4	0,42	0	0,33	0,25	0,395	1,16	0,83	0,21
Czerwiec	0	16,5	0	0	0	0	0	0	0	0
Lipiec	0	17,6	0	0	0	0	0	0	0	0
Sierpień	0	16,6	0	0	0	0	0	0	0	0
Wrzesień	10	12,2	0,43	0	0,2	0,25	0,431	0,74	0,83	0,21
Październik	31	7,1	2,38	0	0,8	1,77	0,708	1,44	2,57	2,1
Listopad	30	2,3	3,27	0	0,99	2,63	0,888	0,66	2,49	4,09
Grudzień	31	-2	4,27	0	1,25	3,56	0,948	0,5	2,57	6,17
W sezonie	232	1,7	26,19	0	8,96	21,21	0,775	11,64	19,24	32,43

gdzie: N_d jest liczbą dni w miesiącu sezonu grzewczego, Tem,m jest średnią temperaturą zewnętrzną w miesiącu sezonu grzewczego, Q_D jest stratą energii cieplnej przez przegrody zewnętrzne, Q_{iw} jest stratą energii cieplnej przez przegrody wewnętrzne, Q_g jest stratą energii cieplnej przez przegrody przyległe do gruntu, Q_v jest stratą energii potrzebnej na ogrzanie powietrza wentylacyjnego, h_{H,g_n} jest współczynnikiem wykorzystania energii, Q_{sol} jest zyskiem ciepła od promieniowania słonecznego przez okna, Q_{int} jest bytowym zyskiem ciepła, Q_H jest łącznym zapotrzebowaniem na ciepło.

Tab. 5. Zestawienie strumienia powietrza wentylacyjnego

Rodzaj zanieczyszczeń	Obliczony strumień powietrza wentylacyjnego [m³/h]	Wskaźnik krotności wymian [h⁻¹]	Uwagi
Ciepło	604	2,2	–
Wilgoć	0,02	<1	–
CO₂	3,1	<1	–

Tab. 6. Zestawienie liczby nawiewników i wywiewników

Numer pomieszczenia	Nazwa pomieszczenia	Nawiew [m³/h]	Liczba nawiewników [sztuk]	Wywiew [m³/h]	Liczba wywiewników [sztuk]
1	wiatrołap	0	0	0	0
2	holl	0	0	0	0
3	WC	8	1	8	1
4	garderoba	0	0	15	1
5	pokój	65	1	65	1
6	pokój	79	1	79	1
7	łazienka	47	1	47	1
8	kuchnia	63	1	63	2
9	pomieszczenie gospodarcze	0	0	33	1
10	salon	180	3	180	1
	Σ	442	8	489	9

3. Obliczenia oraz dobór elementów instalacji

Średni dobowy rozbiór wody użytkowej oblicza się ze wzoru:

$$Q_{dsr} = U \cdot q_c = 3 \cdot 110 = 330 \text{ dm}^3 / d \quad (1)$$

gdzie: U jest liczbą osób, natomiast q_c jest to jednostkowe dobowe zapotrzebowanie na c.w.u. na jedną osobę.

Jednostkowe zapotrzebowanie na ciepłą wodę użytkową przedstawiono w tablicy 7, według normy PN-EN 1717:2003 *Ochrona przed wtórnym zanieczyszczeniem wody w instalacjach wodociągowych i ogólne wymagania dotyczące urządzeń zapobiegających zanieczyszczeniu przez przepływ zwrotny*.

Tab. 7. Jednostkowe zapotrzebowanie na c.w.u. na 1 osobę

Wyposażenie mieszkania	Jednostkowe zapotrzebowanie na c.w.u. na 1 osobę [dm ³ /Md]
zlew, umywalka, wanna	130
zlew, umywalka, natrysk	110

Średnie godzinowe zapotrzebowanie na ciepłą wodę użytkową wyznacza się ze wzoru:

$$Q_{hsr} = \frac{Q_{dsr}}{\tau} = \frac{330}{18} = 18 \text{ dm}^3 / h \quad (2)$$

gdzie τ jest liczbą godzin użytkowania instalacji w ciągu doby. Do obliczeń przyjęto 18 h/d.

Maksymalny godzinowy rozbiór ciepłej wody użytkowej:

$$q_{hmax} = q_{hsr} \cdot N_h = 18 \frac{\text{dm}^3}{h} \cdot 9,32 \cdot 3^{-0,244} = 128 = 0,035 \frac{\text{dm}^3}{s} \quad (3)$$

gdzie N_h prezentuje wskaźnik godzinowej nierównomierności rozbioru ciepłej wody użytkowej i wynosi

$$N_h = 9,32 \cdot U^{-0,244}$$

Maksymalne obliczeniowe zapotrzebowanie na moc cieplną na cele ciepłej wody użytkowej:

Parametry pracy instalacji ciepłej wody użytkowej: 45/10°C

$$\varphi_{max}^{cwu} = \frac{q_{hmax} \cdot \rho \cdot c_w \cdot (t_{cw} - t_{wz})}{3600} \quad (4)$$

$$\varphi_{max}^{cwu} = \frac{128 \frac{\text{dm}^3}{h} \cdot 0,95 \frac{\text{kg}}{\text{dm}^3} \cdot 4,2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot (318 \text{ K} - 283 \text{ K})}{3600} = 5 \text{ kW}$$

gdzie: ρ jest gęstością wody, c_w oznacza ciepło właściwe wody, natomiast t_{cw} oznacza temperaturę ciepłej wody, t_{wz} jest temperaturą wody zimnej.

Średnie obliczeniowe zapotrzebowanie na moc cieplną na cele ciepłej wody użytkowej:

$$\varphi_{sr}^{cwu} = \frac{\varphi_{max}^{cwu}}{N_h} = \frac{5 \text{ kW}}{7,12} = 0,7 \text{ kW} \quad (5)$$

Przyjęto 4 kolektory słoneczne. Wpływ na optymalne wyznaczenie powierzchni kolektora, pojemnościowego podgrzewacza jak i całej instalacji solarnej do przygotowania ciepłej wody użytkowej mają następujące parametry:

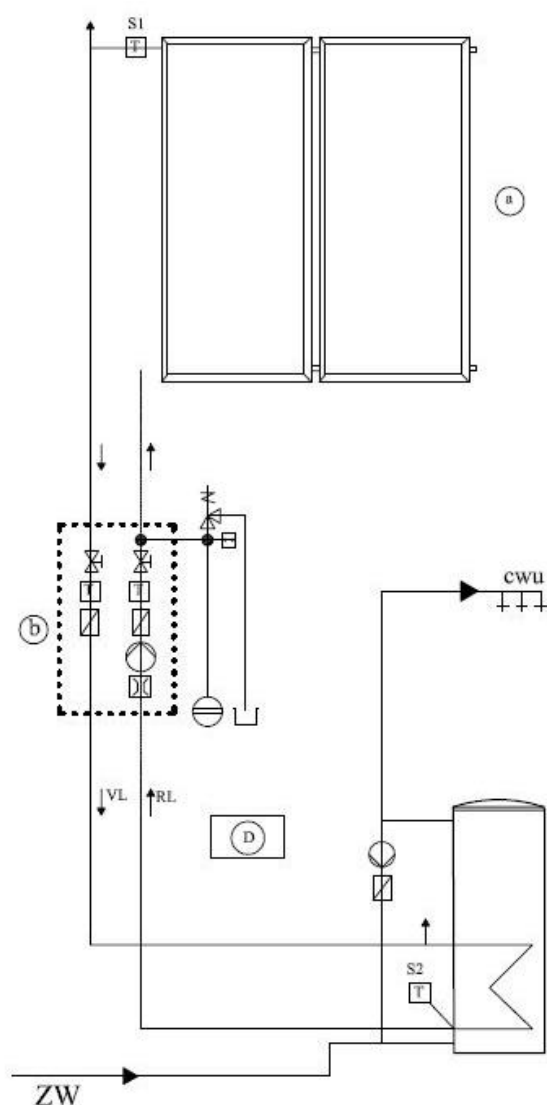
- miejsce montażu – dach,
- kąt nachylenia kolektorów – 45°,
- kierunek skierowania kolektorów – południe,
- rozbiór ciepłej wody – $Q_{dsr} = 330 \text{ dm}^3/d$,
- miejscowość – Zambrów,
- temperatura c.w.u. – 45°C,
- przeznaczenie instalacji solarnej – wyłącznie cele podgrzewu c.w.u.,
- powierzchnia zewnętrzna (powierzchnia brutto) – 2,37 m²,
- powierzchnia czynna (dopływu światła) – 2,25 m²,
- powierzchnia absorbera (powierzchnia netto) – 2,23 m²,
- uzysk kolektora – 525 kWh/(m² a),
- sprawność η_o – 77 %.

Dobrano biwalentny podgrzewacz c.w.u. ładowany pojemnościowo za pomocą węzownicy, w którym cała objętość wody podgrzewana jest równomiernie do określonej temperatury. Skuteczna izolacja zapewnia ekonomiczną eksploatację, a termogłazura – w połączeniu z anodą magnezową – nienaganną higienę oraz trwałość. Schemat zaprojektowanej instalacji solarnej (Bobryk, 2012) zaprezentowano na rysunku 1:

- średnica – 850 mm,
- wysokość – 1850 mm,
- zalecany pobór ciepłej wody na dobę w dm³ (przy temperaturze w podgrzewaczu 60°C oraz temperaturze poboru 45°C) – do 400 dm³,
- pojemność podgrzewacza – 490 dm³.

Do pośredniego podgrzewania wody użytkowej przez obieg grzewczy z użyciem energii elektrycznej. Zastosowanie, gdy występują dłuższe okresy dni złej pogody.

Gruntowy wymiennik ciepła dobrano ze względu na wydajność rekuperatora do 800 m³. Schemat GWC płytowego przy modernizowanym domu (Bobryk, 2012) prezentuje rysunek 2.



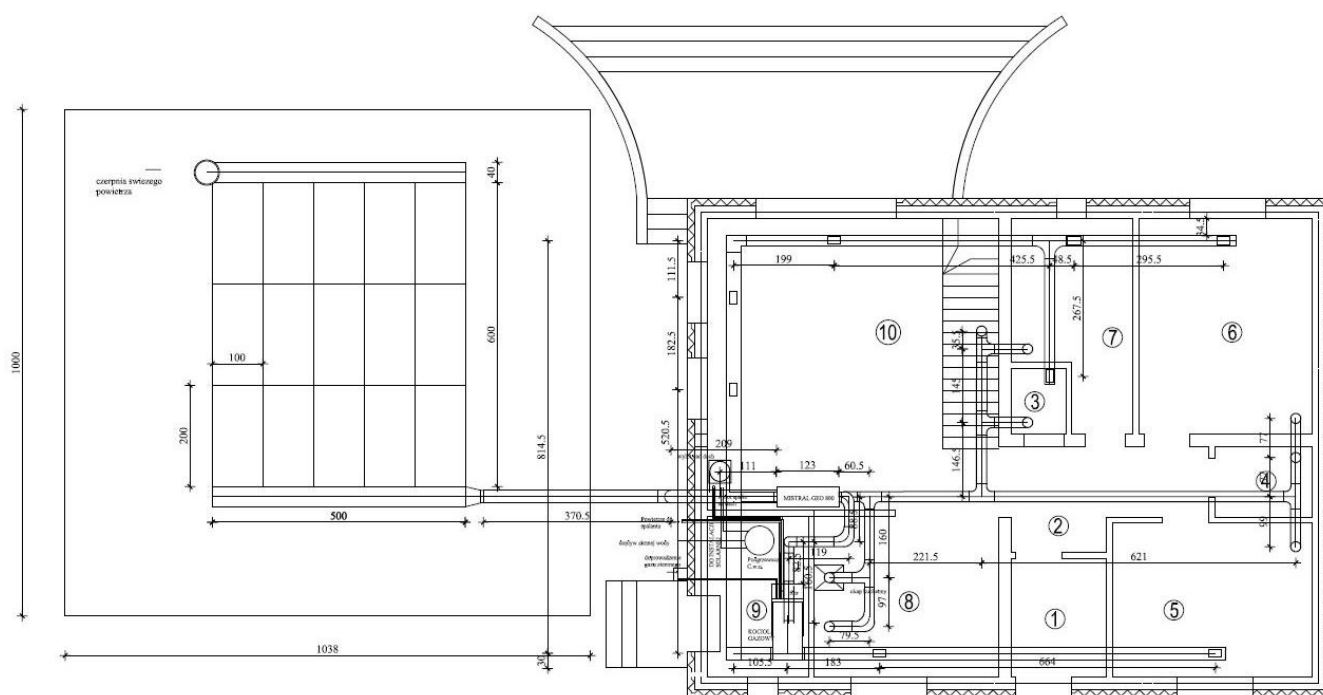
Zestaw elementów dla wydajności 800 m³/h. W skład zestawu wchodzi:

- płyty GWC bezprzeponowego: 15 szt.,
- kolektor 2 szt.,
- czerpnia 1 szt.,
- łącznik,
- kolano 90,
- rura czerpni 3mb.

Elementy dodatkowe niezbędne do wykonania wymiennika gruntowego to:

- folia budowlana 0,1mm – około 35 m²,
- folia budowlana 0,5mm PEHD lub PP – około 100 m²,
- geowłóknina – około 100 m²,
- styropian (2 warstwy) grubość całkowita minimum 14 cm – 12,6 m³.
- żwir 10-20 mm płukany – 3,0 t,
- piasek (żwirek) płukany – 7,0 t,
- kanały do transportu powietrza do wnętrza budynku.

Rys. 1. Schemat zaprojektowanej instalacji solarnej (Bobryk, 2012): ZW – zimna woda, cwu – ciepła woda użytkowa, VR – zasilanie, RL – powrót, A – kolektor słoneczny, B – zestaw pompowy, C – podgrzewacz ciepłej wody użytkowej, D – regulator solarny, sterownik, S1 – czujnik temperatury w kolektorze, S2 – czujnik temperatury w podgrzewaczu



Rys. 2. Schemat GWC płytowego przy modernizowanym domu (Bobryk, 2012)

Koszt uzyskania energii dla opracowanego rozwiązania prezentuje tabela 8.

Tab. 8. Koszt uzyskania energii

Rodzaj paliwa	Gaz ziemny E taryfa W3 (z dnia 8.07.2013)	Energia elektryczna taryfa G11 (z dnia 8.07.2013)
Wartość opałowa	9,97 kWh/m ³	1 kWh
Cena PLN brutto jednostki	1,30	0,2825
Cena 1 kWh	0,13	0,2825
Sprawność urządzenia w %	105	99
Koszt uzyskanego 1 kWh	0,1365	0,2796

Liczba dni sezonu grzewczego – 232 dni

Pobór prądu przez piec nadmuchowy:

$$373 \text{ W} \times 232 \text{ dni} \times 24 \text{ h} = 2032,1 \text{ kWh/sezon}$$

Pobór prądu przez centralę wentylacyjną:

$$270 \text{ W} \times 232 \text{ dni} \times 24 \text{ h} = 1503,4 \text{ kWh/sezon}$$

Rzeczywisty pobór mocy będzie mniejszy gdyż centrala nie będzie pracowała przez cały czas na najwyższym biegu.

Roczny koszt zużytej energii elektrycznej:

$$(2032,1 + 1503,4) \times 0,2825 = 998,78 \text{ zł}$$

Koszt gazu używanego przez piec nadmuchowy:

$$V = \frac{N}{\eta \cdot W} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right]$$

Maksymalne zużycie gazu przez piec:

$$V = \frac{7}{1,05 \cdot 9,97} = 0,67 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

gdzie: V jest to ilość zużywanego gazu w m³/h, N jest to moc kotła wyrażona w kW, η określa sprawność kotła, a W jest wartością opałową paliwa w m³.

Maksymalna ilość zużywanego gazu w sezonie grzewczym:

$$0,67 \cdot 232 \cdot 24 = 3730,6 \text{ m}^3/\text{sezon}$$

Szacunkowy koszt gazu ziemnego:

$$3730,6 \cdot 2 = 7.461 \text{ zł/sezon}$$

Całkowity koszt eksploatacyjny:

$$\text{Koszt gazu ziemnego} - 7.461 \text{ zł/sezon}$$

$$\text{Koszt poboru elektryczności} - 999 \text{ zł/sezon}$$

$$7.461 + 999 = 8.460 \text{ zł/sezon}$$

Zestawienie kosztów instalacji ogrzewania i podgrzewu c.w.u. przedstawia tabela 9.

Tab. 9. Zestawienie kosztów szacunkowych instalacji ogrzewania i podgrzewu c.w.u.

Rodzaj instalacji	Koszt inwestycji [zł]	Koszt eksploatacji [zł/rok]
Ogrzewanie nadmuchowe	17.200	8.460
Podgrzew c.w.u.	10.000	800

4. Podsumowanie

Zaproponowane rozwiązanie techniczne jest jedynym w sytuacji braku miejsca na dwie instalacje. Spełnia funkcję zarówno ogrzewania, jak i wentylacji. W sytuacji, gdy nie jest potrzebne ogrzewanie, spełnia rolę tylko instalacji wentylacyjnej. Koszt instalacji nadmuchowej jest niższy niż dwóch instalacji. Ponadto instalacja ta zajmuje mniej miejsca niż dwie instalacje. Nie bez znaczenia jest fakt, że podczas eksploatacji instalacja ma małą bezwładność termiczną, co pozwala na szybkie ogrzanie lub schłodzenie domu.

Ogrzewanie nadmuchowe zostało wybrane ze względów estetycznych, a także ponieważ łączyło dwie funkcje w jednej instalacji. Podłogowe kratki nawiewne i brak grzejników powodują, że w pomieszczeniach nie ma niezagospodarowanych miejsc. Stosowany kondensacyjny piec gazowy (o mocy 7,3-10,7 kW), centrala rekuperacyjna oraz podgrzewacze mogą być zainstalowane w niewykorzystywanej przestrzeni domu takiej, jak poddasze nieużytkowe, co również umożliwia „odzyskanie” dla celów mieszkalnych przestrzeni użytkowej innych pomieszczeń, na przykład kotłowni. Zrezygnowano z pionów wentylacyjnych, przez co obniżony został koszt budowy domu i odzyskano kilka metrów kwadratowych powierzchni.

Rozpatrując sprawność instalacji pod względem szybkości podniesienia temperatury w pomieszczeniach do zadanego poziomu, system nadmuchowy potrzebuje na to znacznie mniej czasu, ale również szybko się wychładza. Ogrzewanie powietrzne eliminuje również wszelkie awarie, typu: przecieki, korozja, zamarzanie czy osadzanie się kamienia w przewodach. Stosowane urządzenia są przyjazne dla środowiska.

Całkowite koszty inwestycyjne dla analizowanego domu wynoszą 27.200 zł (ogrzewania nadmuchowego i podgrzewu c.w.u.), natomiast koszty eksploatacyjne instalacji ogrzewania nadmuchowego (ogrzewania i wentylacji) – 8.460 zł oraz podgrzewu c.w.u. – 800 zł rocznie, w sumie koszty eksploatacyjne wynoszą 9.260 zł.

W sytuacji, gdy ze względów technologicznych nie można wykonać dwóch instalacji ogrzewania nadmuchowe jest idealnym rozwiązaniem.

Literatura

- Albers J., Dommel R., Montaldo-Ventsam H., Nedo H., Uebelacker E., Wagner J. (2007). Systemy centralnego ogrzewania i wentylacji. Poradnik dla projektantów i instalatorów. WNT, Warszawa.
- Baranowski A., Ferdyn-Grygierek J. (2013). Wpływ wymiany powietrza na zużycie ciepła w budynkach mieszkalnych i użyteczności publicznej. *Rynek Energii*, 4/2013.
- Bobryk T. (2012). Modernizacja centralnego ogrzewania na ogrzewanie powietrzne domu jednorodzinnego. Praca magisterska pod kierunkiem K. Gładyszewskiej-Fiedoruk. *Politechnika Białostocka*, Białystok.
- Danielewicz J., Gołcki K. (2010). Poradnik projektanta systemów grzewczych. *Oficina Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej*, Wrocław.
- Dąbrowska K. (2008). Czy instalacja nadmuchowa wyprze instalację grzejnikową? *Inżynier budownictwa*, 11/2008.
- Fanger P.O., Toftum J. (2002). Extension of the PMV model to non-air-conditioned buildings in warm climates. *Energy and Buildings*, Vol. 34, Issue 6, 533-536.
- Gładyszewska-Fiedoruk K., Krawczyk D.A. (2015). Mikroklimat pomieszczeń biurowych. Badania empiryczne i ankietowe – studium przypadku. *Oficina Wydawnicza Politechniki Białostockiej*, Białystok.
- González S.M., Larsen S.F., Hernández A., Lesino G. (2014). Thermal evaluation and modeling of a double-pass solar collector for air heating. *Energy Procedia*, Vol. 57, 2275-2284.
- Jakhar S., Misra R., Bansal V., Soni M.S. (2015). Thermal performance investigation of earth air tunnel heat exchanger coupled with a solar air heating duct for northwestern India. *Energy and Buildings*, Vol. 87, 360-369.
- Joudi K.A., Farhan A.A. (2014). Greenhouse heating by solar air heaters on the roof. *Renewable Energy*, Vol. 72, 406-414.
- Kępa A. (2014). Strata ciepła na wentylację i sposoby jej zmniejszenia. *Rynek Energii*, 5/2014.
- Koczyk H. (2005). Ogrzewnictwo praktyczne. Projektowanie. Montaż. Eksploatacja. H. Koczyk red., *Systherm Service*, Poznań, 95-96.
- Kowalczyk Z. (2010). Charakterystyka energetyczna budynków. Z. Kowalczyk red., *PWNT*, Gdańsk, 71-72.
- Kramer K.S., Thoma Ch., Mehnert S., Fahr S. (2014). Testing solar air-heating collectors. *Energy Procedia*, Vol. 48, 137-144.
- Krygier K., Klinke T., Sewerynik J. (2000). Ogrzewnictwo, wentylacja, klimatyzacja. *WSiP SA*, Warszawa.
- Nantka M. B. (2006). Ogrzewnictwo i ciepłownictwo. Tom I, *Wydawnictwo Politechniki Śląskiej*, Gliwice.
- Pieńkowski K., Krawczyk D.A., Tumel W. (1999). Ogrzewnictwo. T. 1-2. *Wydawnictwo Politechniki Białostockiej*, Białystok.
- Rastogi M., Chauhan A., Vaish R., Kishan A. (2015). Selection and performance assessment of phase change materials for heating, ventilation and air-conditioning applications. *Energy Conversion and Management*, Vol. 89, 260-269.
- Recknagel H., Sprenger E., Honmann W., Schramek E.R. (1994). Ogrzewanie i klimatyzacja z uwzględnieniem chłodnictwa i zaopatrzenia w wodę. Poradnik (tł. z niem.). *EWFE*, Gdańsk.
- Recknagel H., Sprenger E., Honmann W., Schramek E.R. (2008). Kompendium ogrzewnictwa i klimatyzacji łącznie z zagadnieniami przygotowania ciepłej wody i techniki chłodniczej (tł. z niem.). *Omni Scala*, Wrocław.
- Toftum J., Langkilde G., Fanger P.O. (2004). New indoor environment chambers and field experiment offices for research on human comfort, health and productivity at moderate energy. *Energy and Buildings*, Vol. 36, Issue 9, 899-903.
- Yu Z., Ji J., Sun W., Wang W., Li G., Cai J., Chen H. (2014). Experiment and prediction of hybrid solar air heating system applied on a solar demonstration building. *Energy and Buildings*, Vol. 78, 59-65.

MODERNIZATION OF A SINGLE-PIPE WATER HEATING SYSTEM INTO AN AIR HEATING SYSTEM IN A SINGLE FAMILY HOUSE

Abstract: The paper shows the possibility of modernization of the heating systems in single family houses. The air heating was compared with a radiator heating and underfloor heating in terms of energy sources, heating systems elements, inertia of system, failure rates, costs, an impact on the aesthetics of the interior area and the possibility of expansion of the functions for the ventilation and air-conditioning systems. Moreover the alternative ways for heating such as ground heat exchangers and solar collectors were described. The project for a single-family home heating were presented. It was an air heating using the air handling unit with heat recovery and the ground exchangers. The exhaust ventilation cooperated with a cooker hood. For a DHW system solar installation with DHW tank was proposed. The paper also stated capital and operating costs for the proposed solution.

WYNIKI WYBRANYCH BADAŃ WYTRZYMAŁOŚCI MIĘDZYFAZOWEJ LEKKIEGO GRZEJNIKA PŁASZCZYZNOWEGO Z ROZPRASZACZAMI CIEPŁA

Jacek KARPIESIUK*, Tadeusz CHYŻY

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45 A, 15-351 Białystok

Streszczenie: W artykule zaprezentowano wybrane wyniki badań wytrzymałości międzyfazowej lekkiego grzejnika płaszczyznowego z rozpraszaczami ciepła w postaci lameli aluminiowych. Grzejnik charakteryzuje się niewielką wysokością i suchą, lekką konstrukcją. Uzyskano to poprzez wyeliminowanie warstw jastrychowych. W stosunku do grzejników bez rozpraszaczy ciepła jest konstrukcją droższą w wykonaniu, jednakże jego zaletą jest szybsze i bardziej równomierne przekazywanie energii cieplnej do otoczenia. W artykule przedstawiono wyniki badań wytrzymałościowych użytych klejów. Badano wytrzymałość na ścinanie, siły odrywania, siły przyczepności oraz nasiąkliwość i mrozoodporność. Rezultaty potwierdzają możliwość stosowania grzejników powierzchniowych na kleju poliuretanowym, z lamelami do ogrzewania wewnątrz i w systemach ochrony przed lodem i śniegiem.

Słowa kluczowe: lekki grzejnik płaszczyznowy, lamele, badania wytrzymałościowe, klej poliuretanowy.

1. Wprowadzenie

Jednym z rozważanych rozwiązań konstrukcyjnych dla lekkiego grzejnika płaszczyznowego jest zastosowanie w nim lameli (Karpiesiuk, 2015 i 2016). Pomimo zakładanej wyższej ceny inwestycyjnej grzejnik z lamelami będzie się charakteryzował lepszym komfortem użytkowania, powodowanym bardziej równomiernym i szybszym rozpraszaniem energii cieplnej do ogrzewanego pomieszczenia (Żukowski i Karpiesiuk, 2015). W związku z tym dobrano odpowiedni klej i lamele aluminiowe, mając jednocześnie na uwadze, aby cena tego systemu nie była znacznie wyższa od bardziej ekonomicznej konstrukcji tego rodzaju grzejnika bez lameli.

Wykonano i zaprezentowano odpowiednie badania wytrzymałościowe, w tym statyczną wytrzymałość na ścinanie, siły odrywania, przyczepności metodą pull-off i ścinania pressomessiem. Ponadto wykonano badania nasiąkliwości i mrozoodporności. Eksperymentalne badania wykonano dla płyt izolacyjnych z lamelami aluminiowymi na polistyrenie ekstrudowanym XPS 30 „wafel” firmy Synthos i dodatkowo XPS 300 Fabric, frezowanym (szorstkim) firmy Fibran zgodnym z normą PN-EN 13164+A1: 2015-03 *Wyroby do izolacji cieplnej w budownictwie. Wyroby z polistyrenu ekstrudowanego (XPS) produkowane fabrycznie. Specyfikacja*. Płyty izolacyjne zostały pokryte klejem na całej powierzchni lub punktowo. Na nich przyklejono gres lub parkiet

drewniany o wymiarach zgodnych z wymaganiami norm PN-EN 12004+A1:2012 *Kleje do płytek - wymagania, ocena zgodności, klasyfikacja i oznaczenie* i PN-EN 1348:2008 *Kleje do płytek. Oznaczenie przyczepności dla klejów cementowych*, do tego typu badań. Do zamocowania folii aluminiowej o grubości 0,09 mm, stanowiącej rozpraszacz ciepła do płyt izolacyjnych zastosowano klej poliuretanowy z utwardzaczem typu Sika Force 7710, natomiast do przyklejenia folii do gresów i posadzki drewnianej użyto kleju poliuretanowego, jednoskładnikowego Sika Bond T8. Przeprowadzono badania zarówno na próbkach jak i na całych płytach XPS o wymiarach 600×1250 mm z zamontowanymi węzownicami z PCV PE/RT/Al/PE/RT o średnicy 16×2 mm w rozstawie 10 cm. Całość zbadano po osiągnięciu deklarowanego pełnego obciążenia klejów poliuretanowych Sika, wynoszących zgodnie z dokumentacją techniczną producenta (Karta Informacyjna, 2015) maksymalnie 24-48 godzin, zależnie od warunków klimatycznych, a dokładnie po 3 dniach.

Celem artykułu jest zaprezentowanie wyników badań eksperymentalnych dotyczących wybranych parametrów wytrzymałościowych badanego modelu płyty grzejnej z lamelami, w tym dodatkowo sprawdzenie użyteczności w warunkach eksploatacyjnych wewnątrz i na zewnątrz budynków.

Badania zostały wykonane w firmie Sika Poland Technical Service TM Industry w Krakowie oraz w przemysłowym laboratorium w Warszawie.

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: jack@elektra.pl

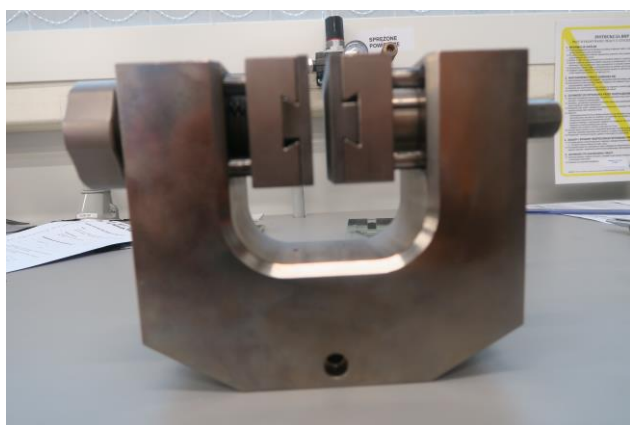
2. Opis stanowisk pomiarowych i metodyka badań

2.1. Badania w laboratorium Sika Poland

W firmie Sika Poland Technical Service TM Industry w Krakowie wykonano badania wytrzymałości metodą statycznego ścinania według procedury korporacyjnej CQP046-0 aplikacji kleju (zgodnie z normą DIN EN 1465) oraz badanie wytrzymałości siły odrywania według procedury CQP564-1 aplikacji kleju (zgodnie z normą DIN 53289) na konstrukcji płyt izolacyjnych z użyciem folii aluminiowych. Schemat stanowiska badawczego i oprzyrządowania prezentuje rysunek 1, 2 i 3. W przyrządzie do badania wytrzymałości odrywania użyto siły 5 N/cm (oderwanie folii od izolacji) i 35 N/cm (oderwanie folii od gresu) przy prędkości 300 mm/min. Podczas badania statycznego ścinania prędkość wynosiła 10 mm/min przy sile 52 N/cm w obu przypadkach ścinania.



Rys. 1. Stanowisko pomiarowe firmy Zwick Polska



Rys. 2. Oprzyrządowanie do badania wytrzymałości metodą statycznego ścinania



Rys. 3. Oprzyrządowanie do badania wytrzymałości siły odrywania

Oba badania zostały wykonane dla następujących warstw:

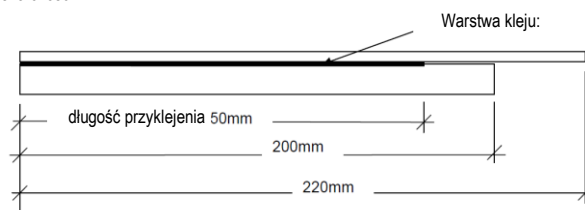
- płyta izolacyjna XPS 30 „wafel” /klej Sika Force 7710/ folia aluminiowa 0,09 mm;
- płyta izolacyjna XPS 300 szorstka /klej Sika Force 7710/ folia aluminiowa 0,09 mm;
- folia aluminiowa 0,09 mm /klej Sika Bond T8/ płytka gresu.

Wymiary próbek do badania siły odrywania są zaprezentowane na rysunku 4, gdzie długość próbki XPS-u wynosi 200 mm, a długość folii aluminiowej 220 mm, przy długości przyklejenia 150 mm.

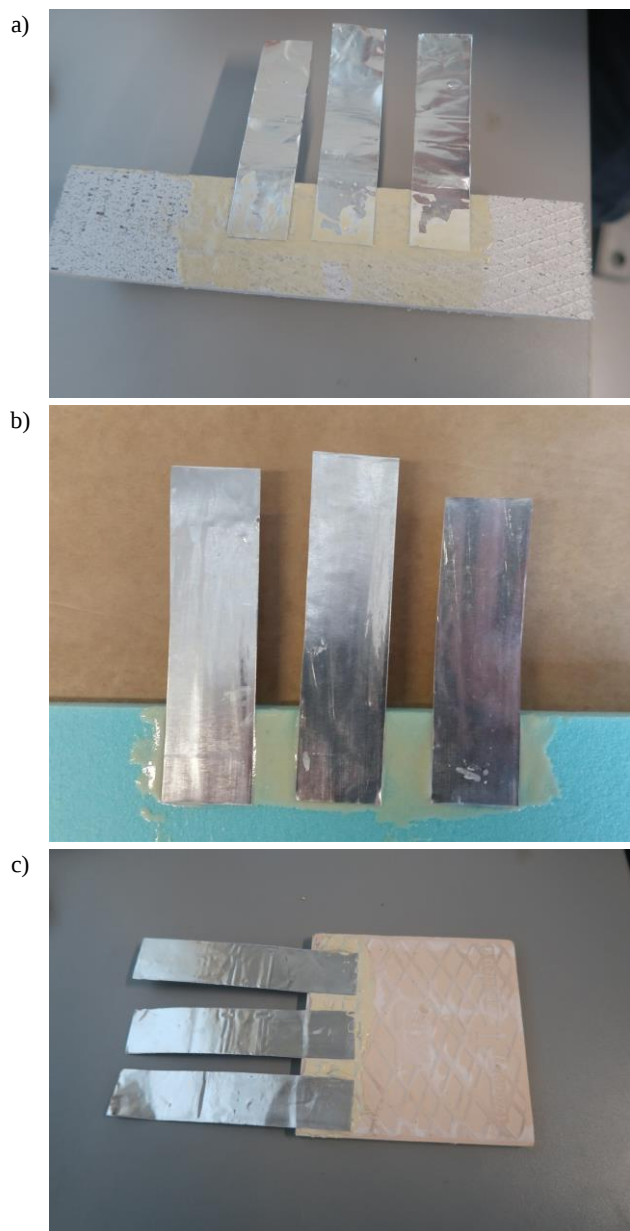
Przy badaniu wytrzymałości metodą statycznego ścinania, nałożona folia aluminiowa na płytę XPS i płytki gresu miała zarówno szerokość, jak i zakładkę przyklejenia wynoszące po 25 mm (rys. 5).

Zdjęcia próbek do badania siły odrywania pokazano na rysunku 6.

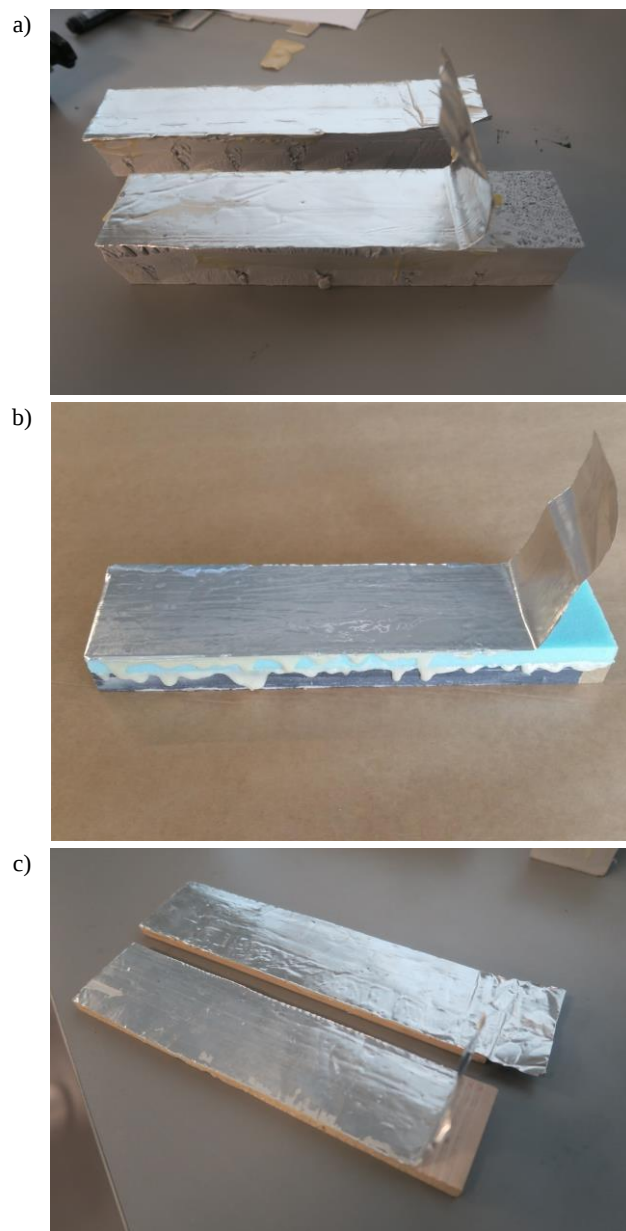
szerokość: 50mm



Rys. 4. Wymiary próbki do testów odrywania zgodnie z procedurą nakładania kleju i czasu jego schnięcia CQP564-1 (archiwum firmy Sika Poland)



Rys. 5. Próbkę do badania statycznego ścinania płytek: a) XPS „wafel”, b) XPS frezowana, c) gres



Rys. 6. Próbkę do badania siły odrywania płytek: a) XPS „wafel”, b) XPS frezowana, c) gres

2.2. Badania w przemysłowym laboratorium w Warszawie

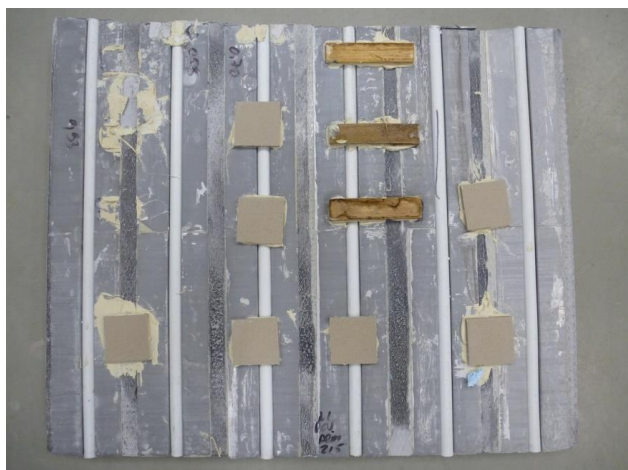
W Warszawie, w laboratorium przemysłowym wykonano badania przyczepności metodą pull-off grzejnika płaszczyznowego, wykonanego z płyt izolacyjnych XPS 30 „wafel” z folią aluminiową (zamocowaną klejem poliuretanowym, utwardzonym Sika Force 7710), stosując do przyklejenia posadzki kleje poliuretanowe Sika Bond T8. Dodatkowo zostały też wykonane pressomessiem badania wytrzymałości na ścinanie tylko konstrukcji podłogi z posadzką z drewna w postaci klocków – podporowy o wymiarach $100 \times 23 \times 8$ mm oraz próbną $43,5 \times 23 \times 8$ mm, przyklejonych do folii aluminiowej klejem poliuretanowym Sika Bold T8 na płycie izolacyjnej XPS „wafel”.

Badania laboratoryjne wykonano za pomocą przyrządu DYNA Z16 Leo1 o zakresie pomiaru 1,6-16 kN firmy Proteq do badania przyczepności.

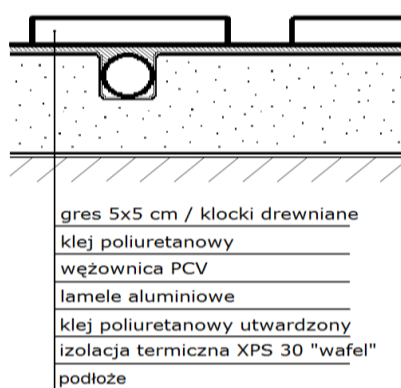
Badania te zostały wykonane dla następującej konstrukcji płyty grzejnej:

- płyta izolacyjna XPS/ klocki drewniane,
- klej poliuretanowy utwardzony,
- lamele aluminiowe,
- węzownica PCV,
- klej poliuretanowy,
- gres 5×5 cm.

Wszystkie próbki zamocowano punktowo, w tym 1, 2 i 3 przyklejono do 3/4 powierzchni aluminium i 1/4 powierzchni do rurki PCV, próbkę 4 przyklejono do 2/3 powierzchni aluminium i 1/3 powierzchni do XPS-u (rys. 7 i 8).

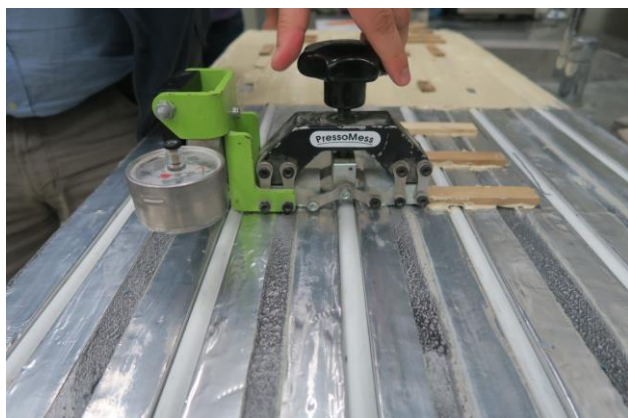


Rys. 7. Płyta izolacyjna do badania przyczepności metodą pull-off

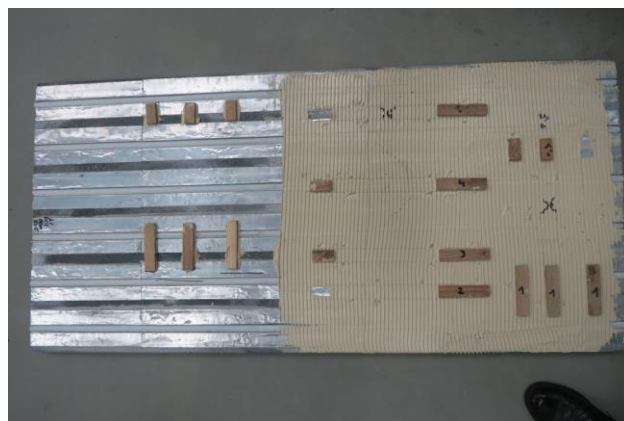


Rys. 8. Schemat stanowiska do badania przyczepności metodą pull-off

Badania wytrzymałości na ścinanie z użyciem pressomessu wykonano na płycie grzejnej z posadzką drewnianą, mocowaną punktowo lub powierzchniowo (rys. 9 i 10). Stanowisko badawcze i oprzyrządowania do badania mrozoodporności stanowiła komora typu K-010, producent ToRoPol.



Rys. 9. Pressomess do badania wytrzymałości na ścinanie



Rys. 10. Próbkki do badania wytrzymałości na ścinanie z klejem poliuretanowym

Badania nasiąkliwości wykonano na płytach jak na rysunku 7, z próbkami drewnianymi i z gresu, mocowanymi punktowo. Po 21 dniach całkowitego zanurzenia w wodzie w temperaturze 20°C, zgodnie z normą PN-EN 1348:2008 poddano je badaniu na rozciąganie prostopadle do powierzchni czołowych.

Kolejne próbki opisane na rysunku 8 z gresu i drewna, zamocowane punktowo poddano badaniu mrozoodporności po 25 cyklach zamrażania i rozmrażania w wodzie zgodnie z bardziej restrykcyjną normą PN-B 06250:1988 *Beton zwykły* niż norma do badania klejów. Wykonano również eksperymenty nienormowe 50-krotnym cyklem zamrażania i odmrażania, czyli 2 razy dłuższym niż podaje norma badania klejów do płytek.

3. Wyniki badań

Rezultaty badania wytrzymałości metodą statycznego ścinania, każdorazowo dla 3 próbek, przedstawia tabela 1, a wykresy zależności siły ścinającej do wydłużenia pokazano na rysunku 11. Rezultaty badania wytrzymałości siły odrywającej, każdorazowo dla 3 próbek, przedstawia tabela 2, a wykresy zależności tej siły względem wydłużenia są na rysunku 12 i 13. Wyniki badania przyczepności metodą pull-off przedstawia tabela 3.

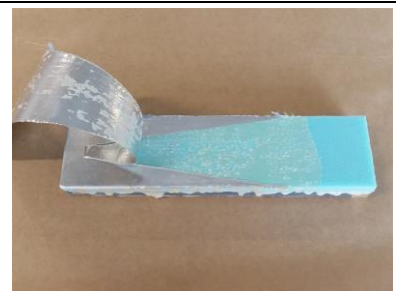
Tab. 1. Siła ścinająca i wydłużenie próbki przy badaniu wytrzymałości metodą statycznego ścinania z opisem rodzaju zniszczenia próbek

Numer próbki	Układ	F_{max} [N]	e_{max} [mm]	Rodzaj zniszczenia
1	Układ "A" XPS „wafel” SYNTHOS 30/ SikaForce 7710	139,40	2,68	Rozerwanie folii aluminiowej
2		138,61	2,62	
3		138,59	2,98	
1	Układ "B" XPS szorstki FIBRAN 300 FABRIC-I-8mm/ SikaForce 7710	143,47	4,61	Rozerwanie folii aluminiowej
2		138,14	4,28	
3		122,55	2,76	Rozerwanie XPS-u
1	Układ "C" PŁYTKA GRESOWA/ SikaBond T8	119,02	3,36	Rozerwanie folii aluminiowej
2		121,18	3,23	
3		119,30	2,20	

 F_{max} - siła ścinająca e_{max} - wydłużenie całej próbki (ze względu na sztywność kleju i XPS-u dot. wydłużenia folii)

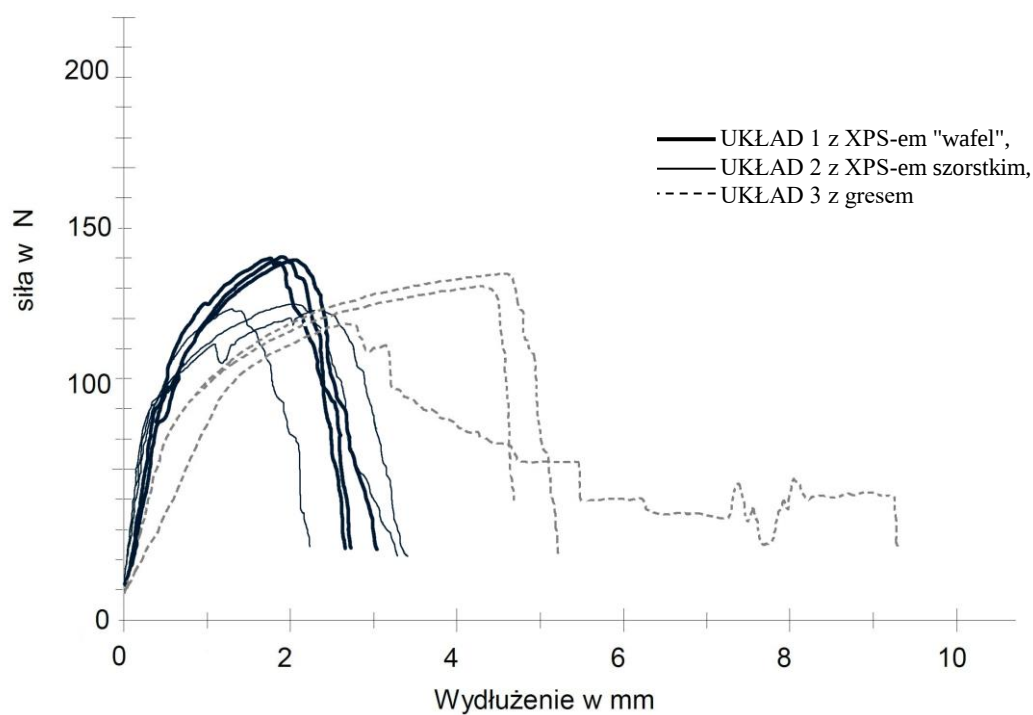
Tabela 2. Siły odrywania przy badaniu wytrzymałości z opisem rodzaju zniszczenia próbek

Numer próbki	Układ	P_s śr. [N/cm]	P_s max [N/cm]	P_s mini [N/cm]	Rodzaj zniszczenia
1	Układ "A" XPS „wafel” SYNTHOS 30/ SikaForce 7710	3,50	4,13	3,00	oderwanie powierzchni gofry od rdzenia XPS-u
2		3,45	4,05	2,99	
3		3,48	4,02	2,93	
1	Układ "B" XPS szorstki FIBRAN 300 FABRIC-I- 8mm/ SikaForce 7710	3,83	4,47	3,24	oderwanie powierzchni folii aluminium od kleju Force
2		3,30	3,93	2,62	
3		3,95	5,69	1,78	
1	Układ "C" PŁYTKA GRESOWA/ SikaBond T8	32,92	37,83	29,69	oderwanie folii aluminiowej od kleju T8
2		34,25	42,21	28,58	
3		32,98	40,33	29,71	

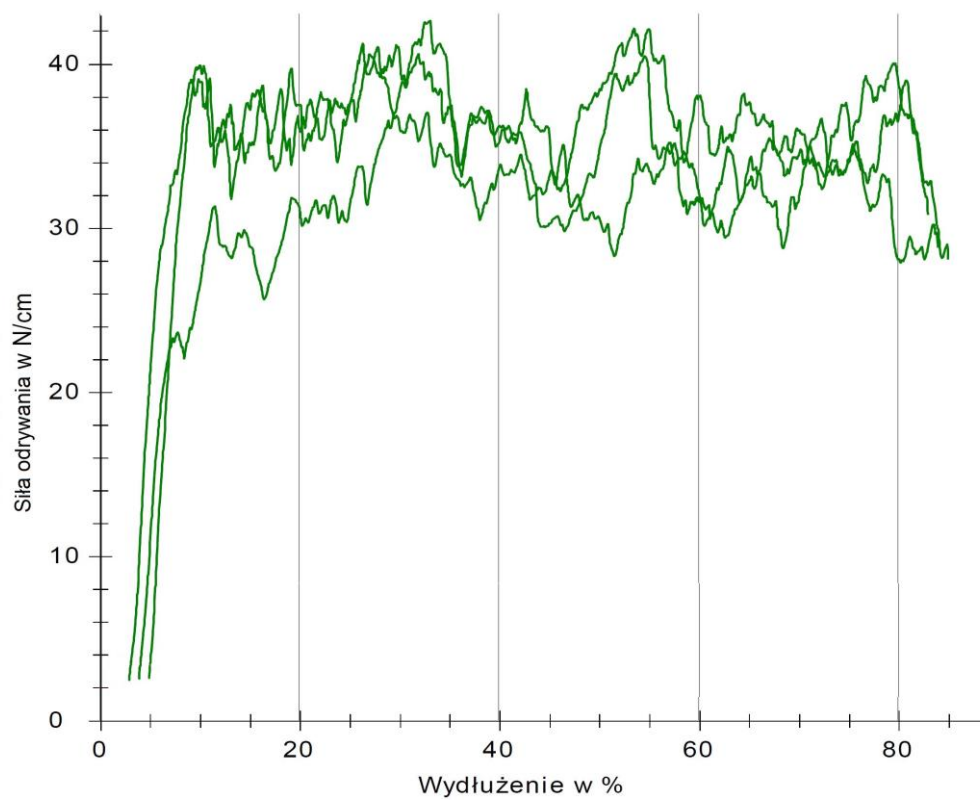


Tab. 3. Siły odspojenia przy badaniu przyczepności pull-off z opisem miejsca odspojenia

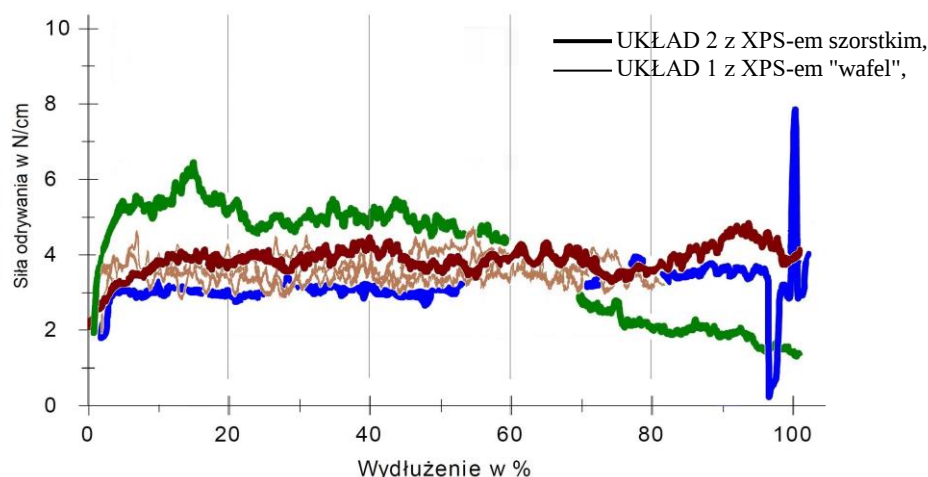
Numer próbki	Układ	Ilość dni	F [kN]	F_p [MPa]	Opis zniszczenia
1	XPS "wafel" SYNTHOS 30/Sika Force/folia	3	>>0,70	>>0,280	brak oderwania, klej Sika Bond T8 rozciąga się, maszyna osiąga max ruchu
2	alum./SikaBond T8/ gres	3	>>0,59	>>0,236	
3	(na 1/4 pow. rurka pcv)	3	>>0,72	>>0,288	
4	XPS "wafel" SYNTHOS 30/Sika Force/folia alum./SikaBond T8/ gres (na 1/3 pow.XPS)	3	>>0,93	>>0,372	



Rys. 11. Wykres zależności siły ścinającej od wydłużenia próbki



Rys. 12. Wykres zależności siły odrywającej od wydłużenia próbki. Układ „C” z płytką gresu



Rys. 13. Wykres zależności siły odrywającej od wydłużenia próbki (opracował J. Karpiesiuk)

Badania wytrzymałości na ścinanie płyty (rys. 14) wykonano przy użyciu miernika o nazwie pressomess. Na izolacyjnej płycie XPS „wafel” z zamocowanymi lamelami aluminiowymi i rurkami PCV nałożono powierzchniowo i punktowo klej SikaBond T8 z drewnianymi próbkami. Próbkę klejono w ten sposób, aby była możliwa do zbadania bezpośrednia siła na izolowanym podłożu. Wykonano poprzeczne ułożenie próbek, aby zbadać średnią z trzech różnych podłoży (folia aluminiowa, rurki PCV, XPS „wafel”). Przy nałożeniu kleju powierzchniowo oddziaływanie wysoko elastycznego kleju poliuretanowego Sika Bond T8 umożliwiało przesunięcie się drewnianego klocka pomiarowego o około 4 mm i jego powrót bez zerwania kleju od podłoża.



Rys. 14. Płyta grzejna wykonana na bazie XPS „wafel” z wklejonymi lamelami aluminiowymi, pokryta w całości lub punktowo klejem Sika Bond T8 z próbkami drewna

W celach badawczych wykonana została próbka z punktowym mocowaniem kleju do podłoża płyty grzejnej (rys. 15). Dodatkowo powierzchnię aluminium zaimpregnowano podkładem SikaPrimer 3N i aktywatorem SikaActivator 205, a rurki PCV zmatowiono papierem ściernym drobnoziarnistym i podkładem SikaPrimer 215. Badanie wykonano po około 18 godz od aplikacji. W tym przypadku odspojenie kleju od podłoża aluminium/ PCV następuje przy sile ścinającej

w granicach od 0,2-0,25 N/mm². Niemniej następuje również początkowe, kilkumilimetrowe przesunięcie przed zerwaniem. To badanie nie odzwierciedla realnej aplikacji gdyż jest punktowe. Wykonano je, jako jedynie możliwe w celu dokonania pomiarów przy pomocy pressomessu.

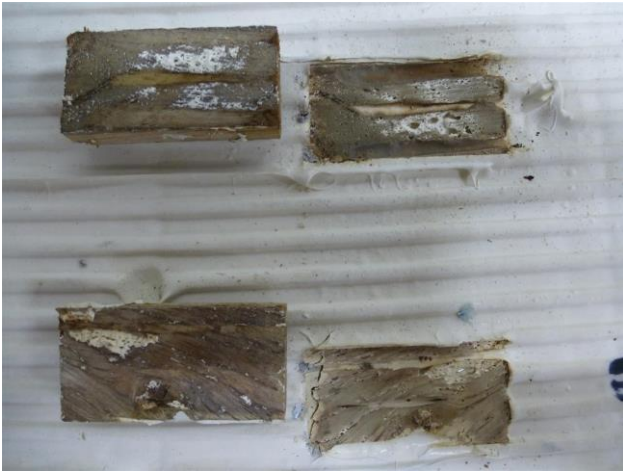


Rys. 15. Wynik badania wytrzymałości na ścinanie przy punktowym mocowaniu posadzki drewnianej

Rezultatem badania wytrzymałości na rozciąganie prostopadle do powierzchni czołowych przy długotrwałej nasiąkliwości i całkowitym zanurzeniu w wodzie przez okres 21 dni był brak oderwania się próbek od podłoża.

Wynikiem badania wytrzymałości na rozciąganie

prostopadle do powierzchni czołowych przy zamrażaniu i odmrażaniu próbek drewnianych przeprowadzone po 25 cyklach był brak oderwania się próbek od podłoża, a po 50 cyklach próbki straciły przyczepność na styku drewno-klej, ulegając odspojeniu jak na rysunku 16. Sam klej poliuretanowy SikaBond T8 nie odspoił się od podłoża płyty grzejnej.



Rys. 16. Drewniane próbki przy badaniu mrozoodporności po 50 cyklach zamrażania i rozmrażania

W przypadku próbek gresu, przyklejonych punktowo zarówno po 25 cyklach, jak i po 50 cyklach nie nastąpiło oderwanie próbek od płyty grzejnej przy maksymalnym wyężeniu przyrządu badawczego.

4. Analiza wyników

W artykule zaprezentowano wyniki wybranych badań wytrzymałości mechanicznej nietypowego grzejnika powierzchniowego z lamelami bez użycia jastrychów. Zastosowano konstrukcję warstwową grzejnika o następujących komponentach:

- płyta izolacyjna XPS „wafel” lub frezowana,
- klej poliuretanowy z utwardzaczem, mocujący do płyty izolacyjnej folię aluminiową, jako warstwa rozpraszająca ciepło (lamel),
- wężownica PCV, wbudowana w rowki,
- posadzka z gresu lub parkietu zamocowana klejem poliuretanowym.

Wykonano następujące badania grzejnika w różnych układach konstrukcyjnych:

- wytrzymałość metodą statycznego ścinania,
- wytrzymałość siły odrywania,
- przyczepność metodą pull-off,
- wytrzymałość na ścinanie,
- nasiąkliwość i mrozoodporność.

Wielowariantowość badań dała porównanie wytrzymałości mechanicznej użytych materiałów. Wykonano zarówno badania do celów wyłącznie badawczych lub rzadko spotykanych przy użytkowaniu, jak też te, potrzebne do określenia rzeczywistych warunków eksploatacyjnych. Jako badawcze i sporadycznie występujące można zaliczyć eksperymenty

wytrzymałości na odrywanie, punktowe mocowanie płytek, czy też badania mrozoodporności posadzek drewnianych.

Badania wytrzymałości na ścinanie próbek pomiędzy płytą izolacyjną, folią i gresem wykazały bardzo dobre właściwości klejów poliuretanowych. Przy wydłużeniu folii aluminiowej o grubości 0,09 mm o 2,20-4,61 mm nastąpiło jej rozerwanie. Zastosowane kleje poliuretanowe zachowały swoją przyczepność przy sile od około 120-140 N zarówno do gresu, jak i płyty izolacyjnej nawet bez gruntowania tych powierzchni. Te wysokie wartości elastyczności i przyczepności klejów poliuretanowych potwierdzone zostały przy badaniu pressomessiem konstrukcji płyty grzejnej, pokrytej tym klejem powierzchniowo z zamocowaną wężownicą. Przyrząd ten przy maksymalnym odchyleniu powodował przesunięcie klocka drewnianego bez zerwania połączenia z klejem poliuretanowym nawet do 4 mm a po badaniu, próbka parkietu wracała do pierwotnego położenia. Dopiero badania przy mocowaniu punktowym klocka pozwoliły na ścięcie połączenia folia aluminiowa-klej poliuretanowy mocujący drewno, ale też przy znacznej sile ścinającej około 0,2-0,25 N/mm². Co ciekawe niestandardowe badania dotyczące przyczepności metodą pull-off, nawet przy punktowym mocowaniu gresu, na kleju poliuretanowym wykazały bardzo dobre jego właściwości. Używając maksymalnych możliwości ruchu maszyny do badania przyczepności o sile powyżej 590 N, a nawet powyżej 930 N nie nastąpiło oderwanie zarówno kleju od podłoża folii aluminiowej, jak też folii od XPS-u.

Zbadano też wytrzymałość na odrywanie folii od gresu i folii od płyty izolacyjnej. Siła odrywania gresu od folii jest około 10-krotnie wyższa od tej przy odrywaniu folii od XPS-u i wynosi 145-280 N. Aby oderwać folię od płyty izolacyjnej wystarczy użyć siły odrywającej od 13-28 N. Badania nad nasiąkliwością i mrozoodpornością potwierdziły znakomitą jakość kleju poliuretanowego do tego rodzaju konstrukcji grzejnika płaszczyznowego z lamelami. Jedyne posadzka drewniana mocowana punktowo została odspojona i to tylko ze względu na ponadnormowe badania mrozoodporności przy 50 cyklach zamrażania i rozmrażania.

5. Wnioski

Rezultaty badań eksperymentalnych potwierdzają możliwość stosowania lekkich grzejników powierzchniowych na kleju poliuretanowym, z lamelami do ogrzewania wewnątrz i w systemach ochrony przed lodem i śniegiem na zewnątrz budynków. Zastosowany klej wykazuje bardzo duże siły przyczepności, jak też wytrzymałości na ścinanie. W przypadku stosowania elementów drewnianych w warunkach działania ujemnych temperatur zaleca się ich impregnowanie z każdej strony, celem zwiększenia odporności na wodę i mróz. Badania wytrzymałości na odrywanie wykazały, że przy ewentualnej wymianie posadzki będzie następowało

odrywanie się folii od płyty izolacyjnej. Folia pozostanie niezerwana jedynie w miejscach ułożenia węzownicy. Może to być istotne przy remoncie całej podłogi lub chęci wymiany posadzki.

W przyszłości Warto byłoby określić wytrzymałość warstw zespolonymi tańszymi klejami cementowymi i zbadać wytrzymałości na ścinanie kleju klasy C2S1 i o wyższej elastyczności, typu C2S2 oraz jego przyczepność przy XPS-ie frezowanym. Wskazane są też badania na zginanie i ściskanie tego rodzaju grzejników.

Literatura

- DIN EN 1465:2009-07 Klebstoffe-Bestimmung der Zugscherfestigkeit von Überlappungsklebungen; Deutsche Fassung.
- DIN 53289:1979 Testing of adhesives for metals and adhesively bonded metal joints; floating roller peel test.
- Karpiesiuk J. (2015). Ciepło z posadzki bez jastrychów (1). Cenna podłógówka. *Magazyn Instalatora*, 11/2015, 30-31.
- Karpiesiuk J. (2016). Ciepło z posadzki bez jastrychów (2). Ultra cienki grzejnik. *Magazyn Instalatora*, 02/2016, 20-21.
- Karta Informacyjna (2015). Sika Bond – T8. Kleje i uszczelniacze, 30.03.2015. Firma Sika Poland.
- Żukowski M., Karpiesiuk P. (2015). Wyniki badań ogrzewania płaszczyznowego typu B wykonanego w technologii suchej. *Instal*, 7-8/2015, 33-37.

THE RESULTS OF SELECTED INTERFACE STRENGTH OF LIGHTWEIGHT RADIANT HEATER WITH DISSIPATING ELEMENTS

Abstract: The paper presents selected results of interface strength tests for lightweight radiant heater with dissipating elements made of aluminum heat diffusers. Small height and lightweight structure are the main features of the heater. It has been achieved through eliminating layers of screeds. Comparing to heaters without dissipating elements the structure is more expensive to make, however, the advantage is faster and more uniform transfer of heat to the environment. The article presents the results of strength tests on used adhesives. The following factors have been tested: the shear strength, floating roller peel, pull-off strength and water absorption and frost resistance. The results confirm the possibility of using the radiator heaters on polyurethane adhesive with heat diffusers for heating interiors and in protection systems against ice and snow.

Autorzy dziękują Panom z firmy Sika Poland – Andrzejowi Burcekowi, Rafałowi Siwkowi, Wojciechowi Ziemińskiemu i Kamilowi Psykowi za przygotowanie próbek i udostępnienie przemysłowego laboratorium w Krakowie i Warszawie

BADANIA CZASU POGŁOSU WNETRZA KAPLICY NIEPOKALANEGO POCZĘCIA NAJŚWIĘTSZEJ MARI PANNY W WARSZAWIE

Michał MARCHACZ*, Antonina ŻABA

Wydział Budownictwa, Politechnika Śląska, ul. Akademicka 5, 44-100 Gliwice

Streszczenie: W artykule przedstawiono badania pogłosowości wnętrza zabytkowej kaplicy Niepokalanego Poczęcia Najświętszej Maryi Panny w Warszawie, nazywanej również *Res Sacra Miser* (ubogi jest świętością). Celem przeprowadzonych pomiarów było określenie podstawowych parametrów akustycznych wnętrza (w tym czasu pogłosu) oraz próba określenia jakości akustycznej. Pomiary czasu pogłosu prowadzone były metodą zanikową przy wykorzystaniu źródła dźwięku generującego szum różowy. Czas pogłosu dla wnętrza niewypełnionego słuchaczami wyniósł 2,11 s (2,31 s dla 500 Hz). Wypełnienie wnętrza słuchaczami wpłynęło pozytywnie na pogłosowość poprzez skrócenie czasu pogłosu we wnętrzu (preferowany zakres dla muzyki wynosi 1,6-1,8 s). Poprawie ulegnie również w takim przypadku zrozumiałość mowy.

Słowa kluczowe: *Res Sacra Miser* – Warszawa, akustyka wnętrz, czas pogłosu, architektura zabytkowa.

1. Wprowadzenie

Rektorska kaplica Niepokalanego Poczęcia Najświętszej Maryi Panny w Warszawie jest bardzo interesującym, ze względu na historię i formę, zabytkiem stolicy. Zlokalizowana jest przy Krakowskim Przedmieściu 62 w gmachu Warszawskiego Towarzystwa Dobroczynności. Na jego elewacji znajduje się motto Towarzystwa *Res Sacra Miser* (Ubogi jest świętością), dlatego tradycyjnie, chociaż formalnie niesłusznie, kaplica nazywana jest kościołem pod tym wezwaniem. Gmach Towarzystwa, w swojej obecnej formie, został zrealizowany w roku 1820 jako przebudowa obiektów należących do pałacu Kazanowskich. Autorem projektu był architekt Antonio Corazziego (1792-1877). Uszkodzony w czasie II wojny światowej budynek wyremontowano i wpisano do Rejestru Zabytków w roku 1965. Obecnie w kaplicy prowadzone są badania siedemnastowiecznych fresków, które zachowały się pod warstwami kolejnych przemalowań.

Wnętrze kaplicy, zbudowane na planie wydłużonego prostokąta (6,51×16,56 m), przykryte jest sklepieniem kolebkowym. Wysokość pomieszczenia wynosi około 11 m. Obiekt jest dostępny z Krakowskiego Przedmieścia oraz parteru i piętra budynków Centrum Caritasu Archidiecezji Warszawskiej (dawnego pałacu Kazanowskich) (rys. 1). Nad wejściem do kościoła znajduje się głęboki chór muzyczny, na którym stoją organy. Prowadzą do niego dwie empory, które zrealizowano w nietypowej dla obiektu sakralnego konstrukcji. Składa się ona ze wsporników i balustrad

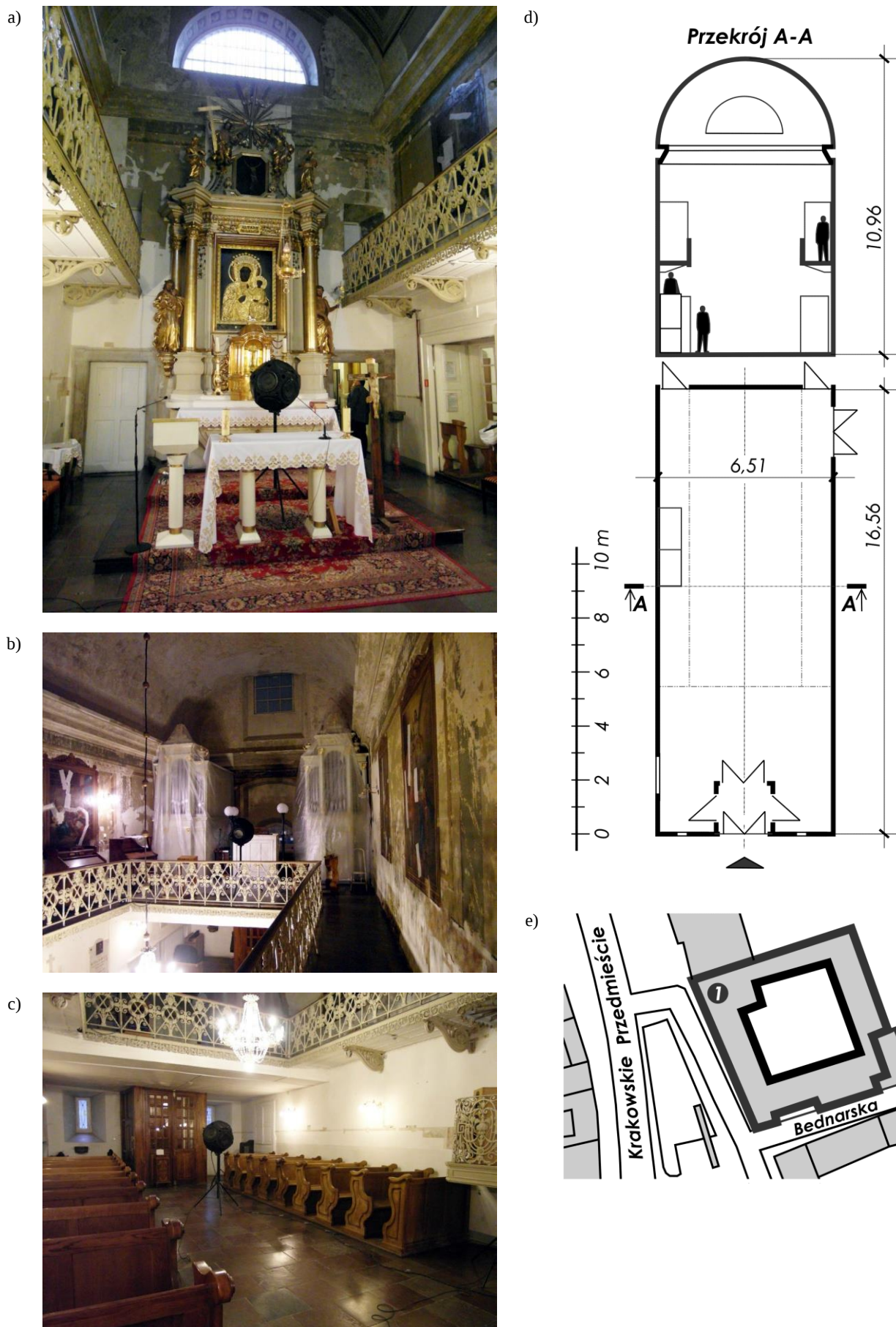
żeliwnych oraz płyt z desek i listew (rozwiązanie typowe dla balkonów w XIX wieku). Krawędzie chóru i empor oznaczono na rysunkach rzutu kaplicy szarą linią dwupunktową (rys. 1 i 2a i b). W przypadku rzutu wykonanego na poziomie chóru i empor zastosowano linię czarną ciągłą (rys. 2 c).

Obiekt ma skromny wystrój. Składają się na niego freski sklepienne i ściennie, epitafia i kamienna posadzka. Na wyposażenie kaplicy składają się drewniane: ołtarz, stół liturgiczny, ambona, ławki (okresowo również dostawiane składane krzesła), konfesjonał, organy oraz dwa kryształowe żyrandole. Na szkicach naniesiono jedynie te elementy wyposażenia, które są ważne ze względu na lokalizację sprzętu badawczego.

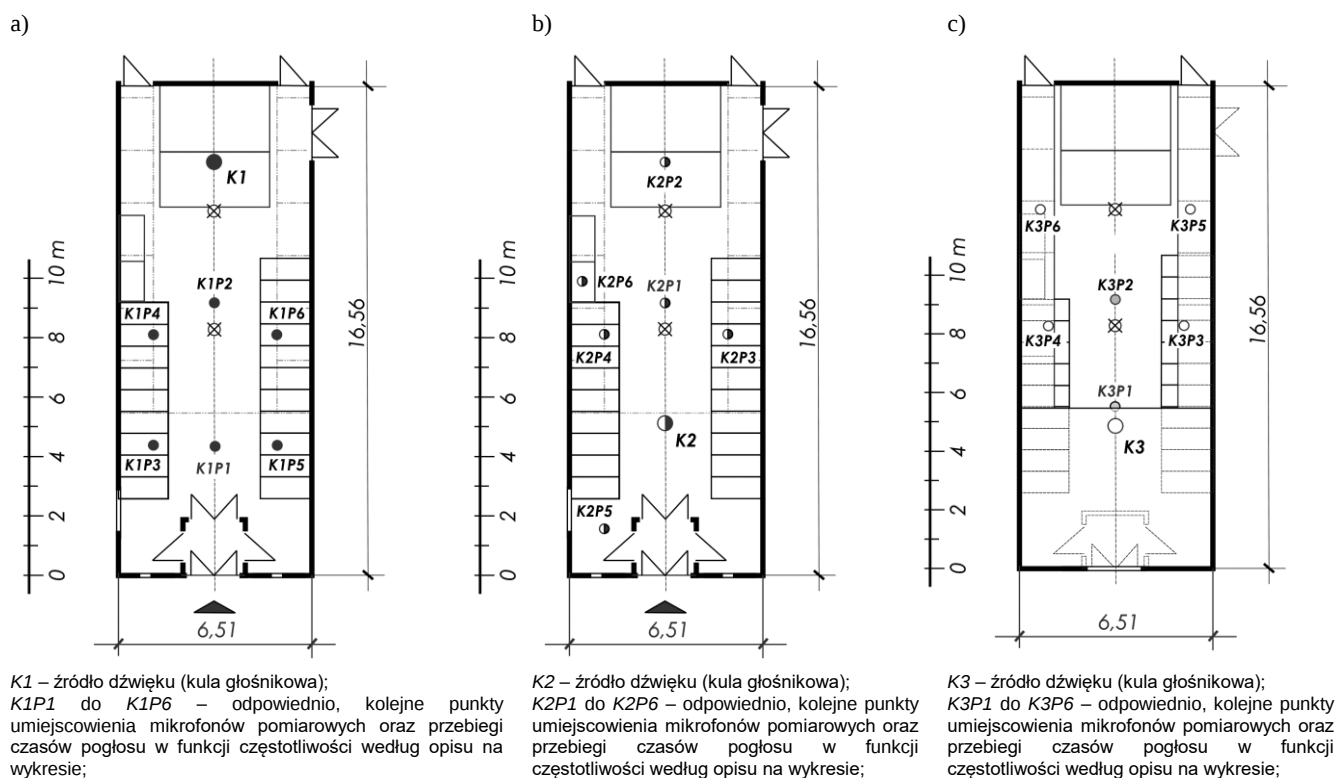
2. Metodyka prowadzonych pomiarów oraz uzyskane wyniki

Wytyczne zawarte w PN-EN ISO 3382-1:2009 *Akustyka. Pomiar parametrów akustycznych pomieszczeń. Część 1: Pomieszczenia specjalne* oraz PN-EN ISO 3382-2:2010 *Akustyka. Pomiar parametrów akustycznych pomieszczeń. Część 2: Czas pogłosu w zwyczajnych pomieszczeniach* stanowiły podstawę prowadzonych działań badawczych.

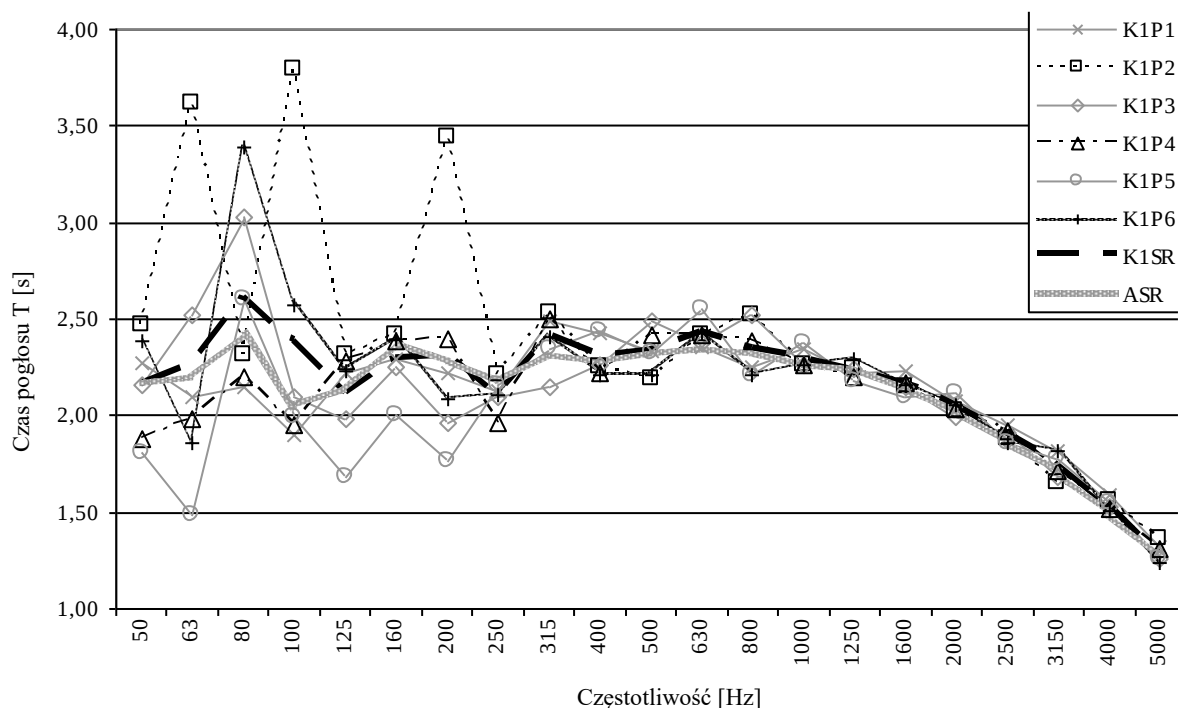
* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: Michal.Marchacz@polsl.pl



Rys.1. Wnętrze kaplicy Niepokalanego Poczęcia Najświętszej Maryi Panny w Warszawie: a) widok na ołtarz, b) widok na organy, c) widok na wejście, d) szkic wnętrza – przekrój i rzut (z wyposażenia pokazano jedynie ambonę), e) lokalizacja kaplicy, opracowanie na podstawie (WIG Mapa szczegółowa 1:25 000)

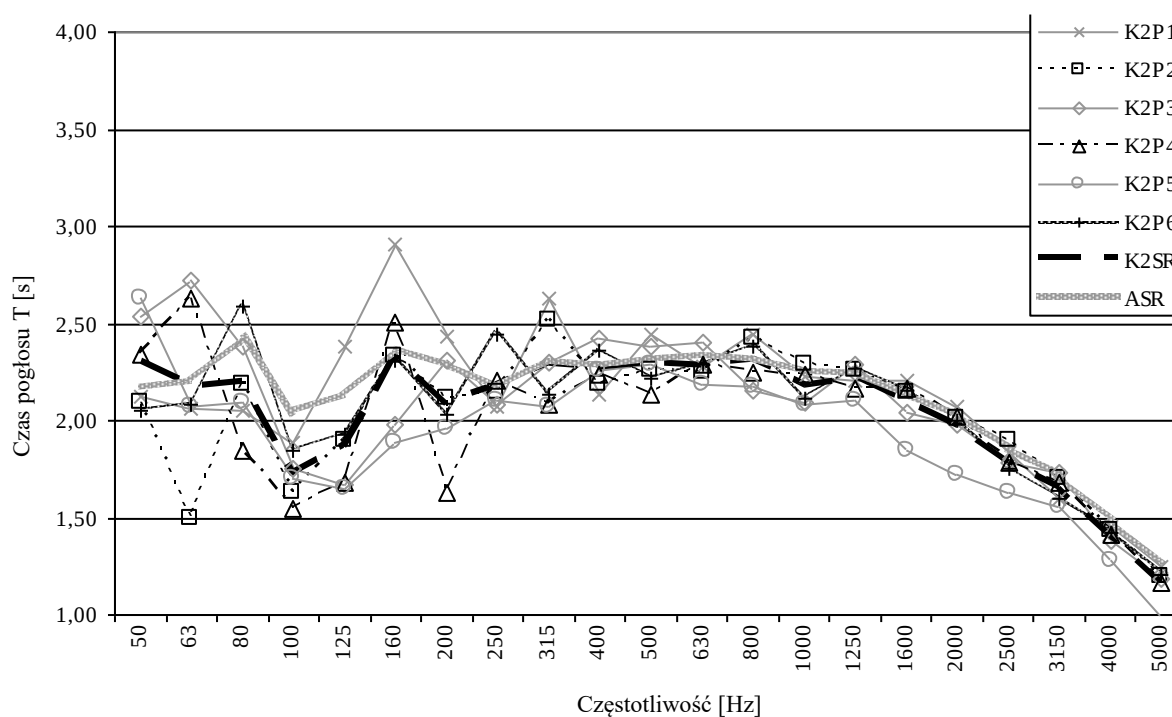


Rys. 2. Lokalizacja sprzętu pomiarowego w czasie badań akustycznych kaplicy przy położeniu głośnika w punkcie: a) K1, b) K2, c) K3



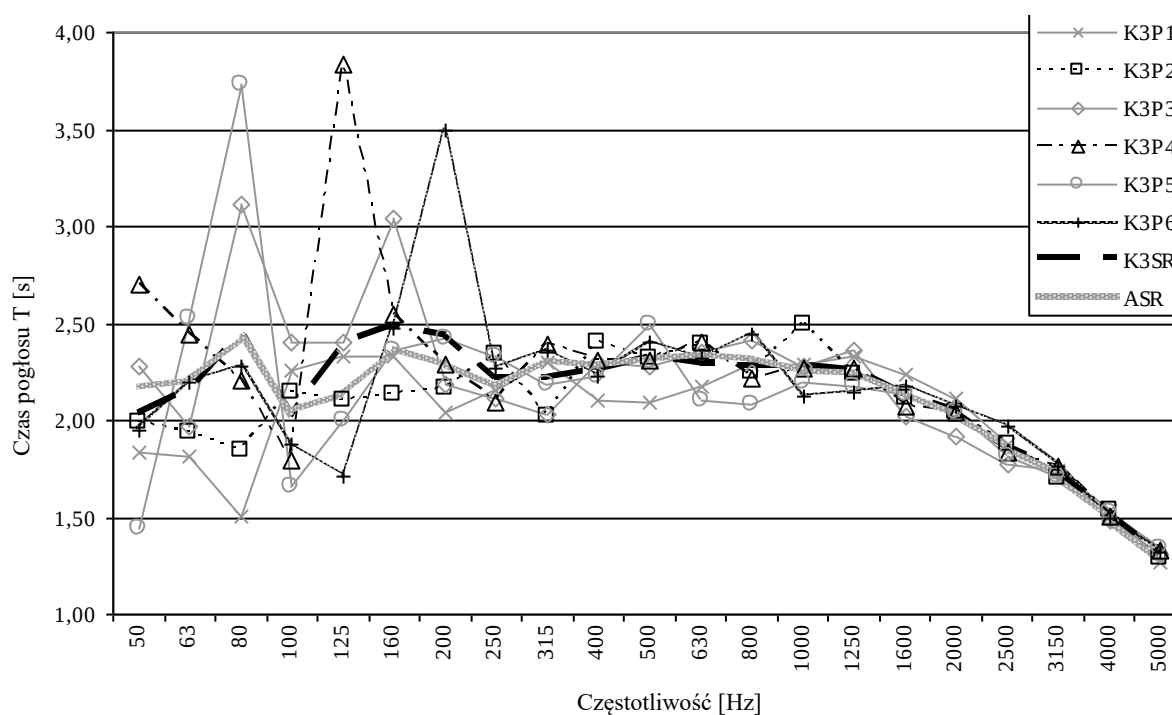
K1SR – średnia z pomiarów dla K1P1 do K1P6,
ASR – średnia z wszystkich pomiarów (K1P1 do K3P6)

Rys. 3. Wykres czasu pogłosu w kolejnych punktach pomiarowych w funkcji częstotliwości w punkcie K1, w czasie pomiaru monitorowano temperaturę T oraz wilgotność H powietrza wewnątrz pomieszczenia, gdzie średnia z danego badania wyniosła: $T = 17,2$ °C, $H = 46,0\%$



K2SR – średnia z pomiarów dla K2P1 do K2P6,
ASR – średnia z wszystkich pomiarów (K1P1 do K3P6)

Rys. 4. Wykres czasu pogłosu w kolejnych punktach pomiarowych w funkcji częstotliwości w punkcie K2, w czasie pomiaru monitorowano temperaturę T oraz wilgotność H powietrza wewnątrz pomieszczenia, gdzie średnia z danego badania wyniosła: $T = 17,2^{\circ}\text{C}$, $H = 45,6\%$



K3SR – średnia z pomiarów dla K3P1 do K3P6,
ASR – średnia z wszystkich pomiarów (K1P1 do K3P6)

Rys. 5. Wykres czasu pogłosu w kolejnych punktach pomiarowych w funkcji częstotliwości w punkcie K3, w czasie pomiaru monitorowano temperaturę T oraz wilgotność H powietrza wewnątrz pomieszczenia, gdzie średnia z danego badania wyniosła: $T = 17,3^{\circ}\text{C}$, $H = 45,2\%$

Do wyznaczenia czasu pogłosu użyto metody tak zwanego szumu przerywanego. Część nadawczą stanowiła kula głośnikowa o dookólnej charakterystyce propagacji dźwięku wraz z wzmacniaczem i generatorem szumu różowego. Część odbiorczą stanowił miernik całkujący klasy pierwszej, typu Svan 958 wraz z osprzętem. Źródło dźwięku wytwarzało poziom ciśnienia akustycznego wystarczający do tego, aby krzywa zaniku rozpoczynała się przynajmniej 35 dB powyżej tła akustycznego w odpowiednim zakresie częstotliwości. Źródło dźwięku umieszczono we wnętrzu kaplicy w 3 różnych miejscach. Pierwsze dwa położenia znajdowały się w nawie kaplicy w poziomie parteru. Następnie kula głośnikowa została przeniesiona na chór muzyczny znajdujący się nad wejściem. Dla każdego umiejscowienia źródła dźwięku wytypowano sześć niezależnych punktów pomiarowych. Punkty te starano się rozmieścić pokrywając obszar całego pomieszczenia. Ponadto przy rozmieszczaniu punktów pomiarowych uwzględniono miejsca, takie jak empory (K3P3 do K3P6), ambona (K2P6) oraz miejsce pod chórem muzycznym (K2P5). Umieszczenie punktów pomiarowych dla każdej z pozycji kuli głośnikowej przedstawiono odpowiednio na rysunkach 2 a-c. W każdym punkcie pomiarowym dokonano sześciokrotnego powtórzenia pomiaru zaniku poziomów dźwięku w czasie.

Liczba oraz rozkład zarówno punktów umiejscowienia źródła dźwięku, jak i pozycji mikrofonów uwzględniał potrzebę zachowania odpowiednich, minimalnych odległości odpowiednio pomiędzy punktami odbioru i źródłem dźwięku, jeśli była taka możliwość. Wskazanie to stosowane było również celem zachowania stosownych odległości względem powierzchni odbijających. W przypadku punktu pomiarowego umiejscowionego na ambonie zachowanie tych odległości nie było możliwe ze względu na brak miejsca. Wyniki pomiarów poddano obróbce celem wyznaczenia czasu pogłosu. Przyjęto w opracowaniu czas pogłosu T20 (wyznaczony w oparciu o procedurę uwzględniającą spadek poziomu dźwięku o 20 dB) stanowiący w dalszej części podstawę do oceny pogłosowości wnętrza. W trakcie badania monitorowano temperaturę oraz wilgotność wnętrza.

3. Analiza wyników pomiarów

Wnętrze kaplicy rozpatrywanej pod kątem jej właściwości akustycznych scharakteryzowano najpierw przez przedstawienie w formie wykresów, zmierzonych czasów pogłosu. Przebieg charakterystyk częstotliwościowych czasów pogłosu dla kolejnych ustawień źródła dźwięku oraz kolejnych punktów pomiarowych jest bardzo zbliżony w zakresie częstotliwości średnich i wysokich co obrazuje odniesienie do krzywej ASR (czas pogłosu uśredniony ze wszystkich punktów pomiarowych) co pokazano na rysunkach 3-5. W zakresie częstotliwości niskich rozrzut zmierzonych wartości jest już większy. Uśrednione dla rozpatrywanego zakresu częstotliwości czasy pogłosu odnotowane w punktach pomiarów różnią się maksymalnie o 20% (najkrótszy wyniósł 1,92 s,

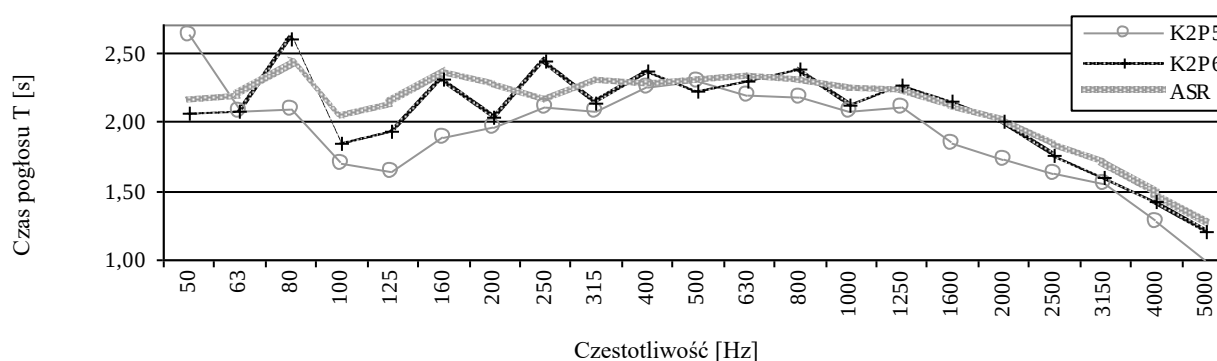
a najdłuższy 2,36 s). Odchylenie standardowe dla próby przyjętej jako zbiór punktów pomiarowych wynosi jedynie 0,1. Należy zauważyć, iż również czas pogłosu zmierzony w punktach pomiarowych zlokalizowanych na znajdujących się w obiekcie nietypowych emporach rozmieszczonych wzdłuż nawy kaplicy nie odbiega od umownej średniej dla rozpatrywanego wnętrza. Różnica wartości średniej czasu pogłosu dla punktów odpowiadających pierwszemu ustawieniu źródła dźwięku względem pomiaru w punktach jak dla trzeciego ustawienia źródła dźwięku (2 punkty pomiarowe w nawie, 4 punkty na emporach) wynosi zaledwie 0,03 s. Punkt pomiarowy K2P5 został umieszczony w nawie pod chórem znajdującym się nad głównym wejściem o kaplicy. Miejsca takie może cechować odmienna charakterystyka akustyczna, co związane jest na przykład z możliwością powstawania dodatkowych zjawisk akustycznych (na przykład rezonans, zwielokrotnienie odbić fali dźwiękowej) związanych z zawartością przestrzeni i układem geometrycznym rozpatrywanego miejsca. Dostępna literatura oraz zalecenia metodyczne zawarte w PN-EN ISO 3382-1:2009 zalecają kontrolowanie również tego typu miejsc. Charakterystyka częstotliwościowa czasu pogłosu w rozpatrywanym punkcie ma podobny kształt jak krzywa ASR (tab. 1, rys. 6). Jednak czasy pogłosu przyjmują niższe wartości. Jest to widoczne zwłaszcza dla częstotliwości wysokich, gdzie wartości czasu pogłosu odbiegają od uzyskanych wyników w pozostałych punktach pomiarowych. Charakterystyka pogłosowa w punkcie pomiarowym K2P6 umiejscowionym na ambonie również nie odbiega od średniej ASR (tab. 1, rys. 6).

Rozpatrując rozkład czasu pogłosu w kontekście rozmieszczenia poszczególnych punktów pomiarowych warto zauważyć bardzo dobrą równomierność jego rozkładu wzdłuż osi głównej budynku (tab. 1, rys. 7). Odchyłki od umownej średniej czasu pogłosu (TSR) we wskazanych punktach pomiarowych są niewielkie, zarówno dla wartości uśrednionych (TSRWP) jak i odczytanych dla częstotliwości 500 Hz (TWP500).

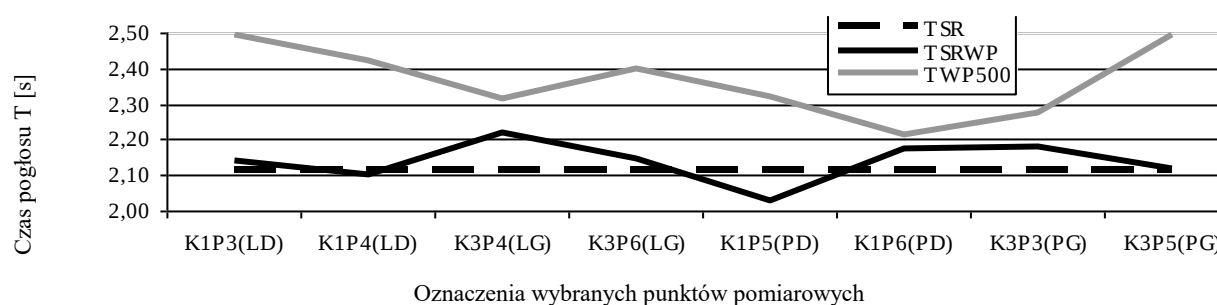
Uśredniony czas pogłosu uzyskany dla rozpatrywanego wnętrza wyniósł 2,11 s. Czas odczytany dla częstotliwości 500 Hz – 2,31 s. Wynik uzyskano przy wnętrzu niewypełnionym słuchaczami. Optymalna, zalecana wartość czasu pogłosu jest sprawą indywidualną, uzależnioną od czynników związanych przede wszystkim z kubaturą obiektu (rozpatrywanego wnętrza) oraz jego przeznaczeniem. Zwykle występuje pewien dysonans pomiędzy parametrami uznawanymi za dobre do odtwarzania muzyki (zwykle dłuższy czas pogłosu) a parametrami optymalnymi do przekazywania słowa mówionego (zwykle potrzeba skrócenia czasu pogłosu). Można przyjąć, że czas pogłosu dla pomieszczenia o kubaturze około 1100 m³ powinien zawierać się w przedziale około 1,6-1,8 s (Long, 2006). Przytoczony zakres czasu pogłosu jest stosowny, na przykład dla odsłuchu muzyki organowej, często wykorzystywanej we wnętrzach kościelnych w trakcie ceremonii liturgicznych. Zgodnie z zaleceniami spotykanymi w literaturze ten typ muzyki wymaga dłuższych czasów

Tab. 1. Zestawienie wybranych parametrów oceny akustycznej rozpatrywanego wnętrza, wykres przebiegu czasu pogłosu w funkcji częstotliwości dla wybranych punktów, wykres średnich czasów pogłosu w zależności od umiejscowienia punktu pomiarowego

Wybrane parametry oceny jakości akustycznej				Uwagi
f (Hz)	STI	C ₈₀	D ₅₀	f (Hz) – częstotliwość
125	-	-1,67	0,28	STI – wskaźnik zrozumiałości mowy wyznaczony w oparciu (Nowoświat, 2007) C ₈₀ – wskaźnik klarowności (Springer, 2006) D ₅₀ – wskaźnik wyrazistości (Springer, 2006)
250	-	-1,78	0,27	
500	0,49	-2,13	0,26	
1000	-	-1,98	0,26	K2P5, K2P6, ASR - opis jak w tabeli 3; K1P3(LD), K1P4(LD), K3P4(LG), K3P6(LG), – punkty umiejscowione po lewej stronie, gdzie: D – na dole, G – na emporach i chórze;
2000	0,50	-1,38	0,29	
4000	-	0,42	0,37	K1P5(PD), K1P6(PD), K3P3(PG), K3P5(PG), – punkty umiejscowione po prawej stronie, gdzie: D – na dole, G – na emporach i chórze;



Rys. 6. Wybrane wykresy czasów pogłosu w funkcji częstotliwości



Rys. 7. Czasy pogłosu w punktach pomiarowych w zależności od umiejscowienia ich we wnętrzu kaplicy

pogłosu niż w przypadku muzyki romantycznej, klasycznej czy operowej. W przypadku rozpatrywanego wnętrza można zauważyć, że zwiększenie chłonności akustycznej w związku z obecnością słuchaczy, może skorygować parametry pogłosowe w kierunku preferowanego zakresu czasu pogłosu. Obecność słuchaczy wpłynąć może również na zmianę temperatury oraz wilgotności w rozpatrywanym wnętrzu. Doświadczenia autorów z laboratoryjnych badań akustycznych w komorze pogłosowej nie wskazują na istotnie zauważalny wpływ powyższych parametrów na uzyskiwane wartości czasu pogłosu. Współczynnik klarowności C₈₀ przyjmuje wartości ujemne poza najwyższymi częstotliwościami. Może się to przekładać

na mniejszą rozróżnialność poszczególnych dźwięków i ich źródeł. Tak przyjęte założenia mogą wskazywać na akustykę rozpatrywanego wnętrza jako odpowiednio dostosowaną do jego przeznaczenia. Oprócz odsłuchu muzyki innym elementem obrządków religijnych jest słowo mówione. Cecha określana jako wyrazistość (mowy) D₅₀ jest niewielka. Wskaźnik transmisji mowy STI, wyznaczony na podstawie czasu pogłosu w oparciu o przybliżoną formułę (Nowoświat, 2007), odpowiadający wyrazistości mowy dla niewypełnionego wnętrza przyjmuje wartości około 0,5.

4. Wnioski

Podsumowując należy stwierdzić, że:

1. Średni czas pogłosu pustego wnętrza wynoszący około 2,11 s nie odbiega znacząco od preferowanego zakresu dla muzyki.
2. Wypełnienie wnętrza słuchaczami skróci czasu pogłosu (zalecany zakres to około 1,6-1,8 s).
3. Uzyskane wartości wskaźnika STI na poziomie 0,5 wskazują na dostateczną zrozumiałość mowy we wnętrzu. Skrócenie czasu pogłosu w wyniku zapelnienia wnętrza słuchaczami wpłynie na zwiększenie zrozumiałości mowy we wnętrzu.

Literatura

- Long M. (2006). *Architectural Acoustics*. Elsevier Academic Press, Burlington.
- Nowoświat A. (2007). Model logarytmiczny wyznaczania wskaźnika zrozumiałości mowy. W: *Materiały z konferencji Fizyka Budowli w Teorii i Praktyce*, tom 2, Łódź, 2007, 215-218.
- Springer Handbook of Acoustics (2006): Charter 9, 308-310. e-ISBN: 0-387-30425-0.
- WIG Mapa szczegółowa 1:25 000. (data dostępu: 1.07.2016).

INVESTIGATIONS OF THE REVERBERATION TIME IN INTERIOR OF THE IMMACULATE CONCEPTION OF THE BLESSED VIRGIN MARY'S CHAPEL IN WARSAW

Abstract: Paper presents reverberation time investigations for interior of the monumental chapel of the Immaculate Conception of the Blessed Virgin Mary's in Warsaw, also called Res Sacra Miser (miserable is sainthood). Aim of measurements was determining acoustic parameters of interior (incl. reverberation time), and attempt to determines acoustic quality. Measurements were done with using decay method and sound source generating pink noise. Reverberation time for empty interior was 2.11 s (2.31 s for 500 Hz). Interior's filling by listeners will have positive effect on reverberation time by his shortening (optimum range for music is 1.6-1.8 s for this interior), also speech intelligibility will be better.

GRUNTOWY POWIETRZNY WYMIENNIK CIEPŁA TYPU ŻWIROWEGO JAKO PRZYKŁAD WYKORZYSTANIA OZE PRZY BUDYNKACH JEDNORODZINNYCH – EFEKTY ENERGETYCZNE I EKONOMICZNE

Justyna TOPOLÁŃSKA*, Dorota Anna KRAWCZYK

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45 A, 15-351 Białystok

Streszczenie: Liczne działania propagujące stosowanie rozwiązań proekologicznych, umożliwiających oszczędzanie energii i ochronę środowiska naturalnego oraz powiązane z nimi przepisy prawne powodują, że coraz częściej stosowane są instalacje wykorzystujące OZE zarówno w przypadku dużych budynków biurowo-administracyjnych czy mieszkalnych, jak w domach jednorodzinnych. Jednym z zyskujących na popularności rozwiązań jest gruntowy powietrzny wymiennik ciepła (GPWC), który wstępnie przygotowuje powietrze, nawiewane następnie do pomieszczeń. Zimą powietrze jest ogrzewane, latem zaś schładzane. Gruntowe wymienniki ciepła występują w dwóch podstawowych rodzajach: przeponowym i bezprzeponowym, oraz kilku typach: żwirowy, płytowy, rurowy, glikolowy oraz grzebieniowy, różniących się sposobem wymiany ciepła z gruntem. Każde z tych rozwiązań ma swoje wady i zalety. W artykule omówiono instalację ze żwirowym GPWC wykonaną przy budynku jednorodzinnym zlokalizowanym w województwie podlaskim. Celem badań była ocena celowości stosowania wymienników żwirowych w okresie przejściowym, czyli jesienią (lub wiosną). Zaprezentowano wyniki pomiarów powietrza po przejściu przez wymiennik w zależności od temperatury zewnętrznej i dokonano oceny systemu pod kątem efektywności energetycznej i ekonomicznej.

Słowa kluczowe: ogrzewanie powietrzne, koszty eksploatacyjne, efektywność, gruntowe powietrzne wymienniki ciepła (GPWC).

1. Wprowadzenie

W ostatnich latach widoczne są starania, by zminimalizować energochłonność budynków. Uzyskanie tego efektu jest możliwe przez ograniczenie strat ciepła przez przenikanie. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury i Rozwoju (Dz.U. 2015 poz. 376) narzuca konieczność zmniejszania wartości współczynników przenikania ciepła przez przegrody budowlane w budynkach nowych. Jednakże w bilansie całkowitym dużą rolę odrywa wentylacyjna strata ciepła, a ta może być zmniejszana przez stosowanie wentylacji mechanicznej z odzyskiem ciepła, bądź dodatkowo przez wykorzystanie gruntowych powietrznych wymienników ciepła. W artykule zaprezentowano wyniki pomiarów przeprowadzonych w okresie przejściowym, których celem było oszacowanie efektywności pracy wymiennika żwirowego.

2. Podstawowe informacje o wymiennikach gruntowych

GPWC jest instalacją umożliwiającą wstępne

ogrzanie/schłodzenie powietrza wentylacyjnego poprzez jego kontakt (pośredni lub bezpośredni) z gruntem. Funkcjonowanie GPWC bazuje na fakcie, że temperatura gruntu na głębokości kilku metrów jest niemal stała w ciągu roku. Przy wymiennikach często stosuje się izolację termiczną w celu symulowania głębszego posadowienia i zniwelowania wpływu dobowych skoków temperatury zewnętrznej.

2.1. Rodzaje GPWC

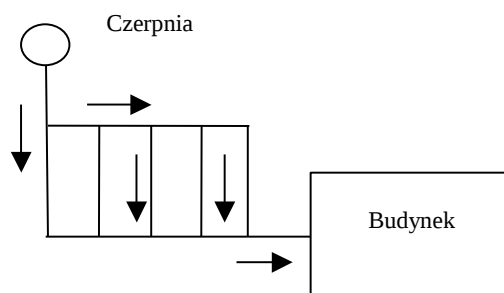
Wymienniki gruntowe dzielą się na dwa podstawowe rodzaje: przeponowe i bezprzeponowe, przy czym można wyróżnić cztery rozwiązania konstrukcyjne (www.gwc.com.pl, www.grzebieniowygwc.pl):

- żwirowy,
- rurowy,
- płytowy,
- grzebieniowy.

Bardzo popularnym rozwiązaniem jest wymiennik rurowy. Istotą jego funkcjonowania jest przeponowa wymiana ciepła przez ściankę rury, z gruntem. Wymiennik gruntowy stanowią rury z tworzyw sztucznych, ułożone przynajmniej 0,3 m poniżej głębokości przemarzania

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: justynatopolanska@wp.eu

(Rosiński, 2012). Rury można układać, jako odcinek prosty bądź jako pierścieniowe lub meandrowe. Najpopularniejszym rozwiązaniem, z uwagi na zmniejszenie strat ciśnienia, jest układ Tichelmanna (rys. 1).



Rys. 1. Schemat GPWC rurowy w układzie Tichelmanna

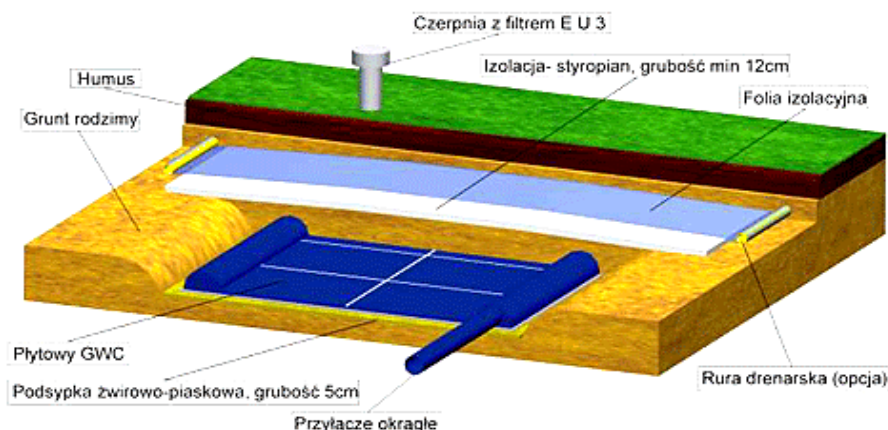
Niezwykle istotną kwestią jest zapewnienie możliwości odprowadzenia kondensatu, stąd też całość systemu należy ułożyć ze spadkiem w kierunku studzienki. Ponadto zaleca się wykonywanie wymienników z rur z warstwą antybakteryjną, tak aby uniemożliwić rozwój drobnoustrojów chorobotwórczych.

Zalecaną prędkością przepływu w rurach wymiennika jest 2-4 m/s (Informacja Techniczna Rehau, 2013). Niższa prędkość niż 1 m/s wiąże się z gorszą wymianą ciepła, zaś przy prędkości powyżej 4 m/s znacznie skraca się czas przepływu czynnika przez rurę. Główną zaletą takiego rozwiązania jest możliwość montażu nawet przy wysokim stanie wód gruntowych, z kolei najważniejsza wada – brak regulacji wilgotności w zimie. Szerzej wady i zalety tego typu wymiennika, jak i innych, omówiono w pracach Topolańskiej i Krawczyk (2014 a i b).

Temat GPWC typu rurowego od lat jest podejmowany w licznych publikacjach światowych, jak i krajowych. Bojic i inni (1997) przeprowadzili symulację, w wyniku której okazało się, że zastosowanie GPWC rurowego jest bardziej efektywne i mniej kosztowne w lecie niż w zimie. De Paepe i Janssens (2003) zwrócili uwagę na fakt, że dotychczasowe badania i symulacje nie dają inżynierom praktykom możliwości swobodnego doboru parametrów wymienników. Autorzy opracowali metodę

obliczeniową i graficzną doboru wymienników rurowych. Interesujące efekty badań przedstawił Badescu (2007). Porównując różne sposoby ogrzewania domów pasywnych: konwencjonalne, wykorzystujące pompę ciepła oraz z gruntowym wymiennikiem ciepła, stwierdził że najkorzystniejsza jest pompa ciepła, gdyż nakłady inwestycyjne zwróciłyby się już po 3-10 latach, w zależności od źródła energii konwencjonalnej. Z kolei GPWC to dobre rozwiązanie, gdy czas pracy jest dłuższy niż 20-30 lat, jednak inwestycyjnie jest znacznie korzystniejszy niż pompa ciepła. W Genewie przeprowadzono badania nad GPWC w warunkach klimatu Europy Środkowej (Hollmuller i Lachal, 2014). Opracowany model numeryczny umożliwia zmiany wartości parametrów, na przykład prędkości i kierunku przepływu powietrza czy niejednorodności gleby. Walidacja modelu długoterminowymi badaniami potwierdziła jego poprawność. Szymański i Wojtkowiak (2007) opracowali model obliczeniowy rurowego wymiennika ciepła z pewnymi uproszczeniami, jednak uwzględniający zmiany temperatury powietrza zewnętrznego i zmiany temperatury gruntu w sezonie grzewczym. Uproszczony model obliczeniowy GPWC pozwolił na określenie efektywności działania wymiennika rurowego (Szymański i Wojtkowiak, 2007 i 2008). Możliwość zastosowania GPWC do chłodzenia pomieszczeń hotelowych została opisana przez Szeszycką i Kostkę (2014). Przy przygotowywaniu powietrza najbardziej energochłonnym procesem jest regulacja jego wilgotności. Wymienniki rurowe jedynie latem osuszają powietrze, natomiast zwirowe latem osuszają, zaś zimą – nawilżają. W analizowanym przypadku stwierdzono, że wymiennik zwirowy może zapewnić 35% oszczędności przy stałym wydatku powietrza i 50% przy połowie wydatku nominalnego. Zastosowanie układu ze zmiennym strumieniem powietrza i z GPWC może przynieść nawet 80% redukcji całorocznych kosztów pracy instalacji.

Wymienniki płytowe są wymiennikami bezprzepływowymi. Powietrze przepływając pod płytami ma kontakt z warstwą podsypki zwirowej. Schemat budowy GPWC przedstawia rysunek 2.



Rys. 2. Schemat budowy GPWC płytowego (www.wymiennikgruntowy.pl)

Minimalna głębokość wykopu pod wymiennik to 0,7 m, należy jednak każdorazowo uwzględnić poziom wód gruntowych (powinien się znajdować poniżej poziomu posadowienia wymiennika). Wymiennik płytowy nie wymaga regeneracji, a opory przepływu są znacznie mniejsze niż przy GPWC żwirowym (www.gwc.com.pl). Dzięki temu, że ruch powietrza odbywa się ciągle, rozwój drobnoustrojów i grzybów jest niemożliwy. Jakość mikrobiologiczna powietrza jest potwierdzona badaniami Wojewódzkiej Stacji Epidemiologicznej w Opolu oraz Atestem PZH. Oprócz czystości powietrza uzyskuje się również regulację wilgotności zarówno w lecie, jak i zimą (www.wymiennikgruntowy.pl). Niestety, ten rodzaj GPWC jest wrażliwy na wody gruntowe i zajmuje większą powierzchnię niż żwirowy, który jest głębszy.

Wymiennik glikolowy jest konstrukcyjnie podobny do dolnego źródła ciepła dla gruntowych pomp ciepła. Pełni jednak inną funkcję – ogrzewa w zimie i ochładza w lecie powietrze pobierane do centrali wentylacyjnej. W kanale jest zamontowany dodatkowy wymiennik ciepła, umożliwiający zmianę parametrów temperatury powietrza. Rura z glikolem ma długość 120 do 150 m i średnicę 20-40 mm (www.gwc.com.pl). Okresy przejściowe są dobrym czasem na regenerację złoża (jesień dzięki opadom deszczu, a wiosna dzięki topnieniu śniegu i lodu). Pożądane jest osiągnięcie stabilizacji temperatury i wilgotności gruntu na poziomie ułożenia rur wymiennika (1,5-1,8 m pod powierzchnią terenu). GPWC glikolowy najlepiej sprawdza się przy wysokiej wilgotności gleby (www.hvacr.pl).

Wymiennik grzebienny jest najnowszym rozwiązaniem konstrukcyjnym. Chroniony jest zgłoszeniem patentowym. Jego nazwa odzwierciedla budowę – tworzą go dwa „grzebienie” (rys. 3), doprowadzający i odprowadzający powietrze. „Grzebienie” są wykonane z rur karbowanych, z nich powietrze przenika do warstwy żwiru, gdzie zachodzi wymiana ciepła. Zalecana głębokość posadowienia to 1 m (www.grzebiennygwc.pl). Wymiennik reguluje wilgotność, poprawia mikrobiologiczną jakość powietrza, charakteryzuje się mniejszą wrażliwością na wody gruntowe.

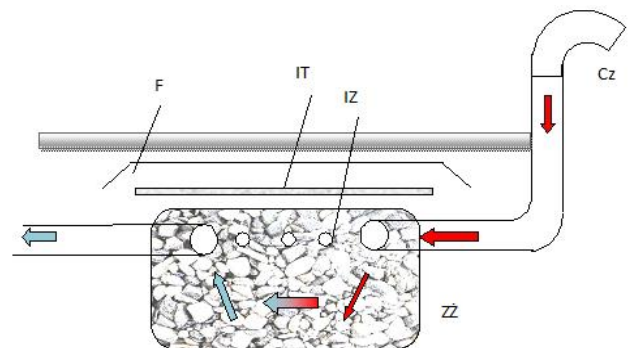


Rys. 3. Montaż GPWC grzebiennego (www.grzebiennygwc.pl)

2.2. GPWC typu żwirowego

GPWC jest najstarszym typem wymiennika w Polsce. Jego rozwiązanie techniczne jest chronione patentem z 1980 roku, zgłoszonym przez pracowników Politechniki Wrocławskiej. Pierwszym budynkiem użyteczności publicznej, wyposażonym w wymiennik żwirowy, było Kieleckie Centrum Biznesu, aktualnie biurowiec Exbud-Skanska. Pomieszczenia biurowe, restauracje, sale wystawowe są obsługiwane przez kilka wymienników żwirowych i jeden rurowy. Łączny strumień objętości powietrza wynosi 137 000 m³/h (www.taniaklima.pl). Pierwsze 6 lat eksploatacji wszystkie zastosowane w Kielcach rozwiązania umożliwiające oszczędzanie energii (GPWC to tylko część inwestycji) podlegały monitoringowi. Podsumowanie wyników zostało opisane przez Jędrzejewskiego (2003). Okazało się, że dla temperatury zewnętrznej około -19°C - -20°C, za złożem uzyskiwano temperaturę do 0°C w przypadku wyłączenia na okres nocny (umożliwienie regeneracji złoża) i -5°C przy pracy układu bez przerwy. Z kolei latem przy temperaturze powietrza atmosferycznego +24°C do +26°C, następowało ochłodzenie do średnio +14°C (od +12°C do +16°C). Takie temperatury dają możliwość chłodzenia budynku bez stosowania tradycyjnej klimatyzacji. Według szacunków, wymienniki dostarczyły 486 kW mocy grzewczej lub chłodniczej, co przekłada się rocznie na zaoszczędzenie 105,7 t węgla.

Najważniejszym elementem wymiennika jest złoże żwirowe (rys. 4), wykonane ze żwiru o granulacji 20-80 mm, w zależności od źródła informacji. Powietrze, przepływając z prędkością 0,1 m/s, wymienia ciepło ze żwirem (www.linkair.pl). Dochodzi również do regulacji wilgotności powietrza. Ponadto jego jakość mikrobiologiczna ulega znacznej poprawie. Ilość drobnoustrojów i ich chemicznych markerów jest znacznie mniejsza po przejściu przez złoże, co potwierdzają dwukrotne badania złoża w Kielcach (Szponar i Iwanicka, 2006).



Rys. 4. Schemat GPWC żwirowego. Oznaczenia: Cz – czerpnia terenowa, F – folia, IZ – instalacja zraszająca, IT – izolacja termiczna, ZZ – złoże żwirowe

Najważniejszymi wadami tego rozwiązania są: wrażliwość na wody gruntowe (ryzyko zapachu stęchlizny) i konieczność regeneracji złoża, by pracowało ono bardziej efektywnie. Z kolei zalety, to łatwość wykonania z dostępnych materiałów, regulacja

wilgotności, wieloletnia bezawaryjna praca (Topolańska i Krawczyk, 2014a). Podsumowaniem 20-letniej eksploatacji złóż żwirowych przy Politechnice Wrocławskiej był artykuł Beslera i in. (2005). Stwierdzono, że zimą mogą one zapewnić nawet 50% ciepła wentylacyjnego, a latem zastąpić klimatyzację. Nakłady energetyczne wiążą się jedynie z pokonaniem oporów przepływu, a ich stosunek do uzyskanej energii wynosi 1:40. Przy posadowieniu GPWC pod chodnikiem, budynkiem czy na powierzchni terenu uzyskuje się niewiele mniejsze sprawności energetyczne. Ponadto odniesiono się do stwierdzenia, że przy stosowaniu wymienników żwirowych w powietrzu wentylacyjnym pojawia się radon – badania doświadczalne zaprzeczyły prawdziwości tego stwierdzenia. W ramach kontynuowania badań na Politechnice Wrocławskiej rozważano metody zwiększenia efektywności pozyskiwania energii z gruntu przy wykorzystaniu złóż żwirowych. Przykładowa instalacja została również opisana przez Beslera i in. (2011): w układzie dwóch wymienników równoległych, jeden jest regenerowany powietrzem usuwanym z pomieszczeń wentylowanych, a drugi pracuje, a następnie role się odwracają. Uzyskano dobre wyniki. Cepiński i in. (2012) rozpatrywali nowatorskie systemy ogrzewania budynków. GPWC typu żwirowego zostałyby wykorzystane jako dolne źródło ciepła dla pompy ciepła typu powietrze/powietrze lub powietrze/woda. Analiza dotyczyła domku jednorodzinny o zapotrzebowaniu na ciepło 8 kW, zlokalizowanego we Wrocławiu. Punktem odniesienia była współpraca pompy ciepła z grzałką elektryczną jako dodatkowym źródłem ciepła. Stwierdzono, że dzięki współpracy z GPWC znacznie rośnie średnioroczny współczynnik wydajności cieplnej, maleje czas pracy sprężarki (wydłużenie jej żywotności), zauważalnie skraca się czas pracy pompy w trybie oszraniania parowacza, nie ma konieczności stosowania grzałki elektrycznej. Oszczędności energii w ciągu roku, przy uwzględnieniu kosztów pracy wentylatora, są mniejsze o 12-17%. Dokonano analizy możliwości zastosowania GPWC typu żwirowego do uzdatniania powietrza na potrzeby różnych pomieszczeń (Besler i in., 2015). Atutem GPWC typu żwirowego jest fakt, że w złożu, oprócz zmiany temperatury, zachodzi też nawilżanie lub osuszanie powietrza.

W celu dokładnego określenia rzeczywistych efektów energetycznych i ekologicznych stosowania poszczególnych konstrukcji wymienników gruntowych w różnych warunkach klimatycznych i rozwiązaniach technologicznych konieczne są dalsze badania urządzeń.

3. Opis badanego gruntowego wymiennika ciepła

GPWC typu żwirowego przygotowuje powietrze dla domku jednorodzinny położonego w Gielczynie. Złoże, o wymiarach 10×30 m i wysokości czynnej 1,1 m, powstało w 2011 roku. Powietrze jest doprowadzane do złoża 2 kanałami perforowanymi o DN 350, zaś odbierane 3 kanałami. Czerpnię terenową wykonano jako murowaną z żaluzjami drewnianymi (rys. 5).



Rys. 5. Czerpnia terenowa w Gielczynie (fot. J.Topolańska)

Instalacja wentylacyjna pobiera powietrze przechodzące przez wymiennik gruntowy przez cały rok. Wentylator typu R3G310-AL47-71 firmy EBM pracuje przy zmiennym strumieniu objętości powietrza wentylacyjnego, ale zachowując spręż wartości 50 Pa. Na podstawie charakterystyki wentylatora przyjęto wartości średnie dla poszczególnych okresów jako:

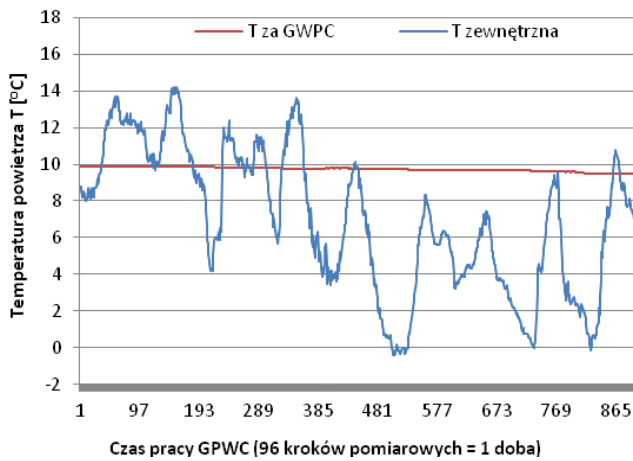
- strumień objętości powietrza wentylacyjnego w godzinach nocnych i rannych (22:00-7:00) wynosi 540 m³/h,
- strumień objętości powietrza wentylacyjnego w godzinach dziennych (7:00-16:00) wynosi 230 m³/h (mieszkańcy poza domem),
- strumień objętości powietrza wentylacyjnego w godzinach popołudniowych (16:00-22:00) wynosi 780 m³/h.

4. Metodyka i wyniki badań

Pomiędzy 23 października a 8 grudnia 2015 rejestrowano pomiary temperatury powietrza zewnętrznego oraz temperatury w dwóch równoległych punktach złoża (do obliczeń przyjęto wartość średnią). Zapis wartości pomiarowych odbywał się co 15 minut.

Pomiar temperatury powietrza realizowały czujniki typu KTY firmy AMK. Przekazują one sygnał do rejestratora przez podpięte przewody, a dokładność pomiaru wynosi 0,1°C. Sygnały z czujników zbierane były przez rejestrator firmy AMK, posiadający możliwość współpracy z 6 czujnikami, z zadanyim krokiem pomiarowym nawet 1 s.

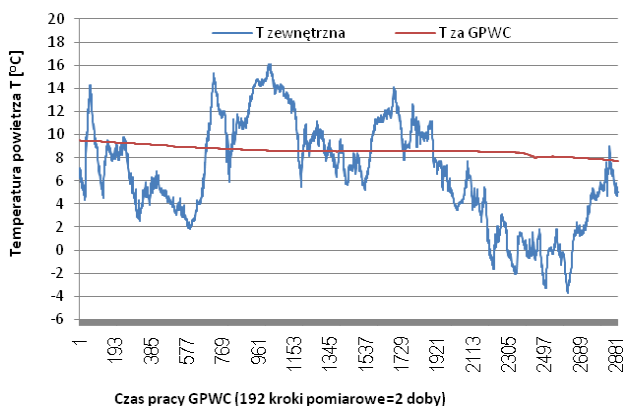
Pomiary w październiku 2015 obejmowały okres pomiędzy 23 a 31 dniem miesiąca. Średnia temperatura powietrza zewnętrznego w tym okresie wyniosła 6,97°C, zaś za GWPC – 9,73°C. Wykres temperatury dla rozpatrywanego okresu przedstawia rysunek 6.



Rys. 6. Wykres temperatury powietrza zewnętrznego i po przejściu przez GWPC w październiku 2015 roku

Ponieważ badania przeprowadzono w tak zwanym okresie przejściowym, gdy zaleca się korzystanie z dodatkowej czepni powietrza zewnętrznego z pominięciem wymiennika, zatem przyrosty temperatury nie są zbyt duże, niejednokrotnie dochodzi też do schłodzenia powietrza. Jest to efekt stabilnej temperatury za złożem żwirowym. GPWC niweluje dobowe skoki temperatury i jest odporne na zmiany temperatury. Na wykresie wyraźnie widać, że dochodziło do schładzania powietrza w wymienniku, ale przeważnie zachodziło ogrzewanie.

Następnie pomiary objęły cały listopad. Średnia temperatura powietrza zewnętrznego w tym okresie wyniosła 6,73°C, zaś za GWPC – 8,61°C. Wykres temperatury dla rozpatrywanego okresu przedstawia rysunek 7.

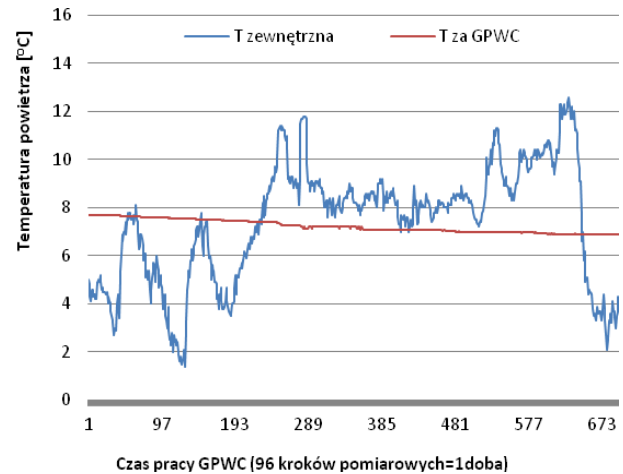


Rys. 7. Wykres temperatury powietrza zewnętrznego i po przejściu przez GWPC w listopadzie 2015 roku

Z wykresu widać, że skoki temperatury zewnętrznej nie mają wpływu na wartość temperatury za GPWC. Generalnie w przeciągu miesiąca temperatura powietrza opuszczającego wymiennik obniżyła się, jednak spadek ten jest stopniowy i nieznaczny.

Z kolei w grudniu pomiary trwały do 12:00 w dniu 08.12.2015 roku. Średnia temperatura powietrza zewnętrznego w tym okresie wyniosła 7,26°C, zaś za GPWC – 7,22°C. Wykres temperatury dla

rozpatrywanego okresu przedstawia rysunek 8. Temperatura za wymiennikiem nadal stopniowo się obniżała w wyrównany sposób. Ponieważ temperatury średnie były do siebie zbliżone – trudno oczekiwać znacznych zysków energii. Ponadto grudzień miał dość nietypową, wysoką średnią temperaturę, nie występowały momenty w ciągu doby z temperaturami ujemnymi.



Rys. 8. Wykres temperatury powietrza zewnętrznego i po przejściu przez GPWC w grudniu 2015 roku

4. Efekty zastosowania żwirowego GPWC

Strumień ciepła wymienionego w wymienniku gruntowym, można obliczyć z równania (1):

$$Q = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T \quad [\text{W}] \quad (1)$$

gdzie: Q jest mocą uzyskaną z GPWC w W, $\dot{m}$ jest strumieniem masy powietrza w kg/s, c_p jest ciepłem właściwym w J/kg·deg, $c_p = 1005 \text{ J/kg} \cdot \text{deg}$, a ΔT jest zmianą temperatury pomiędzy wlotem i wylotem wymiennika w deg.

Strumień masy powietrza można obliczyć na podstawie strumienia objętości powietrza:

$$\dot{m} = \frac{V \cdot \rho}{3600} \quad [\text{kg/s}] \quad (2)$$

gdzie: V jest strumieniem objętości powietrza przepływającego w GPWC w m^3/h , a ρ gęstością powietrza w kg/m^3 .

Aby określić ilość energii, uzyskaną z GPWC, należy wykorzystać wzór:

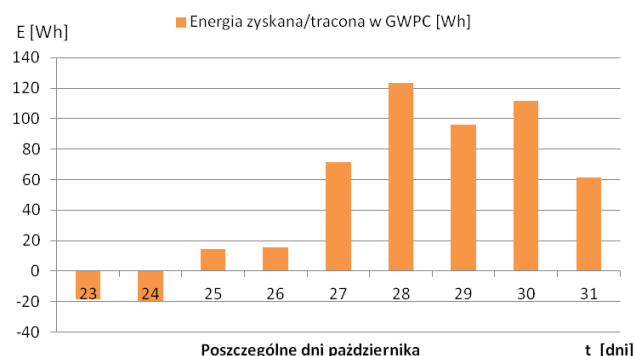
$$E = \sum Q \cdot \Delta t \quad [\text{Wh}] \quad (3)$$

gdzie: E jest energią uzyskaną z GPWC w Wh, a Δt przyjętym krokiem pomiarowy w h.

Wykorzystując wzory (1-3) oraz wyniki pomiarów z każdego okresu, wykonywanego z przyjętym krokiem pomiarowym (0,25 h) oszacowano zyski i straty energii w poszczególnych dobach, które widoczne są na rysunkach 9-11.

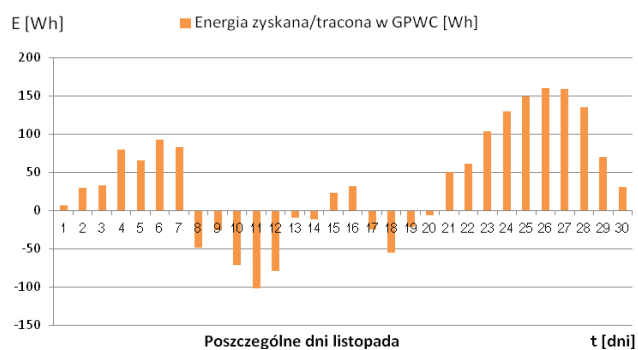
Pomiarom z października odpowiada rysunek 9. W tym czasie GPWC częściej oddawał ciepło powietrzu,

niż je odbierał. Jego funkcjonowanie przyniosło dodatnie efekty energetyczne. Łącznie uzyskano 455,4 Wh, czyli 0,455 kWh energii. Największy dzienny przyrost to 0,57 Wh, zaś największa strata to -0,91 Wh. Średnio dziennie pozyskano 50,6 Wh, a średnia ilość ciepła uzyskanego w ciągu 1 h to 8,12 W.



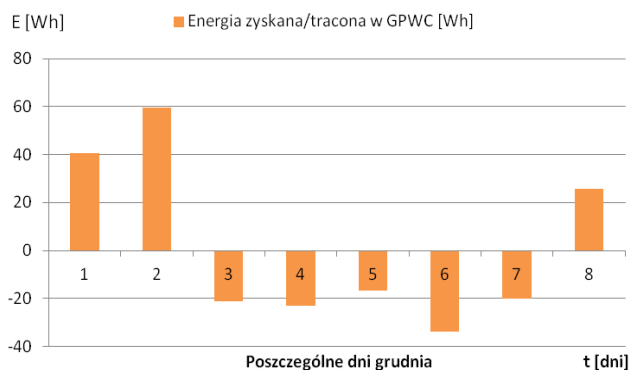
Rys. 9. Ilość ciepła uzyskanego/traconego w GWPC w październiku 2015 roku

Rysunek 10 przedstawia sytuację w listopadzie. Widać, że bilans energetyczny w tym przypadku również jest dodatni. Łączna ilość uzyskanej energii to 1039,15 Wh. Największy dzienny uzysk to 3,19 Wh, zaś największa strata to -1,94 Wh. Średnio dziennie pozyskano 33,52 Wh. W ciągu godziny średnio uzyskano 5,76 W.



Rys. 10. Ilość ciepła uzyskanego/traconego w GWPC w listopadzie 2015 roku

Wyniki uzyskane dla grudnia przedstawiono na rysunku 11. Początek grudnia okazał się być nietypowym dla tego okresu, toteż funkcjonowanie wymiennika przyniosło więcej strat energetycznych niż zysków. Łącznie uzyskano 10,99 Wh, czyli 0,01 kWh. Największy dzienny przyrost to 1,23 Wh, zaś największa strata to -1,32 Wh, natomiast wartość średnia 1,37 Wh.



Rys. 11. Ilość ciepła uzyskanego/traconego w GWPC w grudniu 2015 roku

W okresie przejściowym zastosowanie gruntowego wymiennika ciepła typu żwirowego zapewniała zyski ciepła, jednak niewystarczające do ogrzania obiektu i konieczna była praca alternatywnego źródła ciepła. Łącznie, w wyniku funkcjonowania GPWC, uzyskano 1,5 kWh energii. Przy założeniu braku wymiennika żwirowego, ciepło to byłoby dostarczone przez nagrzewnicę elektryczną, bądź dodatkowe źródło na przykład z kotłowni opalanej węglem, drewnem, olejem lub gazem.

W przypadku, gdyby była stosowana energia elektryczna, wówczas koszt energii w okresie pomiarowym byłby następujący (wartości jednostkowych wskaźników dla taryfy G11 z PGE dystrybucja):

$$K_{EL} = 1,95 \text{ zł/m-c} \cdot 3 \text{ m-c} + 3,15 \text{ zł/m-c} \cdot 3 \text{ m-c} + 0,2057 \text{ zł/kWh} \cdot 1,5 \text{ kWh} + 0,0129 \text{ zł/kWh} \cdot 1,5 \text{ kWh} + 5,1 \text{ zł/m-c} \cdot 3 \text{ m-c} = 30,93 \text{ zł}$$

(koszt tylko zużytej energii to 0,33 zł)

gdzie: 1,95 zł/m-c oraz 5,1 zł/m-c – składniki stały opłaty sieciowej, 3,15 zł/m-c – opłata abonamentowa, 0,2057 zł/kWh – składnik zmienny opłaty sieciowej, 0,0129 zł/kWh – stawka jakościowa.

W przypadku zastosowania kotłowni gazowej koszt energii można wyliczyć w następujący sposób (według taryfy W3.6 PGNiG dla odbiorcy wykorzystującego gaz do ogrzewania domu):

$$K_G = 10,192 \text{ gr/kWh} \cdot 1,5 \text{ kWh} + 6,28 \text{ zł/m-c} \cdot 3 \text{ m-c} = 18,86 \text{ zł}$$

gdzie: 10,192 gr/kWh – cena paliwa gazowego, 6,28 zł/m-c – opłata abonamentowa.

5. Podsumowanie

Pomiary temperatury powietrza zewnętrznego i za gruntowym powietrznym wymiennikiem ciepła typu żwirowego zostały przeprowadzone w okresie przejściowym, w którym zalecane jest stosowanie dodatkowej czepni powietrza zewnętrznego. Jednak liczni inwestorzy nie decydują się na takie rozwiązanie, mając na względzie jakość powietrza (lepsza wilgotność i parametry mikrobiologiczne) opuszczającego złoża żwirowe. W badanym okresie zyski energetyczne przy zastosowaniu wymiennika były znikome, jednak jak pokazują badania w innych okresach roku GWC są znacznie bardziej efektywne (Topolańska, 2017).

Literatura

- Badescu V. (2007). Economic aspects of using ground thermal energy for passive house heating. *Renewable Energy*, Vol. 32, Issue 6, 895-903.
- Besler M., Cepiński W., Fijewski M. (2015). Uzdatanianie powietrza w wymienniku gruntowym dla pomieszczeń o różnych wymaganiach. *Rynek Instalacyjny*, No. 1-2, 38-40.
- Besler M., Rdzak M., Schwitalla A. (2005). Ponad 20 lat eksploatacji bezprzeponowych gruntowych wymienników ciepła i masy według patentu Politechniki Wrocławskiej. *Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja*, Vol. 36, Issue 3, 10-13.
- Besler M., Schwitalla A., Besler G.J. (2011). Intensyfikacja wymiany ciepła i masy w wymiennikach żwirowych. *Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja*, Vol. 42, No. 4, 132-134.
- Bojic M., Trifunovic N., Papadakis G., Kyritis S. (1991). Numerical simulation, technical and economic evaluation of air-to-earth heat exchanger coupled to a building. *Energy*, Vol. 22, Issue 12, 1151-1158.
- Cepiński W., Besler M., Besler G.J. (2012). Współpraca bezprzeponowego gruntowego wymiennika ciepła i masy z powietrzną pompą ciepła. *Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja*, Vol. 43, No. 6, 229-233.
- De Paepe M., Janssens A. (2003). Thermo-hydraulic design of earth-air heat exchanger. *Energy and Buildings*, Vol. 35, Issue 4, 389-397.
- Hollmuller P., Lachal B. (2014). Air-soil heat exchangers for heating and cooling of buildings: Design guidelines, potentials and constraints, system integration and global energy balance. *Applied Energy*, Vol. 119, 476-478.
- Informacja techniczna Rehau o systemie AwaduktThermo, 2013.
- Jędrzejewski L. (2003). GWC – tania energia z własnego podwórka. Gruntowne oszczędności. *Magazyn Instalatora*, No. 11, 50-51.
- Rosiński M. (2012). Odzyskiwanie ciepła w wybranych technologiach inżynierii środowiska. *Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej*, Warszawa.
- Rozporządzenie Ministra Infrastruktury i Rozwoju z dnia 27.02.2015 roku w sprawie metodologii wyznaczania charakterystyki energetycznej budynku lub części budynku oraz świadectw charakterystyki energetycznej. Dz. U. 2015 poz. 376.
- Szeszycka N., Kostka M. (2014). Energia gruntu w klimatyzacji obiektów hotelowych. *Rynek Instalacyjny*, No. 9, 48-50.
- Szponar B., Iwanicka M. (2006). Gruntowy wymiennik ciepła. Mikrobiologiczna czystość. *Magazyn Instalatora*, No. 2 (90), 18-19.
- Szymański M., Wojtkowiak J. (2007). Uproszczona metoda wymiarowania i oceny opłacalności gruntowego wymiennika ciepła w układzie wentylacji budynku. *Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja*, Vol. 38, No. 7-8, 55-58.
- Szymański M., Wojtkowiak J. (2008). Analiza całorocznej pracy rurowego gruntowego wymiennika ciepła RGPWC w układzie wentylacji mechanicznej budynku mieszkalnego. W: *Materiały XII Int. Conf. „Air conditioning Protection & District Heating”*, Wrocław – Szklarska Poręba 2007.
- Topolańska J., Krawczyk D. (2014a). Gruntowe powietrzne wymienniki ciepła. Cz.1. Przegląd stosowanych rozwiązań. *Rynek Instalacyjny*, No. 4, 78-81.
- Topolańska J., Krawczyk D. (2014b). Gruntowe powietrzne wymienniki ciepła – teoria a praktyka. W: *Inżynieria Środowiska – Młodym Okiem 2014*, Vol. 8, 95-127.
- Topolańska J. (2017) Porównanie charakterystyk termicznych gruntowych powietrznych wymienników ciepła typu rurowego i płytowego. Praca doktorska, *Politechnika Białostocka*.

GROUND AIR HEAT EXCHANGER OF GRAVEL TYPE AS AN EXAMPLE OF USING RENEWABLE ENERGY SOURCES IN SINGLE FAMILY BUILDINGS – ENERGY AND ECONOMIC EFFECTS

Abstract: Numerous actions promoting the use of energy-saving and environmentally-friendly solutions and the related legal regulations mean that more and more installations using RES are used, both in large office-administration buildings or residential buildings as well as in single-family houses. One of the most popular solutions is the ground air heat exchanger (GAHE), which pre-prepares the air to be delivered to the indoor. In the winter the air is heated, and it is cooled in the summer. Ground heat exchangers are available in several types: gravel, plate, tubular, glycol and comb. The difference between them is in the way of heat exchange. Each of these solutions has its advantages and disadvantages. The paper discusses installation with GAHE of gravel type made in a single-family house located in the Podlaskie Voivodship. The results of air measurements were taken after passing through the exchanger depending on the outside temperature and the system was evaluated for energy and economic efficiency.

Badania zostały zrealizowane w ramach pracy statutowej Politechniki Białostockiej numer S/WBiS/4/2014 oraz pracy własnej numer MB/WBiS/12/2014 i sfinansowane ze środków na naukę MNiSW.

ANALIZA EKONOMICZNA ZABEZPIECZENIA GŁĘBOKIEGO WYKOPU

Daniel ZIELEPUZA*

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45A, 15-351 Białystok

Streszczenie: Artykuł przedstawia analizę ekonomiczną zabezpieczenia głębokiego wykopu. Przedstawiono dwa warianty zabezpieczenia głębokiego wykopu: ścianę szczelinową i obudowę mieszaną w postaci ściany szczelinowej i ścianki szczelnej. Obliczenia parcia gruntu wykonano zgodnie z Eurokodem 7 analitycznie i za pomocą programu GEO5. Zabezpieczenie wykopu zaprojektowane zostało zgodnie z etapami jego wykonania. Dla obu wariantów przeprowadzono analizę ekonomiczną oraz analizę przemieszczeń konstrukcji zabezpieczającej wykop. W wyniku zastosowania obudowy mieszanej koszty były nieco niższe niż dla ściany szczelinowej.

Słowa kluczowe: zabezpieczenie głębokiego wykopu, ściana szczelinowa, ścianka szczelna, obudowa mieszana.

1. Wprowadzenie

Wzrost gęstości zabudowy miejskiej oraz mała przepustowość układów komunikacyjnych wymusza stosowanie coraz trudniejszych rozwiązań. Budowle podziemne są obecnie nieodzownym elementem budownictwa, widocznym zwłaszcza w dużych miastach, co wynika z braku nowych terenów inwestycyjnych w centrach miast. Rozwój budownictwa podziemnego umożliwia zaoszczędzenie powierzchni terenu i wykorzystanie jej, na przykład na tereny rekreacyjne.

Podczas realizacji kubaturowych budowli podziemnych konieczne jest wykonanie głębokich wykopów. Głębokie wykopu znajdują się często bardzo blisko istniejącej zabudowy. Wpływa to na ich dodatkowe obciążenie oraz wymusza ograniczenie przemieszczeń obudowy wykopu. W przypadku gęstej zabudowy nie ma możliwości wykonania wykopów ze skarpami o odpowiednim nachyleniu. Stosuje się więc zabezpieczenia ścian głębokich wykopów, najczęściej w postaci ścian szczelinowych, ścianek szczelnych, obudowy berlińskiej czy palisad. Takie rozwiązania stwarzają złożone zagadnienia i wymagają dużej odpowiedzialności od projektanta oraz staranności podczas wykonawstwa (Jarominiak, 1999; Grzegorzewicz, 2005; Siemińska-Lewandowska, 2011).

W przypadku występowania dodatkowych obciążeń od wrażliwej na osiadania zabudowy w otoczeniu wykopu oraz sprzętu budowlanego, należy w analizie statycznej przyjmować wartość parcia pomiędzy parciem czynnym, a spoczynkowym, tak zwane zwiększone parcie czynne lub parcie pośrednie (Siemińska-Lewandowska, 2006 i 2011). Wartość wypadkowej siły zwiększonego parcia czynnego wyznacza się ze wzoru:

$$E_{az} = 0,5(E_a + E_0) \quad (1)$$

lub

$$E_{az} = 0,75E_a + 0,25E_0 \quad (2)$$

gdzie: E_{az} jest wypadkową zwiększonego parcia czynnego gruntu, E_a jest wypadkową parcia czynnego, natomiast E_0 wypadkową parcia spoczynkowego.

Wzór (1) stosuje się dla obudowy wykopu, której naziom obciążony jest budynkami w bezpośrednim sąsiedztwie wykopu, natomiast wzór (2) w przypadku obciążenia naziomu jedynie sprzętem budowlanym (Siemińska-Lewandowska, 2006).

W niniejszej pracy przedstawiono analizę ekonomiczną zabezpieczenia głębokiego wykopu pod budynek handlowo-usługowy w Białymstoku. Obliczenia przeprowadzono dla dwóch wariantów zabezpieczenia głębokiego wykopu w postaci ściany szczelinowej oraz obudowy mieszanej: ściany szczelinowej i ścianki szczelnej.

2. Projektowany obiekt

Projektowany budynek znajduje się w województwie podlaskim w centralnej części miasta Białegostoku. Jest to obiekt handlowo-usługowy z podziemnym parkingiem. Wymiary budynku wynoszą około 88×86 m, a powierzchnia użytkowa 19500 m². Budynek będzie wykonany w technologii szkieletowo-żelbetowej. Projektowane są dwie podziemne kondygnacje parkingowe. Ściany szczelinowe projektowanej obudowy wykopu stanowią ściany parkingu projektowanego

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: d.zielepuza@gmail.com

budynku.

Warunki gruntowo-wodne w miejscu projektowanego budynku określono na podstawie wyników wierceń badawczych zawartych w dokumentacji technicznej wykonanej przez firmę Uni-Geo (2013). Lokalizację punktów badawczych pokazano na rysunku 1.

W niniejszym opracowaniu poddano analizie projekt obudowy wykopu wzdłuż IV przekroju geotechnicznego (rys. 2). Stwierdzono występowanie kolejno od powierzchni terenu:

- nasypów i gleby do głębokości 0,4 – 1,3 m;
- utworów piaszczystych i piaszczysto-pylastych oraz warstewek pospółki przy stropie osadów gliniastych do głębokości około 6 – 9 m;
- utworów gliniastych (gliny zwałowe) z przewarstwieniami nawodnionych piasków drobnych miejscami pylastych do głębokości około 20 m.

W rejonie lokalizacji projektowanej inwestycji występuje również przypowierzchniowy poziom wodonośny. Wiercenia wykazały, iż w badanym podłożu występuje woda o swobodnym i napiętym zwierciadle. Głębokość zalegania swobodnego zwierciadła wynosiła od 2,2 m do 3,1 m p. p. t.. W odległości 1,5 km kierunku na NE przepływa rzeka Biała, która stanowi bazę drenażu dla wód powierzchniowych badanego terenu (Uni-Geo, 2013).

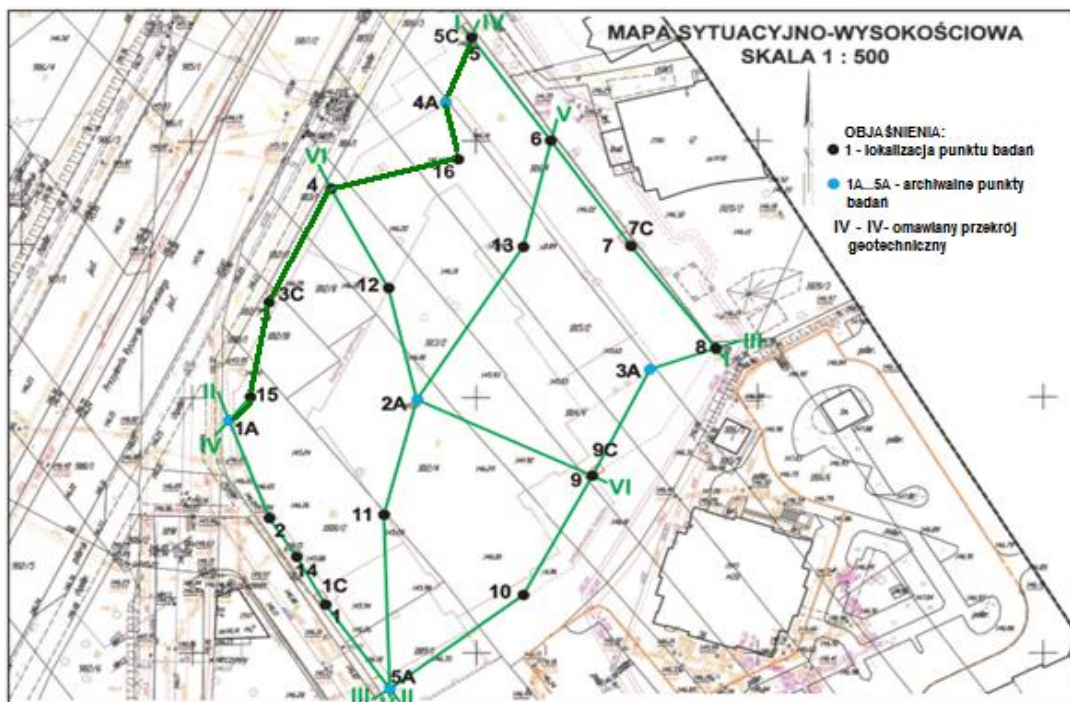
3. Projektowana konstrukcja zabezpieczenia wykopu

Obciążenie naziemu od strony IV przekroju geotechnicznego stanowi droga klasy G 2/3 o szerokości pasa ruchu 3,5 m. Jako pierwszy wariant przyjęto obudowę mieszaną, natomiast jako drugi ścianę

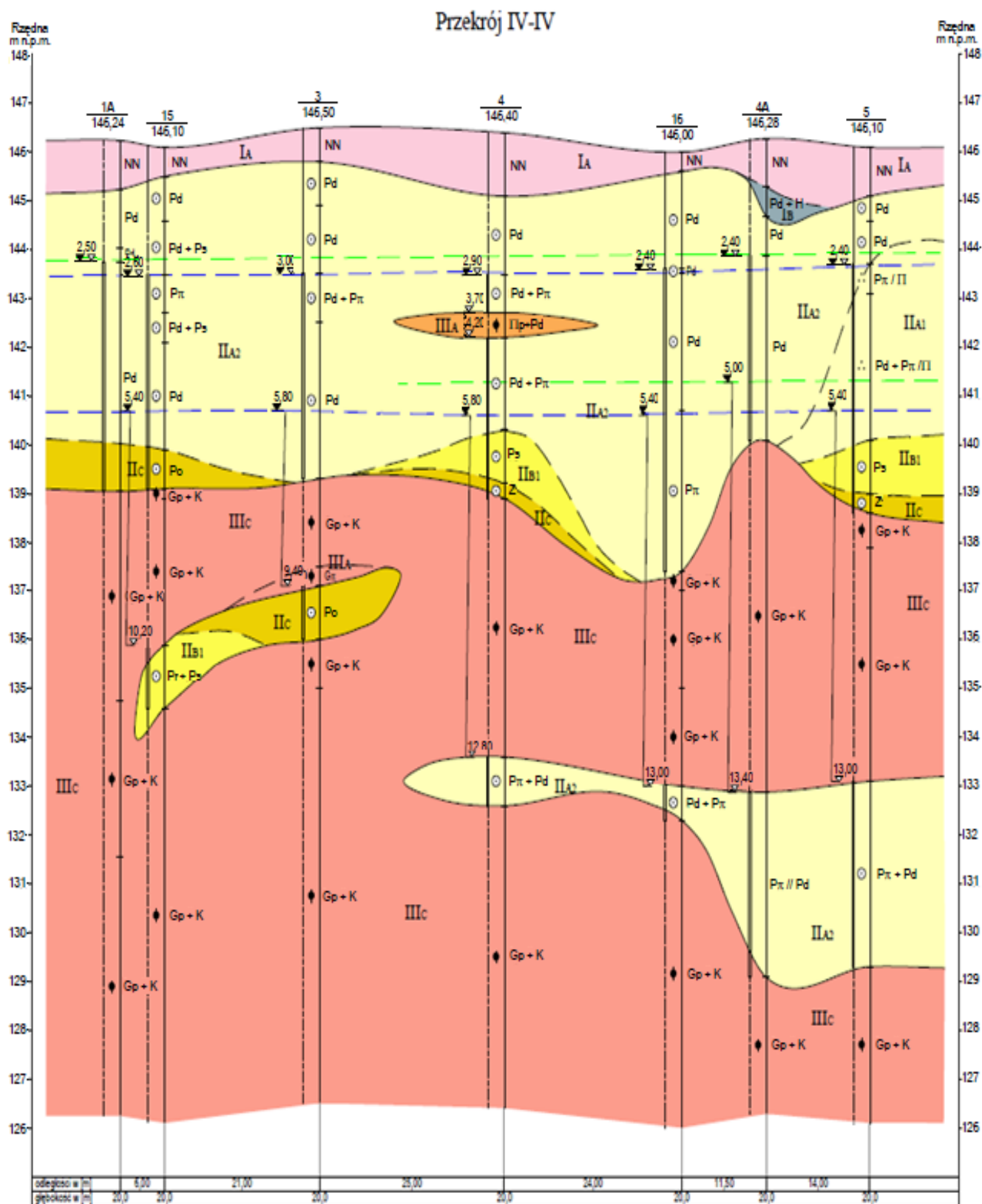
szczelinową na całej wysokości obudowy.

W celach projektowych założono, że obudowa mieszana została zaprojektowana jako ściana szczelinowa w dolnej części konstrukcji oraz ścianka szczelna w jej górnej części. Zdecydowano się na zastosowanie obudowy mieszanej, gdyż ściana szczelinowa stanowi oparcie dla stropu garażu podziemnego. W takich przypadkach często projektuje się obudowy mieszane, na przykład przy budowie stacji metra czy podziemnych parkingów (Siemińska-Lewandowska, 2011). Ściany szczelinowe nie stanowią oparcia dla ścian obiektu galerii handlowej, pełnią rolę jedynie konstrukcji ścian garażu podziemnego. Ścianę szczelinową przedłużono ścianką szczelną ze względu na wysoki poziom wody gruntowej. Z tego względu, w drugim wariantcie zaprojektowano ścianę szczelinową na całej wysokości. W obu przypadkach całkowita długość konstrukcji obudowy wynosi 90 m. Na długości 36 m zaprojektowano obudowę o wysokości 13,5 m, a na pozostałych 54 m o wysokości 12 m. W obu wariantach ściana szczelinowa jest ścianą żelbetową o grubości 80 cm. W przypadku obudowy mieszanej w jej górnej części obudową jest ścianka szczelna wykonana z grodzic typu VL 603 o stałej wysokości 3 m. Płytę denną zaprojektowano o grubości 100 cm, a grubość płyty stropowej kondygnacji podziemnej parkingu samochodowego wynosi 30 cm.

W projekcie przewidziano kotwienie obudowy w obu przypadkach jednym rzędem kotew gruntowych SAS 670/880 firmy ATH na głębokości 1,5 m p. p. t. Całkowita długość kotwy wynosi 10 m. Przyjęto długość buławy 5 m oraz część wolną 5 m. Średnica cięgna wynosi 28 mm. Rozstaw kotew dla jednej sekcji ściany szczelinowej przyjęto równy 3,00 m.



Rys. 1. Rozmieszczenie punktów badawczych (na podstawie dokumentacja badań podłoża gruntowego Uni-Geo, 2013)

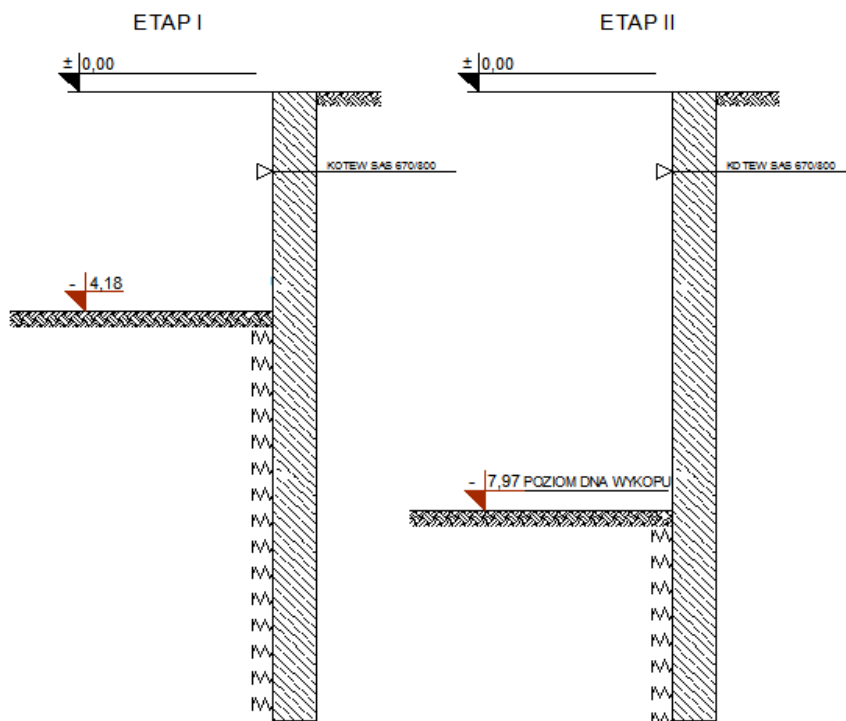


Rys. 2. Przekrój geotechniczny numer IV (na podstawie: Dokumentacja badań podłoża gruntowego Uni-Geo, 2013)

4. Obliczenia projektowe

Obliczenia przeprowadzono dla dwóch etapów wykonania konstrukcji obudowy wykopu (rys. 3). Dla pierwszego etapu obliczenia parcia gruntu wykonano dla głębokości wykopu 0,5 m poniżej poziomu pierwszego stropu. Dla drugiego etapu wyznaczono parcie gruntu przy głębokości odpowiadającej docelowej rzędnej dna wykopu. Uwzględniono również obciążenie od drogi klasy G 2/3. Obciążenia od konstrukcji nawierzchni

drogowej zestawiono w tabeli 1, zaś obciążenie zmienne od ruchu pojazdów w tabeli 2. Obliczenia wykonano zgodnie z PN-EN 1991-2:2007 Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcję. Część 2: Obciążenia ruchome mostów, PN-EN 1997-1:2009 Eurokod 7: Projektowanie geotechniczne. Część 1: Zasady ogólne, PN-EN 1997-2:2009 Eurokod 7: Projektowanie geotechniczne. Część 2: Rozpoznanie i badanie podłoża gruntowego.



Rys. 3. Etapy wykonania obudowy wykopu

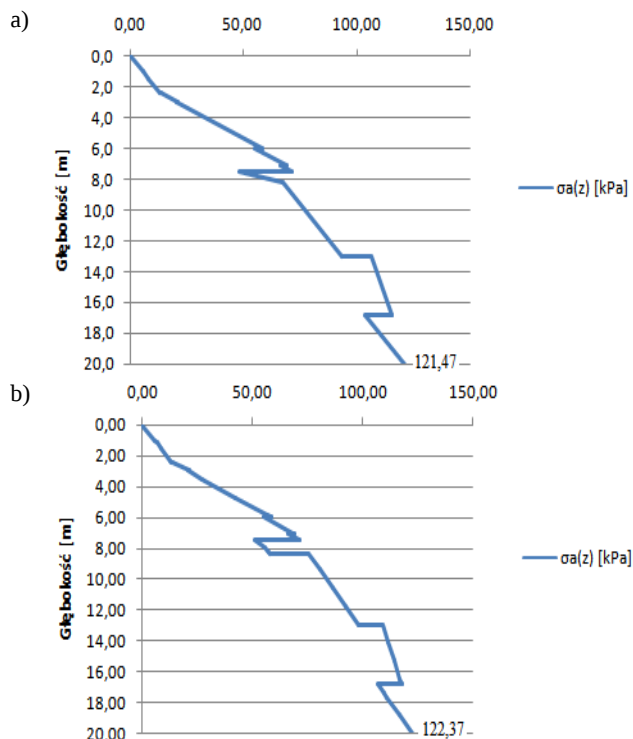
Tab. 1. Obciążenia od nawierzchni drogi na 1 metr bieżący

Rodzaj oddziaływania stałego	Wartość charakterystyczna [kN/m]	Współczynnik częściowy γ_G	Wartość obliczeniowa [kN/m]
Warstwa ścieralna asfaltowa $0,05\text{m} \cdot 23 \text{ kN/m}^2 \cdot 1\text{m} =$	1,15	1,35	1,55
Warstwa wiążąca asfaltowa $0,08\text{m} \cdot 22,5 \text{ kN/m}^2 \cdot 1\text{m} =$	1,8		2,43
Podbudowa z betonu asfaltowego $0,23\text{m} \cdot 22 \text{ kN/m}^2 \cdot 1\text{m} =$	5,06		6,83
Razem	8,01		10,81

Tab. 2. Obciążenia zmienne od naziomu na 1 m bieżący

Rodzaj oddziaływania zmiennego według PN-EN 1991-2:2007	Wartość charakterystyczna [kN/m]	Współczynnik częściowy γ_G	Wartość obliczeniowa [kN/m]
TS (q_{eqk})	90,91	1,35	125,46
UDL (q_{1k})	9,00		12,15
Wartość zredukowana obciążenia pieszymi lub ścieżek rowerowych q_{fk}	3,00		4,05
Razem	102,91		141,66

Obliczenia parcia czynnego na obudowę dla efektywnych parametrów gruntu wykonano analitycznie i z pomocą programu GEO5. Dokonano porównania uzyskanych wyników w celu weryfikacji poprawności obliczeń. Wykresy parcia pośredniego dla jednego z otworów badawczych wzdłuż IV przekroju geotechnicznego przedstawiono na rysunku 4. Wykresy parć różnią się jedynie nieznacznie, co potwierdza poprawność obliczeń.



Rys. 4. Wykres parcia pośredniego w pobliżu otworu numer 5 a) otrzymany metodą analityczną, b) otrzymany programem GEO5

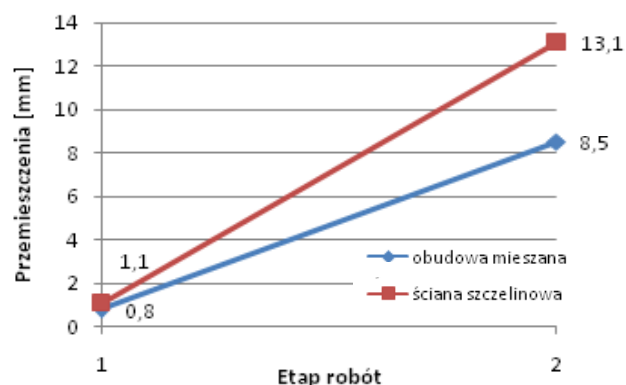
Maksymalne przemieszczenia korony ściany wywołane odkształceniem elementów konstrukcyjnych w kierunku poprzecznym obliczono, ze względu na brak procedury w Eurokodzie 7, według normy PN-83/B-03010 *Ściany oporowe. Obliczenia statyczne i projektowanie*.

$$f_3 < 0,004h \quad (3)$$

gdzie h jest całkowitą wysokością ściany i wynosi 12,0 m.

$$f_3 < 0,004 \cdot 12,0 = 0,048 \text{ [m]} = 48 \text{ [mm]} \quad (4)$$

Obliczenia przemieszczenia obudowy wykopu wykonano dla parcia pośredniego. Maksymalne przemieszczenia wyniosły dla obudowy mieszanej 8,5 mm oraz 13,1 mm dla ściany szczelinowej (rys. 5). Przemieszczenia ścian w obu wariantach są mniejsze niż 48 mm, więc warunek maksymalnych przemieszczeń został dla nich spełniony.



Rys. 5. Wykres przemieszczenia konstrukcji w pobliżu jednego z otworów wzdłuż IV przekroju geotechnicznego

Różnica przemieszczenia wynika z odmiennej sztywności obudowy wykopu w obu wariantach. Ściana szczelinowa wykazuje większe przemieszczenie niż obudowa mieszana. Wynika to z większej sztywności ściany szczelinowej, która jest mniej dociskana za pomocą kotwy gruntowej.

5. Analiza kosztów

Sporządzenie zestawienia kosztów wykonania obu zabezpieczeń wykopu ma na celu analizę ekonomiczności obu rozwiązań. Obliczenia wykonano w programie Norma PRO. Program umożliwia tworzenie kosztorysów oraz przedmiaru robót. Pozwala na określenie aktualnych cen sprzętu, materiałów oraz robocizny.

Całkowity koszt wykonania obudowy mieszanej (o długości 90 m) wyniósł 3.561.475,00 zł, natomiast cena ściany szczelinowej na tym samym odcinku to 3.882.665,00 zł (różnica kosztów wynosi ponad 300.000 zł).

Koszt wykonania ściany szczelinowej i obudowy mieszanej jako zabezpieczenia głębokiego wykopu różni się więc nieznacznie. Koszty wykonania 1 mb obudowy mieszanej wynosi 3.298 zł, natomiast ściany szczelinowej 3.595 zł, co zestawiono w tabeli 3. Niewielka różnica kosztów wynika z dużego podobieństwa zaprojektowanych zabezpieczeń, gdyż ściana szczelinowa stanowi 75% wysokości obudowy mieszanej.

Tab. 3. Porównanie kosztów obu wariantów obudowy wykopu

Rodzaj obudowy	Koszt wykonania 90,0 m obudowy [zł]	Koszt wykonania 1 mb obudowy [zł]
Obudowa mieszana	3.561.475,00	3.298,00
Ściana szczelinowa	3.882.665,00	3.595,00

6. Podsumowanie

Podsumowując przeprowadzone obliczenia należy stwierdzić, że różnica w kosztach zabezpieczenia głębokiego wykopu ścianą szczelinową i obudową mieszaną jest mniejsza niż 10%, co wynika z niewielkiej wysokości zastosowanej ścianki szczelnej w obudowie mieszanej. Ścianka szczelna jest bowiem konstrukcją tańszą niż ściana szczelinowa. W przypadku realizacji obudowy mieszanej występują dodatkowe trudności z połączeniem ściany szczelinowej i profili ścianki szczelnej. Należy także dodać, że przemieszczenia obudowy mieszanej są mniejsze niż ściany szczelinowej.

Literatura

- Grzegorzewicz (2005). Projektowanie i wykonywanie ścian szczelinowych. *Geoinżynieria, Drogi, Mosty, Tunele*, 3/2005.
- Jarominiak A. (1999). Lekkie konstrukcje oporowe. *WKiŁ*, Warszawa.

- Siemińska-Lewandowska A. (2011). Głębokie wykopy. Projektowanie i wykonawstwo. *WKŁ*, Warszawa.
- Siemińska-Lewandowska A. (2006). Projektowanie ścian głębokich wykopów – teoria i praktyka. *Geoinżynieria, Drogi, Mosty, Tunele*, 2/2006.
- Uni-Geo (2013). Dokumentacja badań podłoża gruntowego. *Uni-Geo*.

ECONOMICAL ANALYSIS OF A DEEP EXCAVATION SUPPORTING SYSTEMS

Abstract: The paper aim is to analyse the costs of support of a deep excavation. The paper presents two variants of support of a deep excavation: mixed wall and diaphragm wall, in designed building of commercial centre. Calculations of pressure for both solutions were performed by analytical method according to Eurocode 7 and means of programme GEO5. The support of excavation required two stages of designing, so calculations was divided into two phases. For both structures the economic analysis and displacement analysis were made. In was stated that mixed wall is more economical than diaphragm wall.

BADANIA CZASU POGŁOSU KAPLICY KARMELITAŃSKIEJ W DAWNYM PAŁACU KAZANOWSKICH W WARSZAWIE

Antonina ŻABA, Michał MARCHACZ*

Wydział Budownictwa, Politechnika Śląska, ul. Akademicka 5, 44-100 Gliwice

Streszczenie: W artykule przedstawiono badania czasu pogłosu wnętrza kaplicy znajdującej się w placówce opiekuńczej Caritas Archidiecezji Warszawskiej (dawny pałac Kazanowskich). Kaplica, ze względu na unikatowy zespół siedemnastowiecznych polichromii jest cennym zabytkiem. Celem przeprowadzonych badań było ustalenie warunków pogłosowych panujących we wnętrzu kaplicy, co może być pomocne w ustaleniu sposobów jej przyszłej eksploatacji. Pomiary czasu pogłosu prowadzone były metodą zanikową przy wykorzystaniu źródła dźwięku generującego szum różowy. Czas pogłosu pustego wnętrza wyniósł 2,3 s (2 s dla 500 Hz). Optymalny czas pogłosu wnętrza zależy od rodzaju propagowanego dźwięku (muzyka, mowa). Dla rozpatrywanego wnętrza powinien być krótszy. Wypełnienie wnętrza słuchaczami i wyposażeniem wpłynie pozytywnie na jego skrócenie.

Słowa kluczowe: akustyka wnętrz, czas pogłosu, architektura zabytkowa, polichromie.

1. Wprowadzenie

Dawny pałac Kazanowskich zlokalizowany jest w śródmieściu Warszawy przy ul. Krakowskie Przedmieście 62 (rys. 1). Był on wielokrotnie poddawany przekształceniom, których celem było przystosowanie obiektu do zmieniających się potrzeb użytkowników. Jednym z użytkowników pałacu był zakon karmelitanek bosych. To one w końcu siedemnastego wieku przystosowały jedno z pomieszczeń, na pierwszym piętrze skrzydła wschodniego, do pełnienia funkcji kaplicy nowicjatu klasztornej. Obecnie kaplica ta pełni funkcję miejsca posługi liturgicznej dla pacjentów placówki opiekuńczej Caritas Archidiecezji Warszawskiej.

Kaplica ma rzut zbliżony do prostokąta o wymiarach poziomych 4,59-4,72 × 6,97-7,23 m. Wysokość kaplicy w najwyższych punktach sklepiń wynosi około 3,6 m. Przekrój oraz rzut poziomy pomieszczenia wraz z podziałką liniową (skalą) przedstawiono na rysunku 1b. Wnętrze kaplicy podzielone jest na trzy części. Dwie z nich przekryte są sklepieniami krzyżowymi. Rzutami tych sklepiń są prostokąty, a przekrojami ich kolebek są dwie różne linie koszowe. Sklepienia te oparto na trzech gurtach o przekroju koszowym wspartych na lizenach oraz ścianach: zachodniej i wschodniej pomieszczenia. Trzecia część pomieszczenia została przekryta sklepieniem kolebkowym o przekroju koszowym. Rozpięto je między ścianami: wschodnią i zachodnią wnętrza a oparto na jednym z gurtów i ścianie południowej kaplicy. Zdaniem autorów artykułu, sklepienie kolebkowe i ściana południową wykonano

później niż resztę pomieszczenia.

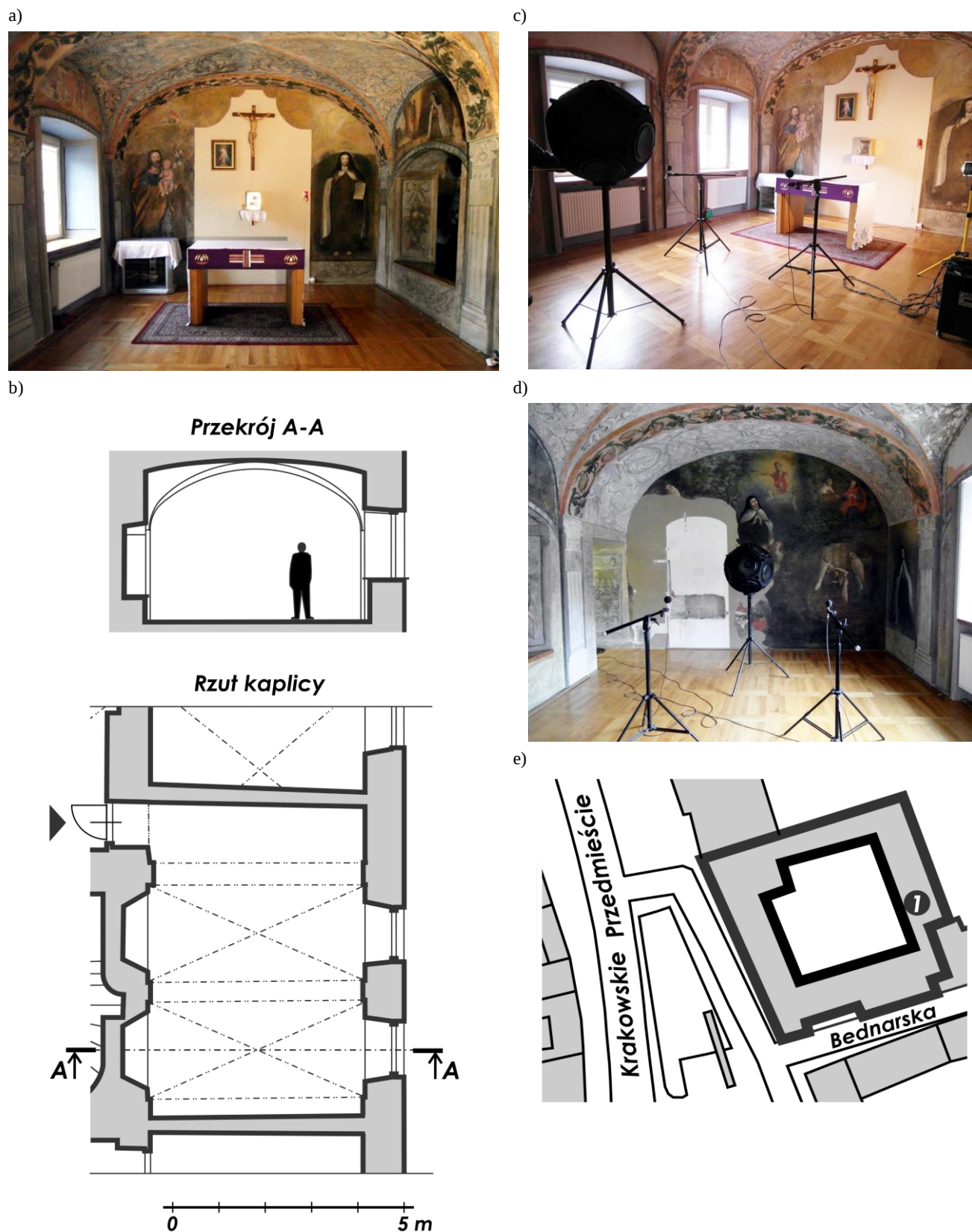
W kaplicy znajduje się unikatowy zespół polichromii ściennych i sklepiennych (rys. 1) o wysokiej wartości artystycznej (Święcka, 2016) i bogatym programie ikonograficznym, między innymi, związanym z postacią św. Eufrozyny (Nowiński, 2015). Posadzkę we wnętrzu stanowi drewniana, lakierowana klepka, a stolarkę dwa okna z PCV i drzwi pływające okleinowane z szybą (pleksi) podzieloną szczeblinami.

Wyposażenie wnętrza stanowią: stół ołtarzowy, ambonka, szafka (kredencja), klęcznik, krzesła tapicerowane, grzejnik, dywan, dekoracje okolicznościowe ze styropianu.

2. Metodyka prowadzonych pomiarów oraz uzyskane wyniki

Metodyka prowadzenia pomiarów oparta została o zalecenia zawarte w normach branżowych (PN-EN ISO 3382-1:2009 *Akustyka. Pomiar parametrów akustycznych pomieszczeń. Część 1: Pomieszczenia specjalne* oraz PN-EN ISO 3382-2:2010 *Akustyka. Pomiar parametrów akustycznych pomieszczeń. Część 2: Czas pogłosu w zwyczajnych pomieszczeniach*). Badania wykonano przy

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: Michal.Marchacz@polsl.pl

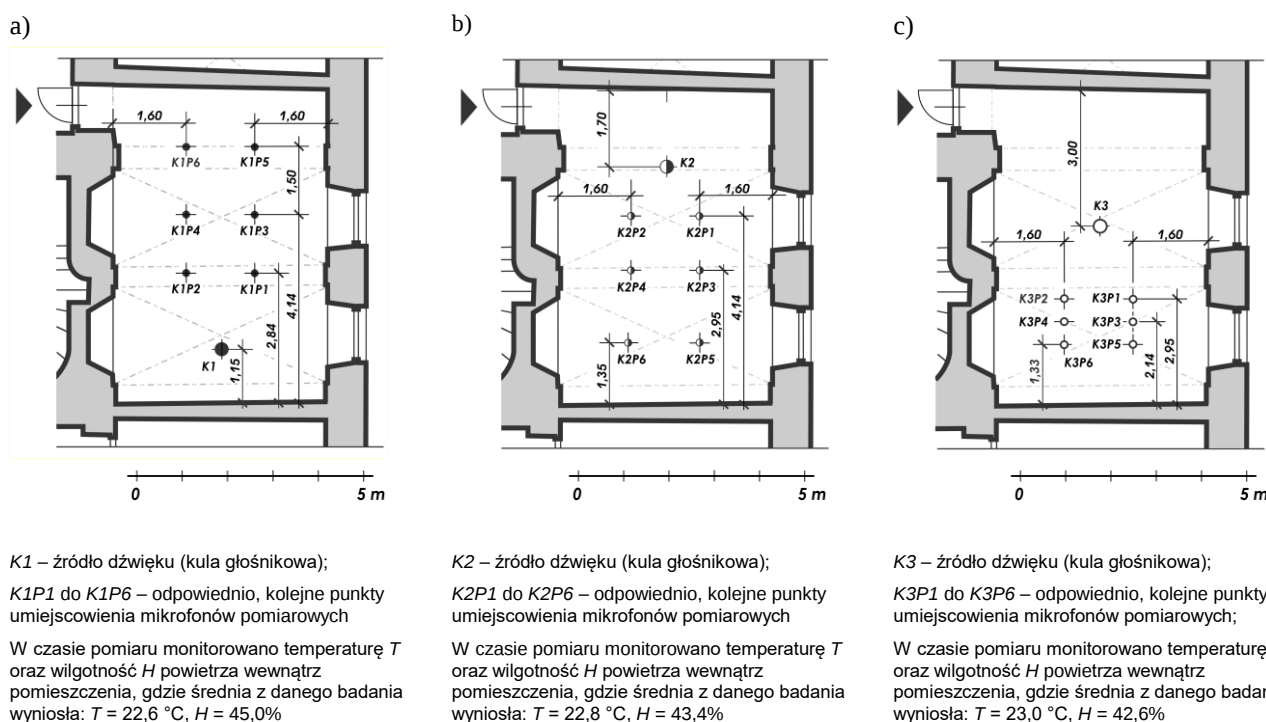


Rys. 1. Kaplica nowicjatu karmelitanek bosych w placówce opiekuńczej Caritas Archidiecezji Warszawskiej (dawny pałac Kazanowskich), Krakowskie Przedmieście w Warszawie: a) widok na ołtarz, b) szkic wnętrza kaplicy, c) lokalizacja aparatury pomiarowej w czasie badań (stanowisko głośnika K2) widok na ścianę ołtarzową, d) lokalizacja aparatury pomiarowej w czasie badań (stanowisko głośnika K2), widok na ścianę przy wejściu, e) lokalizacja kaplicy – 1. (opracowanie na podstawie WIG Mapa szczegółowa 1:25 000)

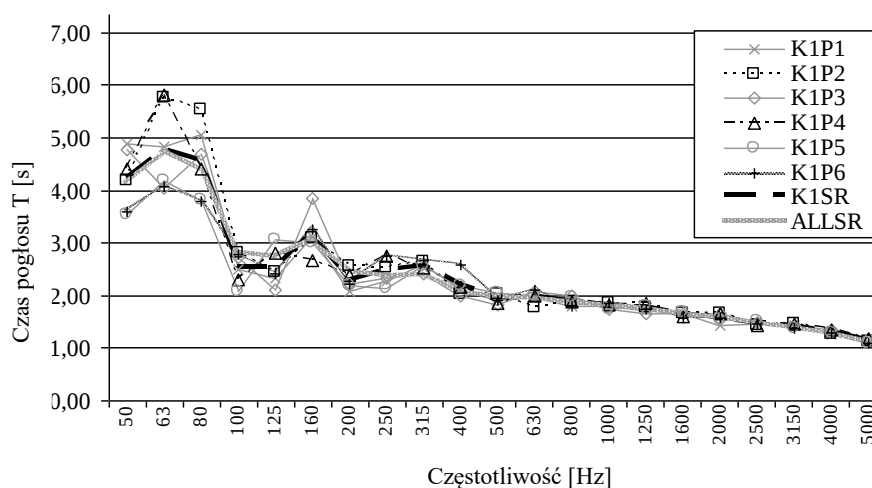
wykorzystaniu metody szumu przerywanego. W badaniach wykorzystano tor pomiarowy złożony z części odbiorczej oraz nadawczej. Część nadawczą stanowiła kula głośnikowa o dookólnej charakterystyce propagacji dźwięku wraz z wzmacniaczem i generatorem szumu różowego. Część odbiorczą stanowił miernik całkujący klasy pierwszej, typu Svan 958 wraz z osprzętem. Źródło dźwięku wytwarzało poziom ciśnienia akustycznego wystarczający do tego, aby krzywa zaniku rozpoczynała się przynajmniej 35 dB powyżej tła akustycznego w odpowiednim zakresie częstotliwości. Źródło dźwięku umieszczono w pomieszczeniu w trzech różnych pozycjach. Dla każdego pojedynczego umiejscowienia źródła dźwięku wytypowano sześć niezależnych, niepokrywających się punktów pomiarowych. W każdym takim punkcie pomiarowym, celem ograniczenia losowości sygnału dźwiękowego, wykonano sześć niezależnych pomiarów zaniku poziomu dźwięku w pomieszczeniu. Umieszczenie zarówno źródeł dźwięku, jak i punktów pomiarowych dobrano

tak, aby zapewnić wymagane minimalne odległości od powierzchni odbijających, jak i odpowiednie odległości pomiędzy źródłem a punktami pomiarowymi. Rozmieszczenie punktów pomiarowych wraz z umiejscowieniem źródeł dźwięku zestawiono na rysunku 2. Temperatura i wilgotność w trakcie pomiarów pozostawały na podobnym poziomie (rys. 2).

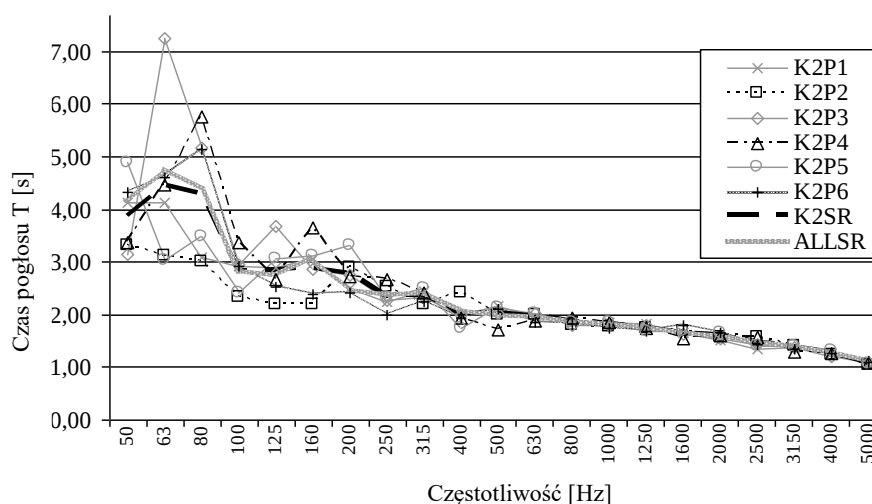
Wyniki pomiarów poddano stosownej obróbce celem wyznaczenia czasu pogłosu. Przyjęto w opracowaniu czas pogłosu T20 (wyznaczony w oparciu o procedurę uwzględniającą spadek poziomu dźwięku o 20 dB) stanowiący w dalszej części podstawę do oceny pogłosowości wnętrza. Badania prowadzono po uprzednim opróżnieniu wnętrza z elementów wyposażenia (krzesła, przenośna ambona). Przebiegi czasów pogłosu w funkcji częstotliwości dla poszczególnych punktów pomiarowych oraz kolejnych ustawień źródła dźwięku zaprezentowano poniżej w formie wykresów na rysunkach 3, 4 i 5.



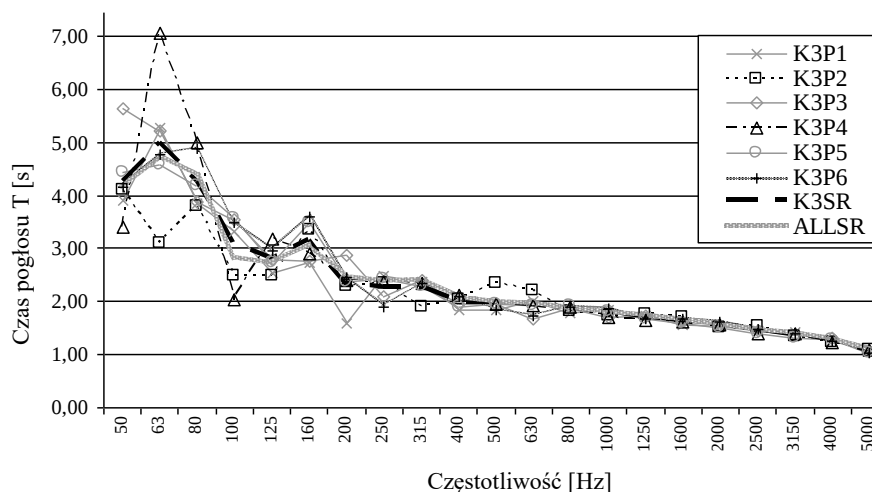
Rys. 2. Lokalizacja sprzętu pomiarowego w czasie badań akustycznych kaplicy przy położeniu głośnika w punkcie: a) K1, b) K2, c) K3



Rys. 3. Wykres czasu pogłosu w kolejnych punktach pomiarowych w funkcji częstotliwości, przy położeniu głośnika w punkcie K1. K1P1 do K1P6 – odpowiednio, od miejsca umiejscowienia mikrofonu pomiarowego; K1SR – średnia z pomiarów dla K1P1 do K1P6; ALLSR – średnia z wszystkich pomiarów (K1P1 do K3P6).



Rys. 4. Wykres czasu pogłosu w kolejnych punktach pomiarowych w funkcji częstotliwości, przy położeniu głośnika w punkcie K2. K2P1 do K2P6 – odpowiednio, od miejsca umiejscowienia mikrofonu pomiarowego; K2SR – średnia z pomiarów dla K1P1 do K1P6; ALLSR – średnia z wszystkich pomiarów (K1P1 do K3P6).



Rys. 5. Wykres czasu pogłosu w kolejnych punktach pomiarowych w funkcji częstotliwości, przy położeniu głośnika w punkcie K3. K3P1 do K3P6 – odpowiednio, od miejsca umiejscowienia mikrofonu pomiarowego; K3SR – średnia z pomiarów dla K3P1 do K3P6; ALLSR – średnia z wszystkich pomiarów (K1P1 do K3P6).

3. Podsumowanie i wnioski

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów można stwierdzić, że:

- średni czas pogłosu dla pustego wnętrza kształtuje się na poziomie 2,3 s (2 s dla 500 Hz);
- optymalny czas pogłosu dla rozpatrywanego wnętrza zależy od charakteru odbieranego dźwięku (dźwięk muzyczny lub słowny) jednak jest krótszy od zmierzonego;
- należy wziąć pod uwagę, że czas pogłosu rozpatrywanego wnętrza po wypełnieniu słuchaczami oraz elementami wyposażenia ulegnie skróceniu, co poprawi parametry akustyczne wnętrza.

Ponadto warto zauważyć, iż uzyskane wyniki wskazują na równomierny rozkład czasu pogłosu w funkcji częstotliwości praktycznie w całym zakresie rozpatrywanego widma dźwięku dla kolejnych punktów pomiarowych oraz ustawień źródła dźwięku. Wskazuje to na dobrą powtarzalność uzyskanych pomiarów. Notowane rozbieżności czasów pogłosu dla zakresu częstotliwości niskich są typowe dla przyjętej metody pomiarowej w kontekście pomieszczeń o dużej liczbie powierzchni słabo pochłaniających dźwięk. Badania czasu pogłosu przeprowadzono po uprzednim przygotowaniu wnętrza do pomiarów poprzez usunięcie niektórych elementów wyposażenia, na przykład takich jak: niewielka liczba siedzisk o miękkim pokryciu, mały dywan czy kłęcznik. Optymalny czas pogłosu dla dźwięku muzycznego zależy od charakteru przeznaczenia wnętrza oraz rodzaju dźwięku muzycznego (poczynając od teatrów, w tym muzycznych, a kończąc na muzyce organowej) i zawiera się w szerokim zakresie. Szacunkowa kubatura kaplicy wynosi nieco poniżej 120 m³ stąd można przyjąć, że zakres ten będzie wynosił od około 0,6-0,8 s do około 1,3-1,5 s (Long, 2006). Odbiór dźwięku słownego zwykle wymaga krótkich czasów pogłosu. Norma PN-B-02151-4:2015-06 *Akustyka budowlana. Ochrona przed hałasem w budynkach. Część 4: Wymagania dotyczące warunków pogłosowych i zrozumiałości mowy w pomieszczeniach oraz wytyczne prowadzenia badań określająca wartości czasu pogłosu oraz wskaźnik transmisji mowy STI dla pomieszczeń przeznaczonych do odbioru dźwięku słownego o kubaturze poniżej 120 m³, przyjmuje czas pogłosu nie większy niż 0,6 s i nie wskazuje wymagań dla STI.*

Dla kubatury w zakresie 120-250 m³ zaleca, przykładowo dla pomieszczeń wskazanych na sale audytoryjne, czas pogłosu również nie więcej niż 0,6 s, a STI co najmniej 0,60. Wartość wskaźnika STI obliczono w oparciu o (Nowoświat, 2007). Wynosi ona około 0,5 dla rozpatrywanego pomieszczenia.

Literatura

- Long M. (2006). *Architectural Acoustics*. Elsevier Academic Press, Burlington.
- Nowiński J. (2015). Siedemnastowieczna polichromia kaplicy nowicjatu karmelitanek bosych w dawnym Pałacu Kazanowskich w Warszawie. *Biuletyn Historii Sztuki*, 1/2015, 67-81.
- Nowoświat A. (2007). Model logarytmiczny wyznaczania wskaźnika zrozumiałości mowy. W: *Materiały z konferencji Fizyka Budowli w Teorii i Praktyce*, tom 2, Łódź, 2007, 215-218.
- Święcka E. (2016). Trzecie spotkanie Komisji Malarstwa Ściennego ICOMOS w Warszawie, <http://icomos.swiatowedziedzictwo.pl/icomos/images/komisje/III%20spotkanie%20Komisji%20Malarstwa%20%20C5%9Aciennego%20ICOMOS.pdf>. Data dostępu: 1.07.2016.
- WIG Mapa szczegółowa 1:25 000. Data dostępu: 1.07.2016.

INVESTIGATIONS OF THE REVERBERATION TIME IN CARMELITE'S CHAPEL PLACED IN KAZANOWSKI'S FORMER PALACE IN WARSAW

Abstract: The paper presents acoustic investigations of the chapel placed in care facility of the Caritas of the Warsaw Archdiocese (Kazanowski's former palace). Chapel, due to 17th century unique collection of the polychromes, is valuable historical treasure. Aim of measurements was determining acoustic parameters of chapel's interior. It might be helpful in establishing exploitation ways in the future. Measurements were done with using decay method and sound source generating pink noise. Reverberation time for empty interior was 2.3 s (2 s for 500 Hz). Optimum reverberation time for interior depends on kind of propagating sound (music, speech). For considering interior reverberation time should be shorter. Interior's filling by listeners will have positive effect on reverberation time by his shortening.

Abstracts

Vol. 8 No. 3

Katarzyna GŁADYSZEWSKA-FIEDORUK, Tomasz BOBRYK

Modernization of a single-pipe water heating system into an air heating system in a single family house

The paper shows the possibility of modernization of the heating systems in single family houses. The air heating was compared with a radiator heating and underfloor heating in terms of energy sources, heating systems elements, inertia of system, failure rates, costs, an impact on the aesthetics of the interior area and the possibility of expansion of the functions for the ventilation and air-conditioning systems. Moreover the alternative ways for heating such as ground heat exchangers and solar collectors were described. The project for a single-family home heating were presented. It was an air heating using the air handling unit with heat recovery and the ground exchangers. The exhaust ventilation cooperated with a cooker hood. For a DHW system solar installation with DHW tank was proposed. The paper also stated capital and operating costs for the proposed solution.

Jacek KARPIESIUK, Tadeusz CHYŻY

The results of selected interface strength of lightweight radiant heater with dissipating elements

The paper presents selected results of interface strength tests for lightweight radiant heater with dissipating elements made of aluminum heat diffusers. Small height and lightweight structure are the main features of the heater. It has been achieved through eliminating layers of screeds. Comparing to heaters without dissipating elements the structure is more expensive to make, however, the advantage is faster and more uniform transfer of heat to the environment. The article presents the results of strength tests on used adhesives. The following factors have been tested: the shear strength, floating roller peel, pull-off strength and water absorption and frost resistance. The results confirm the possibility of using the radiator heaters on polyurethane adhesive with heat diffusers for heating interiors and in protection systems against ice and snow.

Michał MARCHACZ, Antonina ŻABA

Investigations of the reverberation time in interior of the Immaculate Conception of the Blessed Virgin Mary's chapel in Warsaw

Paper presents reverberation time investigations for interior of the monumental chapel of the Immaculate Conception of the Blessed Virgin Mary's in Warsaw, also called Res Sacra Miser (miserable is sainthood). Aim of measurements was determining acoustic parameters of interior (incl. reverberation time), and attempt to determines acoustic quality. Measurements were done with using decay method and sound source generating pink noise. Reverberation time for empty interior was 2.11 s (2.31 s for 500 Hz). Interior's filling by listeners will have positive effect on reverberation time by his shortening (optimum range for music is 1.6-1.8 s for this interior), also speech intelligibility will be better.

Justyna TOPOLAŃSKA, Dorota Anna KRAWCZYK

Ground air heat exchanger of gravel type as an example of using renewable energy sources in single family buildings – energy and economic effects

Numerous actions promoting the use of energy-saving and environmentally-friendly solutions and the related legal regulations mean that more and more installations using RES are used, both in large office-administration buildings or residential buildings as well as in single-family houses. One of the most popular solutions is the ground air heat exchanger (GAHE), which pre-prepares the air to be delivered to the indoor. In the winter the air is heated, and it is cooled in the summer. Ground heat exchangers are available in several types: gravel, plate, tubular, glycol and comb. The difference between them is in the way of heat exchange. Each of these solutions has its advantages and disadvantages. The paper discusses installation with GAHE of gravel type made in a single-family house located in the Podlaskie Voivodship. The results of air measurements were taken after passing through the exchanger depending on the outside temperature and the system was evaluated for energy and economic efficiency.

Daniel ZIELEPUZA

Economical analysis of a deep excavation supporting systems

The paper aim is to analyse the costs of support of a deep excavation. The paper presents two variants of support of a deep excavation: mixed wall and diaphragm wall, in designed building of commercial centre. Calculations of pressure for both solutions were performed by analytical method according to Eurocode 7 and means of programme GEO5. The support of excavation required two stages of designing, so calculations was divided into two phases. For both structures the economic analysis and displacement analysis were made. In was stated that mixed wall is more economical than diaphragm wall.

Antonina ŻABA, Michał MARCHACZ

Investigations of the reverberation time in Carmelite's chapel placed in Kazanowski's former palace in Warsaw

The paper presents acoustic investigations of the chapel placed in care facility of the Caritas of the Warsaw Archdiocese (Kazanowski's former palace). Chapel, due to 17th century unique collection of the polychromes, is valuable historical treasure. Aim of measurements was determining acoustic parameters of chapel's interior. It might be helpful in establishing exploitation ways in the future. Measurements were done with using decay method and sound source generating pink noise. Reverberation time for empty interior was 2.3 s (2 s for 500 Hz). Optimum reverberation time for interior depends on kind of propagating sound (music, speech). For considering interior reverberation time should be shorter. Interior's filling by listeners will have positive effect on reverberation time by his shortening.