

dr inż. Małgorzata Fedorczyk-Cisak^{1*)}

ORCID: 0000-0003-1125-4068

dr inż. Beata Sadowska²⁾

ORCID: 0000-0003-2866-3685

Innowacyjne rozwiązanie budynków o drewnianej konstrukcji szkieletowej z zastosowaniem systemu Aktywnej Izolacji Termicznej

An innovative solution for timber-frame buildings using the Active Thermal Insulation system

DOI: 10.15199/33.2023.08.04

Streszczenie. W celu zminimalizowania zużycia energii w sektorze budownictwa niezbędne są nowe rozwiązania. W artykule została przedstawiona koncepcja budynku z aktywną izolacją termiczną (ATI), która pozwala na systemowe podejście do obiektu jako kompleksowej technologii, a nie zbioru oddzielnych elementów. Wieloletnia eksploatacja systemu ATI w budynku zrealizowanym na Węgrzech pokazała jego skuteczność w minimalizacji zapotrzebowania na energię. Celem artykułu jest porównanie warunków klimatycznych na Węgrzech oraz w Polsce w celu implementacji technologii ATI do wznoszenia szkieletowych budynków drewnianych w naszym kraju.

Słowa kluczowe: aktywna izolacja termiczna (ATI); szkieletowy budynek drewniany; innowacyjny system izolacji; magazynowanie energii.

Abstract. Minimising energy consumption in the building sector is a necessity. To achieve this, new solutions are needed. This paper presents the concept of an Active Thermal Insulation (ATI) building, which allows a systemic approach to the building as a unified technology rather than a collection of separate elements. The long-term operation of the ATI system, in a building completed in Hungary, has demonstrated its effectiveness in minimising energy demand. The aim of this paper is to compare the climatic conditions in Hungary and Poland for the implementation of ATI technology for timber frame buildings in Poland.

Keywords: Active Thermal Insulation; timber frame building; innovative insulation system; energy storage.

Sektor budownictwa w Polsce przechodzi gwałtowne zmiany. Wymagania dotyczące efektywności energetycznej budynków są obecnie bardzo ostre, a czekają nas kolejne wyzwania. To już nie tylko minimalizacja zużycia energii, ale konieczność zapewnienia neutralności klimatycznej [1]. W Europejskim Zielonym Ładzie został zapisany obowiązkowy unijny cel klimatyczny: **ograniczenie emisji CO₂ w UE o co najmniej 55% do 2030 r.** [2]. Państwa Unii Europejskiej pracują nad nowymi przepisami, które pozwolą ten cel osiągnąć. Do 2050 r. Europa ma być pierwszym kontynentem neutralnym dla klimatu [1]. Aby podołać tym ambitnym celom, należy całkowicie zmienić sposób myślenia o budynku jako o zbiorze oddzielnych technologii i elementów i traktować go jako jeden

spójny system współpracujących ze sobą elementów. Budynek musi mieć bardzo dobre parametry cieplne przegród zewnętrznych [3] oraz wysoko efektywne energetycznie instalacje z wentylacją mechaniczną z odzyskiem ciepła [4]. Systemy wyposażenia technicznego muszą cechować się niskimi stratami energii. Takie systemy powinny wykorzystywać w jak najwyższym stopniu energię ze źródeł odnawialnych, np. ze słońca, gruntu czy wody [5]. Pozyskana energia musi być tak magazynowana, aby można było z niej korzystać przez cały rok. Magazyn ciepła może znajdować się np. w gruncie pod budynkiem i powinien być bardzo dobrze zaizolowany. Energię z magazynu należy wykorzystywać na wszystkie możliwe sposoby w ciągu całego roku, m.in. do podgrzania powietrza w gruntowych wymiennikach ciepła (podgrzany grunt może być dolnym źródłem energii) itp. W przypadku systemu Aktywnej Izolacji Termicznej, zastosowanego w eksperymentalnym budynku na Węgrzech, ta-

ki magazyn służy do wprowadzenia w przegrody zewnętrzne tzw. bariery termicznej. Jest to warstwa o temperaturze zbliżonej do temperatury magazynu gruntowego, ale niższej od temperatury wewnętrznej. Tak skonstruowany system ma szansę osiągnąć niezależność energetyczną. Wszystkie wymienione elementy wchodzi w skład systemu ATI (Aktywna Izolacja Termiczna), objętego ochroną patentową, którego twórcą jest węgierski innowator **Tamás Bárkányi**. System, który funkcjonuje od kilkunastu lat na Węgrzech, jest monitorowany, a dane z systemu opomiarowania są gromadzone, co umożliwia przeprowadzanie analiz. W artykule [6] przeprowadzono analizę systemu w wybranych okresach w ciągu roku. Autorzy wykazali, że dzięki zastosowaniu systemu ATI możliwe jest zmniejszenie strat ciepła przez przegrody zewnętrzne w sezonie grzewczym nawet o 70%. Podobne wyniki uzyskano w budynku eksperymentalnym w północno-wschodniej Polsce [7], zrealizowanym w systemie

¹⁾ Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Lądowej

²⁾ Politechnika Białostocka, Wydział Budownictwa i Nauk o Środowisku

^{*)} Adres do korespondencji: mfedorczyk-cisak@pk.edu.pl

szalunku traconego. Zmniejszenie strat ciepła przez przegrody po zastosowaniu ATI wyniosło 52% [8].

Naszą innowacyjną propozycją jest implementacja systemu ATI do drewnianej technologii szkieletowej, ponieważ jest to rozwiązanie innowacyjne na skalę światową. W tym aspekcie konstrukcje drewniane mają bardzo duży potencjał rozwojowy.

Wśród technologii budownictwa drewnianego na szczególną uwagę zasługuje prefabrykowane budownictwo szkieletowe, jedna z najszybciej rozwijających się technologii wznoszenia budynków. W ciągu pięciu ostatnich lat liczba budynków drewnianych zwiększyła się przeszło dwukrotnie. W 2020 r. wybudowano w Polsce 905 budynków w konstrukcji drewnianej [6]. Eksperti firmy Polskie Domy Drewniane wskazują na rosnącą tendencję budowy budynków w konstrukcji drewnianej. Ich zdaniem każdego roku może powstawać nawet 15 tys. takich budynków. Budynki o lekkiej konstrukcji w szkielecie drewnianym nie są jednak wolne od minusów. Jednym z nich jest mała pojemność cieplna przegród.

Wprowadzenie systemu Aktywnej Izolacji Termicznej do technologii szkieletowej może znacznie poprawić pojemność cieplną przegród, ponieważ dostarczane jest w sposób ciągły do przegrody ciepło z magazynu gruntowego.

Firmy produkujące budynki szkieletowe w Polsce są bardzo zainteresowane rozwiązaniem systemowym Aktywnej Izolacji Termicznej. Na Politechnice Krakowskiej trwają już eksperymentalne pomiary systemu w warunkach laboratoryjnych i opracowywane są detale nowej innowacyjnej technologii. W artykule [8] przedstawiono również analizę możliwości poprawy efektywności energetycznej całego budynku oraz kalkulację ekonomiczną. Dzięki zastosowaniu ATI możliwe jest zmniejszenie kosztów ogrzewania o 30%, a czas zwrotu nakładów inwestycyjnych systemu to 6 – 7 lat w zależności od źródła ciepła (kocioł gazowy, powietrzna pompa ciepła) i związanego z nim kosztu jednostki energii.

Celem artykułu jest porównanie parametrów klimatu zewnętrznego na Węgrzech, gdzie wybudowano ekspery-

mentalny budynek z systemem ATI, z klimatem w Polsce w skali roku. Dokonano również porównania temperatury na wyjściu Aktywnej Izolacji Termicznej z pomiarem temperatury w gruncie pod eksperymentalnym budynkiem w Polsce. Badania te mają na celu ocenę, na ile różnice w pomiarach temperatury są znaczne i czy zasadne są prace wdrożeniowe systemu ATI w klimacie Polski.

Metoda oceny systemu ATI

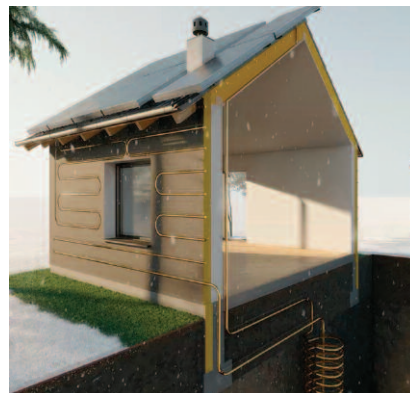
W celu oceny możliwości wdrożenia systemu ATI w Polsce wykonano badania temperatury gruntu pod budynkiem w Krakowie oraz badania porównawcze w eksperymentalnym opomiarowanym budynku na Węgrzech w miejscowości Nyiregyhaza. Zarówno terytorium Polski, jak i Węgier, wg klasyfikacji Köppena-Geigera [10, 11], znajduje się w klimacie dfb (zimnym, bez pór suchych, z ciepłym latem). W artykule przedstawiono również koncepcję innowacyjnego systemu budynku w konstrukcji drewnianej szkieletowej z zastosowaniem systemu ATI i wstępne wyniki symulacji komputerowych w przypadku takiego rozwiązania.

Opis eksperymentalnego budynku z systemem ATI na Węgrzech. W miejscowości Nyiregyhaza na Węgrzech zlokalizowany jest eksperymentalny budynek mieszkalny z zastosowanym systemem Aktywnej Izolacji Termicznej (ATI). Widok eksperymentalnego budynku przedstawiono na fotografii 1, a fotografii 2 schematyczny, poglądowy model działania systemu ATI.

System ATI w tym eksperymentalnym obiekcie zamontowano w konstrukcji ścian wykonanych w technologii EVG-3D. Składają się one z paneli z warstwą ocynkowanej siatki po obu stronach rdzenia styropianowego, zespawanych ze sobą za pomocą kratownic ze stali ocynkowanej, które przechodzą przez rdzeń styropianowy. Panele są łączone w żądanej konfiguracji na miejscu budowy i natryskiwane betonem, aby utworzyć konstrukcję typu „sandwich”. Do systemu EVG-3D dołączono od strony zewnętrznej warstwę natryskanego betonu, w którym umieszczono węzownicę. Dodatkowo węzownicę osłonięto od zewnątrz warstwą styropianu

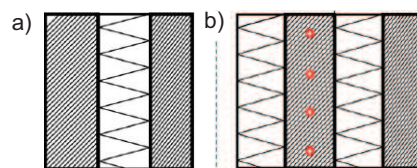


Fot. 1. Eksperymentalny budynek w Nyiregyhaza, Węgry
Źródło własne
Photo 1. Experimental building in Nyiregyhaza, Hungary
Own source



Fot. 2. Model działania systemu ATI
Źródło własne
Photo 2. Model of ATI operation system
Own source

grubości 5 cm (rysunek 1). Mocowanie systemu ATI w budynku eksperymentalnym na Węgrzech przedstawiono na fotografii 3. „Podwieszenie” systemu pod krokiewiami nie powoduje powstania mostków cieplnych. Natomiast warstwa

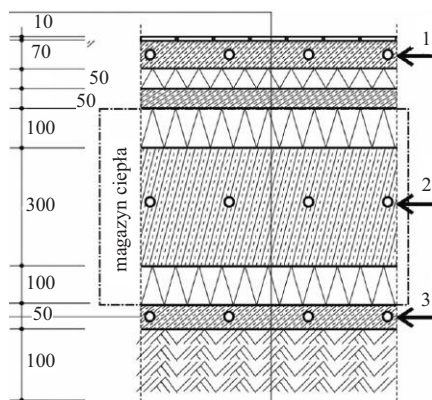


Rys. 1. Różnice pomiędzy technologią EVG-3D: a) standardową; b) z systemem ATI

Źródło własne
Fig. 1. Differences between EVG-3D technology: a) standard; b) with ATI system
Own source



Fot. 3. Ułożenie węzownicy systemu ATI pod krokiewiami
Źródło własne
Photo 3. Placement of the ATI system coil under rafters
Own source



Oznaczenia: 1 – wodne ogrzewanie podłogowe – poziom A; 2 – magazyn jako dolne źródło pompy ciepła – poziom B; 3 – magazyn systemu ATI – poziom C

Rys. 2. Przekrój przez magazyn gruntowy w budynku na Węgrzech *Źródło własne*

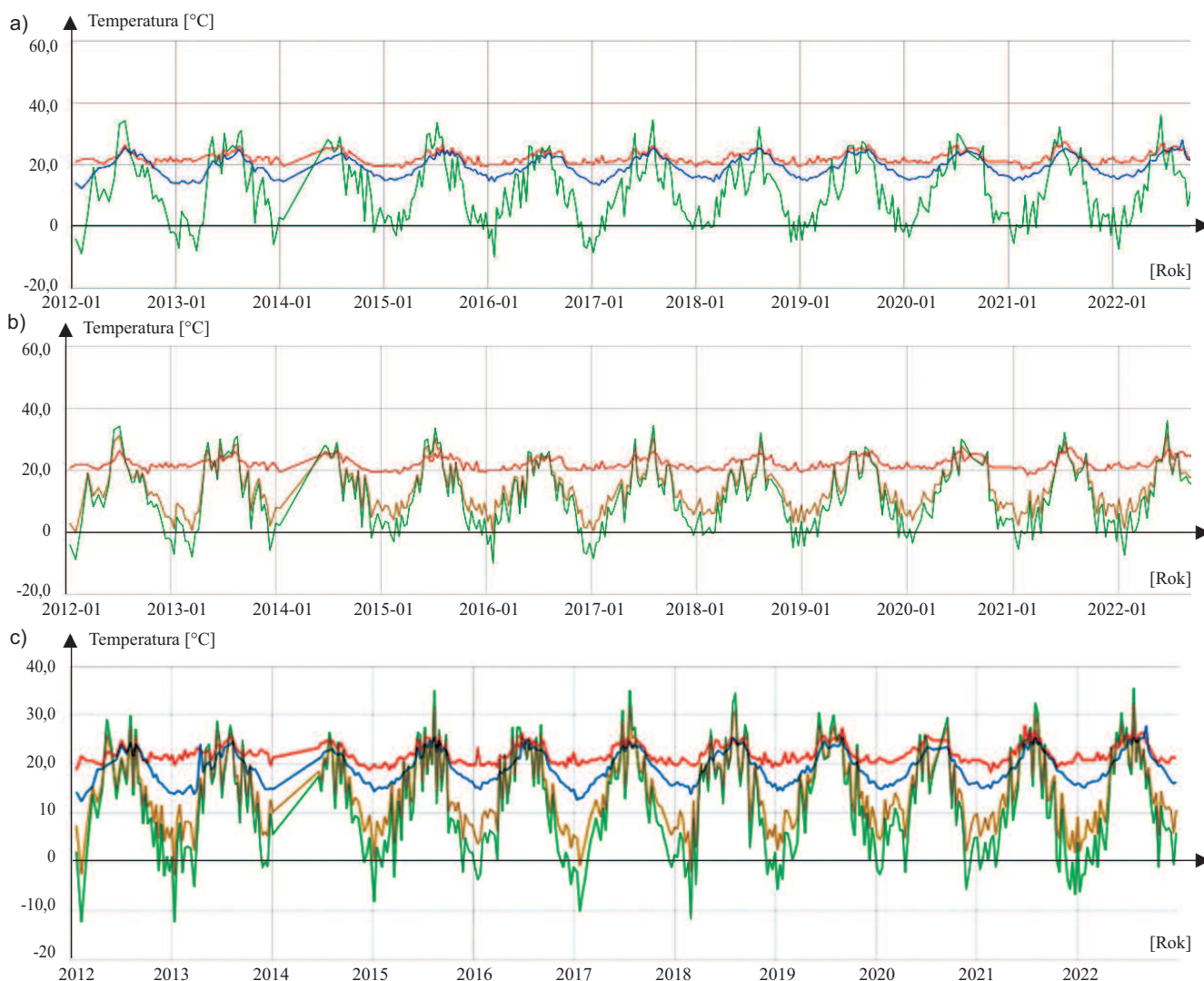
Fig. 2. Cross-section through the ground storage in a building in Hungary *Own source*

termoizolacji w ścianie zewnętrznej musi być „zakołkowana” do warstwy konstrukcyjnej, co wymaga zastosowania kołków do styropianu i generuje powstanie mostków punktowych.

Wężownice w ścianach połączone są z magazynem gruntowym, umieszczonym pod budynkiem (poziom C). Magazyn ładowany jest energią cieplną z wężownicy umieszczonej na dachu. Czynnikiem grzewczo-chłodzącym w systemie jest roztwór glikolu. Na rysunku 2 przedstawiono przekrój przez magazyn gruntowy. Więcej szczegółów technicznych można znaleźć w artykule [6].

Pomiar temperatury wewnętrznej (czerwona linia), temperatury zewnętrznej (zielona linia) oraz temperatury

w warstwie aktywnej izolacji termicznej (niebieska linia) pokazano na rysunku 3a, a na rysunku 3b temperaturę na zewnątrz i wewnątrz budynku oraz obliczoną temperaturę w warstwie ATI, zakładając, że czynnik grzewczy nie krąży w wężownicach. Na rysunku 3a widać wyraźną różnicę pomiędzy temperaturą zewnętrzną a temperaturą w warstwie ATI. Ta bariera termiczna wyraźnie zmniejsza strumień ciepła przez przegrodę, a tym samym wpływa na efektywność energetyczną budynku. W celu porównania, na rysunku 3c przedstawiono pomiar temperatury zewnętrznej, wewnętrznej, temperatury w warstwie ATI oraz obliczonej temperatury przy założeniu, że system nie działa.

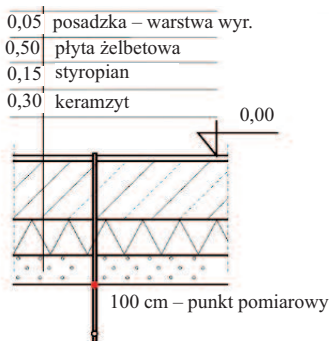


Rys. 3. Temperatura wewnętrzna (czerwona linia), temperatura zewnętrzna (zielona linia), temperatura w warstwie ATI: a) przy działającym systemie (niebieska linia); b) przy niedziałającym systemie (żółta linia); c) wykres wspólny przy działającym (niebieska linia) oraz niedziałającym systemie ATI (żółta linia)

Fig. 3. Internal temperature (red line), external temperature (green line), temperature in the ATI layer: a) with the running system (blue line); b) with the not running system (yellow line); c) joint graph with the ATI running system (blue line) and not running (yellow line)

Temperatura glikolu na wlocie i wylocie węzownicy ścienniej jest mierzona i rejestrowana. Można z dużym prawdopodobieństwem przyjąć, że temperatura na wylocie z magazynu jest zbliżona do temperatury panującej w magazynie gruntowym pod budynkiem. System ATI w eksperymentalnym budynku na Węgrzech działa od 2012 r. System pomiarowy zbiera również dane o temperaturze zewnętrznej.

Opis stanowiska pomiarowego w Polsce. Do analizy wybrano budynek w lokalizacji Kraków, na terenie kampusu Politechniki Krakowskiej. W celu sprawdzenia i porównania temperatury w gruncie na Węgrzech i w Polsce wykorzystano dane z sond pomiarowych umieszczonych pod budynkiem eksperymentalnym w Krakowie. Czujnik, z którego odczytano dane pomiarowe, jest zamocowany pod warstwą płyty żelbetowej, termoizolacji i warstwy keramzytu na głębokości 100 cm od poziomu 0.0. Na rysunku 4 przedstawiono warstwy podłogi na gruncie. Pod płytą żelbetową znajduje się warstwa ocieplenia z twardego styropianu oraz keramzytu. Temperaturę zewnętrzną pobrano z zewnętrznych stacji klimatycznych. W związku z tym, że magazyn gruntowy pod budynkiem w Krakowie nie jest „ładowany” energią



Rys. 4. Schemat podłogi na gruncie w miejscu pomiaru temperatury gruntu

Fig. 4. Diagram of the floor on the ground at the ground temperature measurement site

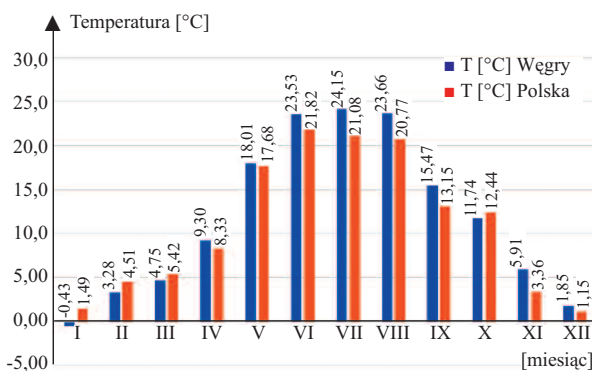
cieplną, tak jak w przypadku budynku eksperymentalnego na Węgrzech, należy przypuszczać, że temperatura w tym przypadku będzie niższa. Dane pomiarowe przyjęte do porównania obejmują okres 1.01.2022 – 31.12.2022 r.

Założenia do symulacji komputerowych. W artykule przeprowadzono analizę przepływu ciepła przez ścianę w lekkiej konstrukcji drewnianej z sys-

temem ATI, z wykorzystaniem programu THERM 6.3., opracowanego przez Lawrence Berkeley Laboratory (LBNL) w Berkeley w USA [12]. Jest to program do analizy dwuwymiarowej wymiany ciepła metodą elementów skończonych, powszechnie stosowany w ocenie termicznej przegród niejednorodnych i mostków termicznych. Warunki brzegowe przyjęto następujące: temperatura wewnętrzna $t_i = 20^\circ\text{C}$, zewnętrzna $t_e = 5,2^\circ\text{C}$ (średnia temperatura w rzeczywistym sezonie grzewczym, obejmującym miesiące: styczeń – kwiecień oraz październik – grudzień 2022 r.), temperaturę w warstwie ATI (t_p) przyjęto na poziomie 16°C . Jest to średni wynik otrzymany w badanym budynku na Węgrzech na wylocie węzownicy z magazynu gruntowego.

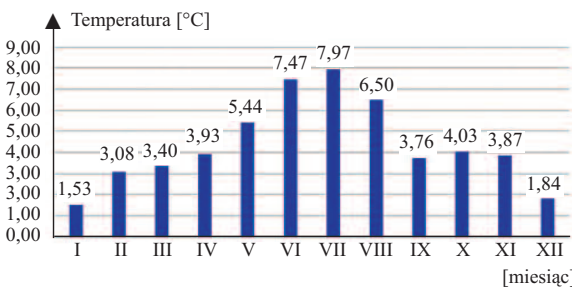
Wyniki i ich omówienie

Na rysunku 5 przedstawiono porównanie średniej miesięcznej temperatury zewnętrznej zarejestrowanej w otoczeniu eksperymentalnych budynków na Węgrzech i w Polsce w 2022 r., a na rysunku 6



Rys. 5. Porównanie średniej miesięcznej temperatury zewnętrznej zarejestrowanej w otoczeniu eksperymentalnych budynków na Węgrzech i w Polsce w 2022 r.

Fig. 5. Comparison of the monthly average outdoor temperature recorded around the experimental buildings in Hungary and Poland in 2022



Rys. 6. Różnica między średnią miesięczną temperaturą w gruncie w Polsce i na Węgrzech

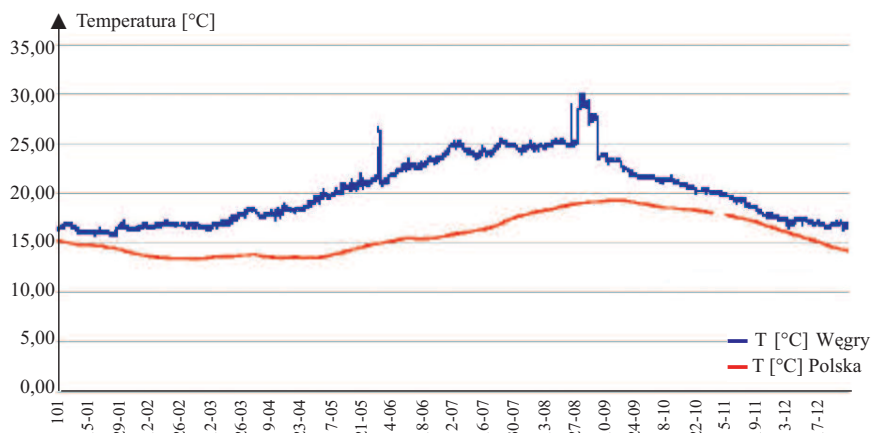
Fig. 6. Difference between average monthly temperature in the ground in Poland and Hungary

różnicę między średnią miesięczną temperaturą w gruncie w Polsce i na Węgrzech.

Z przeprowadzonych pomiarów porównawczych wynika, że w miesiącach zimowych oraz letnich różnica między średnią miesięczną temperaturą w obu lokalizacjach nie przekracza 3°C . Średnia temperatura w rzeczywistym sezonie grzewczym (obejmującym miesiące: styczeń – kwiecień oraz październik – grudzień 2022 r.) była w obu lokalizacjach taka sama i wyniosła $5,2^\circ\text{C}$.

Na rysunku 7 porównano całoroczną temperaturę w gruncie pod budynkiem, zarejestrowaną w 2022 r. na wyjściu z magazynu gruntowego w eksperymentalnym budynku na Węgrzech oraz pod budynkiem eksperymentalnym w Krakowie. Tu oczywiście różnica jest większa szczególnie w okresie letnim, kiedy na Węgrzech następuje ładowanie magazynu ciepłem z kolektora dachowego (wzrost temperatury o ok. 8°C), natomiast w miesiącach zimowych różnica średniej miesięcznej temperatury znajduje się w przedziale $1,53 - 3,87^\circ\text{C}$.

Propozycja opracowania konstrukcyjnego nowego innowacyjnego systemu w technologii szkieletowej drewnianej z systemem ATI zapewniającego pojemność cieplną i komfort użytkowy. Badania porównawcze wykazują niewielką różnicę temperatury zewnętrznej. Co prawda temperatura gruntu w Polsce jest niższa, ale zakładając, że magazyn gruntowy będzie ładowany z kolektorów dachowych oraz z węzownicy umieszczonych w ścianach, można założyć, że temperatura gruntu w Polsce zbliży się do temperatury na Węgrzech. Bardzo dobre wyniki badań naukowych węgierskiego budynku [7], potwierdzające zalety systemu ATI oraz próba rozwiązania problemu związanego



Rys. 7. Porównanie całorocznej temperatury zarejestrowanej w 2022 r. w gruncie pod budynkiem na Węgrzech i w Polsce

Fig. 7. Comparison of the year-round temperature recorded in 2022 in the ground under the building in Hungary and Poland

z małą pojemnością cieplną budynków w drewnianej technologii szkieletowej były podstawą do opracowania technologii innowacyjnej na rynku światowym. Na rysunku 8a przedstawiono rozwiązanie detali konstrukcyjnych ściany zewnętrznej w połączeniu z płytą fundamentową oraz magazynem ciepła, a na rysunku 8b dachu/kolektora pozyskującego energię w sezonie letnim.

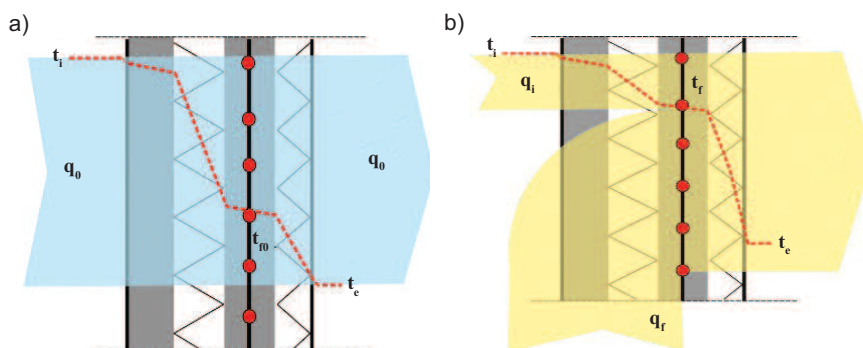
Wstępna analiza cieplna przyjętego rozwiązania

W celu sprawdzenia różnicy w strumieniu ciepła przepływającym przez przegrodę z innowacyjnym systemem ATI w porównaniu z rozwiązaniem bez tego systemu obliczono w każdym przypadku współczynnik przenikania ciepła. Należy podkreślić, że w przypadku

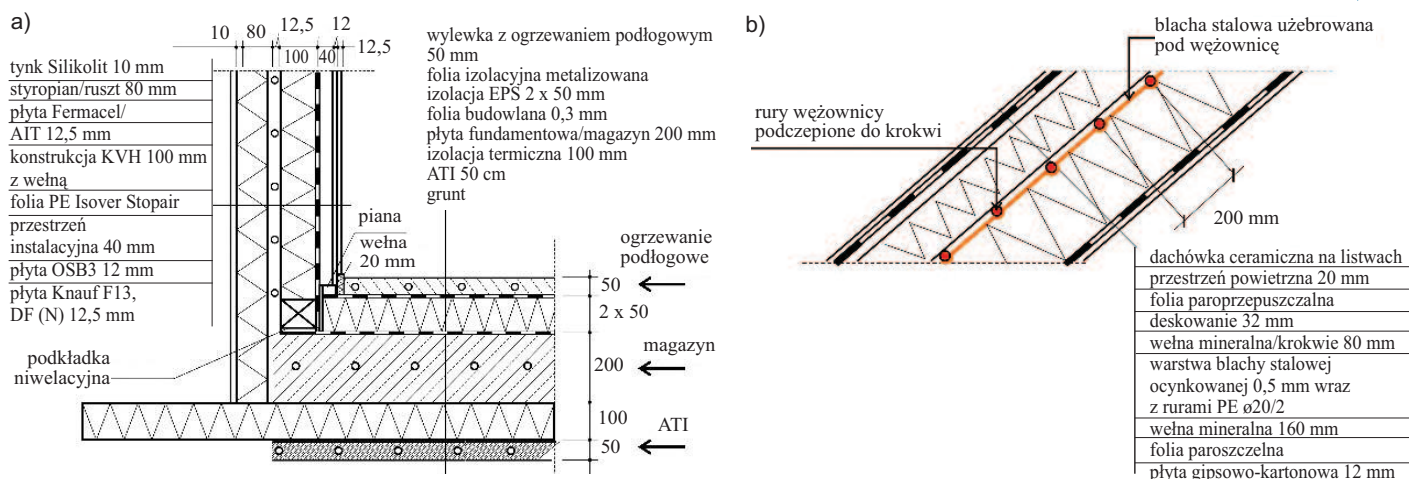
działania aktywnej izolacji termicznej, przy obliczaniu wartości gęstości strumienia ciepła (q_i) brana jest pod uwagę tylko częściowa przenikalność cieplna ściany zewnętrznej od wnętrza do aktywnej płaszczyzny izolacji [6], co pokazano na rysunku 9. W artykule po-

równano jedynie strumienie ciepła q_0 oraz q_i wpływające do przegrody od strony wnętrza. Wartość q_i pochodzi z ciepła zgromadzonego w magazynie gruntowym. We wstępnej analizie pominięto opór ścianek rur ATI i mocowania. Założono również, że temperatura w warstwie ATI jest jednorodna na całej powierzchni. Na rysunku 10 przedstawiono wyniki symulacji komputerowej 2D ściany bez proponowanego systemu, a na rysunku 11 przy działającym systemie ATI.

Na podstawie policzonego, w programie Therm, współczynnika przenikania ściany (U-factor) w dwóch przypadkach oraz różnicy temperatury obliczono gęstość strumienia ciepła, która wyniosła odpowiednio: 2,95 oraz 1,79 W/m². Tak więc redukcja strat ciepła z wnętrza na zewnątrz, dzięki zastosowaniu systemu ATI w drewnianej ścianie szkieletowej wynosi, przy przyjętych założeniach, 39%. W kolejnych badaniach zostaną przeprowadzone

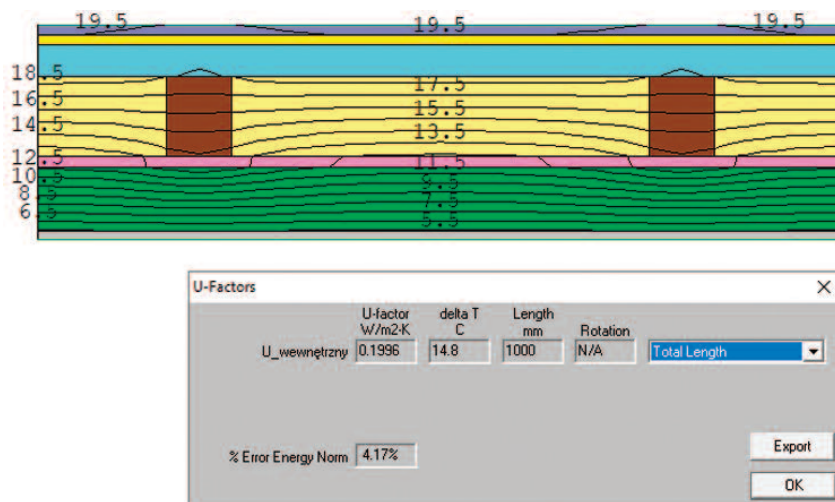


Rys. 9. Schemat przegrody: a) bez systemu ATI; b) z działającym systemem ATI *Źródło własne*
Fig. 9. Diagram of the partition: a) without the ATI system; b) with the ATI system in operation *Own source*



Rys. 8. Rozwiązanie detali konstrukcyjnych: a) połączenia ściany zewnętrznej z płytą fundamentową oraz magazynem ciepła; b) dachu *Źródło własne*

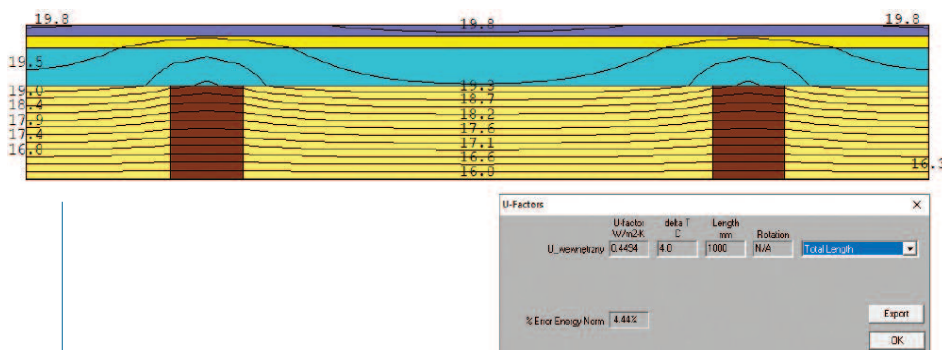
Fig. 8. Detail solutions: a) for the connection of the external wall to the foundation slab and the heat store; b) roof *Own source*



Rys. 10. Rozkład temperatury w przegrodzie szkieletowej bez ATI oraz wyniki obliczeń współczynnika przenikania ciepła

Fig. 10. Temperature distribution in a frame partition without ATI and results of calculations of the heat transfer coefficient

*Źródło własne
Own source*



Rys. 11. Rozkład temperatury w przegrodzie szkieletowej z systemem ATI oraz wyniki obliczeń współczynnika przenikania ciepła

Fig. 11. Temperature distribution in a frame partition with ATI system and results of calculations of the heat transfer coefficient

*Źródło własne
Own source*

szczegółowe symulacje numeryczne proponowanego rozwiązania, badania eksperymentalne oraz analizy ekonomiczne.

Wnioski

Z przeanalizowanych przez nas badań wynika, że w 2022 r. różnica średniomiesięcznej temperatury zewnętrznej na Węgrzech i w Krakowie wynosiła ok. 3°C. Natomiast w miesiącach letnich różnica ta sięgała 8°C, co wynikało z „ładowania” akumulatora gruntu w budynku eksperymentalnym na Węgrzech. W miesiącach zimowych różnica średniej miesięcznej temperatury gruntu pod budynkami wahała od 1,53 do 3,87°C.

Obliczona z symulacji komputerowych redukcja strumienia ciepła w przegrodzie z działającym systemem ATI wynosi 39% w miesiącach zimowych.

Obliczenia dotyczyły drewnianej ściany szkieletowej. Obniżenie strat ciepła jest mniejsze, niż podano w [6], gdzie analizowano przegrodę z rdzeniem betonowym w eksperymentalnym budynku na Węgrzech.

Wyzwania, jakie stoją przed sektorem budownictwa, wymagają opracowywania nowych technologii oraz innowacyjnych rozwiązań. Takim rozwiązaniem jest system ATI, który pozwoli na zwiększenie pojemności cieplnej budynków wzniesionych w drewnianej technologii szkieletowej. Rozwiązanie takie nie jest do tej pory znane i można je uznać za innowację na skalę światową. Aby dokonać ostatecznej oceny celowości implementacji rozwiązania ATI do warunków klimatycznych w Polsce, należy przeprowadzić dodatkowe pomiary dotyczące temperatury w magazynie gruntu „ładowanym” energią słoneczną. Warto

również przeprowadzić analizę ekonomiczną takiego rozwiązania, aby określić relację koszt-efekt, co będzie tematem kolejnych prac.

Literatura

- [1] Paryskie porozumienie klimatyczne. Dostępne online: <https://www.consilium.europa.eu/pl/policies/climate-change/paris-agreement/#EU>. Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej L 282/4 (sprawdzono 19.07.2023).
- [2] Europejski Zielony Ład. Komunikat Komisji Do Parlamentu Europejskiego, Rady Europejskiej, Rady, Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów. Bruksela 11.12.2019, COM/2019/640 final. Dostępne online: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/?uri=celex%3A52019DC0640> (sprawdzono 19.07.2023).
- [3] Rozporządzenie Ministra Rozwoju i Technologii z 31 stycznia 2022 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie. (Dz.U. 2022 poz. 248).
- [4] Domy energooszczędne. Podręcznik dobrych praktyk NFOŚiGW, przygotowany na podstawie opracowania KRAJOWEJ AGENCJI POSZANOWANIA ENERGII S.A., Warszawa, listopad 2012. Dostępny online: <http://beta.nfosigw.gov.pl/oferta-finansowania/srodki-krajowe/programy-priorytetowe/doplaty-do-kredytow-na-domy-energooszczedne/podrecznik-dobrych-praktyk/> (sprawdzono 19.07.2023).
- [5] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2018/844 z 30 maja 2018 r. zmieniająca dyrektywę 2010/31/UE w sprawie charakterystyki energetycznej budynków i dyrektywę 2012/27/UE w sprawie efektywności energetycznej.
- [6] Kisilewicz T, Fedorczak-Cisak M, Barkanyi T. Active thermal insulation as an element limiting heat loss through external walls. *Energy Build.* 2019; <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109541>
- [7] Krzaczek M, Florczuk J, Tejchman JJAE. Improved energy management technique in pipe-embedded wall heating/cooling system in residential buildings. *Applied Energy.* 2019; <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113711>
- [8] Sadowska B, Barkanyi T, Fedorczak-Cisak M, Gobcewicz E, Broniewicz E, Dec K. Efektywność energetyczna systemu aktywnej izolacji termicznej w budynku jednorodzinym w warunkach polskich wraz z analizą ekonomiczną i środowiskową. *Materiały Budowlane.* 2023; DOI: 10.15199/33.2023.06.06.
- [9] http://kurtz.zut.edu.pl/fileadmin/BE/Tablice_materialowe.pdf (sprawdzono 19.07.2023).
- [10] Kottek M, Grieser J, Beck C, Rudolf, B, Rubel F. World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift.* 2006, 15: 259 – 263.
- [11] Peel MC, Finlayson BL, McMahon TA. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification, *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2007; <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>.
- [12] Strona informacyjna oprogramowania THERM. <https://therm.software.informer.com> (sprawdzono 19.07.2023).

Przyjęto do druku: 24.07.2023 r.