

INSTYTUT FIZYKI BUDOWLI KATARZYNA I PIOTR KLEMM S.C.

INSTITUTE OF BUILDING PHYSICS KATARZYNA & PIOTR KLEMM S.C.

FIZYKA BUDOWLI
W TEORII I PRAKTYCE

BUILDING PHYSICS
IN THEORY AND PRACTICE

BIBLIOTEKA GŁÓWNA
POLITECHNIKI ŁÓDZKIEJ

P.

M-481

68

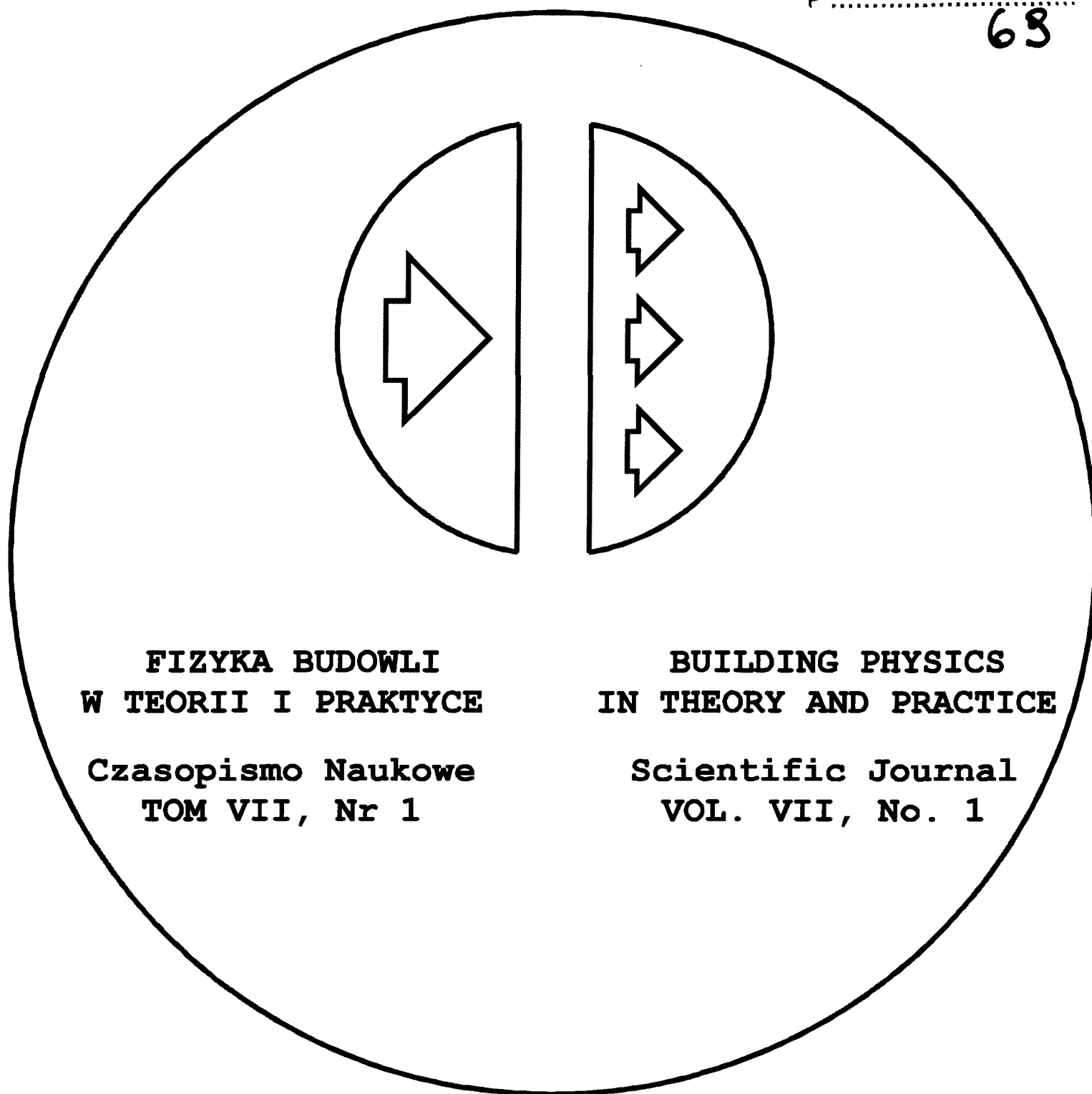
TOM VII, Nr 1

VOLUME VII, No. 1

ŁÓDŹ 2015

Biblioteka Główna
Politechniki Łódzkiej

P M-681
68



INSTYTUT FIZYKI BUDOWLI KATARZYNA I PIOTR KLEMM S.C.

INSTITUTE OF BUILDING PHYSICS KATARZYNA & PIOTR KLEMM S.C.

ŁÓDŹ 2015

KOMITET HONOROWY - HONORARY COMMITTEE

Prof. Wojciech Dzieniszewski (Poland)
Prof. Jerzy A. Pogorzelski (Poland)
Prof. Maria Stawicka-Wałkowska (Poland)
Prof. Lech Śliwowski (Poland)
Prof. Leszek Wolski (Poland)

KOMITET NAUKOWY - SCIENTIFIC COMMITTEE

Prof. Jacques Beaumont (France)
Prof. Ewa Błazik-Borowa (Poland)
Prof. Dorota Bzowska (Poland)
Prof. Dorota Chwieduk (Poland)
Prof. Halina Garbalińska (Poland)
Prof. Dariusz Gawin (Poland)
Dr hab. Dariusz Heim (Poland)
Prof. Jan Hensen (Netherlands)
Dr hab. Irena Ickiewicz (Poland)
Prof. Aleksander Jewtuszenko (Ukraine)
Prof. Jarosław Jędrysiak (Poland)
Dr hab. Hanna Jędrzejuk (Poland)
Prof. Karel Kabele (Czech Republic)
Prof. Tomasz Kisilewicz (Poland)
Prof. Agnieszka J. Klemm (Great Britain)
Dr hab. Katarzyna Klemm (Poland)
Prof. Piotr Klemm (Poland)
Prof. Halina Koczyk (Poland)
Prof. Elżbieta Kossecka (Poland)
Prof. Jan Kubik (Poland)
Prof. Leszek Laskowski (Poland)
Prof. Lech Lichołai (Poland)
Prof. Thomas Lützkendorf (Germany)
Prof. Wojciech Marks (Poland)
Prof. Henryk Nowak (Poland)
Prof. Jacek Nurzyński (Poland)
Prof. Stefan Owczarek (Poland)
Prof. Jerzy Zb. Piotrowski (Poland)
Prof. Henk L. Schellen (Netherlands)
Prof. Jan Ślusarek (Poland)
Prof. Robert Wójcik (Poland)
Prof. Jerzy Wyrwał (Poland)

ZESPÓŁ REDAKCYJNY - EDITORIAL BOARD

Przewodniczący Zespołu - Editor-in-chief

Prof. Piotr Klemm

Sekretarz Redakcji - Secretary

Dr hab. Dariusz Heim

Komitety Redakcyjny - Editorial Committee

Dr hab. Katarzyna Klemm

Dr Maciej Wojtczak

WYDAWCA - PUBLISHER

Instytut Fizyki Budowli Katarzyna i Piotr Klemm S.C.
Institute of Building Physics Katarzyna & Piotr Klemm S.C.
ul. Świetlana 7, 91-490 Łódź, e-mail: poczta@fizykabudowli.com.pl

ISSN 1734-4891

Pamięci Profesora Jerzego Sadowskiego

Wspomnienie o Profesorze Jerzym Sadowskim

Dnia 28 lipca 2014 r. zmarł Prof. zw. dr hab. inż. Jerzy Sadowski wybitny polski uczony, specjalizujący się w dziedzinie akustyki budowlanej, przemysłowej, architektonicznej i środowiskowej.

Profesor Jerzy Sadowski urodził się 18 grudnia 1924 r. w Augustowie. W 1946 roku rozpoczął studia na Politechnice Gdańskiej początkowo na Wydziale Architektury, potem przeniósł się na Wydział Elektryczny. Losy studenta Jerzego Sadowskiego były równie skomplikowane jak powojenna historia Polski. Za nielegalną działalność w organizacji studenckiej został w 1949 r. relegowany z uczelni z zakazem dalszego studiowania. Zakaz ten po pewnym okresie uchylono, co pozwoliło podjąć mu dalsze studia, tym razem na Politechnice Warszawskiej, na Wydziale Łączności, gdzie w 1952 r. uzyskał dyplom magistra inżyniera.



W czasie przerwy w studiach, i bezpośrednio po ukończeniu studiów pracował w wykonawstwie budowlanym a następnie jako projektant w Biurze Studiów i Projektów Radia i Telewizji. W tym czasie opracował wiele projektów studiów radiowych i telewizyjnych (na owe czasy zastosował bardzo nowatorskie rozwiązania).

W 1959 r. nawiązał kontakt z Instytutem Techniki Budowlanej, gdzie utworzył Zakład Akustyki. Pod Jego kierownictwem Zakład ten stał się wkrótce ważnym ośrodkiem zajmującym się akustyką budowlaną, architektoniczną, urbanistyczną i środowiskową.

Jerzy Sadowski szybko zdobywał kolejne stopnie i tytuły naukowe: w 1961 r. uzyskał stopień doktora na Politechnice Śląskiej, stopień dr hab. uzyskał na Politechnice Warszawskiej, a następnie w roku 1973 – tytuł profesora i w 1980 r. – tytuł profesora zwyczajnego.

Jako wieloletni Kierownik Zakładu Akustyki ITB (przez prawie 45 lat) kształtował jego tematykę badawczą i profil działania uwzględniając zarówno aspekty naukowe jak i praktyczne, odpowiadające potrzebom budownictwa, urbanistyki i ochrony środowiska.

W tych dziedzinach zajmował się Profesor badaniami zjawisk akustycznych zachodzącymi w elementach i obiektach budowlanych, we wnętrzach o akustyce kwalifikowanej, w przestrzeniach urbanistycznych, rozwijał metody specjalistycznych pomiarów akustycznych. Zajmował się także zagadnieniami będącymi na pograniczu medycyny, psychoakustyki i akustyki technicznej związanymi z subiektywnymi badaniami hałasu oraz z wpływem hałasu na zdrowie i samopoczucie człowieka odnosząc tą problematykę do jakości akustycznej obiektów budowlanych, szczególnie budynków mieszkalnych.

Duże znaczenie dla rozwoju w Polsce akustyki architektonicznej miały inicjatywy Profesora J. Sadowskiego włączenia polskich ośrodków badawczych do współpracy międzynarodowej. Na szczególne podkreślenie zasługuje także działalność prof. Jerzego Sadowskiego w organizacjach europejskich i międzynarodowych: naukowych, normalizacyjnych (ISO, CEN) i zawodowych. Profesor uczestniczył w pracach Komisji Akustyki W-51 CIB (Centre International du Batiment), w Europejskiej Komisji Gospodarczej ONZ, gdzie był ekspertem ds. akustyki budowlanej i środowiskowej. Był między innymi autorem raportu Environmental Protection Against Noise in Poland opracowanego na wniosek tej Komisji.

Bardzo aktywną działalność prowadził Profesor, jako członek Państwowej Rady Ochrony Środowiska oraz kolejnych Rad Naukowo-Technicznych Komisji ds. Ocen Oddziaływania na Środowisko przy Ministrze Ochrony Środowiska Zasobów Naturalnych i Leśnictwa (obecna nazwa: Ministerstwo Środowiska) reprezentując w tych organach zagadnienia ochrony środowiska przed hałasem i drganiami. Współpracował również, jako konsultant w zakresie zagadnień akustycznych, przy projektowaniu i realizacji wielu znaczących inwestycji w kraju.

Profesor Sadowski był członkiem Komitetu Akustyki Polskiej Akademii Nauk. Działał również w Stowarzyszeniu Urbanistów Polskich oraz w Sekcji Autorów Dzieł Naukowych Stowarzyszenia ZAIKS. Był również zapraszany do uczestnictwa w wielu Radach Programowych wydawnictw naukowych i technicznych (np. Instytutu Techniki Budowlanej w Warszawie, Głównego instytutu Górnictwa w Katowicach, Instytutu Inżynierii Środowiska PAN w Krakowie).

Jako promotor 13 przewodów doktorskich wspierał rozwój naukowy pracowników Zakładu Akustyki ITB i innych ośrodków badawczych w kraju.

Dorobek publikacyjny Profesora Jerzego Sadowskiego jest imponujący. Jest autorem (w kilku przypadkach współautorem) ponad 240 publikacji w tym 40 publikacji zwartych, referatów na konferencjach krajowych i zagranicznych. Książki autorstwa Profesora były i są nadal wykorzystywane zarówno w pracach badawczych, eksperckich jak i przy prowadzeniu zajęć na wyższych uczelniach

Za prace badawcze i publikacje uzyskał Profesor Sadowski 23 nagrody przyznane przez ministrów resortów Budownictwa i Ochrony Środowiska. Był odznaczony srebrnym Krzyżem Zasługi (1972), Krzyżem Oficerskim Orderu Odrodzenia Polski (1997), Krzyżem Komandorskim Orderu Odrodzenia Polski (2004) oraz licznymi odznaczeniami resortowymi i odznaczeniami organizacji naukowych i technicznych.

Przedstawiony w ogromnym skrócie dorobek Profesora Jerzego Sadowskiego, jako wybitnego uczonego, organizatora życia naukowego, eksperta, nauczyciela i pisarza świadczy o jego wielkiej pracowitości, rzetelności i odwadze w podejmowaniu coraz to nowych wyzwań. Podkreślić należy jeszcze inne cechy Profesora – ogromną kulturę osobistą, jego życzliwość, umiejętność współpracy i konsolidacji zespołów badawczych. Takiego Profesora Jerzego Sadowskiego będą mieć w pamięci wszyscy, którzy mieli zaszczyt z Nim współpracować.

SPIS TREŚCI

TABLE OF CONTENTS

BANDURSKI K., MIELCZYŃSKI T., KOCZYK H., Wpływ użytkowania na parametry komfortu w energooszczędnym domu drewnianym <i>DomTrzon</i> – wyniki pomiarów	9
BOCHENEK M., GARBALIŃSKA H., Ocena porównawcza techniki DVS i tradycyjnej metody wyznaczania izoterm sorpcji – na przykładzie betonu komórkowego klasy 400	15
BZOWSKA D., Model regresji do wyznaczania liczby wymiana powietrza wentylacyjnego.....	21
DULAK L., MARCHACZ M., ŻUCHOWSKI R., Laboratoryjne badania tłumienia dźwięków uderzeniowych przez podłogi pływające z pojedynczą oraz podwójną warstwą sprężystą	29
JABŁOŃSKI M., GAWĘDA I., GAWIN D., Wpływ temperatury na kinetykę procesu hydratacji różnych cementów.....	33
KACZOREK D., PIETRUSZKA B., Badania właściwości cieplno–wilgotnościowych materiałów higroskopijnych z surowców pochodzenia roślinnego	39
LICHOŁAI L., STARAKIEWICZ A., MURIAS P., SZYSZKA J., Wpływ ramki dystansowej na rozkład temperatury na powierzchni szyby zespolonej w świetle badań termowizyjnych.....	45
MISZCZUK A., Poziom szczelności jednorodzinnych budynków energooszczędnych w Polsce	49

RECENZENCI - FIZYKA BUDOWLI W TEORII I PRAKTYCE – TOM VII Nr 1

Prof. Dorota Bzowska

Prof. Halina Garbalińska

Dr Sławomir Grabarczyk

Dr hab. Irena Ickiewicz

Dr Marek Jabłoński

Prof. Agnieszka Klemm

Prof. Halina Koczyk

Prof. Henryk Nowak

Dr Katarzyna Nowak

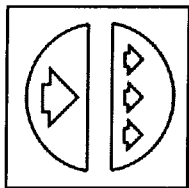
Dr hab. Jacek Nurzyński

Dr Joanna Rucińska

Dr Aleksander Starakiewicz

Dr Tomasz Steidl

Prof. Robert Wójcik



**WPLYW UŻYTKOWANIA NA PARAMETRY KOMFORTU
W ENERGOOSZCZĘDNYM DOMU
DREWNIANYM *DOMTRZON* – WYNIKI POMIARÓW**

Karol BANDURSKI*, Tomasz MIELCZYŃSKI**, Halina KOCZYK*

* Politechnika Poznańska, Instytut Inżynierii Środowiska
ul. Berdychowo 4, 60-965 Poznań, e-mail kontaktowy: karol.bandurski@put.poznan.pl

** BUILDgreen Design Sp. z o. o.
ul. Kopanina 54/56, 60-105 Poznań, strona internetowa: <http://www.buildgreen.pl/>

Streszczenie: *DomTrzon* (znany również jako *Bio_Arka*) jest drewnianym budynkiem jednorodinnym, wykonanym w standardzie energooszczędnym, o konstrukcji masywnej. Obiekt jest wyposażony w mechaniczną instalację wentylacyjną z rekuperatorem. Głównym źródłem ciepła na cele grzewcze jest akumulacyjny piec opalany drewnem, który służy również do przygotowywania posiłków. Artykuł prezentuje dziesięciodniowe pomiary (luty 2014r.) wybranych parametrów komfortu wewnętrznego (temperatura, wilgotność, stężenie dwutlenku węgla). Na potrzeby analizy wprowadzono prosty model pieca akumulacyjnego. W referacie przeanalizowano korelacje pomiędzy zawartością wilgoci w powietrzu oraz stężeniem CO₂. Osiągnięciem pracy jest również szacunkowa analiza wpływu rodzaju źródła ciepła do przygotowania posiłków na zapotrzebowanie świeżego powietrza. Na podstawie pomiarów zaproponowano kierunki zmian w koncepcji budynku, które mogłyby jeszcze bardziej wykorzystać jego energooszczędny i ekologiczny potencjał.

Słowa kluczowe: Pomiar komfortu, użytkownicy, budownictwo energooszczędne i ekologiczne, piec akumulacyjny.

1. WSTĘP

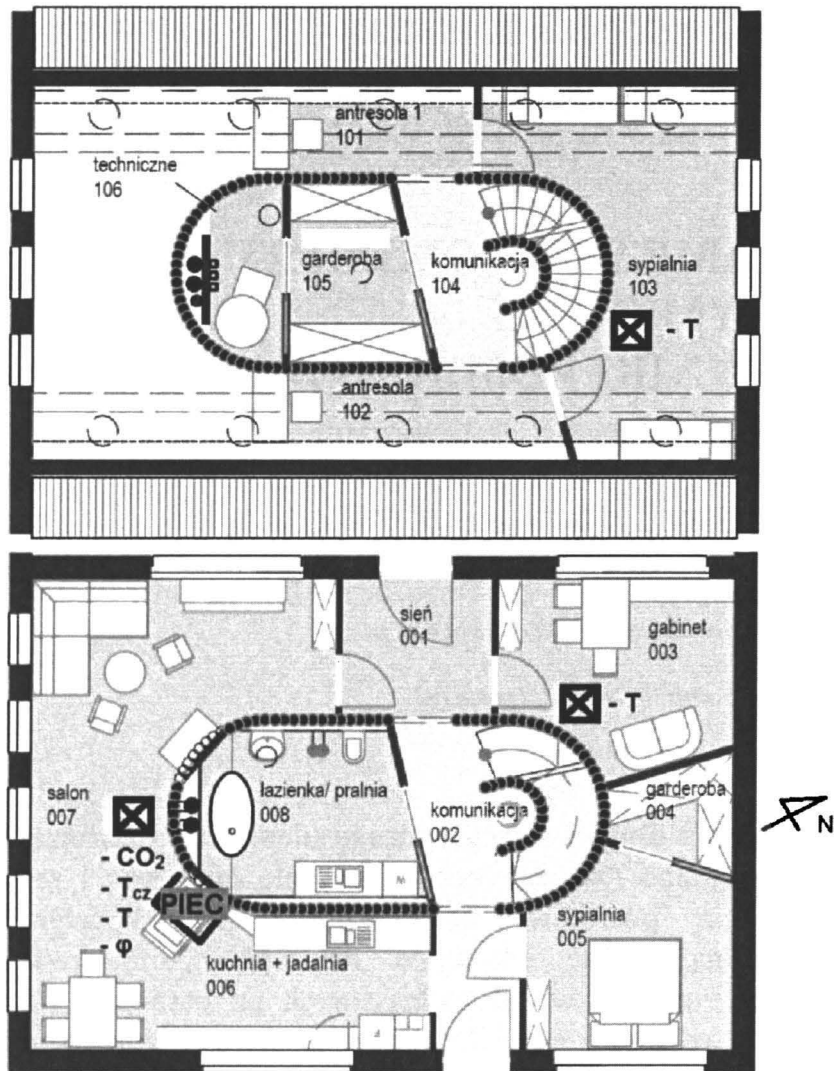
Jednym z obecnych priorytetów branży budowlanej jest tworzenie budynków zrównoważonych [1], tzn. racjonalnych pod względem energetycznym, ekologicznym i ekonomicznym. Niniejszy artykuł ma na celu zaprezentowanie analizy wyników pomiarów wybranych parametrów środowiska wewnętrznego drewnianego domu energooszczędnego *DomTrzon* (roczne zapotrzebowanie na energię na cele grzewcze: 27 kWh/m²), który charakteryzuje się niskim zużyciem energii pierwotnej (rocznie: 17

kWh/m²), z drugiej strony wymaga ulepszenia rozwiązania instalacyjnego (zużycie energii na cele grzewcze i przygotowanie posiłków: 66 kWh/m²) [2]. W artykule szczególną uwagę zwrócono na wpływ użytkowania obiektu i warunków atmosferycznych na parametry jego klimatu wewnętrznego. *DomTrzon* jest nazywany również *Bio_Arka* (<http://domtrzon.buildgreen.pl/>).

1.1. Charakterystyka obiektu

DomTrzon jest jednorodinnym budynkiem drewnianym, którego konstrukcję nośną stanowią ściany zewnętrzne wykonane z drewnianych paneli z tzw. klejonego drewna masywnego, o grubości 10 cm i drewniana więźba dachowa. Budynek jest ocieplony za pomocą izolacji z włókna drzewnego o sumarycznej grubości 30 cm. Współczynniki przenikania ciepła przegród nieprzeźroczystych wynoszą: 0.15 W/(m²K) (ściana zewnętrzna) i 0.09 W/(m²K) (dach). W przypadku przegród przeźroczystych współczynnik przenikania ciepła zawiera się w granicach: 0.73-0.84 W/(m²K), a całkowity współczynnik przenikania energii słonecznej: 0.45–0.58. Świeże powietrze do budynku jest dostarczane przez wentylację mechaniczną (200 m³/h) z krzyżowym wymiennikiem ciepła (sprawność ok. 82%). Jedyne źródło ciepła w budynku to piec akumulacyjny na drewno (*Eva 1*, [3]), który pełni również rolę kucharki do przygotowywania posiłków. Na rys. 1 przedstawiono układ funkcjonalny budynku. W istniejącym obiekcie brak jednak większości ścian działowych (prowizorycznie wydzielony jest gabinet, garderoba i sypialnia na parterze) oraz schodów, meble są w innym układzie, centralnie umiejscowiona palisada

istnieje. Obiekt znajduje się w północnej części Wielkopolski, na terenie wiejskim.



Rys. 1. Układ funkcjonalny opomiarowanego obiektu z zaznaczeniem lokalizacji czujników (T – temperatury, T_{CZ} – temperatura czarnej kuli, CO_2 – czujnik stężenia CO_2 , ϕ – wilgotność) i pieca akumulacyjnego.

Fig. 1. Investigated building functional layout, sensors (T – temperature, T_{CZ} – black-globe temperature, CO_2 – carbon dioxide concentration, ϕ – relative/absolute humidity) and accumulation stove placement.

1.2. Opis pomiarów

Pomiary prezentowane w referacie przeprowadzono w ostatnich dniach lutego 2014 roku. W analizowanym okresie w domu przebywało od 1 do 6 osób (małżeństwo i czwórka dzieci w wieku 0 – 11 lat). Przez 10 dni monitorowano: temperaturę w salonie, gabinecie i na antresoli za pomocą czujników Pt100, temperaturę czarnej kuli (również czujnik Pt100) i stężenie dwutlenku węgla oraz wilgotność w salonie (czujnik HB21AB17 – Delta OHM). Czujniki umieszczono na wysokości pomiędzy 1.5 a 2.5 m. Mieszkańcy, przez pierwszych 6 dni, zapisywali czas i orientacyjną ilość palonego w piecu drewna (mały/duży wsad) oraz orientacyjną liczbę osób w budynku. Wszystkie odnotowane przez mieszkańców

rozruchy pieca były motywowane potrzebą przygotowania posiłku, nie odnotowano potrzeby korzystania z pieca w celu polepszenia parametrów mikroklimatu wewnętrznego. W trakcie pomiarów mieszkańcy raportowali, że warunki środowiska wewnętrznego *DomuTrzon* są komfortowe pod względem termicznym.

Dla okresu pomiarowego uzyskano również dane klimatyczne z najbliższej stacji meteorologicznej (ok. 30 km), podobnie jak w [2], gdzie zbieżność z warunkami meteorologicznymi na miejscu została częściowo zweryfikowana.

1.3. Model pieca akumulacyjnego

W trakcie pomiarów notowano jedynie orientacyjną ilość paliwa (drewna) oraz godzinę spalania. Aby przeanalizować wpływ pracy (mocy chwilowej) pieca na mikroklimat wewnętrzny postanowiono stworzyć prosty model matematyczny obiektu, który na wejściu ma podawaną bezwymiarową wielkość wsadu (w odniesieniu do wsadu maksymalnego), a na wyjściu moc ciepłą urządzenia. Po przeanalizowaniu informacji producenta [3] (oraz na podstawie niepublikowanych danych pomiarowych temperatury pieca w trakcie pracy – jeden punkt pomiarowy) skalibrowano dla użytkowanego pieca następujące równanie:

$$P(t) = W \cdot t \cdot e^{-at} \quad (1)$$

gdzie: P – chwilowa moc pieca [kW], t – czas [min], W, a – stałe zależne od wielkości wsadu.

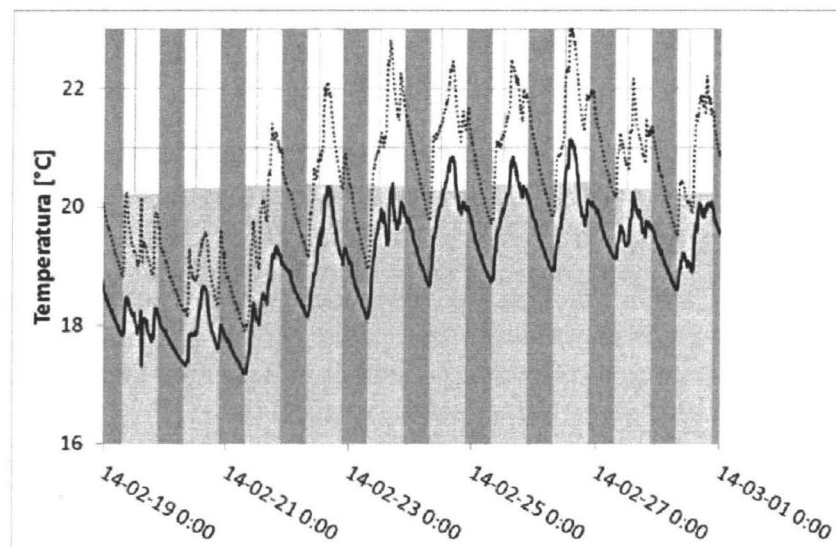
2. ANALIZA POMIARÓW

Zebrane dane przeanalizowano pod kątem: komfortu temperaturowego wewnątrz budynku oraz czynników wpływających na temperaturę, stężenia CO_2 i zawartości wilgoci w powietrzu wewnętrznym budynku. W okresie pomiarowym maksymalna i minimalna temperatura powietrza zewnętrznego wynosiły odpowiednio: 10.1 °C, -3.4 °C, maksymalne promieniowanie bezpośrednie na płaszczyznę normalną do kierunku promieni słonecznych wynosiło: 973 Wh/m². Bazując na przyjętym modelu pieca wyznaczono, że maksymalna moc chwilowa wydzielana przez urządzenie wyniosła 4.2 kW.

2.1. Temperatura wewnętrzna

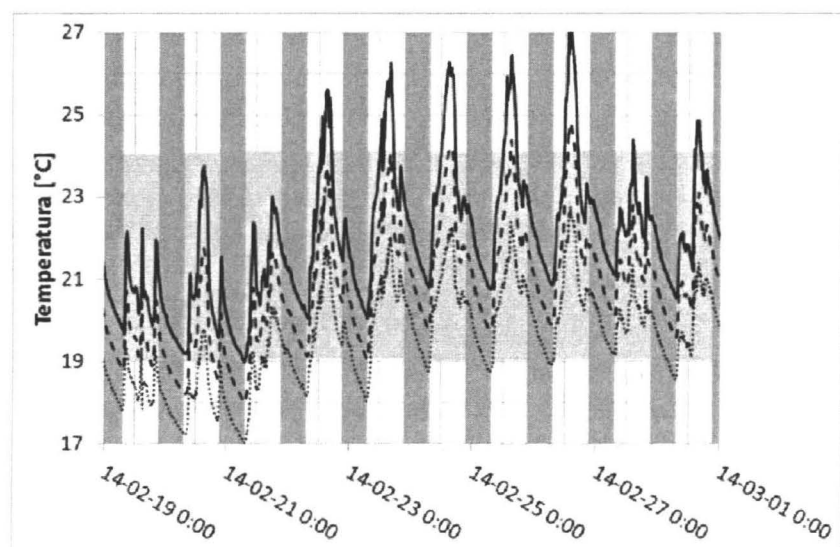
Na rys. 2, 3 i 4 przedstawiono przebieg temperatury wewnętrznej w poszczególnych pomieszczeniach w okresie pomiarowym (10 dni) oraz pory dnia i zakresy komfortu wg [4]. Można zauważyć, że warunki termiczne na Antresoli są czasem zbyt gorące jak na strefę sypialnianą, ale praktycznie każdej doby odpowiednie do użytkowania pomieszczenia w ciągu dnia. Z kolei gabinet jest

odpowiednim miejscem do spania jednak w początkowym okresie nie spełniał swojej funkcji jako pomieszczenie do pracy biurowej. W Salonie temperatura operatywna (średnia pomiędzy temp. powietrza i średnią temp. promieniowania) znajduje się cały czas na odpowiednim poziomie, natomiast w przypadku odrębnego rozpatrywania temperatury powietrza i średniej temp. promieniowania można zauważyć okresy niedogrzenia i przegrzania. To zjawisko świadczy o korzystnej wymianie ciepła pomiędzy piecem a konstrukcją budynku.



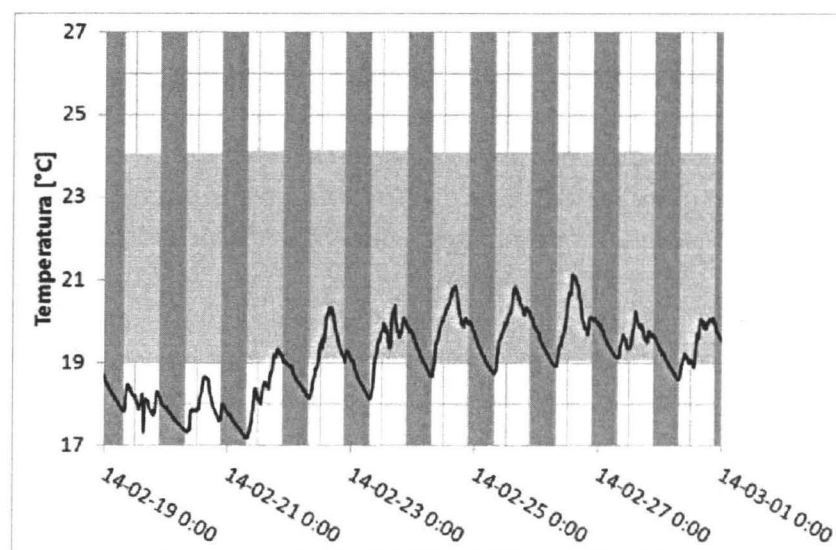
Rys. 2. Temperatura powietrza na Antresoli (linia przerywana) i w Gabinetce (linia ciągła), odcieniami szarości oznaczono noc (godz. 22-7) i zakres komfortu dla sypialni wg [4].

Fig. 2. Entresol air temperature (dotted line) and Study room air temperature (solid line), grays represent night-time (10PM-7AM) and comfort temperature range for bedroom, acc. [4].



Rys. 3. Temperatura powietrza (linia krokowana), średnia temp. promieniowania (linia ciągła, założona $v_{pow}=0.2$ m/s) i temp. operatywna (linia kreskowana) w Salonie, odcieniami szarości oznaczono noc (godz. 22-7) i zakres komfortu dla pomieszczeń innych niż sypialnia i łazienka wg [4].

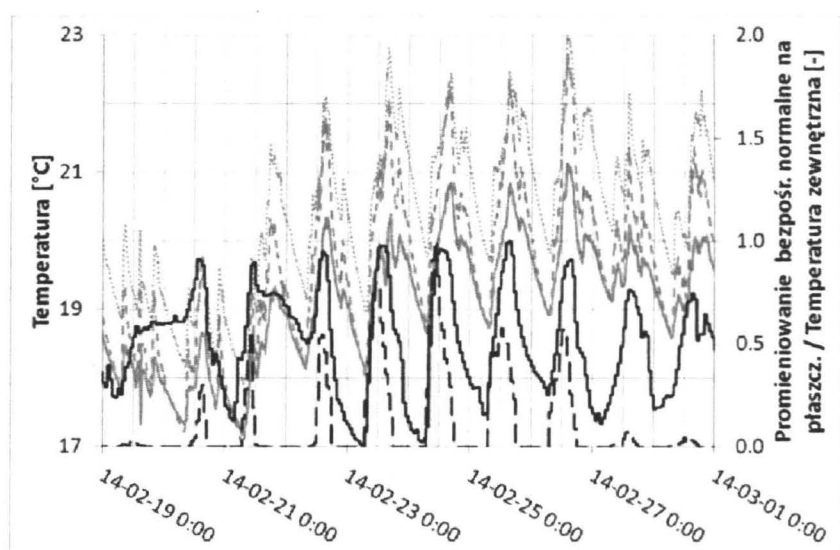
Fig. 3. Living room air temperature (dotted line), mean radiant temperature (solid line, assumption: air velocity equal 0.2 m/s) and operative temperature (dashed line), grays represent night-time (10PM-7AM) and comfort temperature range for living room, acc. [4].



Rys. 4. Temperatura powietrza w Gabinetce (linia czarna), odcieniami szarości oznaczono noc (godz. 22-7) i zakres komfortu dla pomieszczeń innych niż sypialnia i łazienka wg [4].

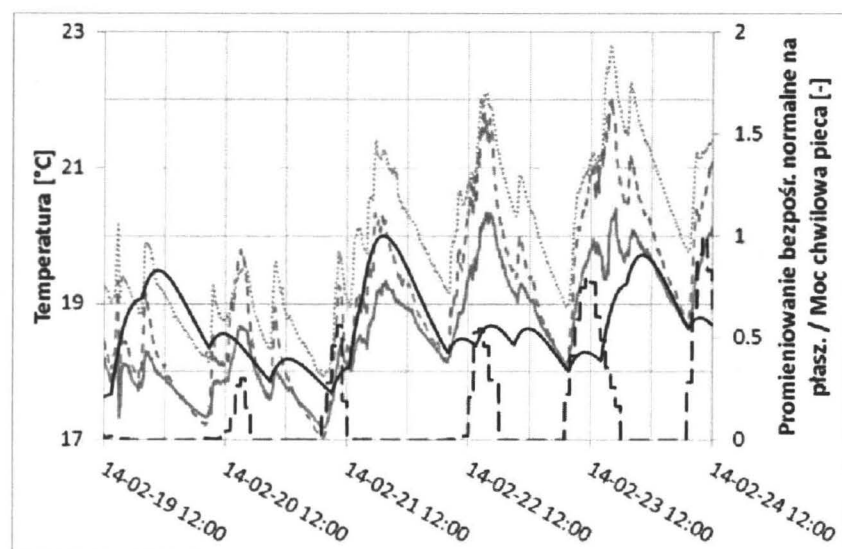
Fig. 4. Study room air temperature (solid line), grays represent night-time (10PM-7AM) and comfort temperature range for living room, acc. [4].

Analizując rys. 5 można zauważyć, że nie wszystkie piki temperaturowe można wyjaśnić promieniowaniem słonecznym. Wiele z nich, względnie wysokich jest niezależnych od operacji słonecznej. Zestawiając przebieg temperatury wewnętrznej i moc chwilową pieca oraz bezpośrednie promieniowanie (rys. 6) można zauważyć, że użytkowanie pieco-kuchni, znacznie wpływa na warunki temperaturowe w całym budynku.



Rys. 5. Temperatura powietrza wewnętrznego w różnych strefach (szare linie), bezwymiarowa energia promieniowania normalnego bezpośredniego na płaszczyznę (linia czarna przerywana) i bezwymiarowa temperatura zewnętrzna (linia czarna ciągła).

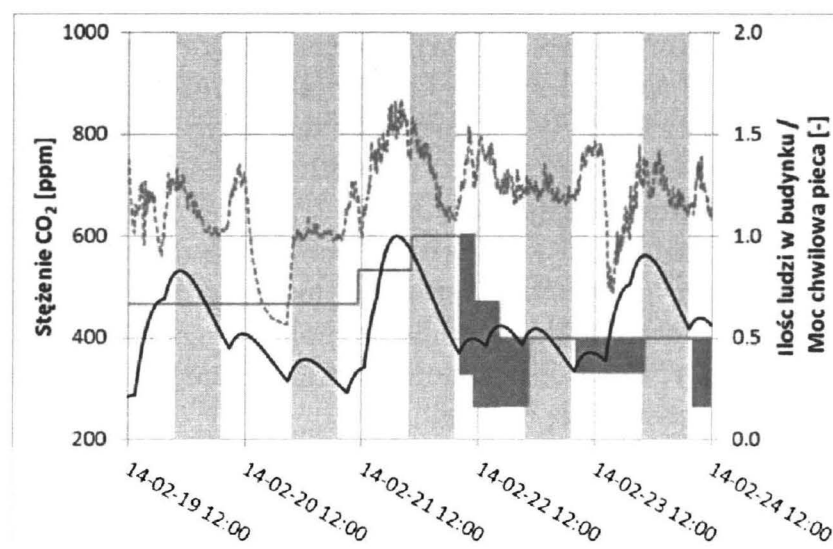
Fig. 5. Air temperature of different zones of investigated building (gray lines), dimensionless direct normal radiation (black dashed line), dimensionless outdoor air temperature (black solid line).



Rys. 6. Temperatura powietrza wewnątrz w różnych strefach (szare linie), bezwymiarowa energia promieniowania normalnego bezpośredniego na płaszczyznę (linia czarna przerywana) i bezwymiarowa moc cieplna chwilowa pieca (linia czarna ciągła).
Fig. 6. Air temperature of different zones of investigated building (gray lines), dimensionless direct normal radiation (black dashed line), dimensionless instantaneous heat power of accumulation stove (black solid line).

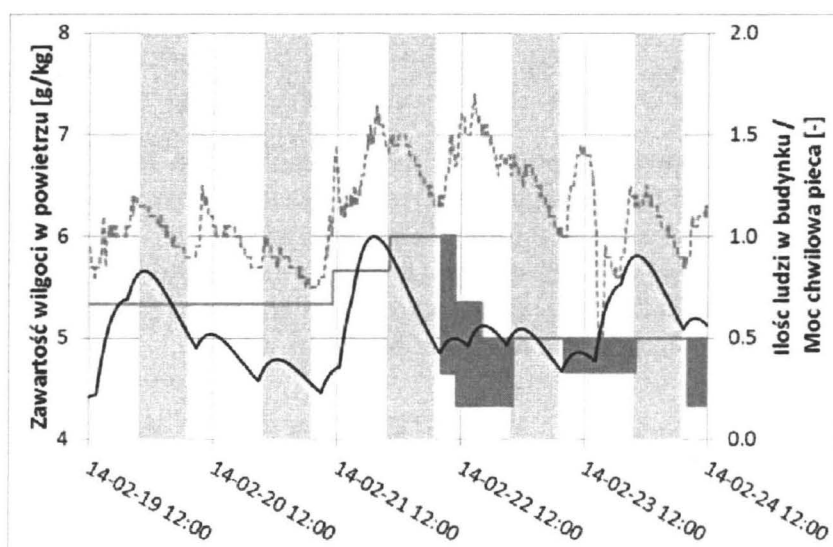
2.2. Stężenie CO₂ i zawartość wilgoci

Okazuje się, że sposób notowania liczby osób w budynku był zbyt zgrubny, aby można było zaobserwować bezpośredni wpływ mieszkańców na stężenie dwutlenku węgla (rys. 7). Ponadto sprawnie działająca wentylacja mechaniczna ustawiona na spełnienie kryterium higienicznego skutecznie oczyszcza środowisko wewnętrzne na bieżąco. Można jednak zauważyć, że palenie w piecu zdecydowanie podwyższa zawartość CO₂ w powietrzu. Momenty osiągnięcia maksymalnej mocy chwilowej przez piec (faza spalania) często wiąże się ze zdecydowanym wzrostem stężenia dwutlenku węgla. Brak proporcjonalności pomiędzy wzrostem mocy chwilowej a wzrostem stężenia może wynikać z: istnienia dodatkowego czynnika wpływającego na obserwowane stężenie CO₂, a nierejestrowanego w ogóle lub zbyt niedokładnie (np. liczby i miejsca przebywania osób w budynku, wydajności wentylatorów...) lub zbyt zgrubnych oszacowań odnośnie ilości spalanej drewna czy sposobu jego spalania (z otwartą/zamkniętą komorą). Podobnej analizie poddano zawartość wilgoci w powietrzu (rys. 8), która jest również zależna od liczby osób i procesu spalania, ale w dużej mierze także od procesu gotowania posiłków. Związek z pracą pieca, czyli procesem spalania i gotowania potwierdza rys. 8, jednak wpływ liczby osób znowu wydaje się trudny do stwierdzenia.



Rys. 7. Stężenie CO₂ (szara linia przerywana), bezwymiarowa moc chwilowa pieca (linia czarna) i bezwymiarowa liczba osób w budynku (linia szara ciągła). Szarymi pasami oznaczono noc (godz. 22-7).

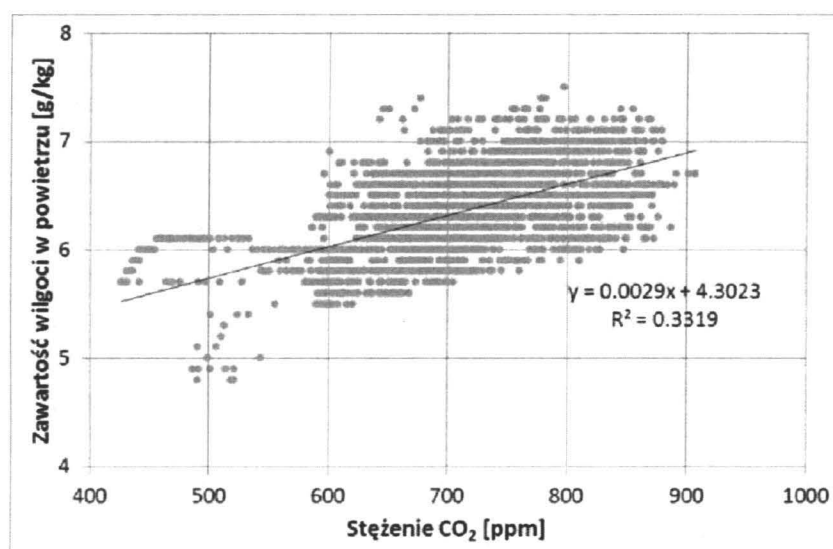
Fig. 7. Carbon dioxide concentration (gray dotted line), dimensionless instantaneous heat power of accumulation stove (black solid line), dimensionless number of people in the building (gray solid line). Gray stripes represent night-time (10PM-7AM).



Rys. 8. Zawartość wilgoci w powietrzu (szara linia przerywana), bezwymiarowa moc chwilowa pieca (linia czarna) i bezwymiarowa liczba osób w budynku (linia szara ciągła). Szarymi pasami oznaczono noc (godz. 22-7).

Fig. 8. Absolute humidity (gray dotted line), dimensionless instantaneous heat power of accumulation stove (black solid line), dimensionless number of people in the building (gray solid line). Gray stripes represent night-time (10PM-7AM).

Porównując rys. 7 i 8 oraz na podstawie rys. 9 można zauważyć zbieżność w zmianie zawartości wilgoci i CO₂ w powietrzu pomieszczenia. Momentami największej rozbieżności są: moment opuszczenia budynku (nie odnotowany przy zliczaniu osób w budynku!) 20 lutego oraz niektóre noce, w trakcie których spadek zawartości wilgoci jest bardziej intensywny. Może to wynikać z większego wpływu procesu gotowania posiłków na zawartość wody w powietrzu i większego znaczenia procesu spalania na stężenie CO₂.



Rys. 9. Korelacja pomiędzy stężeniem CO₂ a zawartością wilgoci dla całego okresu pomiarowego (10 dni).

Fig. 9. The correlation between the CO₂ concentration and absolute humidity for the entire measurement period (10 days).

3. WPŁYW PIECA OPALANEGO DREWNEM NA MIKROKLIMAT I ZUŻYCIE ENERGII

Piec użytkowany w *DomieTrzon* ma dwójaki wpływ na jakość powietrza wewnętrznego: z jednej strony, w skutek spalania, produkuje dwutlenek węgla, a z drugiej pobiera tlen (powietrze) potrzebny do zajścia reakcji utleniania. Obecność pieca nie została uwzględniona przy projektowaniu instalacji wentylacyjnej, w związku z czym istnieje zagrożenie spalaniem niezupełnym i niecałkowitym, co wiąże się z zagrożeniem zdrowia i życia (powstawanie trującego CO), a także zmniejszeniem efektywności energetycznej urządzenia. W analizowanym obiekcie istnieje jednak nieużytkowany komin (ϕ 180), który został zainstalowany dla kominka planowanego po przeciwległej stronie strefy dziennej w stosunku do istniejącej pieco-kuchni. Komin nie jest podłączony do żadnego urządzenia, a przy tym nie jest zaślepiiony, przez co jest połączeniem między środowiskiem zewnętrznym a wewnętrznym. Dzięki temu do wnętrza jest zasysane powietrze do spalania, co z jednej strony zabezpiecza przed zatruciem, a z drugiej zwiększa straty ciepła i może generować tzw. stratę kominową. Ponieważ wysokość obydwu kominów (użytkowanego i nieużytkowanego) są podobne, straty ciepła powstają głównie w momencie użytkowania pieca.

Jak ważne jest branie pod uwagę źródła ciepła do przygotowania posiłków przy projektowaniu budynków energooszczędnych może świadczyć prosty rachunek. Do porównania przyjęto dwa źródła ciepła: kuchenkę gazową i użytkowaną w analizowanym budynku pieco-kuchnię. Na podstawie własnych doświadczeń oszacowano, że kuchenka gazowa użytkowana przez 6 osobową rodzinę, zużywa średnio ok. 0.25 m³ gazu GZ-50 dziennie, co generuje 8.9 MJ energii. Bazując na informacji od

właściciela budynku obliczono, że dzienne zużycie drewna w okresie zimowym to ok. 13.3 kg, co generuje ok. 202 MJ energii. Następnie, na podstawie [5] i [6], obliczono zapotrzebowanie powietrza do spalania omawianych paliw. Przy założeniu współczynnika nadmiaru powietrza $\lambda_K=1.3$ dla kuchenki i $\lambda_P=2$ [7] dla pieca, otrzymano odpowiednio: 3.1 m³/dobę oraz 201.4 m³/dobę. Odnosząc wyliczone wartości do ilości energii okazuje się, że musimy dodatkowo doprowadzić dla paleniska gazowego 0.35 m³, a dla paleniska na drewno 1 m³ powietrza na każdy MJ ciepła oddanego przez urządzenie. Dlatego zarówno sposób doprowadzenia tlenu do paleniska, jak i odprowadzenia spalin są bardzo istotne przy projektowaniu energooszczędnych budynków tego typu.

4. PODSUMOWANIE

W *DomuTrzon*, w omawianym okresie, dynamicznie zmieniają się wartości parametrów komfortu. Ten fakt nie powoduje dyskomfortu mieszkańców. Zachodzące zmiany są podporządkowane rytmowi życia z uwagi na związek z promieniowaniem słonecznym i zyskami wewnętrznym. W ten sposób bez zaawansowanego systemu sterowania przebywanie w analizowanym budynku jest komfortowe. Są jednak dwie rzeczy, które mogą polepszyć funkcjonalność obiektu. Istnieją zarówno okresy przegrzewania jak i niedogrzenia niektórych stref. Po drugie, brak dedykowanego rozwiązania odnośnie doprowadzenia powietrza do spalania i odprowadzenia spalin powoduje, że potencjał koncepcji *DomuTrzon* nie jest w pełni wykorzystany.

Wyjściem dla pierwszej niedogodności jest dopracowanie rozkładu pomieszczeń w budynku i systemu rozdziału powietrza. Strefy przeznaczone do pracy/nauki, można by zlokalizować na Antresoli, a sypialnie w północnej części parteru. Być może zamienienie miejscami Sypialni z Gabinetem również poprawiłoby komfort cieplny. Zmiany bardziej zaawansowane mogłyby dotyczyć lokalizacji i konstrukcji trzonu budynku z piecem i/lub orientacji budynku, np. w ten sposób, aby ściana północna była zagospodarowana przez pomieszczenia czasowego przebywania (jak spiżarnia, garderoba) lub z dużą ilością zysków cieplnych: kuchnia.

Zmiany instalacyjne mogłyby polegać na zastosowaniu dobowych (wodnych) akumulatorów energii cieplnej, które zasilane byłyby przez spaliny (i powietrze usuwane z cieplejszych stref), a stanowiłyby źródło ciepła dla nagrzewnic powietrza zlokalizowanych w strefach zimniejszy. Do pieco-kuchni należałoby doprowadzić powietrze do spalania osobnym przewodem (np. pod posadzkowym) o regulowanym przepływie, aby nie ochładzało wnętrza i polepszyło transport spalin z paleniska (ograniczyłoby penetrację ich do wnętrza obiektu). Mogłoby to być powietrze bezpośrednio z zewnątrz lub

ewentualnie wyrzucane z pomieszczeń (choć mogłoby ono mieć zbyt niskie stężenie tlenu). Opracowanie takich rozwiązań polepszyłoby efektywność obiektu zarówno pod względem energetycznym, jak i jakości powietrza wewnętrznego.

Podczas analizy zauważono potencjał zawartości wilgoci w powietrzu do obserwowania zmian jakościowych powietrza wewnętrznego. Z jednej strony parametr ten wykazuje wyraźną korelację z zawartością dwutlenku węgla w powietrzu, a z drugiej strony wykazuje większą wrażliwość na źródła zanieczyszczeń związanych z przygotowaniem posiłków, które mogą nie zostać oznaczone przez zmianę w stężeniu CO₂. Warto zaznaczyć, że dwutlenek węgla jest jedynie wskaźnikiem jakości powietrza wewnętrznego, a jego bezpośredni wpływ na jakość komfortu nie jest w pełni jednoznaczny.

Dalsze badania powinny uwzględnić dłuższe okresy w różnych porach roku, a także lepszy monitoring aktywności użytkowników i ich odczucia komfortu. W celu polepszenia analizy energetycznej wartościowe było by dokładniejsze zmierzenie wpływu pieca na przepływ powietrza i ciepła przez budynek: prędkość powietrza w kanałach kominowych, temperatura pieca, prędkość powietrza w strefie przebywania ludzi, skład spalin...

5. PODZIĘKOWANIA

Dane klimatyczne wykorzystane w analizie zostały uzyskane dzięki uprzejmości Pana Joe Huang'a z firmy White Box Technologies:

<http://weather.whiteboxtechnologies.com/>

Publikacja powstała w ramach realizacji projektu "Inżynier Przyszłości. Wzmocnienie potencjału dydaktycznego Politechniki Poznańskiej.", nr POKL.04.03.00-00-259/12, współfinansowanego ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego.

EFFECT OF THE USE OF ENERGY EFFICIENCY WOODEN HOUSE *DOMTRZON* ON INDOOR COMFORT PARAMETERS – MEASUREMENTS RESULTS

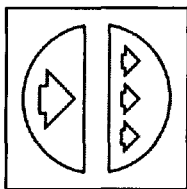
Summary: *DomTrzon* (also known as *Bio_Arka*) is wooden, energy-saving, single-family house, with massive construction (exterior walls: 10 cm laminated wood + 30 cm wood fiber insulation). Mechanical ventilation system with cross heat exchanger is installed in the building. Wood-lag accumulation stove is the main heat source in the analyzed object, the stove is used mainly to prepare meals. This paper presents 10-days measurement (February 2014) of selected indoor environment comfort parameters: temperature, relative/absolute humidity, carbon dioxide concentration. In this paper: (1) simple mathematical model of accumulation stove is implemented; (2) correlation between CO₂ concentration and absolute humidity is analyzed; (3) influence of kitchen heat source (for meals preparation) on fresh air demand is estimated. Directions of

DomTrzon concept development are proposed based on investigation of measurements results. Solutions of indicated imperfections could help to better exploit energy-savings and ecological potential of the building. Authors would like to acknowledge Mr. Joe Huang from White Box Technologies (<http://weather.whiteboxtechnologies.com/>), who donate climate data used in the analysis.

This article was financially supported within the project "Engineer of the Future. Improving the didactic potential of the Poznan University of Technology" - POKL.04.03.00-00-259/12, implemented within the Human Capital Operational Programme, co-financed by the European Union within the European Social Fund.

Literatura

- [1] Szczechowiak E., *Przemiany strukturalne systemów HVAC w budynkach przyszłości*. Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja 1/2015, 30-36
- [2] Bandurski K., Mielczyński T., Koczyk H., *Thermal Comfort and Energy Consumption of the Ecological House – Simulation Analysis of DomTrzon*. Technical Transactions. Civil Engineering 3-B/2014, 11-22
- [3] <http://www.nunnauni.fi/>
- [4] Peeters L., de Dear R., Hensen J., D'haeseleer W., *Thermal comfort in residential buildings: Comfort values and scales for building energy simulation*. Applied Energy (86) 2009, 772-780
- [5] *Pomiary cieplne i energetyczne*. red. Mieszkowski M., WN-T, Warszawa 1985
- [6] <http://agroenergetyka.pl/>
- [7] <http://www.pelletcentre.info/>



OCENA PORÓWNAWCZA TECHNIKI DVS I TRADYCYJNEJ METODY WYZNACZANIA IZOTERM SORPCJI – NA PRZYKŁADZIE BETONU KOMÓRKOWEGO KLASY 400

Magdalena BOCHENEK*, Halina GARBALIŃSKA*

** Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Budownictwa i Architektury, Al. Piastów 50, 70-311 Szczecin
e-mails: Magdalena.Bochenek@zut.edu.pl, Halina.Garbalinska@zut.edu.pl*

Streszczenie: W referacie przedstawiono ocenę porównawczą techniki DVS i tradycyjnej metody wyznaczania izoterm sorpcji. Problem omówiono na przykładzie betonu o gęstości 400 kg/m^3 , prezentując uzyskane dla tego materiału wyniki badań. Wyznaczono izotermy sorpcji metodą tradycyjną z zastosowaniem nasyconych roztworów soli oraz metodą zautomatyzowaną z wykorzystaniem urządzenia generującego wilgotność.

Słowa kluczowe: Kinetyka sorpcji, izotermy sorpcji, beton komórkowy

1. WPROWADZENIE

Badaniem stanów równowagowych, opisywanych przez izotermy sorpcji, zajmowało się wielu naukowców, np. [3, 4, 8, 9, 11]. Pomimo licznych badań brak jest jednak metod pozwalających na teoretyczne wyznaczenie izoterm sorpcji dla dowolnego materiału porowatego. Tradycyjne badania laboratoryjne są żmudne i długotrwałe, a dane literaturowe dotyczące izoterm sorpcji materiału danego rodzaju wykazują często znaczne rozbieżności.

Nową metodą badania stanów równowagowych, alternatywną do metody tradycyjnej, jest metoda zautomatyzowana wykorzystująca urządzenia generujące wilgotność, jak np. Dynamic Vapor Sorption (DVS). Wiarygodność pomiarów tym urządzeniem potwierdzają badania prowadzone w innych gałęziach przemysłu, m.in. farmaceutycznym, czy spożywczym. Stwierdza się jednak brak usystematyzowanych badań porównawczych metody tradycyjnej z metodą zautomatyzowaną w odniesieniu do materiałów budowlanych. Próby do-
rażnego porównania obydwu metod znaleziono w pracach [2, 6].

Wykazanie zgodności pomiarów tradycyjnych z metodą wykorzystującą urządzenia generujące wilgotność pozwoliłoby

na jej szersze stosowanie, a tym samym wielokrotne skrócenie czasu pomiaru zasadniczego badania i zminimalizowanie wysiłku potrzebnego na przygotowanie roztworów oraz próbek, wymagających późniejszego wielomiesięcznego ważenia. Mając to na względzie podjęto się przeprowadzenia dwóch niezależnych eksperymentów, pozwalających na porównanie obydwu metod, przy czym badania sorpcji przeprowadzono na wybranych odmianach bloczków wykonanych z betonu komórkowego. Niniejszy artykuł przedstawia ocenę porównawczą techniki DVS i tradycyjnej metody wyznaczania izoterm sorpcji na przykładzie betonu komórkowego klasy 400.

2. METODA TRADYCYJNA

W pierwszym eksperymencie badano izotermy sorpcji tradycyjną metodą grawimetryczną. Badaniami objęto betony komórkowe o następujących klasach gęstości: 400, 500, 600, 700 kg/m^3 .

Do tradycyjnych badań sorpcji przygotowano po 3 próbki prostopadłościennych o wymiarach $6 \times 12 \times 1 \text{ cm}$. Próbki te wycinano z bloczków o czterech różnych gęstościach. Po zinventoryowaniu próbek wysuszono je w suszarce do stałej masy w temperaturze 105°C , a następnie zaizolowano na pobocznicach powłoką silikonową i ponownie dosuszono w suszarce do stałej masy. Tak przygotowane próbki umieszczono w stelażach i zamknięto w pojemnikach, na dnie których znajdowały się wcześniej przygotowane nasycone roztwory soli. Na podstawie norm i literatury [1, 5, 7, 10] wybrano następujące sole: LiCl ($\varphi \approx 11\%$), MgCl_2 ($\varphi \approx 33\%$), $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ ($\varphi \approx 54\%$), NaNO_2 ($\varphi \approx 65\%$), NaCl ($\varphi \approx 75\%$), KCl ($\varphi \approx 85\%$), K_2SO_4 ($\varphi \approx 98\%$). Poszczególne układy badawcze ułożono

w komorze termostaticznej, ustawionej na temperaturę 20°C (rys. 1).



Rys. 1. Próbkę w pojemnikach ulokowanych we wnętrzu komory termostaticznej.

Fig. 1. The samples inside the thermodynamic chamber.

Procesy sorpcji zainicjowane były wprowadzeniem suchych próbek w kontakt z powietrzem o różnym poziomie zawilgożenia, a realizowane były według schematu: 0→11%, 0→33%, 0→54%, 0→65%, 0→75%, 0→85%, 0→98%.

Badania sprowadzały się do systematycznego rejestrowania zmieniającej się masy poszczególnych próbek. Pomiary masy wszystkich próbek prowadzono co 6 h, następnie co 12 h i stopniowo zwiększano odstęp między kolejnymi pomiarami. Cały eksperyment trwał 10 miesięcy.

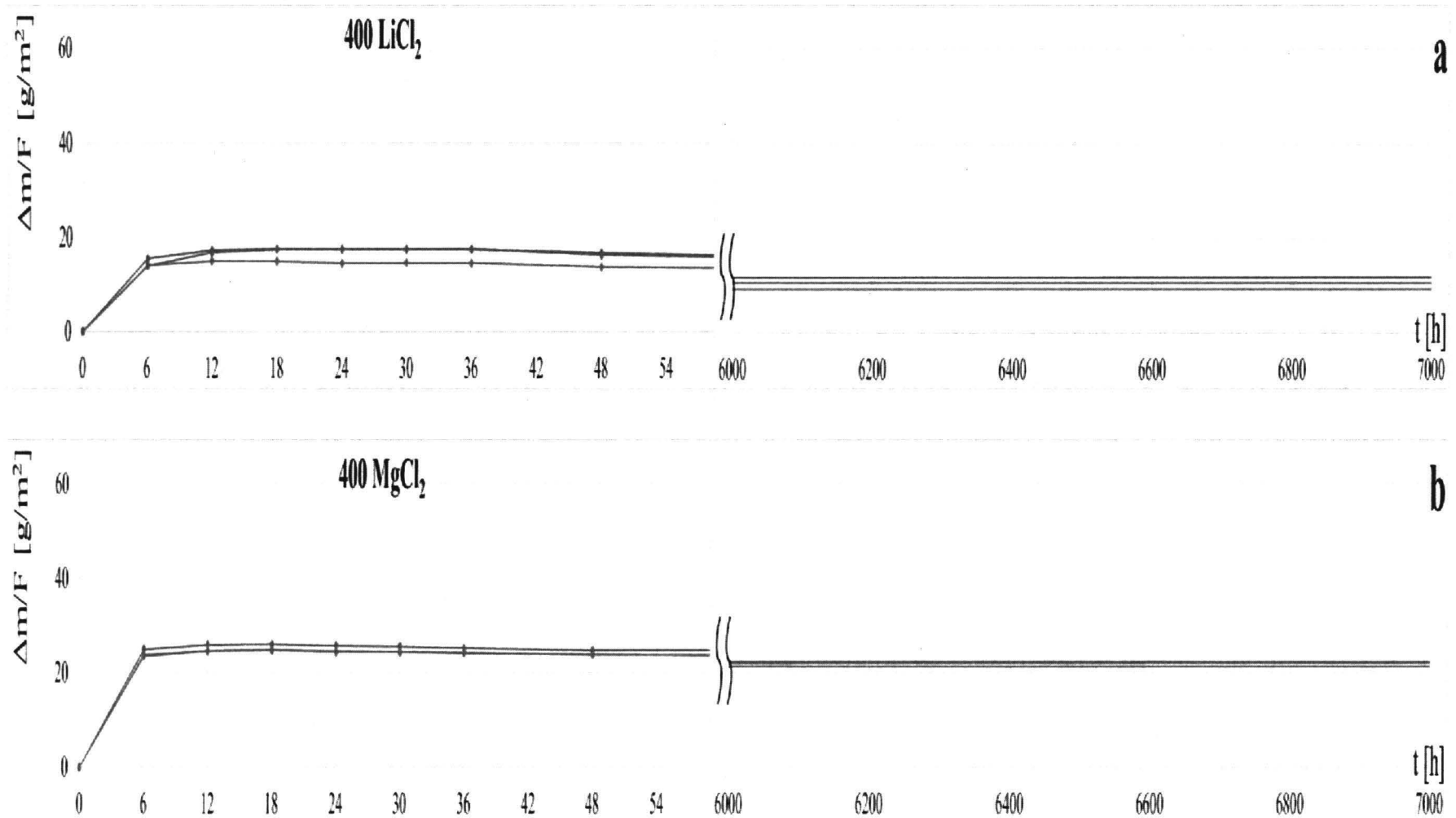
2.1. Badania kinetyki sorpcji

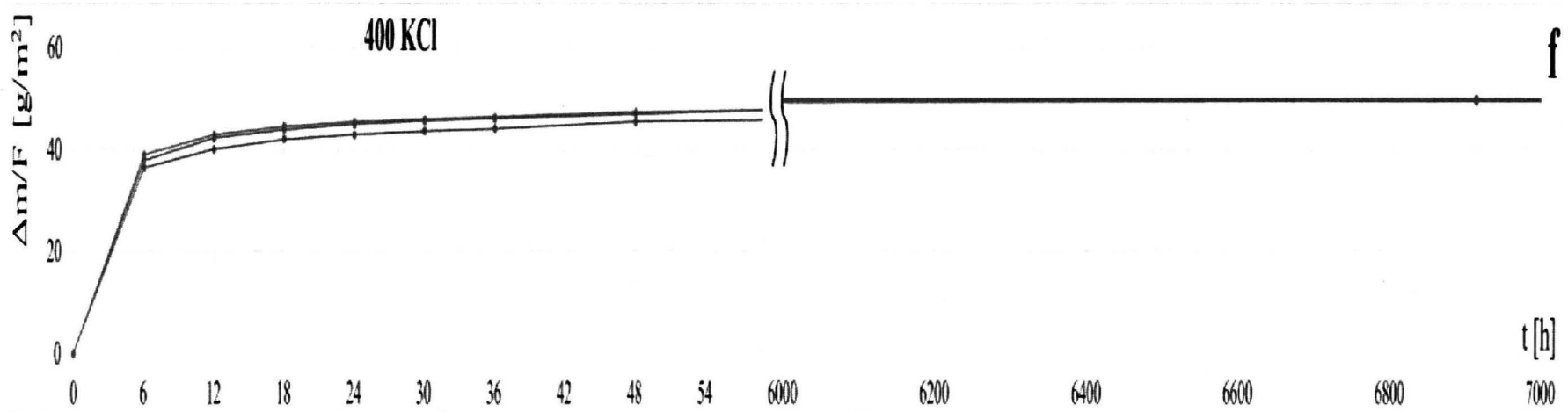
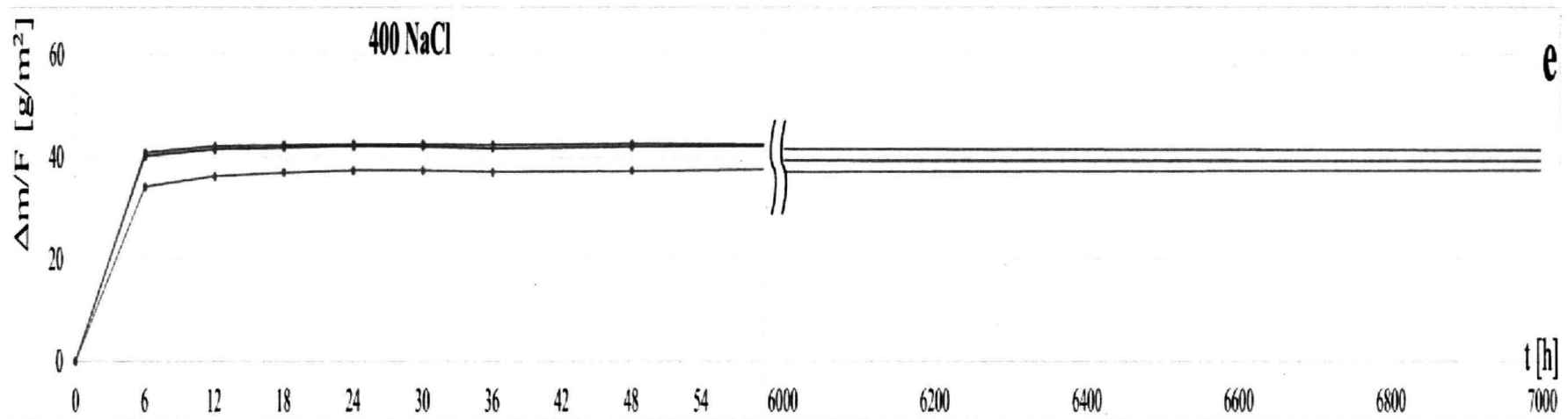
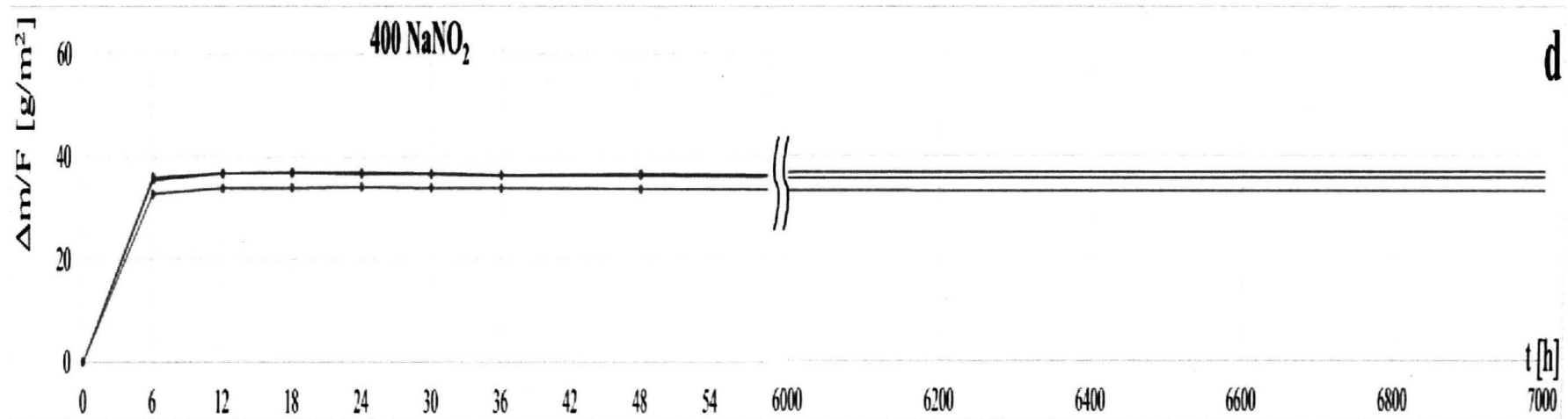
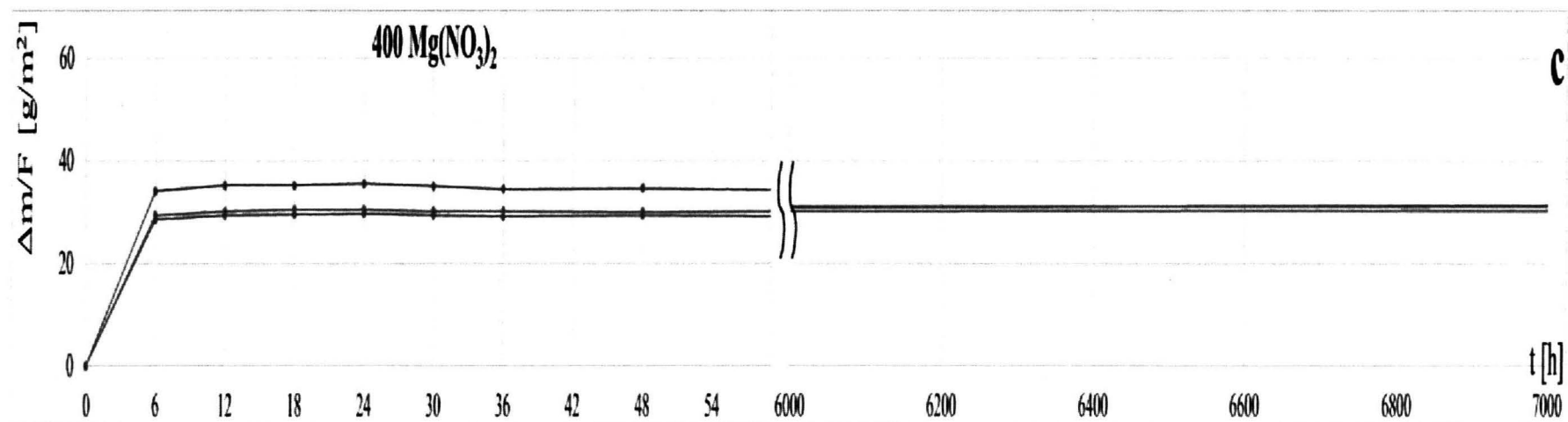
Kinetyka sorpcji zależy od właściwości danego materiału oraz parametrów pomiaru, tj. temperatury i wilgotności względnej otoczenia.

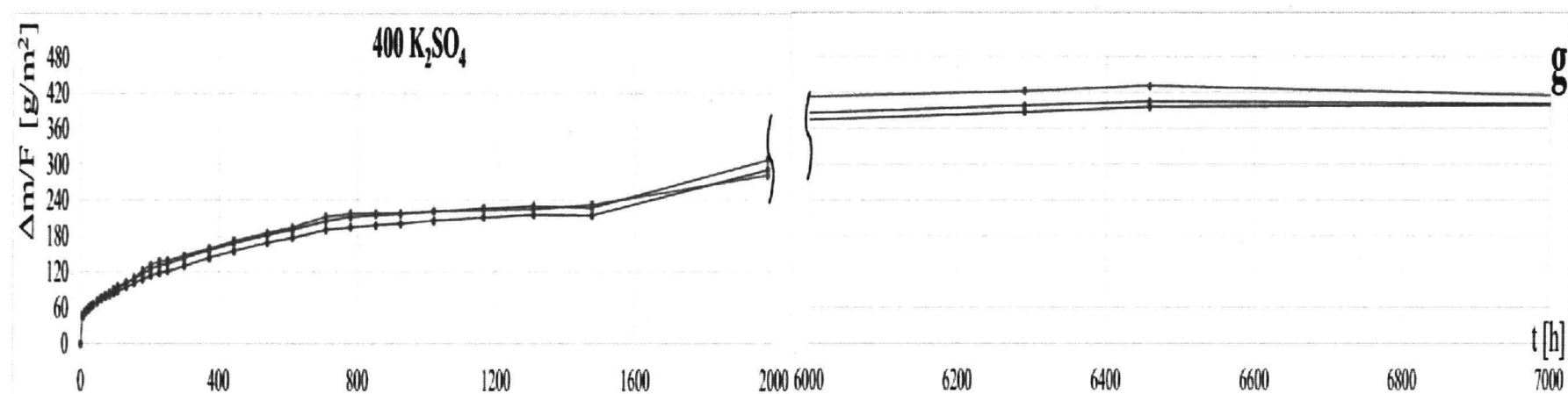
Na rysunku 2 przedstawiono wykresy kinetyki sorpcji, odwzorowane każdorazowo dla 3 próbek betonu komórkowego klasy 400, testowanego w siedmiu założonych klimatach.

Z chwilą wygaśnięcia procesów w poszczególnych interwałach $\Delta\phi$ można było przystąpić do wyznaczania równowagowej zawartości wody przy założonych w eksperymencie poziomach wilgotności względnej powietrza ϕ .

W grupie siedmiu przebadanych klimatów wyróżnia się pod względem jakościowym i ilościowym przebieg procesu sorpcji zachodzący przy najwyższej wilgotności względnej powietrza $\phi = 98\%$.







Rys. 2. Kinetyka procesu sorpcji betonu komórkowego klasy 400 w temperaturze 20°C i wilgotności względnej: a) 11%, b) 33%, c) 54%, d) 65%, e) 75%, f) 85%, g) 98%.

Fig. 2. Kinetics of sorption process for autoclaved aerated concrete class 400 at 20°C and relative humidity: a) 11%, b) 33%, c) 54%, d) 65%, e) 75%, f) 85%, g) 98%.

2.2. Izotermy sorpcji

Izotermą sorpcji określany jest związek między równowagowym uwodnieniem materiału a wilgotnością względną powietrza, przy określonej stałej temperaturze.

Po osiągnięciu stanu równowagowego w każdym z zakresów wilgotności określano masową zawartość wilgoci w materiale U_m [%] korzystając z wzoru [12]:

$$U_m = \frac{m_w - m_s}{m} \quad (1)$$

gdzie: m_w oznacza masę zaizolowanej próbki w stanie równowagi wilgotnościowej, m_s to masa zaizolowanej próbki wysuszonej do stałej masy, zaś m oznacza masę suchej próbki bez izolacji.

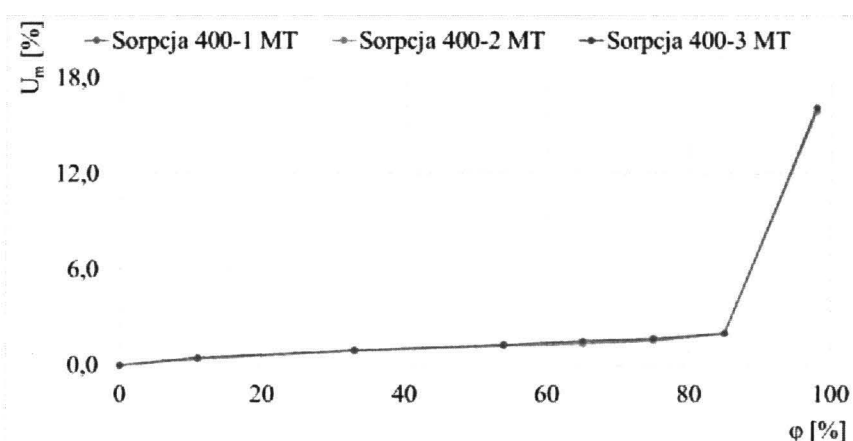
W tabeli 1 przedstawiono wyniki, pochodzące z pomiarów sorpcji metodą tradycyjną, dotyczące trzech próbek analizowanego betonu komórkowego klasy 400.

Tabela 1. Wyniki badań sorpcji betonu komórkowego klasy 400, uzyskane metodą tradycyjną.

Table 1. Sorption test results of autoclaved aerated concrete 400, obtained using the traditional method.

Zakres $\Delta\phi$ [%]	U_m [%] 400-1 MT	U_m [%] 400-2 MT	U_m [%] 400-3 MT
0 - 11	0,378	0,435	0,486
0 - 33	0,888	0,910	0,942
0 - 54	1,209	1,236	1,274
0 - 65	1,327	1,428	1,527
0 - 75	1,542	1,608	1,696
0 - 85	1,987	1,988	1,998
0 - 98	15,894	15,932	16,134

Na podstawie uzyskanych wyników sporządzono izotermy sorpcji, które zestawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Izotermy sorpcji betonu komórkowego klasy 400 wyznaczone metodą tradycyjną.

Fig. 3. Sorption isotherms of autoclaved aerated concrete class 400 determined by traditional method.

Sigmoidalny charakter krzywych sorpcji pary wodnej wskazuje na zjawisko tworzenia się wielocząsteczkowych warstw wody na powierzchni porów badanego materiału. Wraz z wzrostem wilgotności względnej powietrza wzrasta istotnie zawilgocenie próbek. Do wilgotności względnej powietrza ok. 75÷85% izotermy przebiegają łagodnie. Natomiast gwałtowny wzrost zawilgocenia następuje w zakresie wilgotności od 75÷85% do 98%.

3. METODA DVS

Ze względu na długi czas i duży nakład pracy, jakie wymagane są przy wyznaczaniu izoterm sorpcji tradycyjnymi metodami grawimetrycznymi, zaczęto wdrażać w pełni zautomatyzowane urządzenia generujące wilgotność, takie jak Dynamic Vapor Sorption (DVS). Instrument ten wykorzystuje strategię nazywaną dm/dt (procentowa zmiana masy w funkcji czasu) w celu ustalenia, czy poziom równowagi został osiągnięty. Wartość dm/dt jest obliczana w oparciu o pomiar masy z ostatnich minut eksperymentu. Gdy dm/dt

jest bliskie zero to oznacza to, że próbka zbliża się do osiągnięcia stanu równowagi.

Mając na względzie szybkość tego typu pomiarów, zdecydowano się przeprowadzić drugi eksperyment za pomocą urządzenia DVS (rys. 4). Z bloczków czterech klas betonu komórkowego wycięto po trzy próbki sześciennie o wymiarach 0,2x0,2x0,2 cm i wadze ok. 10 mg. Badania wykonywano w temperaturze 20°C i zakresie wilgotności względnych powietrza 0÷98%. Ustawiono skokowe zmiany wilgotności co ok. 10% i rejestrację zmian masy co 1 minutę. Za pomocą komputera sprzężonego z urządzeniem rejestrowano zmiany masy w każdym kroku pomiarowym. Zawsze kiedy program wykrywał zmianę masy mniejszą niż 0,002 % na minutę zmieniała się automatycznie wilgotność o ok. 10%. Pomiar sorpcji jednej próbki, pozwalający odtworzyć przebieg całej izotermy, trwał około 1 doby.



Rys. 4. Pomiar urządzeniem DVS.
Fig. 4. Measurement of DVS device.

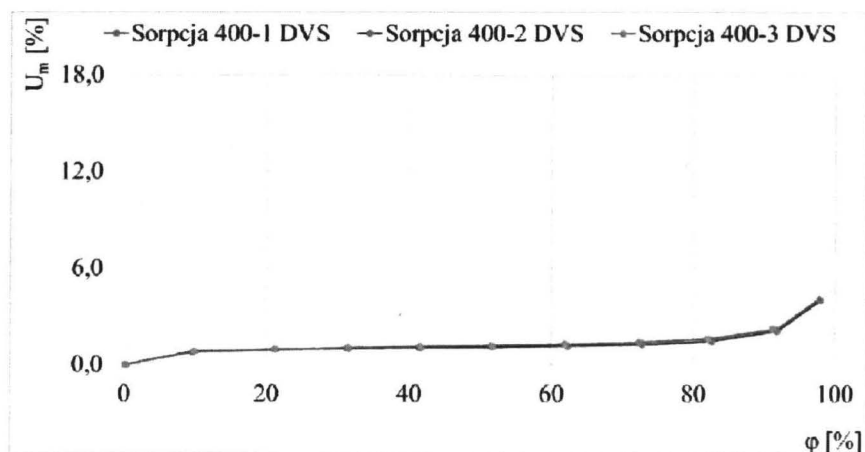
W tabeli 2 przedstawiono wyniki pochodzące z pomiarów sorpcji techniką DVS, a dotyczące trzech próbek analizowanego betonu komórkowego klasy 400.

Tabela 2. Wyniki badań sorpcji betonu komórkowego klasy 400, uzyskane za pomocą urządzenia DVS.

Table 2. Sorption test results of autoclaved aerated concrete 400, obtained using the DVS device.

ϕ [%]	U_m [%] 400-1 DVS	ϕ [%]	U_m [%] 400-2 DVS	ϕ [%]	U_m [%] 400-3 DVS
0,2	0,002	0,3	0,001	0,3	0,001
9,7	0,756	9,9	0,822	9,8	0,813
21,1	0,918	21,4	0,944	21,2	0,966
31,3	1,015	31,6	1,006	31,5	1,068
41,5	1,088	41,7	1,055	41,6	1,144
51,6	1,164	51,8	1,103	51,6	1,207
62,1	1,259	62,3	1,164	61,9	1,288
72,6	1,390	72,8	1,260	72,3	1,411
82,5	1,606	82,6	1,467	82,0	1,623
91,8	2,209	91,9	2,090	91,2	2,214
97,8	4,109	98,0	4,026		

Na podstawie uzyskanych wyników sporządzono izotermy sorpcji, które zestawiono na rysunku 5.



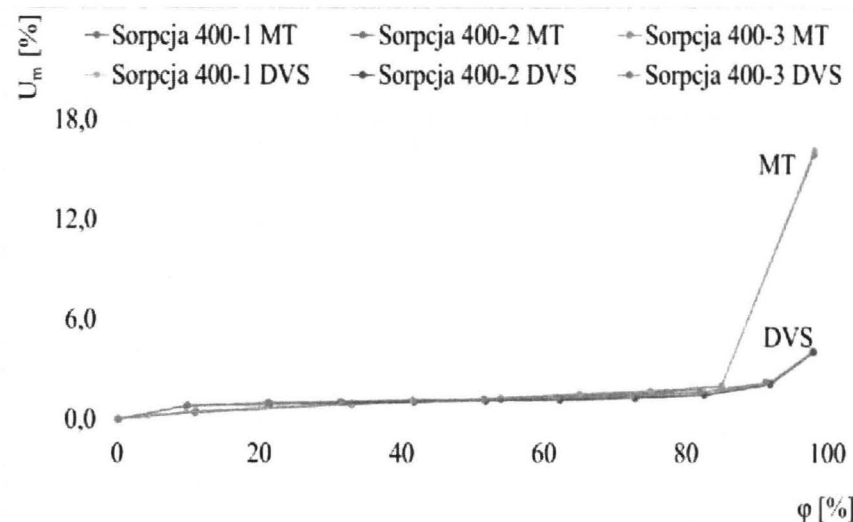
Rys. 5. Izotermy sorpcji betonu komórkowego 400 wyznaczone metodą DVS.

Fig. 5. Sorption isotherms of autoclaved aerated concrete class 400 determined by DVS method.

Zaobserwowano również sigmoidalny charakter krzywych sorpcji pary wodnej. Jednak przebieg krzywej jest łagodniejszy niż w przypadku izotermy sorpcji uzyskanej metodą tradycyjną. Wzrost zawilgocenia następuje w zakresie wilgotności od 75÷85% do 98%, jednak zarejestrowany w metodzie DVS wzrost nie jest tak intensywny, jak w metodzie tradycyjnej.

4. ANALIZA PORÓWNAWCZA

Na rysunku 6 zestawiono wykresy izoterm sorpcji dla betonu komórkowego klasy 400, wyznaczone dwoma różnymi metodami. Na rysunku oznaczono wyniki metodą tradycyjną jako MT, zaś metodą zautomatyzowaną jako DVS.



Rys. 6. Izotermy sorpcji betonu komórkowego klasy 400 wyznaczone metodą tradycyjną oraz DVS.

Fig. 6. Sorption isotherms of autoclaved aerated concrete class 400 determined by traditional method and DVS.

Można zauważyć bardzo dobrą zgodność wyników badań uzyskanych testowanymi metodami w zakresie wilgotności względnych powietrza do 75÷85%. Przy wilgotnościach obejmujących zakres od 75÷85% do 98% różnice w wynikach badań są bardzo duże. Przy granicznej wilgotności $\phi=98\%$ metoda tradycyjna dostarcza 3,8 razy większą wartość wilgotności równowagowej betonu klasy 400 w stosunku do metody DVS.

Porównując czas trwania obu eksperymentów można zauważyć znaczące różnice. Badanie izoterm sorpcji metodą tradycyjną trwało 10 miesięcy i było poprzedzono intensywną pracą związaną z przygotowaniem do badań. Natomiast pomiary urządzeniem DVS dla 3 próbek to ok. 3 doby bez konieczności specjalnego przygotowania próbek oraz roztworów. Zatem czas tego typu pomiarów prowadzonych metodą tradycyjną jest ponad 100 krotnie dłuższy w stosunku do metody DVS.

5. WNIOSKI

Przeprowadzone badania wykazały, że obydwie metody wyznaczania izoterm sorpcji są kompatybilne w zakresie wilgotności od 0% do 75÷85%. Niewątpliwie podstawową zaletą metody DVS jest bardzo krótki czas pomiaru oraz wyeliminowanie dużego nakładu pracy związanego z przygotowaniem badań oraz z wielomiesięcznym ważeniem próbek. Możliwe jest to dzięki pełnej automatyzacji urządzenia i wykorzystania oprogramowania komputerowego. Dzięki wysokiej czułości i dokładności tych aparatów, rozmiary próbek mogą być niewielkie i dzięki temu osiągnięcie równowagi przez próbkę następuje o wiele szybciej. Ponadto w wyniku badań urządzeniem DVS uzyskuje się większą ilość punktów pomiarowych niż w tradycyjnym badaniu. Niestety metoda ta nie kwalifikuje się do zastosowania w odniesieniu do wysokich wilgotności $\phi > 75\div 85\%$, w których przekraczana jest już wilgotność krytyczna, a klasycznym procesom sorpcji towarzyszą procesy kondensacji kapilarnej.

COMPARATIVE EVALUATION OF DVS AND THE TRADITIONAL METHOD OF SORPTION ISOTHERM DETERMINATION – EXAMPLIFIED BY AUTOCLAVED AERATED CONCRETE CLASS 400

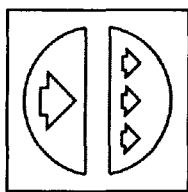
Summary: This paper presents a comparative evaluation of the DVS technique and the traditional method to determine the sorption isotherms. The problem was discussed based on the example of autoclaved aerated concrete with a density of 400 kg/m³, followed by a presentation of the results obtained for this material. Sorption isotherms were determined by use of the traditional method applied with saturated salt solutions and the automated method applying a humidity-generating device.

Podziękowania

Autorki składają podziękowania Profesorowi Winfriedowi Malornemu za udostępnienie aparatury DVS, pozwalającej na przeprowadzenie badań prezentowanych w niniejszej pracy.

Literatura

- [1] ASTM E104 - 02(2012) Standard practice for maintaining constant relative humidity by means of aqueous solutions. West Conshohocken, PA, ASTM International, 2012
- [2] Cagnon H., Aubert J.E., Coutand M., Magniont C.: Hygrothermal properties of earth bricks. *Energy and Buildings*, 80, 2014, s. 208-217
- [3] Drochytka R., Zach J.: Badania oddziaływania wilgoci i temperatury na ABK, *Materiały Budowlane*, nr 11, 2013, s. 112-113
- [4] Garbalińska H., Siwińska A.: Izotermie sorpcji cegły ceramicznej, silikatowej i betonu komórkowego. XI Polska Konferencja Naukowo-Techniczna Fizyka budowni w Teorii i Praktyce, *Czasopismo Naukowe tom II, Sekcja Fizyki Budowni Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN*, Łódź 2007, s. 41-46
- [5] Greenspan L.: Humidity Fixed Points of Binary Saturated Aqueous Solutions, *Journal of Research of the National Bureau of Standards- A. Physics and Chemistry* Vol. 81 A, No., 1977, s. 89-96
- [6] Gruyaert E., Dieleman C., De Belie N.: Influence of sample preparation and the addition of BFS on water vapour sorption isotherms. *International Conference on Durability of Building Materials and Components*. Porto-Portugal 2011, s.1-8
- [7] Jiříčková M., Černý R., Rovnaníková P.: Measurement of moisture storage parameters of building materials. *Acta Polytechnica*, 2003, vol. 43, no. 2, s. 39-43
- [8] Jerman M., Keppert M., Výborný J., Černý R.: Hygric, thermal and durability properties of autoclaved aerated concrete. *Construction and building materials*, 2013, no. 41, s. 352-359
- [9] Koronthayova O.: Moisture storage capacity and microstructure of ceramic brick and autoclaved aerated concrete. *Construction and Building Materials*, vol. 25, no 2, 2011, s. 879-885
- [10] PN-EN ISO 12571: 2013 Ciepłno-wilgotnościowe właściwości materiałów i wyrobów budowlanych. Określanie właściwości sorpcyjnych
- [11] Świrski-Perkowska J.: Adsorpcja i ruch wilgoci w porowatych materiałach budowlanych w warunkach izotermicznych. *PAN Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej*, Warszawa 2012
- [12] Zakrzewski T.: Zagadnienia fizyczne w budownictwie. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2003



MODEL REGRESJI DO WYZNACZANIA LICZBY WYMIANA POWIETRZA WENTYLACYJNEGO

Dorota BZOWSKA

Politechnika Warszawska, Instytut Budownictwa, Łukasiewicza 17, 09-400 Płock, E-mail address: dor.bzowska@gmail.com

Streszczenie: Zaproponowano model regresji do wyznaczenia liczby wymian powietrza w budynku dla okresu letniego. W tym celu przeanalizowano wpływ powierzchni okien, ich orientacji oraz oporu cieplnego obudowy budynku na ilość wymienianego powietrza wentylacyjnego. Dla kolejno zmienianych powierzchni okien sukcesywnie docieplano budynek warstwami izolacji z zakresu 3 - 30cm. Zmiana przeszkleń obejmowała udział powierzchni okna w przegrodzie - wwr od 0,05 do 0,5 kolejno dla orientacji E, S i W. Bazą danych do wyznaczenia modelu regresji były przebiegi dobowe nieustalonych procesów przepływu powietrza przez budynek dla powyżej wymienionych przypadków. W symulacjach uwzględniono trzy tryby oddziaływania wiatru. Model opisuje liczbę wymian powietrza w funkcji powierzchni przeszkleń w budynkach jednorodzinnych wyposażonych w wentylację naturalną.

Słowa kluczowe: opór cieplny obudowy budynku, wypór termiczny powietrza wewnętrznego, naturalna wymiana powietrza w budynku, słoneczne zyski energetyczne

1. WSTĘP

Rozporządzenie w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie z 2013 roku wprowadza nowe, malejące co dwa lata aż do roku 2021, wartości współczynników przenikania ciepła przegród budowlanych. Zmiany te dotyczą wszystkich przegród przezroczystych i nieprzezroczystych oraz wszystkich rodzajów budynków łącznie z budynkami jednorodzinnymi. Wymagania co do powierzchni przeszkleń pozostają niezmienione. Rozporządzenie wprowadza także w tym samym trybie niższe wartości wskaźników E_p . Wysoka izolacyjność obudowy budynku pozostaje zatem podstawowym wskaźnikiem ograniczającym zarówno straty ciepła w sezonie grzewczym jak i zyski od promieniowania słonecznego nie tylko w okresie gorącego

lata. Z wysokiej izolacyjności przegród nieprzezroczystych wywodzi się idea, w dalszym ciągu obecna w Rozporządzeniu, o niskim zapotrzebowaniu budynków na energię w sezonie grzewczym. Badania dowodzą, że występuje potrzeba ogrzewania takich budynków poza sezonem grzewczym. Natomiast w praktyce projektowej dopełnieniem niskich wartości współczynników U dla przegród nieprzezroczystych są nie rzadko powiększone powierzchnie okien, które mają pozyskiwać energię promieniowania słonecznego i tym samym być narzędziem ograniczającym zużycie energii ze źródeł konwencjonalnych. Rozwiązanie architektoniczne bazujące na dużych przeszkleńiach o orientacji południowej nie zawsze jest szczęśliwym rozwiązaniem, szczególnie jeżeli nie są wykorzystywane powłoki niskoemisyjne i budynek jest budynkiem lekkim pozbawionym możliwości procesu akumulacji ciepła w przegrodach. Badania poligonowe [7] dowodzą, że duże przeszkleńia nie muszą mieć istotnego wpływu na pomniejszenie energochłonności budynków w sezonie grzewczym. Natomiast generują one zazwyczaj przegrzanie obiektów w okresie letnim. Poprawny dobór powłoki przeszkleńia dla okresu zimowego pogłębia proces przegrzania w lecie. Powierzchnie przeszkleń są zatem tymi elementami przegrody, które mogą regulować intensywność, w zależności od potrzeb, pozyskiwania promieniowania słonecznego. Dlatego też w dalszym ciągu ukazuje się sporo prac, które prezentują wyniki badań dotyczących wpływu wielkości, rodzaju, transmisyjności oraz orientacji okien na bilans energetyczny budynków tak w czasie sezonu grzewczego i w czasie lata [2 - 6, 9].

Intensywne promieniowanie słoneczne docierające do pomieszczeń, z racji powiększonego przeszkleńia, generuje większy wypór termiczny. Obserwowany jest wyraźny jego wzrost. Ale nawet pogłębiony deficyt gęstości powietrza wewnętrznego nie jest w stanie generować wystarczająco intensywnego przepływu powietrza. Oznacza to, że

wymiana powietrza wentylacyjnego, nawet przy wspomaganie wiatrem, jest za mała by odprowadzić nadmiar ciepła z pomieszczenia pozbawionego jego akumulacji w przegrodach. Dodatkowo, mocno zaizolowana obudowa budynku ma bardzo ograniczoną zdolność do tracenia ciepła do otoczenia zewnętrznego.

Nakładane na budownictwo coraz ostrzejsze reżimy energetyczne wymagają nie tylko korzystania z energii ze źródeł odnawialnych ale także bardziej kompleksowego traktowania procesu projektowego obiektów budowlanych. Proces a raczej jego rezultat powinien być obecnie wynikiem oddziaływania znacznie szerszej liczby parametrów i czynników niż jeszcze dekadę temu. Od projektu architektonicznego wymaga się nie tylko spełnienia oczekiwań estetycznych i funkcjonalnych obiektu zgodnych z jego przeznaczeniem a także, niskiej energochłonności w obu sezonach; grzewczym i letnim. Ponadto obecnie wznoszony czy też termomodernizowany budynek powinien spełniać poprawnie wszystkie swoje funkcje także za lat 30, kiedy przewidywane jest pełne oddziaływanie ocieplenia klimatu. Według najłagodniejszego scenariusza temperatura otoczenia wzrośnie o 4 deg. a więc obecnie projektowane budynki powinny zapewniać komfort cieplny także wówczas. Klimatyzacja jest oczywistym rozwiązaniem dla przegrzanych wewnątrz. Niemniej proces projektowy wymaga rozumienia procesów ciepło-przepływowych, które zachodzą w budynkach. Szczególnie istotne z punktu widzenia także energochłonności budynku jest poprawne sformułowanie wstępnych założeń projektowych. Stąd oddziaływanie masy termicznej budynku, kompleksowo rozumianego rodzaju przeszklenia, systemu wymiany powietrza wentylacyjnego na komfort cieplny pomieszczeń wymaga bardzo dokładnej analizy już we wstępnej fazie projektowej. Potrzeby energetyczne budynku dla sezonu grzewczego i letniego powinny być rozpatrywane niezależnie. Analiza we wstępnej fazie projektu wymaga innych narzędzi niż te stosowane do symulacji procesów ciepłoprzepływowych gdy projekt wkracza w ostateczną fazę realizacji. Projektant dysponuje wówczas pełną dokumentacją techniczną, w przeciwieństwie do wstępnej fazy projektu, i możliwe jest używanie komercyjnych programów symulacyjnych. Natomiast, proponowany w pracy, model regresji może być wsparciem właśnie przy wyznaczaniu wstępnych założeń projektowych. Model ten pozwala wyznaczyć granice intensywności wymiany powietrza wentylacyjnego w funkcji wielkości przeszklenia i jego orientacji przy przyjmowanych grubościach docieplenia. Granica ta oznacza zakres występowania minimalnej i maksymalnej liczby wymian powietrza przepływającego przez budynek z kierunkiem przepływu ku gorze lub ku dołowi w zależności od kierunku parcia wiatru. Te podstawowe, ale niekoniecznie oczywiste, współzależności mogą dostarczać informacji, które stworzą

alternatywę adekwatnego wyboru rozwiązania z uwagi na komfort cieplny i zużycie energii. Model został stworzony dla parametrów pogody Polski centralnej, dla okresu letniego, ściślej dla lipca, kiedy w naszym klimacie panują najwyższe temperatury. Wykorzystane w obliczeniach temperatury zewnętrzne pochodzą z przetworzenia wieloletnich ciągów IMGW.

2. MODEL TEORETYCZNY NIEUSTALONYCH PRZEPŁYWÓW CIEPŁOPRZEPŁYWOWYCH, WARUNKI BRZEGOWE

Obiekt budowlany, wraz z otoczeniem zewnętrznym można zdefiniować jako kompleksowy układ, w którym zachodzą wzajemnie powiązane procesy przepływowe ciepła i masy. Wymiana ciepła pomiędzy budynkiem a jego otoczeniem zewnętrznym wynika z przewodzenia, konwekcji i promieniowania. Przepływ powietrza odbywa się przez kontrolowane otwory wentylacyjne.

Bilans energetyczny powietrza wewnętrznego tj zmiana energii wewnętrznej powietrza o temperaturze T_i , w pomieszczeniu o objętości V składa się z szeregu członów (równanie 1). Człon Φ jest algebraiczną sumą strumieni ciepła dopływających lub traconych przez obiekt. Człon drugi definiuje strumień ciepła wymieniane pomiędzy powietrzem w pomieszczeniu a ograniczającymi ścianami F_i o temperaturze T_{s_i} i współczynnika przejmowania ciepła h_i . Trzeci opisuje strumień ciepła, przenikające z zewnątrz przez okna pomieszczenia o współczynniku U_{ok} i powierzchni A_{ok} (1). Czwarty wyraża zmianę entalpii, związaną ze strumieniem masowym powietrza wentylacyjnego, o natężeniu przepływu $\dot{V}_m$ [kg·s⁻¹] i opisany jest równaniem (2), [1, 8].

$$V \cdot \rho_i \cdot c_v \cdot \frac{dT_i}{dt} = \Phi + \sum_{i=1}^n h_i \cdot F_i \cdot (T_{s_i} - T_i) + \sum_{K=1}^m U_{okK} \cdot A_{okK} \cdot (T_o - T_i) + \dot{V}_m \cdot c_p \cdot (T_o - T_i) \quad (1)$$

a: strumień powietrza wentylacyjnego wynosi

$$\dot{V}_m = C_d \cdot A_{ot} \cdot \rho_o \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h \cdot \frac{T_i - T_o}{T_o} \pm 2 \Delta p_v} \quad (2)$$

Powietrze o temperaturze otoczenia T_o wpływa do pomieszczenia przez otwór wentylacyjny A_{ot} a opuszcza je

przy temperaturze T_i . C_d to współczynnik zwężenia strugi jednakowy dla otworu w zawietrznej i nawietrznej fasadzie budynku, ρ_0 gęstość powietrza zewnętrznego a Δp spadek ciśnienia od parcia wiatru. Znak „+” przed Δp oznacza, że spadek ciśnienia wytwarzany jest przez parcie wiatru wspomagającego przepływ powietrza przez budynek (tj. działającego na otwór wentylacyjny dolny) i sumuje się ze spadkiem ciśnienia pochodzącym z ubytku gęstości powietrza. Znak „-” wskazuje że spadek ciśnienia, który jest wytwarzany przez parcie wiatru przeciwnego (tj. działającego na otwór wentylacyjny górny) zmniejsza strumień powietrza, który powstaje z ubytku gęstości powietrza. W sytuacji bezwietrznej pogody człon Δp nie występuje w symulacjach numerycznych.

Pole temperatury w ścianach i stropie opisywane jest jednowymiarowym równaniem przewodnictwa z nieustalonymi warunkami brzegowymi III rodzaju. Po stronie zewnętrznej warunek uwzględnia dodatkowy człon związany z promieniowaniem słonecznym ponieważ poziome i pionowe przegrody budynku poddane były oddziaływaniu całkowitego promieniowania słonecznego. Strumień energii promieniowania słonecznego padający na ścianę był przez nią pochłaniany. Założono, że promieniowanie bezpośrednie jest tłumione proporcjonalnie do cosinusa kąta zenitu. Przyjęto brak zacienienia dla powierzchni poziomych tj. stropodachu budynku oraz przegród pionowych. Współczynnik refleksyjności podłoża wynosi 0,2 a współczynnik korekcyjny dla promienia odbitego 0,5.

Po stronie wewnętrznej temperatura jest parametrem skupionym. Dla ścianki wielowarstwowej, na granicy warstw, przyjęto warunek IV rodzaju. Równanie przewodnictwa rozwiązywane było z następującymi warunkami początkowymi: temperatura wewnątrz wszystkich warstw przegród i stropu oraz powietrza w pomieszczeniu równa była 20°C . Wartości wszystkich parametrów, zależnych od czasu, odpowiadały godzinie 0

3. CHARAKTERYSTYKA OBIEKTÓW

Badanie procesów ciepłno-przepływowych przeprowadzono w budynku jednostrefowym o wymiarach $5 \times 5 \times 3 \text{ m}$, który jest wyposażony w wentylację naturalną. Budynek posiada wewnętrzną masę termiczną, która zwiększa akumulację ciepła. Kalibrowane otwory wentylacyjne zostały umieszczone w przeciwległych ścianach. Dolny otwór wentylacyjny ulokowany jest w ścianie północnej 1 m nad gruntem a górny, w ścianie południowej 4 m nad gruntem. Otwory wentylacyjne dopływowe lokowane są zawsze w północnej ścianie obiektu, aby szczególnie w okresie letnim, przy wysokich sumach promieniowania słonecznego, uniknąć wpływu bezpośredniego promieniowania słonecznego. Okresowy wzrost temperatury zewnętrznej może wówczas przekroczyć wartość temperatury

wewnętrznej, powodując tym samym zaburzenia w przepływie powietrza przez budynek. Przy wietrze północnym otworem dopływowym powietrza do budynku jest zatem otwór dolny. Otwór górny stanowi wylot. Przy wietrze południowym funkcję otworów są odwrotne o ile wypór termiczny powietrza nie góruje nad spadkiem ciśnienia wywołowanym parciem wiatru południowego. W każdej sytuacji, wiatr działający na przegrodę budynku z dolnym otworem dopływowym intensyfikuje przepływ powietrza a parcie wiatru na ścianę z otworem górnym osłabia lub wręcz odwraca przepływ powietrza przez budynek.

Testowany budynek jest obiektem wzniesionym parę dekad wstecz, którego oporność cieplna przegród zewnętrznych jest poza wszelkimi aktualnymi wymaganiami. Opór przenikania stropodachu murowanego, który został już uprzednio ocieplony 4 cm wełny mineralnej i pokryty papą, wynosi $1.144 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$. Dla ścian pionowych opór równy jest zaledwie $0.664 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$. Wewnętrzna warstwa akumulacyjna jest odpowiednikiem przegrody ceglanej o grubości 20 cm i jej pojemność cieplna osiąga wartość $1134 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ podczas gdy całego budynku równa jest $4838 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$. Przegrody zewnętrzne zorientowane były na południe, północ, wschód i zachód. Okna o powierzchni $1,5 \text{ m}^2$ znajdowały się na S, E i W ścianie. Współczynnik przenikania ciepła dla okien U wynosił $1.6 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$. Przyjęta moc cieplna, pochodząca z zainstalowanych urządzeń i od mieszkańców wynosi 300 W.

4. METODYKA OBLICZEŃ NUMERYCZNYCH

Budynek, którego podstawowe parametry cieplne podano w poprzednim punkcie, poddano następującym zabiegom termomodernizacyjnym. Zarówno stropodach jak i ściany zewnętrzne docieplano kolejno materiałem izolacyjnym o następujących warstwach: 3 cm, 5 cm a następnie z krokiem co 5 cm osiągnięto warstwę grubości 30 cm. Przy każdej, kolejnej warstwie docieplającej symulowano numerycznie przepływy ciepłno-przepływowe dla zmieniającej wartości parametru wwr tj udziału powierzchni okna w powierzchni przegrody. Obliczeń dokonywano kolejno dla okien o orientacji: E, S i W. Udział powierzchni okna w powierzchni przegrody rozpoczynał się od wartości 0.05 a kończył na 0.5 z krokiem 0.05. Jeśli zmiana wwr dotyczyła okna w przegrodzie wschodniej to okna w ścianie południowej i zachodniej miały powierzchnię podstawową, równą $1,5 \text{ m}^2$ a więc wskaźnik wwr wynosił 0.1. Przy przegrodzie południowej powierzchnia okna w przegrodzie wschodniej i zachodniej miała powierzchnię podstawową. Podobnie było z przegrodą zachodnią. Reasumując dla każdej kolejno zmienianej warstwy docieplenia o grubości od 3 cm do 30 cm następowała zmiana przeszklenia, która obejmowała udział powierzchni okna w przegrodzie od

0,05 do 0,5. Dodatkowo dla każdej warstwy izolacyjnej i każdej wartości parametru wwr obliczenia numeryczne przeprowadzono przy trzech trybach oddziaływania wiatru. Z uzyskanych, dla wszystkich przypadków, przebiegów dobowych liczby wymian powietrza wentylacyjnego wybrano wartości minimalne i maksymalne. Wartości te pozwoliły wyznaczyć linie regresji, których opis stanowi modele regresji do wyznaczania niezależnie minimalnej i maksymalnej liczby wymian powietrza w budynku w funkcji parametru wwr przy zastosowanym dociepleniu. Wyniki obliczeń stosowane w tworzeniu modelu regresji otrzymano z zastosowania algorytmu, w którym temperatura wewnętrzna obliczona z równania wymiany ciepła jest wprowadzona do równań przepływu powietrza w następnym kroku czasowym. Zabieg ten pozwala na wyznaczenie w kolejnym kroku, temperatury wewnętrznej uwzględniającej zarówno wymianę ciepła jak i powietrza. Cykl obliczeniowy obejmuje cały miesiąc, w tym wypadku lipiec, z codziennymi wydrukami 746 godzin. Wykresy wykorzystywane w modelu pochodzą z przedziału pomiędzy 679 a 740 godziną obliczeń, czyli z końca miesiąca.

Obliczenia prowadzono uwzględniając lub pomijając istnienie wewnętrznej masy akumulacyjnej. Praca prezentuje wyniki uwzględniającej wpływ masy akumulacyjnej.

5. WYNIKI OBLICZEŃ

Model regresji do wyznaczania liczby wymian powietrza wentylacyjnego w funkcji wskaźnika wwr opisuje równanie (3). Natomiast tab.1 zawiera wartości parametrów dla wszystkich stworzonych opcji modelu tj. minimalnej i maksymalnej liczby wymian powietrza przepływającego przez budynek dla: trzech orientacji okien tj.: wschodniej, południowej i zachodniej, trzech trybów oddziaływania wiatru tj. wspomagającego, przeciwnego i przepływu bez wiatru. We wszystkich opcjach modelu występuje oddziaływanie całkowitego promieniowania słonecznego. Z racji ograniczonej pojemności artykułu, graficznie przedstawiona jest wymiana powietrza wentylacyjnego, tylko dla przeszkleń orientacji wschodniej. Rys. 1a i 1c przedstawiają wymianę powietrza przy wietrze wspomagającym. Osiągane zaś temperatury wewnętrzne przy minimalnej liczbie wymian podają wykresy na rys. 1b. Tę samą konfigurację wyników przedstawiają rys. 5a i 5c oraz 5b przy wietrze przeciwnym. Natomiast wykresy liczby wymian na rys. 3a i 3c oraz temperatury wewnętrznej na 3b dotyczą dni bezwietrznych. Przepływ powietrza przez budynek i osiągnięte w nim wartości temperatur, w bezwietrznych warunkach pogodowych, wynikają jedynie z różnicy gęstości powietrza.

Otrzymane wyniki obliczeń, zarówno dla wartości minimalnych jak i maksymalnych wymian powietrza

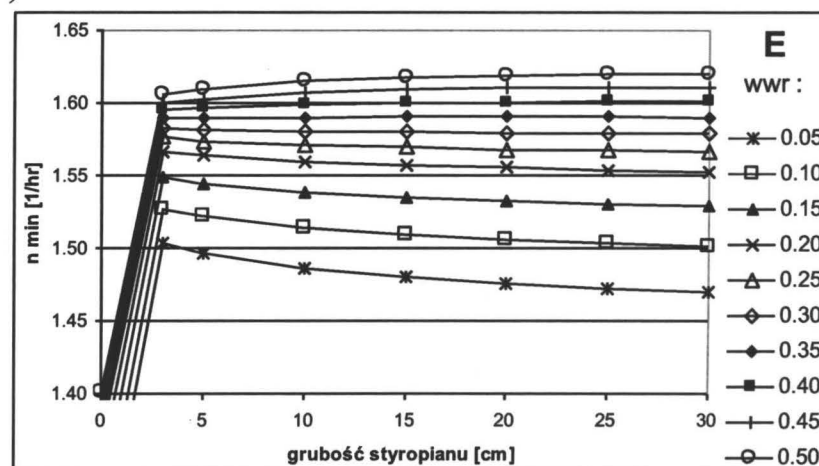
wentylacyjnego, dowodzą, że intensywność przepływu powietrza dość słabo zależy od oporu cieplnego przegród nieprzezroczystych. Im wyższy opór cieplny przegrody tym zależność pomiędzy oboma parametrami słabsza. Przebieg najniższego wykresu z rys. 1a tj. minimalnej liczby wymian powietrza osiągniętej w budynku przy parametrze przeszkleń wwr równym 0.05 dla orientacji wschodniej (dla orientacji południowej i zachodniej wwr wynosi 0.1) wskazuje, że różnica w przepływie powietrza pomiędzy budynkiem z 3 centymetrową izolacją a budynkiem ocieplonym 30 cm wynosi zaledwie 0.034 wymiany na godzinę. Przy przeszkleń wwr równym 0.5 różnica w przepływie jest jeszcze mniejsza. Pomijalnie mała różnica w przepływie powietrza jest obserwowana już od wwr równym 0.25. Poniżej tej wartości tj. dla wwr równym: 0.20, 0.15, 0.1 różnice są podobnie niewielkie jak przy wwr równym 0.05. Generowany deficyt gęstości powietrza wewnętrznego, który odpowiada za przepływ powietrza przez budynek, jest także funkcją dostarczanej za pośrednictwem okien energii promieniowania słonecznego, akumulacji ciepła w ścianach, wewnętrznych zysków ciepła oraz ograniczonego procesu tracenia ciepła przez przegrody. Przy rosnącej grubości warstwy ocieplającej proces wymiany ciepła z otoczeniem staje się coraz bardziej ograniczony podobnie jak intensywność pozyskiwania energii promieniowania słonecznego przez przegrody nieprzezroczyste. Stąd o wysokości temperatury w budynku decydują przede wszystkim okna a więc zyski energii pozyskiwane za ich pośrednictwem. Dlatego też, przy wysokich wartościach parametru wwr, obserwowany przepływ powietrza wentylacyjnego, jest prawie niezależny od grubości warstwy docieplającej. Odpowiadające, liczbie wymian - rys. 1a, minimalne temperatury - rys. 1b dowodzą, że już od warstwy docieplenia równej 10cm i od wartości wwr równej 0.25 temperatura wewnętrzna ustala się na stałym poziomie. Przy niższych wartościach wwr, wskazanych na rys. 1b, grubość warstwy odgrywa niewielką rolę. Przy wwr równym 0.05 różnica temperatury wewnętrznej pomiędzy warstwą ocieplającą równą 5cm i 30 cm jest największa dla rozpatrywanych przypadków i wynosi 0.5°C. Natomiast najwyższa wartość temperatury występuje przy wwr równym 0.5 i dla docieplenia pomiędzy 15cm a 30cm wynosi 26.5°C. Najniższe temperatury występują przy braku docieplenia (rys. 1b nie obejmuje tego zakresu). Przy wwr równym 0.05 temperatura w budynku wynosi 21.5°C a przy wwr równym 0.5 osiąga 22.5°C. Temperatury te odpowiadają liczbie wymian 1.27 i 1.40 odpowiednio. Różnica w wymianie wynika także ze znacznych strat ciepła przez niezaizolowane przegrody budynku. Rys. 1a wskazuje, że zaledwie 3 cm izolacja cieplnej przegród, podnosi efektywność wentylacji naturalnej. Następuje także wtedy wzrost temperatury w budynku. Spadek intensywności strat ciepła przez tak skąpo zaizolowane przegrody jest więc

istotniejszy, z uwagi na temperaturę wewnętrzną, niż wzrost intensywności wymiany powietrza wentylacyjnego. Podobne jakościowe relacje zachodzą pomiędzy maksymalną liczbą wymian - rys. 1c a odpowiadającymi im maksymalnymi temperaturami wewnętrznymi. Najwyższe wymiany powietrza w budynku osiągane są dla wwr równego 0.5 z 30 centymetrowym dociepleniem. Najśłabsza wentylacja występuje przy wwr równym 0.05 i izolacji 3 cm. Ilości przepływającego przez budynek powietrza dla najniższej i najwyższej izolacji różnią się w setnych wymiany i to przy najmniejszym jak i największej wartości parametru wwr. Przy braku izolacji wymiana przy wwr równym 0.05 wynosi 1.45 na godzinę a przy wwr = 0.5 równa jest 1.57 wymiany podczas gdy przy tych samych parametrach wwr ale z 30 cm. dociepleniem liczba wymian równa jest 1.60 i 1.78 odpowiednio. Maksymalne temperatury w pomieszczeniu, wynoszą przy najmniejszym oknie 26.9°C a przy największym 31.2°C. Natomiast przy braku ocieplenia spadają do 23.5°C i 27°C odpowiednio. Rys. 2, z kolei, przedstawia linię regresji dla maksymalnej liczby wymian powietrza, przy orientacji wschodniej okna. Linie tę uzyskano dla wyselekcjonowanych z symulacji danych numerycznych. Dla orientacji południowej i zachodniej, przy wszystkich formach oddziaływania wiatru, współczynniki równania regresji zamieszczone są w tabeli 1.

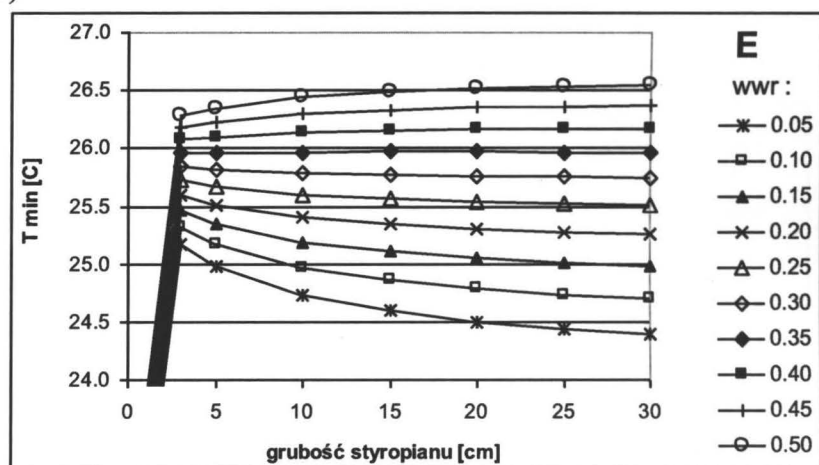
Wykresy na rys. 3 odnoszą się do sytuacji, kiedy przepływ powietrza przez budynek wynika tylko z deficytu gęstości powietrza. Porównania więc wykresów z rys.1 i rys. 3 obrazuje wpływ oddziaływania wiatru wspomagającego na intensywność przepływu powietrza. Otwór dopływowy jest usytuowany zaledwie 1m nad gruntem i wpływ chropowatości terenu na prędkość wiatru jest znaczna. Wiatr północny osiąga w tej lokalizacji w lipcu zaledwie 1,03m/s z amplitudą 0.25m/s. Maksymalna prędkość wiatru występuje o 15.30. Mimo tak niewielkiej prędkości wiatru w przypadku braku jego wspomagania przepływ powietrza spada, znacząco dla wartości minimalnych z 1.5 wymiany na godzinę - rys. 1a do 1.02 wymiany - rys. 3a. Dla maksymalnych wartości, wymiana zmniejsza się z 1.76 - rys. 1c do 1.58 wymiany - rys. 3c. Natomiast w przypadku braku docieplenia (poza wykresami widocznymi na rys. 1a, 3a) przepływ w zakresach minimalnych spada ponad dwukrotnie z 1,27 wymiany - rys. 1a na 0.6 wymiany rys. 3a. W zakresach maksymalnych, z 1. wymiany - rys. 1c na 1.28 wymiany - rys.3c. Słabsza wentylacja ma wpływ na poziom temperatur w pomieszczeniu. Przy wietrze wspomagającym, w największych słonecznych zyskach energetycznych tj przy wskaźniku wwr równym 0,5, najwyższa temperatura z zakresu minimalnych temperatur - rys. 1c osiąga 26.6°C a przy braku oddziaływania wiatru wzrasta o 1deg - rys.3c. W zakresach maksymalnych temperatur, przy wietrze wynosi 31.2°C a bez wiatru wzrasta także o 1 deg. W budynku niezaizolowanym

cieplnie brak wiatru ma bardzo niewielki wpływ na temperaturę wewnętrzną. Wzrost temperatury wynosi ok. 0.5°C. Rozróżnienie przepływu powietrza przy wentylacji naturalnej z udziałem wiatru wspomagającego i braku występowania wiatru może być istotne.

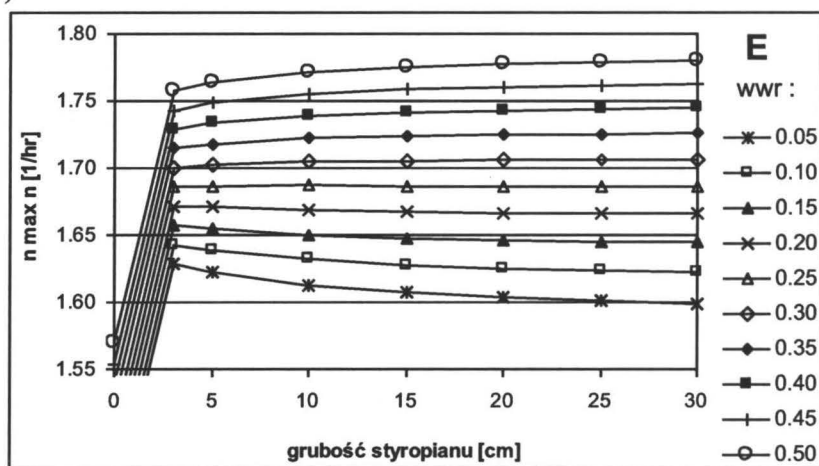
a)



b)



c)



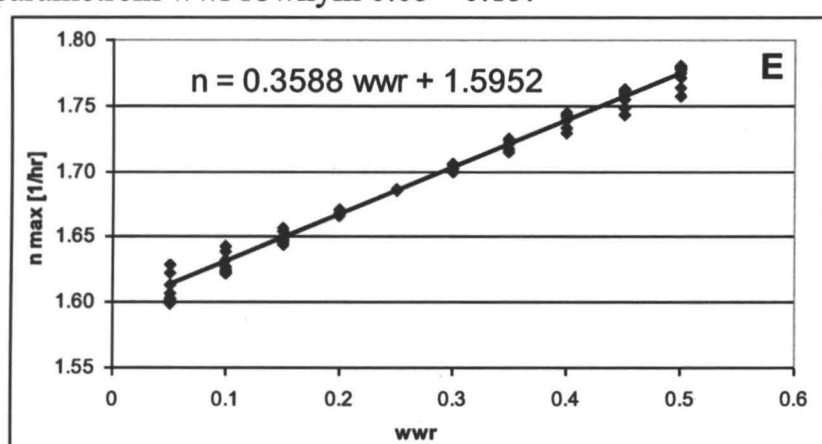
Rys.1. Liczba wymian powietrza wentylacyjnego n oraz wartości temperatury wewnętrznej T w funkcji grubości izolacji i parametru wwr. Orientacja E, wiatr wspomagający.

a) i b) – wartości minimalne; c) – wartości maksymalne.

Fig. 1. ACH (n) and the indoor temp. (T) at the different value of insulation material and the wwr parameter. E orientation, assisting wind. a), b) – minimum; c) – maximum values.

W gorące letnie dni bardzo często wiatr jest „nieobecny”. Sytuacja ta może wzmacniać dyskomfort pomieszczeń. Rys. 4 przedstawia linię regresji do wyznaczania maksymalnej liczby wymian bez udziału wiatru.

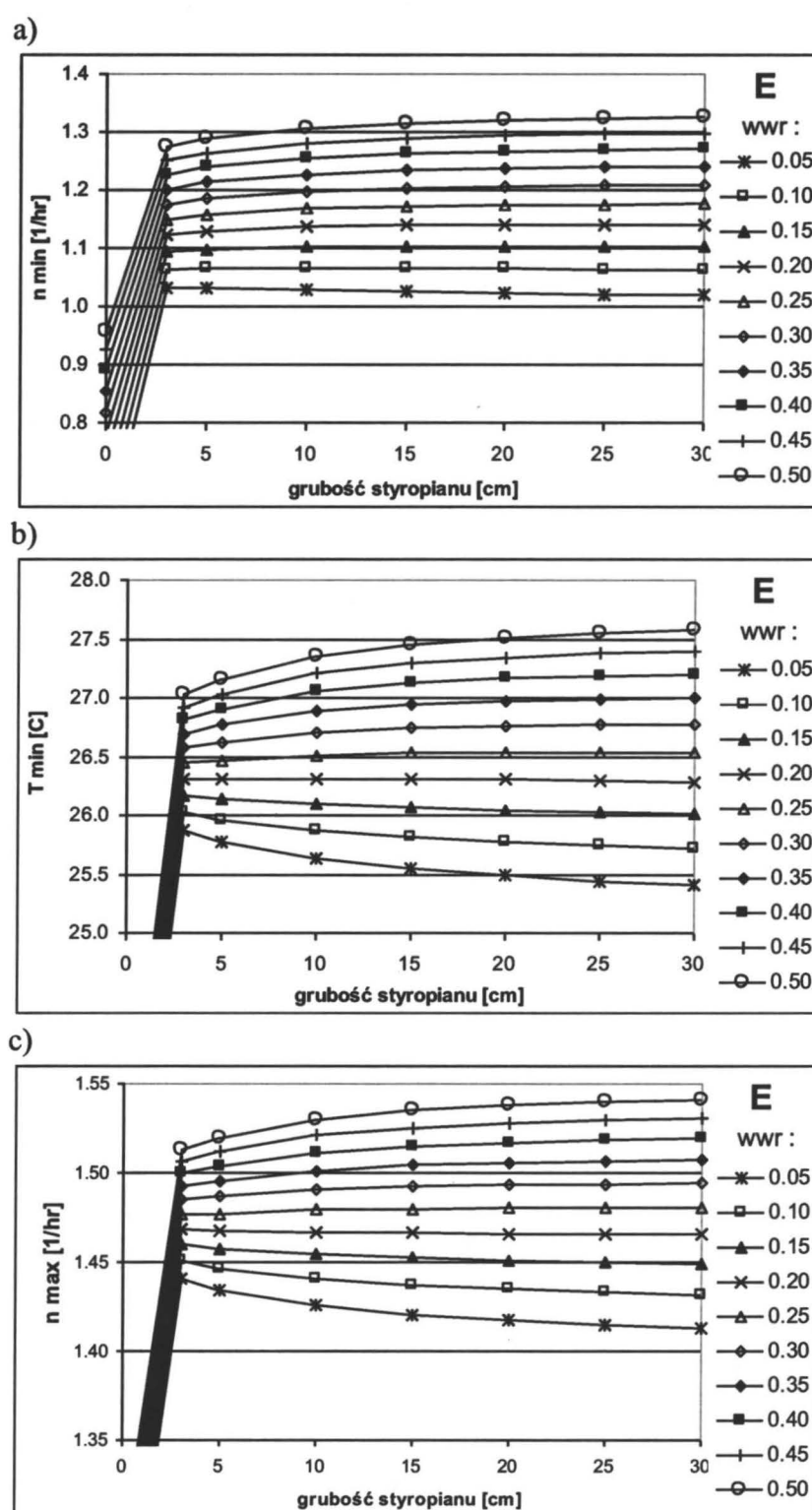
Wykresy z rys. 5. przedstawiają liczby wymian powietrza i temperatury w sytuacji kiedy występuje parcie wiatru na górny otwór wentylacyjny. W założeniu jest on otworem wypływowym. W tym wypadku we wzorze (2) spadek ciśnienia, który pochodzi z parcia wiatru występuje ze znakiem „-”. Rzeczywisty strumień powietrza wentylacyjnego wynika zatem z różnicy pomiędzy wyporem termicznym a parciem wiatru. Jeśli spadek ciśnienia, który pochodzi od wiatru przewyższy ten, który jest wynikiem deficytu gęstości powietrza to przepływ będzie się odbywać z góry na dół. Występują wówczas przepływy odwrotne; „-”. Tak też dzieje się w testowanym budynku, ale tylko wtedy gdy budynek jest nie zaizolowany (niewidoczna na rys. 5a część wykresu) i charakteryzuje się parametrem wwr równym 0.05 - 0.15.



Rys. 2. Linia regresji dla liczby wymian powietrza wentylacyjnego n ; wartości maksymalne, orientacja E, wiatr wspomagający.

Fig. 2 Regression model for the ACH max. (n_{max}), East orientation, assisting wind.

Przy najmniejszej powierzchni okna, wwr równym 0.05, liczba wymian wynosi (-) 0.75. Jeśli w budynku niedocieplonym wwr wynosi 0.5 to liczba wymian osiąga zaledwie wartość 0.3 ale nie ma przepływu odwrotnego. Zmiana kierunku przepływu z odwrotnego na ku górze, wynika z istotnie zwiększonej energii promieniowania słonecznego, która jest pozyskiwana za pośrednictwem 10 krotnie większego okna, tzn. wwr równe jest 0.5. Wypór termiczny pokonuje parcie wiatru i powietrze przepływa z dołu do góry. W przypadku wiatru przeciwnego, w budynku zaizolowanym cieplnie, nie występują przepływy odwrotne ale minimalna wymiana powietrza w całym badanym zakresie wwr od 0.05 do 0.5 pozostaje niemal na stałym poziomie i wynosi 0.52. Przy wwr powyżej wartości 0.2 obserwuje się lekką zależność ilości wymienianego powietrza od grubości docieplenia.



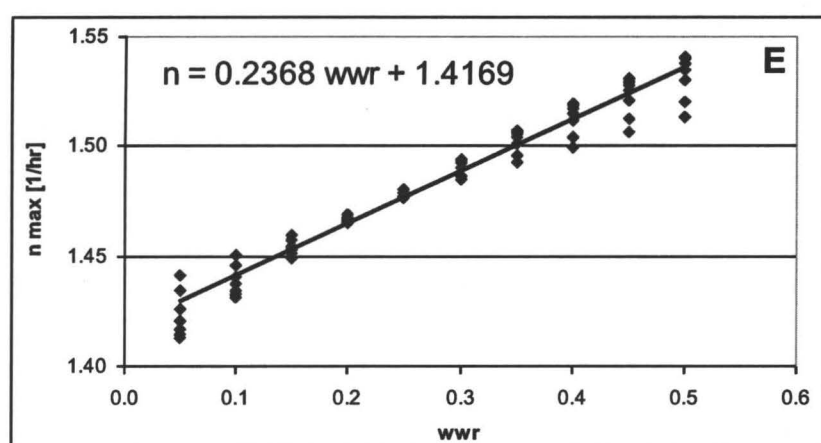
Rys.3. Liczba wymian powietrza wentylacyjnego n oraz wartości temperatury wewnętrznej T w funkcji grubości izolacji i parametru wwr, Orientacja E, brak wiatru.

a) i b) – wartości minimalne; c) – wartości maksymalne.

Fig. 3. ACH (n) and the indoor temp. (T) at the different value of insulation material and the wwr parameter. E orientation, no wind. a), b) – minimum; c) – maximum values.

Pomiędzy 3 cm a 30 cm izolacji następuje ok. 10% wzrost strumienia powietrza. Niemniej, przy wietrze przeciwnym, wymiana powietrza jest najmniejsza z trzech przedstawionych przypadków. W zakresie wymian minimalnych największa wartość wynosi 1 wymianę.

Stąd temperatura wewnętrzna jest najwyższa i wynosi 28.3°C. W zakresie wymian maksymalnych osiągana jest wymiana zaledwie 1.42, a temperatura w budynku przekracza 33°C.



Rys. 4. Linia regresji dla liczby wymian powietrza wentylacyjnego n ; wartości maksymalne, orientacja E, brak wiatru.

Fig. 4. Regression model for the ACH max. (n_{max}) East orientation, no wind.

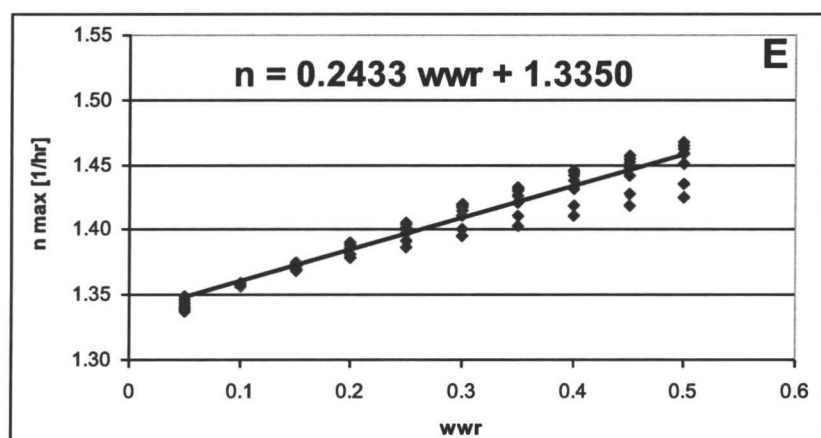
Model regresji opisany jest poniższym równaniem (3) a wartości jego współczynników zawiera tab.1.

$$n = a \cdot wwr + b \quad (3)$$

Tabela 1. Współczynniki regresji.

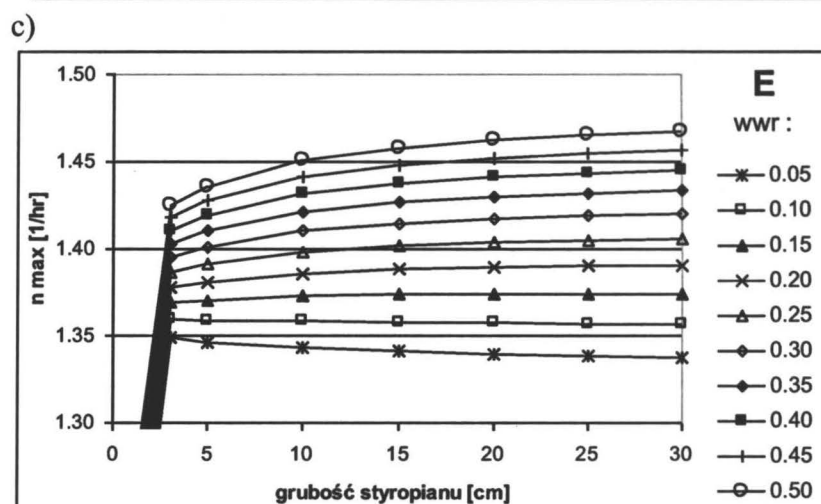
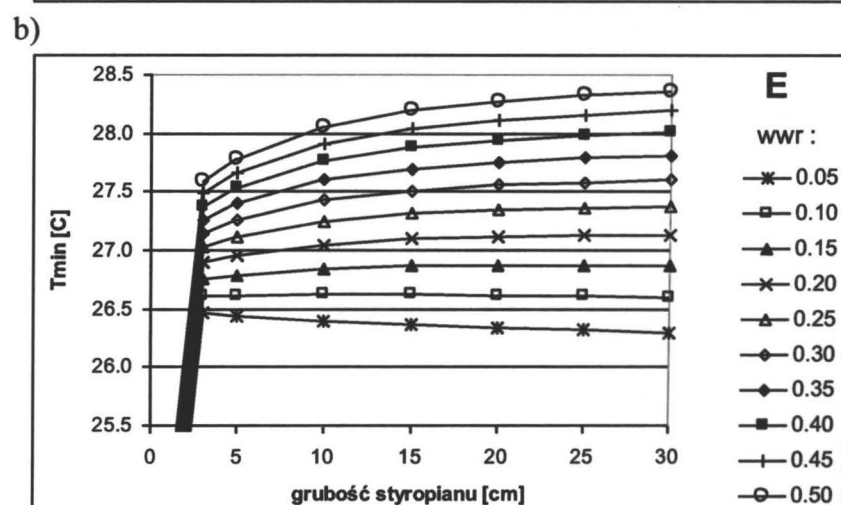
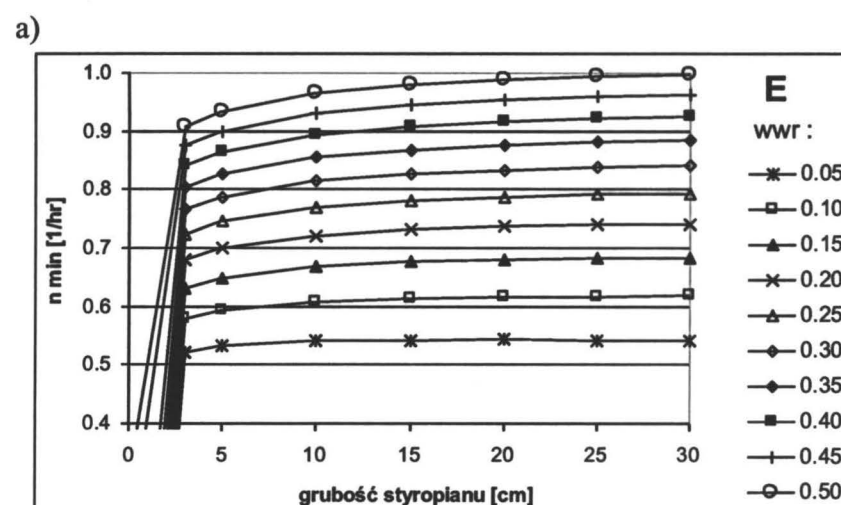
Table 1. Regression coefficients.

	n min [1/hr]		n max [1/hr]	
	a	b	a	b
Wiatr wspomagający				
E	0.2747	1.4897	0.3588	1.5952
S	0.2781	1.4849	0.4400	1.5848
W	0.3203	1.4817	0.6236	1.5701
wiatr przeciwny				
E	0.9376	0.5192	0.2433	1.3850
S	1.1878	0.4957	0.2719	1.3322
W	0.9440	0.5208	0.3366	1.3261
brak wiatru				
E	0.6210	1.0057	0.2368	1.4169
S	0.7583	0.9955	0.2636	1.4143
W	0.6203	1.0076	0.3245	1.4085



Rys. 6. Linia regresji dla liczby wymian powietrza wentylacyjnego n ; wartości maksymalne, orientacja E, wiatr przeciwny.

Fig. 6. Regression model for the ACH max. (n_{max}) East orientation, opposing wind.



Rys.5. Liczba wymian powietrza wentylacyjnego n oraz wartości temperatury wewnętrznej T w funkcji grubości izolacji i parametru wwr, Orientacja E, wiatr przeciwny.

a) i b) – wartości minimalne; c) – wartości maksymalne.

Fig. 5. ACH (n) and the indoor temp. (T) at the at different value of insulation material and the wwr parameter. E orientation, opposing wind. a), b) – minimum; c) – maximum values.

6. PODSUMOWANIE

Zamieszczone w pracy wyniki obliczeń dotyczą izolowanego cieplnie budynku z naturalną wentylacją. W budynku zmieniany jest udział powierzchni przeszkleń w przegrodzie. Wartość tego udziału wyznacza parametr wwr. Podstawowymi wyróżnikami testowanego budynku są: parametr wwr, orientacja okien i tryb oddziaływania

wiatru. Wyniki symulacji numerycznych wskazują, że grubość warstwy docieplającej obudowę budynku ma bardzo niewielki wpływ, w porównaniu z powierzchnią przeszklenia, na intensywność przepływu powietrza przez budynek oraz wartość osiąganą temperaturę wewnętrzną. Przy izolacji powyżej 10 cm i udziale przeszklenia w powierzchni fasady powyżej 0.2, 0.25 ustalają się niemal stałe temperatury i strumienie powietrza, niezależne od grubości izolacji cieplnej. Ich wartość zależy wtedy jedynie od powierzchni okna. Na poziom obu parametrów ma następnie wpływ trybu oddziaływania wiatru a następnie orientacja okien. Z zmieszczonej w poprzednim rozdziale analizie otrzymanych danych wynika, że istotne różnice w odniesieniu do izolacji cieplnej występują w charakterystykach ciepłoprzepływowych pomiędzy budynkami zaizolowanymi cieplnie i pozbawionymi izolacji, które wzniesiono w poprzednich dekadach. Nawet niewielki, poniżej $1\text{m}^2\text{K/W}$, wzrost oporu cieplnego, wzmacnia przepływ powietrza bo rośnie deficyt gęstości powietrza wentylacyjnego z racji obniżonych strat ciepła przez obudowę budynku. Oczywiście jednoczesny wzrost przeszklenia podnosi temperaturę wewnętrzną i strumień powietrza.

Wyliczone w testowanym budynku, przy przyjętych warunkach meteorologicznych, liczby wymian powietrza nie są w stanie zapewnić, w godzinach największego nasłonecznienia, komfortu cieplnego. Do poszerzenia informacji potrzebny jest model, który równie szybko pozwoliłby oszacowywać temperaturę osiąganą w pomieszczeniu. Natomiast wskazanie trwania okresów dyskomfortu wymaga pełnej analizy przebiegów dobowych strumieni powietrza i temperatury wewnętrznej. Jeśli okresy niekorzystnej temperatury trwają krótko to może należy je zaakceptować, jeśli dłużej można wtedy wprowadzić elementy wentylacji hybrydowej lub tylko skuteczne zacienienie.

Dla standardowego budynku powinna istnieć możliwość szacowania warunków komfortu cieplnego za pomocą prostego narzędzia które rozszerzy zakres czułych informacji.

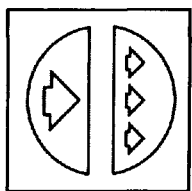
THE REGRESSION MODEL TO ESTIMATE NATURAL AIR RATE EXCHANGE

Summery: The purpose of this work was to investigate the intensity of natural air exchange when a value of thermal resistant for outside walls is being increased together with the increase of the window's surface. To obtain higher thermal resistant the outside partition were covered with insulating material subsequently from 3 to 30 cm. Window surface to wall surface ratio (wwr) was changing from 5% to 50%. The window's test surface was facing east, south and west in turn while the wwr of the remaining orientations was kept at a constant 1/10 of the wall. Three forms of ventilation airflow were considered - with assisting and opposing winds and no wind appearance. The process was

examined in a single zone building, naturally ventilated, fitted with heat accumulating mass. The regression model was proposed to estimate ACH maximum and minimum values when the window's test surface was facing east, south and west in turn while the wwr of the remaining orientations is kept at a constant 1/10 of the wall.

Literatura

- [1] Bzowska D. *Dynamika procesów wymiany ciepła i naturalnej wymiany powietrza w budynkach o różnej strukturze materiałowej przegród*, Prace IPPT 2/2007.
- [2] Gasparella A., et al., *Analysis and modelling of window and glazing systems energy performance for a well insulated residential building*. Energy & Buildings 43 (2011) 1030-1037.
- [3] Grinning S., et al., *Windows in the building of tomorrow: Energy losers or energy gainers?* Energy & Buildings 61 (2013) 185-192.
- [4] Haim D., et al., *Optymalizacja fasad podwójnych pod kątem oszczędności energii i środowiska wewnętrznego*. Monografia, wydawnictwo PŁ, (2013).
- [5] Kim T., Todorovic M., *Tuning control of building glazing's transmittance dependence on the solar radiation wavelenght to optimize daylighting and building's energy efficiency*. Energy & Buildings 63 (2013) 108-118.
- [6] Kisilewicz T., *Wpływ izolacyjnych, dynamicznych i spektralnych właściwości przegród na bilans cieplny budynków energooszczędnych*. Monografia, wydawnictwo PK, 2008.
- [7] Leskvar V., Z., Premrov M., *An approach in archictertural of energy- efficient timber buildings with a focus on the optimal glazing size in the south-oriented façade*. Energy & Buildings 43 (2011) 3410-3418.
- [8] Li Y., Delsante A., *Natural ventilation induced by combined wind and thermal forces*, Building and Environment, 36 (2001), 59-71.
- [9] Persson M., et al., *Influence of window size on the energy balance of low energy houses*. Energy & Buildings 38 (2006) 181-188.



LABORATORYJNE BADANIA TŁUMIENIA DŹWIĘKÓW UDERZENIOWYCH PRZEZ PODŁOGI PŁYWAJĄCE Z POJEDYNCZĄ ORAZ PODWÓJNĄ WARSTWĄ SPRĘŻYSTĄ

Leszek DULAK^{*}, Michał MARCHACZ^{}, Rafał ŻUCHOWSKI^{***}**

^{} Politechnika Śląska, Katedra Procesów Budowlanych
ul. Akademicka 5, 44-100 Gliwice,*

e-mails: leszek.dulak@polsl.pl; michal.marchacz@polsl.pl; rafal.zuchowski@polsl.pl

Streszczenie: W pracy podjęto próbę określenia możliwości poprawy właściwości dźwiękoizolacyjnych podłóg pływających z warstwą sprężystą w postaci polistyrenu ekspandowanego elastyfikowanego pochodzącego z recyklingu.

Słowa kluczowe: wskaźnik ΔL_w , izolacyjność od dźwięków uderzeniowych, znormalizowany poziom uderzeniowy, materiały z recyklingu.

1. WPROWADZENIE

Układ warstw w podłodze pływającej zmodyfikowany został poprzez dodatek materiału pochodzącego z recyklingu. Badania z przyczyn ekonomicznych przeprowadzone zostały na masywnym stropie wzorcowym, jednak dla próbek badawczych o mniejszej powierzchni niż zalecane przez obowiązujące procedury normowe, zawarte między innymi w PN-EN ISO 10140-3:2011 [1]. W pracy uwzględniono wnioski płynące z realizacji tematu badawczego przeprowadzonego w roku 2013 [3], które wskazują, że nie jest możliwa ilościowa ocena parametrów dźwiękoizolacyjnych podłóg pływających na podstawie badań przeprowadzonych na próbkach o zdecydowanie mniejszej powierzchni od wymaganych normą jako minimum 10 m². Uzyskane wyniki porównane zostały z wynikami uzyskanymi dla podłóg bez dodatku materiału pochodzącego z recyklingu. Potrzebę poszukiwania rozwiązań o wyższej skuteczności wymusza rynek budowlany. Doświadczenia ostatnich lat wskazują na Nieradujące parametry stropów z podłogami pływającymi wykonanymi z wykorzystaniem polistyrenu elastyfikowanego. Dodatkowo poszukiwanie nowych zastosowań dla

materiałów pochodzących z recyklingu wpisuje się w szeroko rozumianą politykę rozwoju zrównoważonego.

2. METODYKA POMIARÓW

W celu realizacji zadania badawczego polegającego na porównaniu wyników zmniejszenia poziomu uderzeniowego przez podłogi pływające bez modyfikacji (nazwane bazowymi) z wynikami uzyskanymi na próbkach o zmodyfikowanej budowie, zastosowano poniżej przedstawioną procedurę badawczą. Badania izolacyjności akustycznej od dźwięków uderzeniowych przeprowadzono w sprzężonych komorach pogłosowych Laboratorium Akustycznego Katedry Budownictwa Ogólnego i Fizyki Budowli Wydziału Budownictwa Politechniki Śląskiej. Komory rozdzielone są stropem znormalizowanym żelbetowym o gr. 14 cm. Celem wyznaczenia parametrów akustycznych charakteryzujących izolacyjność od dźwięków uderzeniowych podłogi pływającej, próbka ułożona została na stropie wzorcowym w komorze nadawczej. Próbka miała wymiary 100 × 100 cm, za wyjątkiem próbki nr 3, która miała wymiary 134 × 103,5 cm. Powierzchnia badanych podłóg wynosiła odpowiednio 1,00 m² i 1,39 m². Pomiary poziomu uderzeniowego wykonano dla 4 różnych pozycji stukacza. Każdej pozycji stukacza odpowiadały 4 pozycje ustawienia mikrofonu w komorze odbiorczej. Na rys. 1 pokazano fotografię próbki podłogi pływającej ułożoną w komorze nadawczej. W oparciu o przeprowadzone pomiary laboratoryjne wyznaczono następujące parametry podłóg pływających:

- charakterystykę znormalizowanego poziomu uderzeniowego w funkcji częstotliwości L_{n0} - pomiary

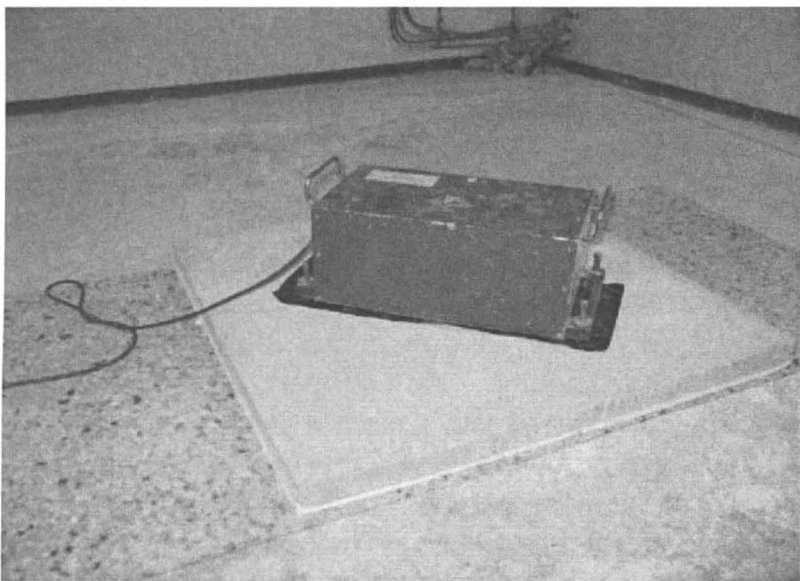
wykonane w pasmach tercjowych w poszerzonym zakresie częstotliwości $50 \div 5000$ Hz,

- jednolicebny ważony wskaźnik znormalizowanego poziomu uderzeniowego $L_{n0,w}$,
- widmowy wskaźnik adaptacyjny dla poziomu uderzeniowego $C_{I,0}$.

Dla znormalizowanego masywnego stropu z podłogą pływającą wyznaczono:

- charakterystykę znormalizowanego poziomu uderzeniowego w funkcji częstotliwości L_n - pomiary wykonane w pasmach tercjowych, w poszerzonym zakresie częstotliwości $50 \div 5000$ Hz,
- jednolicebny ważony wskaźnik znormalizowanego poziomu uderzeniowego $L_{n,w}$,
- widmowy wskaźnik adaptacyjny dla poziomu uderzeniowego C_I ,
- charakterystykę zmniejszenia poziomu uderzeniowego ΔL - pomiary wykonane w pasmach tercjowych, w poszerzonym zakresie częstotliwości $50 \div 5000$ Hz,
- jednolicebny wskaźnik ważony zmniejszenia poziomu uderzeniowego ΔL_w ,
- widmowy wskaźnik adaptacyjny dla poziomu uderzeniowego $C_{I\Delta}$.

Znormalizowany poziom uderzeniowy L_{n0} wyznaczono dla stropu znormalizowanego bez podłogi a następnie dla każdej z próbek wyznaczono kolejno znormalizowany poziom uderzeniowy L_n .

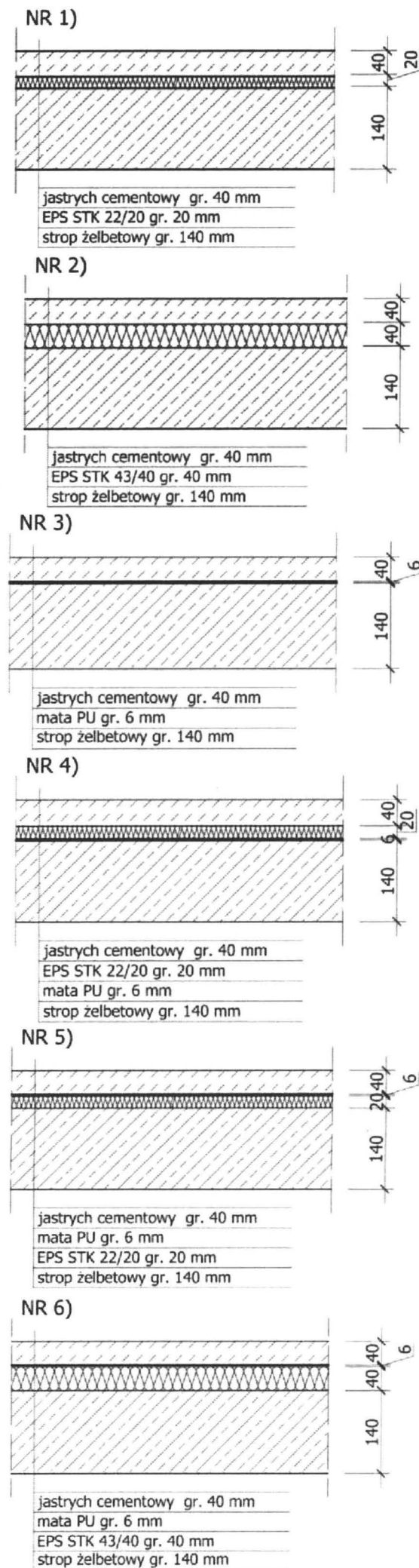


Rys.1. Fotografia przykładowej zmodyfikowanej podłogi pływającej (próbka nr 4). Na fotografii widoczny stukacz młotkowy.

Fig. 1. Image of exemplary modified floor covering (sample No. 4). The image shows the tapping machine.

3. CHARAKTERYSTYKA BADANYCH PRÓBEK

Na rys. 2 przedstawiono widok próbek podłóg poddanych badaniom zmniejszenia poziomu uderzeniowego.



Rys.2. Próbki 1÷6 poddane badaniom zmniejszenia poziomu uderzeniowego.

Fig. 2. Samples 1÷6 of the floor subjected to the tests on of the impact sound reduction.

Badania tłumienia dźwięków uderzeniowych przez podłogi pływające zrealizowano dla 3 próbek podłóg pływających bazowych wykonanych w oparciu o elastyfikowane płyty styropianowe STK EPS T o grubości 43/40 mm i 22/20 mm oraz polistyren pochodzący z recyklingu. Następnie wykonano badania dla podłóg stanowiących modyfikację podłóg bazowych polegającą na uzupełnieniu układu podłogowego na bazie styropianu o dodatkową warstwę materiału wibroizolacyjnego gr. 6 mm w postaci maty poliuretanowej wyprodukowanej z materiałów pochodzących z recyklingu (mata PU). Numery próbek oraz rodzaj materiału sprężystego zestawiono w tabelicy 1.

Tabela 1. Zestawienie próbek poddanych badaniom izolacyjności akustycznej od dźwięków uderzeniowych.

Table 1. Summary of samples subjected to tests on reduction of transmitted impact noise.

Nr próbki	Rodzaj jastrychu	Rodzaj styropianu	wymiary próbki, cm
1	cementowy	STK EPS T 22/20	100 × 100
2	cementowy	STK EPS T 43/40	100 × 100
3	cementowy	mata PU gr. 6 mm	134 × 104
4	cementowy	mata PU + STK EPS T 22/20	100 × 100
5	cementowy	STK EPS T 22/20 + MATA PU	100 × 100
6	cementowy	STK EPS T 43/40 + MATA PU	100 × 100

4. WYNIKI

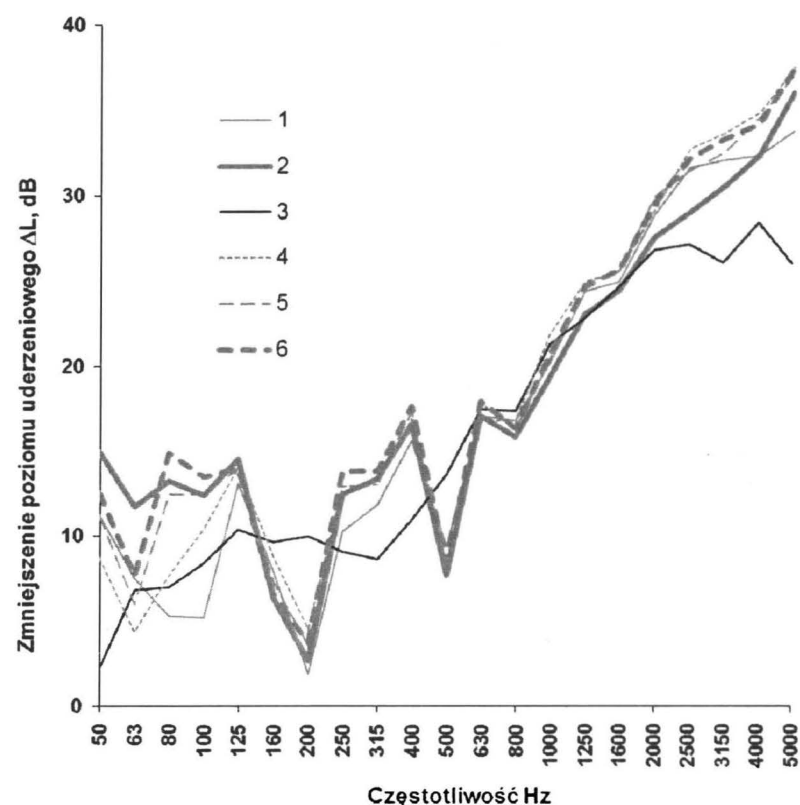
W wyniku przeprowadzonych badań wyznaczono parametry akustyczne charakteryzujące tłumienie dźwięków uderzeniowych przez podłogi na masywnym stropie wzorcowym.

Tabela 2. Wyniki badań zmniejszenia poziomu uderzeniowego.

Table 2. The results of reduction of transmitted impact noise.

Rodzaj ekranu	Wskaźniki oceny właściwości akustycznych przebadanych podłóg pływających oraz stropu znormalizowanego				
	ΔL_w , dB	$C_{I\Delta}$, dB	$C_{I,r}$, dB	$L_{n0,w}$, dB	$C_{I,0}$, dB
strop wzorcowy				77	-12
1	23	-11	0	-	-
2	22	-10	0	-	-
3	22	-8	-3		
4	24	-11	0	-	-
5	23	-10	0	-	-
6	24	-11	0		

Pomiary wykonano dla pasm 1/3 oktaowych w zakresie 50÷5000 Hz. Wskaźniki oceny właściwości akustycznych przebadanych podłóg pływających oraz stropu znormalizowanego wyznaczono dla zakresu 100÷3150 Hz. Wyniki w postaci obliczonych wskaźników przedstawiono w tabelicy 2. Na rys. 3 pokazano zmniejszenie poziomu uderzeniowego w funkcji częstotliwości, uzyskane poprzez zastosowanie kolejnych próbek podłóg pływających na stropie wzorcowym.



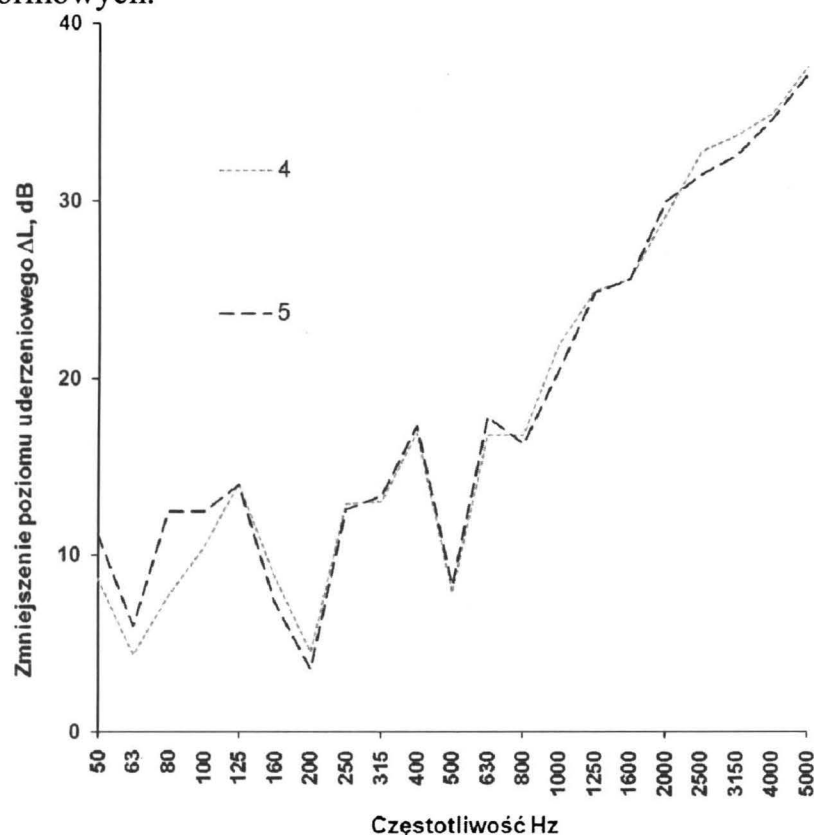
Rys.3. Charakterystyka zmniejszenia poziomu uderzeniowego dla kolejnych próbek podłóg pływających na stropie wzorcowym wykonane w oparciu o materiał: 1) STK EPS T o grubości 22/20 mm, 2) STK EPS T o grubości 22/20 mm, 3) MATA PU gr. 6 mm, 4) mata PU + STK EPS T 22/20, 5) STK EPS T 22/20 + mata PU, 6) STK EPS T 43/40 + mata PU.

Fig. 3. Characteristics of the reduction of transmitted impact noise for subsequent samples of floor coverings made with the use of elastic material: 1) STK EPS T 22/20 mm, 2) STK EPS T 22/20 mm, 3) mat PU 6 mm, 4) mat PU + STK EPS T 22/20, 5) STK EPS T 22/20 + mat PU, 6) STK EPS T 43/40 + mat PU.

5. PODSUMOWANIE

Wartości jednoliczbowego ważonego wskaźnika zmniejszenia poziomu uderzeniowego ΔL_w uzyskane dla wszystkich podłóg bazowych nr 1 ÷ nr 3 wyniosły 22 i 23 dB. Poprzez modyfikację matą poliuretanową podłóg bazowych nr 1 i nr 2 opartych na styropianie elastyfikowanym uzyskano nieznaczny wzrost jednoliczbowego ważonego wskaźnika zmniejszenia poziomu uderzeniowego ΔL_w do wartości odpowiednio 23 i 24 dB. W świetle wyników badań przeprowadzonych w ramach BK2013 [3] otrzymana zmiana wartości wskaźnika ΔL_w nie może być traktowana jako rzeczywisty wynik mówiący

o zmniejszeniu poziomu uderzeniowego znormalizowanego. Analizując charakterystykę zmniejszenia poziomu uderzeniowego w funkcji częstotliwości dla przebadanych próbek wpływ modyfikacji należy uznać za niesatysfakcjonujący z punktu widzenia oczekiwanych rezultatów. W celu uogólnienia wniosków na szerszą grupę podłóg wpływających na bazie styropianów elastyfikowanych modyfikowanych poprzez wprowadzenie dodatkowych warstw wibroizolacyjnych należałoby przeprowadzić podobne badania w szerszym zakresie na próbkach normowych.



Rys.4. Charakterystyka zmniejszenia poziomu uderzeniowego dla kolejnych próbek podłóg pływających na stropie wzorcowym wykonane w oparciu o materiał: 4) MATA PU + STK EPS T 22/20, 5) STK EPS T 22/20 + MATA PU.

Fig. 4. Characteristics of the reduction of transmitted impact noise for subsequent samples of floor coverings made with the use of elastic material: 4) MATA PU + STK EPS T 22/20, 5) STK EPS T 22/20 + MATA PU.

Na rys. 4 dodatkowo przedstawiono porównanie wyników badań dla próbki nr 4 i 5, czyli dla podłogi na bazie styropianu STK EPS T o grubości 22/20 mm i polistyrenu MATA PU pochodzącego z recyklingu. Próbki różniły się jedynie kolejnością ułożenia warstw. Należy stwierdzić, że jedynie dla niskich częstotliwości (50÷100 Hz) odnotowano niewielkie różnice pomiędzy tymi rozwiązaniami. Potwierdza to wnioski płynące z metod teoretycznych dotyczących szacowania wypadkowej sztywności dynamicznej dla dwóch lub więcej warstw sprężystych [2], które nie uwzględniają kolejności ułożenia warstw wibroizolacji w podłodze, co wskazuje na brak wpływu między kolejnością ułożenia warstw a skutecznością rozwiązania. Na podstawie analizy charakterystyki

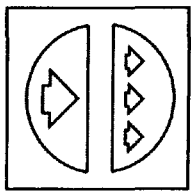
zmniejszenia poziomu uderzeniowego w funkcji częstotliwości dla przebadanych próbek o zredukowanej powierzchni stwierdzono, że występujące dla częstotliwości 200 i 500 Hz bardzo wyraźne obniżenie skuteczności podłogi związane jest właśnie z ograniczeniem wymiarów próbek badawczych [3]. Jedynie dla próbki nr 3, której wymiary wynosiły 134 x 104 cm nie zaobserwowano zmniejszenia skuteczności dla wspomnianych wyżej częstotliwości. Wskazuje to na możliwość poszukiwania takich wymiarów próbki, dla których pomimo redukcji powierzchni wyniki badań byłyby zbliżone do wyników dla próbek normowych. Artykuł opracowano na podstawie wyników badań zrealizowanych w ramach pracy badawczej zrealizowanej na Wydziale Budownictwa Politechniki Śląskiej BK-239/RB-3/2014 Analiza wpływu wybranych parametrów fizycznych tradycyjnych i nowoczesnych przegród budowlanych na eksploatację wybranych rodzajów budynków.

LABORATORY MEASUREMENTS OF THE REDUCTION OF TRANSMITTED IMPACT NOISE BY MODIFIED FLOOR COVERING WITH SINGLE OR DOUBLE RESILIENT LAYER

Summary: The paper attempts to identify the possibilities to improve the sound insulation properties by floor coverings with an elastic layer in the form of elasticised expanded polystyrene from recycling.

Literatura

- [1] PN-EN ISO 10140-3:2011 Akustyka -- Pomiar laboratoryjny izolacyjności akustycznej elementów budowlanych -- Część 3: Pomiar izolacyjności od dźwięków uderzeniowych.
- [2] PN-EN ISO 12354-2:2002 Akustyka budowlana -- Określenie właściwości akustycznych budynków na podstawie właściwości elementów -- Część 2: Izolacyjność od dźwięków uderzeniowych między pomieszczeniami.
- [3] Dulak L., Laboratoryjne badania porównawcze tłumienia dźwięków uderzeniowych przez podłogi pływające na masywnym stropie wzorcowym. BK - 282 /RB-3/2013 Badania wybranych elementów klimatu wewnętrznego w budynkach.
- [4] Dulak L., Laboratoryjne badania tłumienia dźwięków uderzeniowych przez podłogi pływające o zmodyfikowanej budowie. BK-239/RB-3/2014 Analiza wpływu wybranych parametrów fizycznych tradycyjnych i nowoczesnych przegród budowlanych na eksploatację wybranych rodzajów budynków.



WPLYW TEMPERATURY NA KINETYKĘ PROCESU HYDRATACJI RÓŻNYCH CEMENTÓW

Marek JABŁOŃSKI^{*}, Ismena GAWĘDA^{}, Dariusz GAWIN^{***}**

^{} Politechnika Łódzka, Katedra Fizyki Budowli i Materiałów Budowlanych
Al. Politechniki 6, 90-924 Łódź,
e-mails: ^{*}marek.jablonski@p.lodz.pl, ^{**}ismena.gaweda@p.lodz.pl, ^{***}dariusz.gawin@p.lodz.pl*

Streszczenie: W pracy przedstawiono wyniki badań ciepła hydratacji cementu w kalorymetrze izotermicznym. Wyniki badań posłużyły do wyznaczenia stopnia hydratacji i jego ewolucji w czasie oraz energii aktywacji dla różnych wartości stopnia hydratacji i różnych temperatur.

Słowa kluczowe: Hydratacja cementu, energia aktywacji, kalorymetr izotermiczny, masywne konstrukcje betonowe.

1. WSTĘP

Prognozowanie przebiegu procesu hydratacji cementu ma duże znaczenie podczas wykonywania masywnych konstrukcji betonowych. Ilość ciepła wytwarzanego podczas hydratacji cementu zależy głównie od składu chemicznego cementu. Wskutek małej dyfuzyjności cieplnej betonu, w jego wnętrzu następuje kumulacja ciepła w początkowym okresie twardnienia, w wyniku czego powstaje znaczna różnica temperatury między powierzchnią a wnętrzem konstrukcji, która jest tym większa, im większe jest ciepło hydratacji cementu. W następstwie dużego gradientu temperatury, potęgowanego dodatkowo przez ochładzanie warstw zewnętrznych, mogą powstawać znaczne naprężenia cieplne, będące źródłem rys, pęknięć i postępującej destrukcji betonu, jeśli przekroczona zostanie jego wytrzymałość [1]. Duże znaczenie ma zatem modelowanie przebiegu procesu dojrzewania kompozytów cementowych na poziomie strukturalnym, w zależności od zadanych warunków brzegowych i początkowych.

Kinetykę procesu hydratacji charakteryzuje tzw. *funkcja źródeł* [2]. Podaje ona gęstość mocy ciepła hydratacji w betonie, tj. ilość ciepła wydzielanego podczas hydratacji z jednostki masy (gęstość) cementu w jednostce czasu (moc).

Ilość ciepła, które wydzielilo się z jednostki masy cementu od początku hydratacji do danej chwili czasu t nazywamy *ciepłem hydratacji*. Można je obliczyć całkując funkcję źródeł.

Dokładny opis funkcji źródeł ma bezpośredni wpływ na rozwiązanie równania przewodnictwa ciepła, co z kolei warunkuje poprawne oszacowanie naprężeń termicznych w dojrzewającym betonie, zwłaszcza w konstrukcjach masywnych. Funkcja źródeł jest powszechnie stosowana w modelowaniu procesów higro-termicznych, odkształceń i rys powstających w młodym betonie [2, 4].

2. MODEL MATEMATYCZNY KINETYKI PROCESU HYDRATACJI CEMENTU

Zaawansowanie procesu hydratacji można opisać za pomocą stopnia hydratacji $\Gamma_{hydr}(t)$. Określany jest on jako ilość ciepła wydzielonego do chwili czasu t - $Q_{hydr}(t)$, odniesionego do całkowitego ciepła hydratacji - $Q_{hydr\infty}$, zgodnie ze wzorem [3]:

$$\Gamma_{hydr}(t) = \frac{Q_{hydr}(t)}{Q_{hydr\infty}}, \quad (1)$$

Kinetykę procesu hydratacji cementu podczas dojrzewania betonu można opisać także za pomocą ekwiwalentnego okresu hydratacji [5]. Modele mechanistyczne bazują zwykle na termodynamice reakcji chemicznych, a szybkość procesu hydratacji wyrażona jest jako funkcja tzw. znormalizowanego powinowactwa chemicznego $\tilde{A}_r$, będącego miarą stopnia termo-dynamicznego nierównoważenia układu woda – cement i uwzględniającą dodatkowo dyfuzję wody przez zewnętrzną, zhydratyzo-

waną warstwę ziaren cementu, [2, 6]. W opisie tym szybkość postępu stopnia hydratacji Γ_{hydr} , można wyrazić wzorem [7]:

$$\frac{d\Gamma_{hydr}}{dt} = \tilde{A}_\Gamma(\Gamma_{hydr}) \cdot \beta_\varphi(\Gamma_{hydr}, \varphi) \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right), \quad (2)$$

gdzie t oznacza czas, E_a – pozorną energię aktywacji procesu hydratacji, R – uniwersalną stałą gazową, T – temperaturę w skali bezwzględnej, zaś parametr β_φ wyraża wpływ wilgotności względnej φ na szybkość hydratacji. W niniejszej pracy przyjęto, że powinowactwo $\tilde{A}_\Gamma(\Gamma_{hydr})$ można opisać, słusznym dla betonu wykonanego z cementu CEM I, wzorem [7]:

$$\tilde{A}_\Gamma(\Gamma_{hydr}) = A_1(A_2 / \kappa_\infty + \kappa_\infty \Gamma_{hydr})(1 - \Gamma_{hydr}) \cdot \exp(-\eta \Gamma_{hydr}), \quad (3)$$

zaś funkcję β_φ zależnością [2]:

$$\beta_\varphi(\Gamma_{hydr}, \varphi) = \beta_\varphi(\varphi) = 1 / [1 - a^4(1 - \varphi)^4], \quad (4)$$

gdzie parametry materiałowe A_1 , A_2 i $\bar{\eta}$ wyznacza się z regresji wyników badań kalorymetrycznych.

3. BADANIA PROCESU HYDRATAcji

Badania przebiegu procesu hydratacji zostały przeprowadzone w ośmiokanałowym kalorymetrze izotermicznym typu TAM Air. Jest to przyrząd laboratoryjny, który za pomocą technik pośrednich, takich jak pomiar energii elektrycznej dostarczanej do układu, pozwala na wyznaczenie charakterystyki procesu oraz zmian w czasie obserwowanych efektów cieplnych.

Próbki do badań kalorymetrycznych przygotowano zgodnie z procedurą opisaną w normie ASTM C 1679-08.

Badania przeprowadzono dla zaczynu cementowego wykonanego z cementów: CEM I 32,5R N/A, CEM II B-S 32,5R, CEM IIIA 32,5 N/A, CEM IIIA 42,5 N oraz CEM V A/S-V 32,5R, którego współczynnik wodno-cementowy wynosił $w/c = 0,47$.

Analizowano wpływ temperatury na przebieg procesu hydratacji w różnych stadiach jej rozwoju. Badania kalorymetryczne wykonano w temperaturze 20°C, 30°C i 40°C.

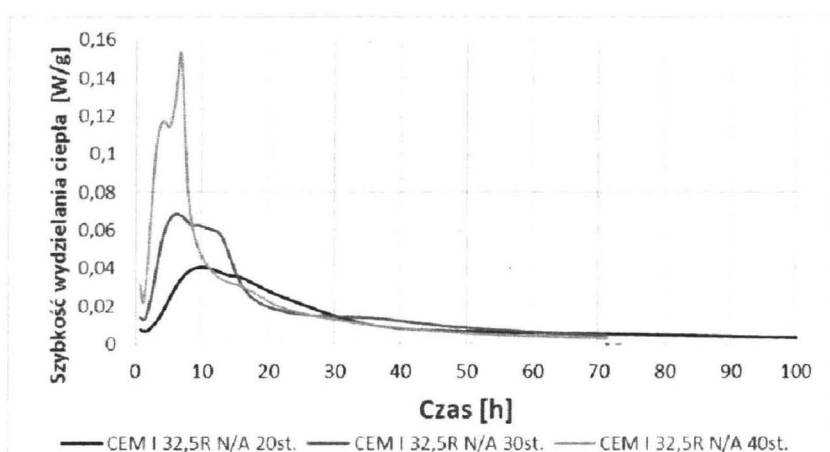
Na podstawie ilości ciepła zmierzonego w kalorymetrze do danej chwili czasu określano funkcję źródeł, która posłużyła do wyznaczenia stopnia hydratacji (wzór 1) i jego ewolucji w czasie (wzór 2). Energię aktywacji dla różnych wartości stopnia hydratacji wyznaczano na podstawie danych eksperymentalnych dla różnych temperatur z zależności:

$$E_a|_{\Gamma_{hydr}} = R \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right)^{-1} \left[\ln \frac{d\Gamma_{hydr}}{dt} \Big|_{\Gamma_{hydr,T}} - \ln \frac{d\Gamma_{hydr}}{dt} \Big|_{\Gamma_{hydr,T_0}} \right], \quad (5)$$

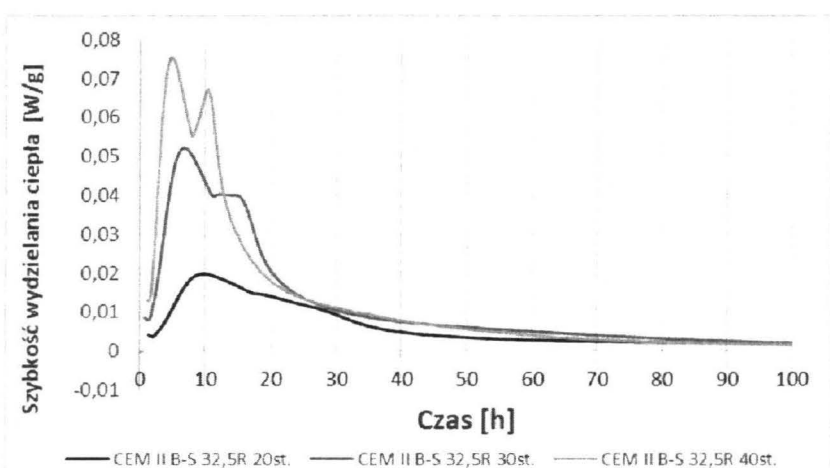
gdzie T_0 jest temperaturą referencyjną.

4. WYNIKI BADAŃ

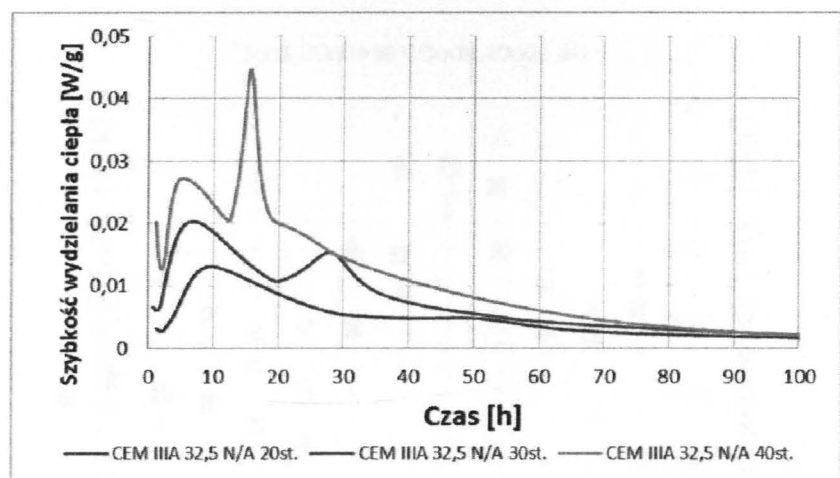
Przykładowe wyniki badań kalorymetrycznych w różnych temperaturach, wykonywanych dla zaczynów cementowych omówionych w punkcie 3 pokazano na rysunkach 1 - 5. Rysunek 1 przedstawia przebieg funkcji źródeł podczas hydratacji zaczynów cementowych na bazie cementu CEM I 32,5R N, CEM II BS 32,5R, CEM III A 32,5 N, CEM III A 42,5 N i CEM V A/S-V 32,5R, w temperaturze 20°C, 30°C i 40°C. Na rysunku 2 przedstawiono przykładowe wyniki dla zaczynu cementowego na bazie cementu CEM I 32,5R N/A, otrzymane z krzywej pokazanej na rysunku 1a.



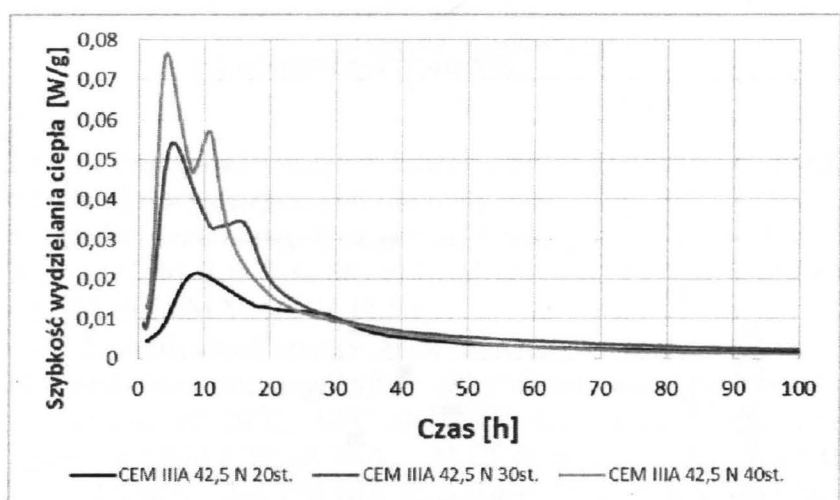
a)



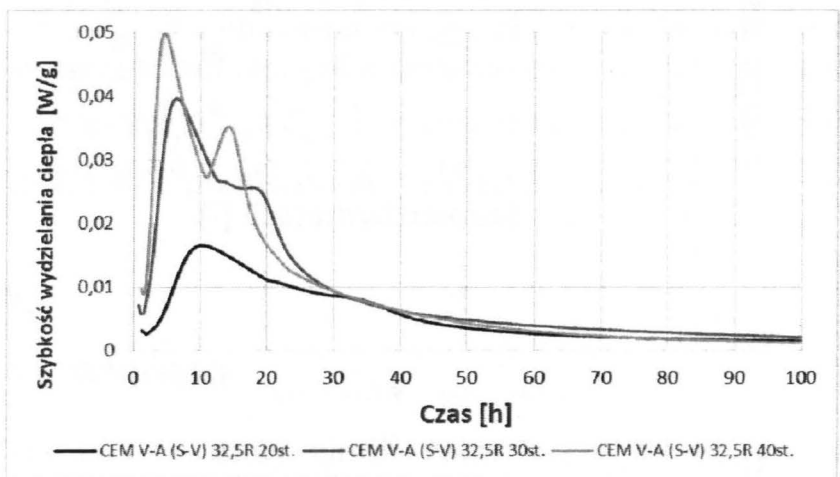
b)



c)



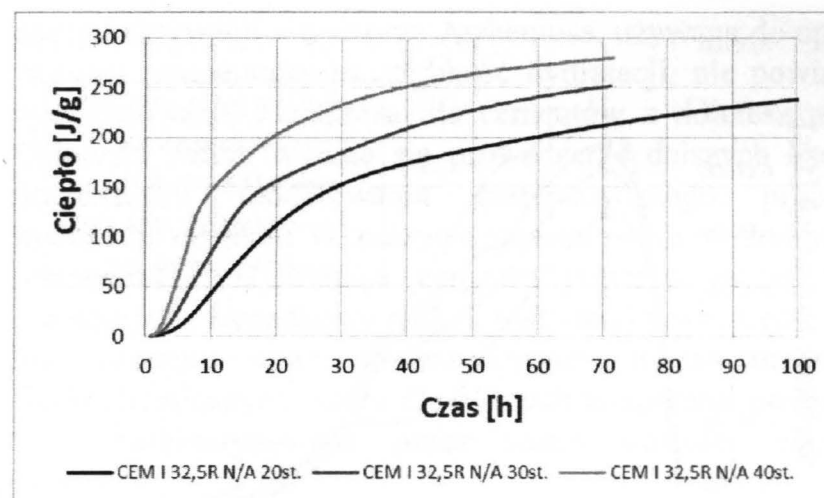
d)



e)

Rys. 1. Szybkość wydzielania ciepła hydratacji w funkcji czasu, otrzymane z badań kalorymetrycznych dla trzech różnych temperatur dla zaczynów cementowych na bazie cementów: a) CEM I 32,5R N/A, b) CEM II B-S 32,5R, c) CEM IIIA 32,5 N/A, d) CEM IIIA 42,5 N, e) CEM V A/S-V 32,5R.

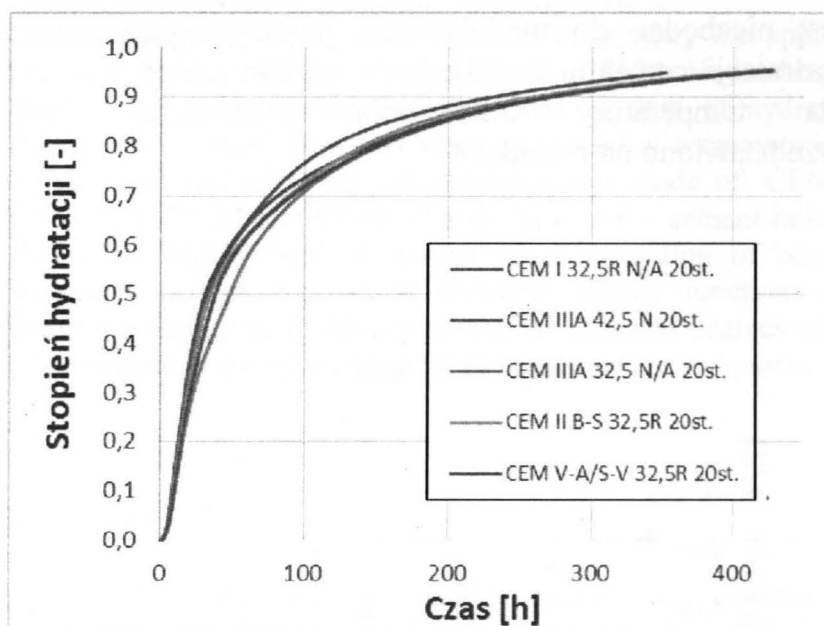
Fig. 1. Heat rate of hydration as a function of time, obtained from the calorimetric tests performed at three different temperatures for the cement pastes: a) CEM I 32,5R N/A, b) CEM II B-S 32,5R, c) CEM IIIA 32,5 N/A, d) CEM IIIA 42,5 N, e) CEM V A/S-V 32,5R.



Rys. 2. Znormalizowane ciepło hydratacji w funkcji czasu otrzymane z badań kalorymetrycznych dla trzech różnych temperatur dla zaczynu cementowego na bazie cementu CEM I 32,5R N/A.

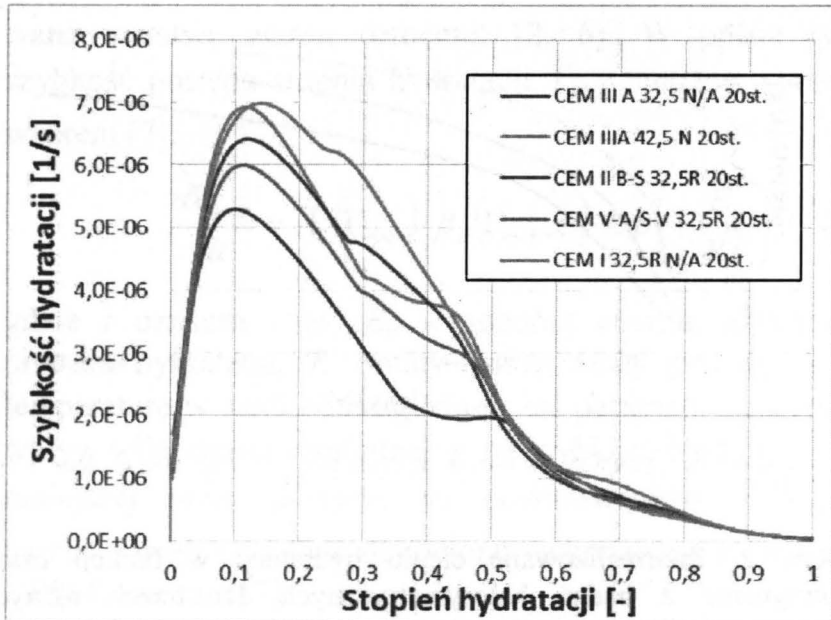
Fig. 2. Normalized heat of hydration as a function of time, obtained from the calorimetric tests performed at three different temperatures for the cement paste CEM I 32,5R N/A.

Z otrzymanych wyników pomiaru zmian ciepła hydratacji w czasie, korzystając z równania (1), wyznaczono rozwój stopnia hydratacji w funkcji czasu. Przykładowe wyniki obrazuje rysunek 3, na którym przedstawiono krzywe dla temperatury $T = 20^{\circ}\text{C}$.



Rys. 3. Stopień hydratacji w funkcji czasu otrzymany z badań kalorymetrycznych dla temperatury 20°C dla analizowanych zaczynów cementowych.

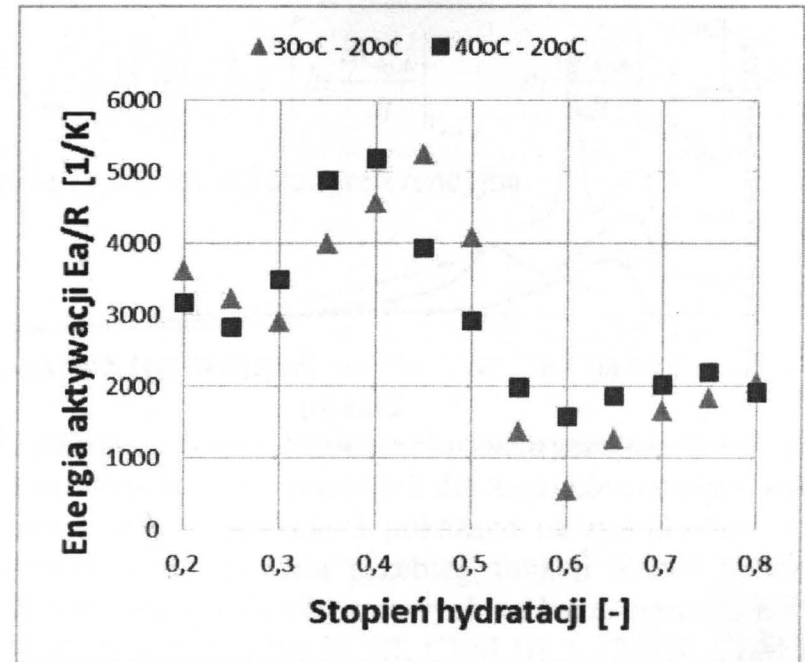
Fig. 3. Hydration degree as a function of hydration time, obtained from the isothermal calorimetric tests performed at temperature of 20°C for the analyzed cement pastes.



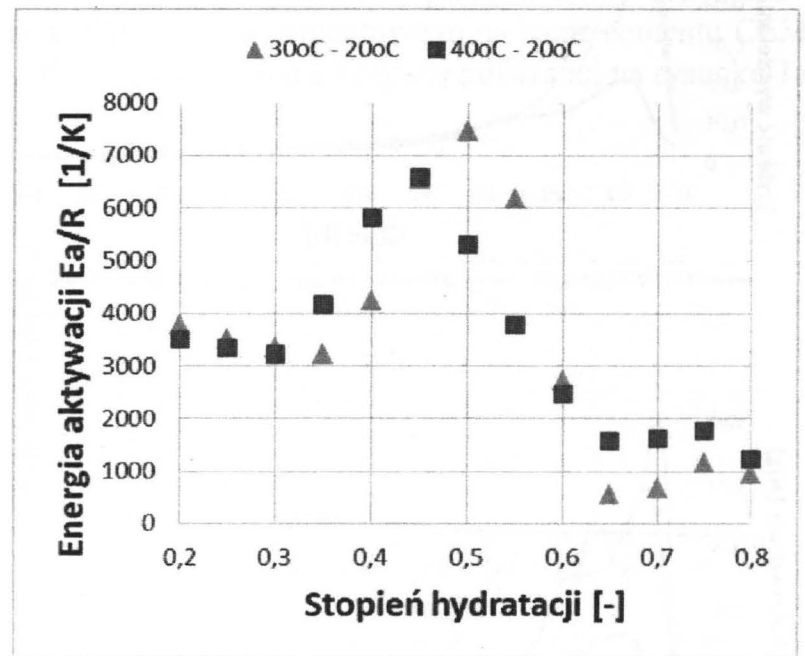
Rys. 4. Szybkość postępu hydratacji w funkcji stopnia hydratacji otrzymane z badań kalorymetrycznych dla temperatury 20°C dla analizowanych zaczynów cementowych.

Fig. 4. Hydration degree rate as a function of hydration degree, obtained from the isothermal calorimetric tests performed at temperature of 20°C for the analyzed cement pastes.

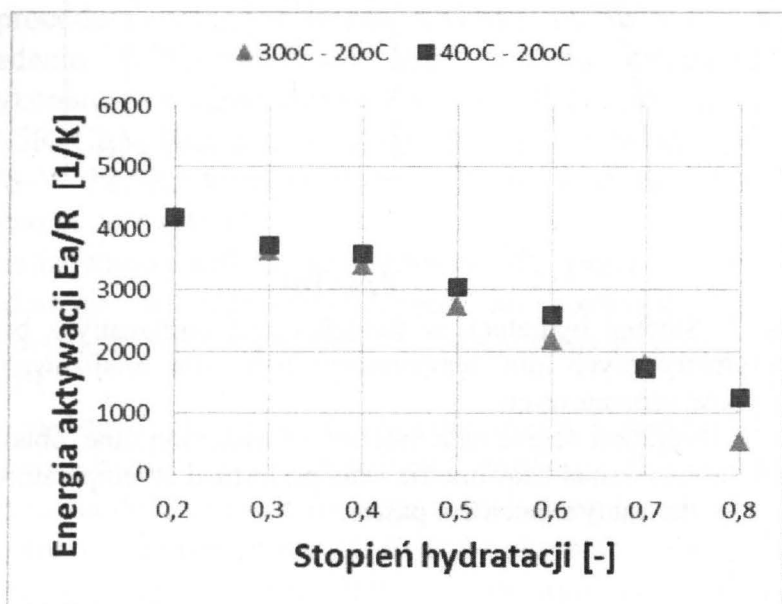
Wyniki pomiaru stopnia hydratacji w funkcji czasu wykorzystano do wyznaczenia szybkości postępu stopnia hydratacji $\dot{\Gamma}_{hydr}(\Gamma_{hydr})$, opisanego równaniem (2), które jest niezbędne do modelowania numerycznego procesu hydratacji cementu. Przykładowe wyniki takich obliczeń, dla temperatury odniesienia wynoszącej 20°C, przedstawiono na rysunku 4.



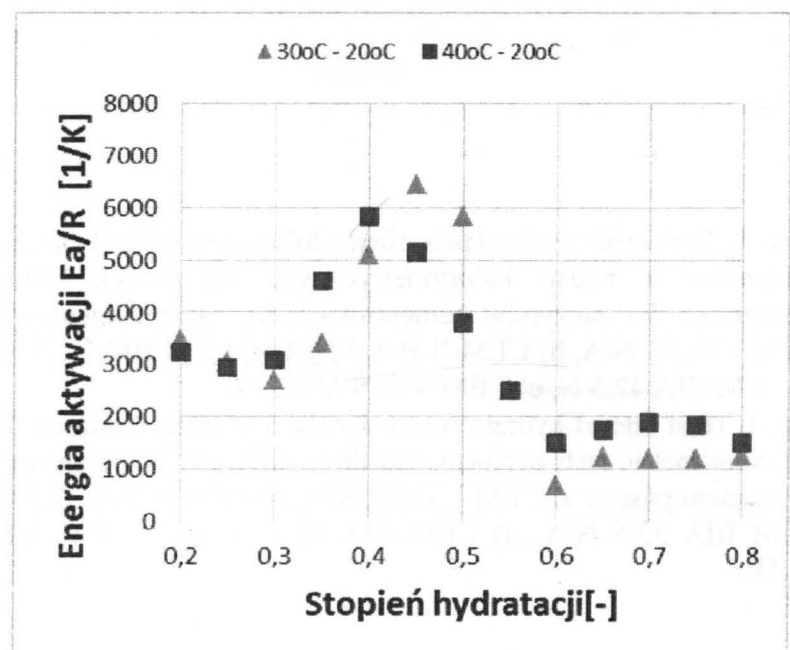
b)



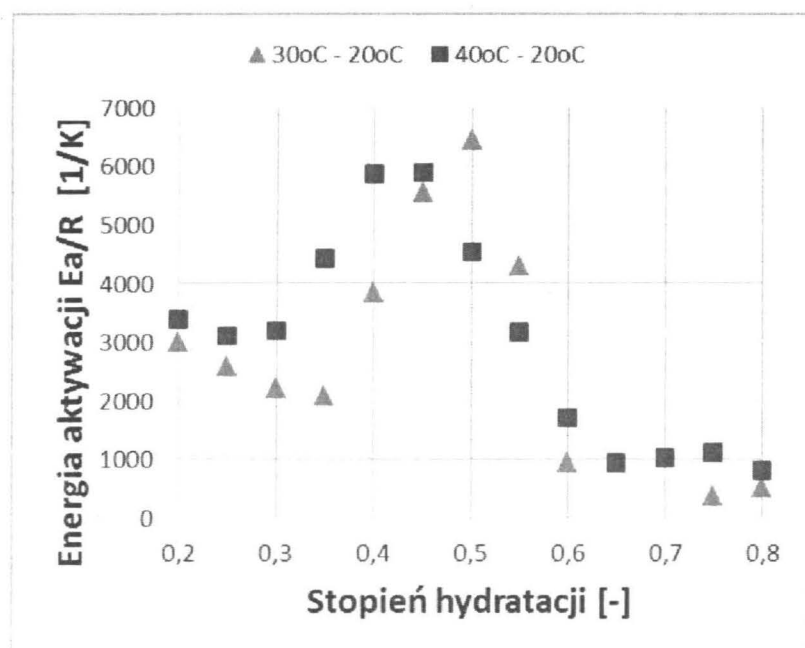
c)



a)



d)



e)

Rys. 5. Energia aktywacji w funkcji stopnia hydratacji otrzymana z badań kalorymetrycznych dla temperatur 20°C, 30°C i 40°C dla zaczynów cementowych na bazie cementów: a) CEM I 32,5R N/A, b) CEM II B-S 32,5R, c) CEM IIIA 32,5 N/A, d) CEM IIIA 42,5 N, e) CEM V A/S-V 32,5R.

Fig. 5. Activation energy as a function of hydration degree, obtained from the isothermal calorimetric tests performed at temperature of 20°C, 30°C and 40°C for the analyzed cement pastes: a) CEM I 32,5R N/A, b) CEM II B-S 32,5R, c) CEM IIIA 32,5 N/A, d) CEM IIIA 42,5 N, e) CEM V A/S-V 32,5R.

Wykorzystując dane przedstawione powyżej, przy użyciu równania (5), obliczono energię aktywacji dla wszystkich analizowanych zaczynów cementowych. Wyniki uzyskane z krzywych $\dot{\Gamma}_{hydr}(\Gamma_{hydr})$ w temperaturze 20°C i 30°C oraz 20°C i 40°C przedstawiono na rysunkach 5 a-e.

5. WNIOSKI

Wartości w danej chwili czasu krzywych opisujących ewolucję procesu hydratacji cementu dla analizowanych zaczynów cementowych różnią się znacznie, w zależności od temperatury, por. Rysunek 2. Ponadto, dla wszystkich analizowanych zaczynów cementowych, kształt krzywych opisujących ewolucję procesu hydratacji cementu w temperaturach 30°C i 40°C różnił się wyraźnie od krzywych dla temperatury 20°C, Rysunek 1a-e. Z tego powodu, wartość energii aktywacji dla danego zaczynu cementowego nie jest stała i zależy zarówno od temperatury, jak i od rodzaju cementu z którego wykonano zaczyny do badań (innych niż CEM I). Dla cementów portlandzkich żuźlowych, portlandzkich popiołowych oraz cementu hutniczego można zaobserwować opóźniony postęp hydratacji, którego kinetyka silnie zależy od temperatury. Można zatem przypuszczać, że stała wartość

energii aktywacji we wzorze Arrheniusa, używana do opisu wpływu temperatury na szybkość hydratacji, nie powinna być stosowana, zwłaszcza dla cementów z domieszkami. Celowym zatem wydaje się prowadzenie dalszych badań dotyczących modelowania matematycznego procesu hydratacji cementu w zaczynie cementowym w zmiennej temperaturze. Hydratacja cementu powinna raczej być opisana jako wypadkowa reakcji hydratacji poszczególnych faz cementu oraz towarzyszących temu przemian fizykochemicznych, które dla różnych temperatur powinna być charakteryzowana przez różne wartości energii aktywacji.

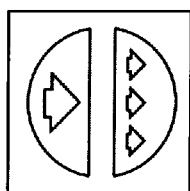
EFFECT OF TEMPERATURE ON EVOLUTION OF HYDRATION PROCESS IN DIFFERENT CEMENT PASTES

Summary: Predicting time evolution of cement hydration process is of strategic importance for the concreting of massive structures. The amount of heat generated during cement hydration depends mostly on the chemical composition of the cement. In general, higher curing temperature, higher cement content and finer cement grains cause an increase of the heat of hydration. If this heat is not rapidly dissipated, a significant rise of the temperature can occur in interior part of a massive concrete structure. This may result in considerable tensile stresses of the surface zone and in material cracking. To determinate the hydration degree evolution, the heat flow calorimetry was applied. The tests were performed by means of the TAM Air isothermal calorimeter, to determine the evolutions in time of hydration degree and its rate. The tests were performed at temperature of 20°C, 30°C and 40°C for the cement pastes made of: CEM I, CEM II, CEM III and CEM V, with the water – cement ratio of 0,47. The widely used in mathematical modelling of cement hydration process, normalised chemical affinity functions and activation energy of hydration process at different degrees of its advancement, were determined for the analyzed cement pastes.

Literatura

- [1] FLAGA K., Wpływ samoociepnięcia się betonu na szybkość wznoszenia budowli masywnych, Inżynieria i Budownictwo, 3, 1970, 96-98
- [2] WOODS, H., STEINOUR, H., STARKE, H. Effect of composition of Portland cement on heat evolved during hardening, *Industrial and Engineering Chemistry*, 24 (1932), 1207-1214
- [3] GAWIN, D., PESAVENTO, F., SCHREFLER, B.A. Hygro-thermo-chemo-mechanical modeling of concrete at early ages and beyond. Part I: Hydration and hygro-thermal phenomena, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 67(3) (2006), 299-331

- [4] WITKOWSKI P., Matematyczny model zjawisk termicznych towarzyszących hydratacji cementu, *Archiwum Inżynierii Lądowej*, 27, 4, 1977, 379-399
- [5] MILLS, R.H.: Factors influencing cessation of hydration in water cured cement pastes, Special Report No. 90, In: *Proceedings of Symposium on the Structure of Portland Cement Paste and Concrete*, (1966), Highway Research Board, Washington DC, USA, pp. 406–424
- [6] WALLER, V. *Relations entre compositions des betons, exothermie en cours de prise et resistance en compression*, Ph.D. thesis, (2000), LCPC, ERLPC, France
- [7] FREISLEBEN-HANSEN, P., PEDERSEN, E.J. Maturity computation for controlled curing and hardening of concrete, *Journal of the Nordic Concrete Federation*, 1 (1977)



BADANIA WŁAŚCIWOŚCI CIEPLNO-WILGOTNOŚCIOWYCH MATERIAŁÓW HIGROSKOPIJNYCH Z SUROWCÓW POCHODZENIA ROŚLINNEGO

Dobrosława KACZOREK^{*}, Barbara PIETRUSZKA^{}**

^{*} *Instytut Techniki Budowlanej, Zakład Fizyki Ciepłej, Instalacji Sanitarnych i Środowiska
ul. Ksawerów 21, 02-656 Warszawa, e-mail: d.kaczorek@itb.pl*

^{**} *Instytut Techniki Budowlanej, Zakład Fizyki Ciepłej, Instalacji Sanitarnych i Środowiska
ul. Ksawerów 21, 02-656 Warszawa, e-mail: b.pietruszka@itb.pl*

Streszczenie: W artykule przedstawiono badania podstawowych właściwości cieplno-wilgotnościowych naturalnych materiałów higroskopijnych. Uzyskane wyniki posłużyły do dalszych badań mających na celu określenie wpływu zróżnicowanych profili obciążeń wilgocią na możliwości absorpcji, magazynowania oraz oddawania wilgoci przez poszczególne materiały. Wyniki przeprowadzonych badań potwierdziły, że na zachowanie poszczególnych materiałów pod wpływem danego profilu obciążeń wilgocią mają wpływ jego właściwości sorpcyjne oraz przepuszczalność pary wodnej.

Słowa kluczowe: materiały higroskopijne, magazynowanie wilgoci, absorpcja wilgoci, symulacje cieplno-wilgotnościowe.

1. WPROWADZENIE

Materiały higroskopijne dzięki swoim zdolnościom do absorbowania oraz magazynowania wilgoci mogą wpływać na kształtowanie poziomu wilgoci w pomieszczeniach, co z kolei może przyczynić się do poprawy komfortu cieplnego oraz do ograniczenia zużycia energii na ogrzewanie i chłodzenie poszczególnych pomieszczeń [1, 4, 5, 13]. Wiele przeprowadzonych badań doświadczalnych potwierdza, że profil obciążeń wilgotnościowych wpływa w znaczący sposób na potencjał akumulacji wilgoci przez poszczególne materiały [3, 6, 15]. Różnice we właściwościach, takich jak: chłonność wody oraz przepuszczalność pary wodnej, poszczególnych materiałów powodują, że pod wpływem tych samych obciążeń materiały te pochłaniają i oddają wilgoć w różny sposób.

W niniejszej pracy skupiono się na badaniach pochłaniania i oddawania wilgoci przez naturalne materiały higroskopijne w warunkach zmiennego obciążenia wilgocią.

Wyznaczono podstawowe właściwości fizyczne, takie jak: przewodność cieplna, opór dyfuzyjny, krzywa sorpcji, gęstość, przepuszczalność pary wodnej. Przebadano potencjał magazynowania wilgoci przez cztery różne materiały dla dwóch profili obciążenia wilgocią, wykorzystując w tym celu komercyjny program komputerowy do obliczeń cieplno-wilgotnościowych elementów budowlanych WUFI Pro 5.0 [14].

Przedstawione w niniejszej pracy badania są fragmentem prac prowadzonych w ramach projektu H-House [16], którego jednym z celów jest wyodrębnienie takich materiałów, które dzięki swoim higroskopijnym właściwościom będą zdolne do regulacji jakości powietrza wewnętrznego w pomieszczeniach, tak aby zapewnić jak najlepszy komfort ich użytkownikom.

2. BADANIA WŁAŚCIWOŚCI CIEPLNO-WILGOTNOŚCIOWYCH MATERIAŁÓW

Badaniu poddano cztery rodzaje naturalnych materiałów:

- sztywna płyta izolacyjna z włókna drzewnego o gr. 40 mm (oznaczenie materiału 3.3.3.)
- płyta izolacyjna z włókna drzewnego o gr. 40 mm (oznaczenie materiału 3.3.10.)
- mata izolacyjna z włókien konopi o gr. 80 mm (oznaczenie materiału 4.7.3.)
- płyta pilśniowa z włókien lnianych i drzewnych o gr. 70 mm (oznaczenie materiału 6.5.3.)

2.1. Przewodność cieplna

Badania współczynnika przewodzenia ciepła wykonano w aparacie płytowym z czujnikami strumienia cieplnego

HFM Fox 314 w warunkach ustalonego przepływu ciepła zgodnie z PN-EN 12664:2002 [10] i PN-EN 12667:2002 [11]. Przed przystąpieniem do badań, próbki kondycjonowano w warunkach temperatury (23 ± 5) °C i wilgotności względnej powietrza (50 ± 5) %, aż do osiągnięcia stałej masy. Pomiary wykonano przy średniej temperaturze próbki 10°C, różnicy temperatury na grubości próbki 20 K i ruchu ciepła z dołu do góry, na 5 próbkach każdego typu materiału, o wymiarach 300 x 300 mm i grubości podanej w tabeli 1.

Końcową wartość współczynnika przewodzenia ciepła λ podano jako wartość deklarowaną obliczoną zgodnie z PN-EN ISO 10456:2009/AC:2010 [12] (jest to wartość określona dla temperatury 10°C i zawartości wilgotności równej zawartości wilgotności w materiale w stanie równowagi z powietrzem o temperaturze 23°C i wilgotności względnej 50%, obliczona z pięciu wyników pomiarów). Uzyskane wyniki przedstawiono w tabeli 1.

2.2. Gęstość

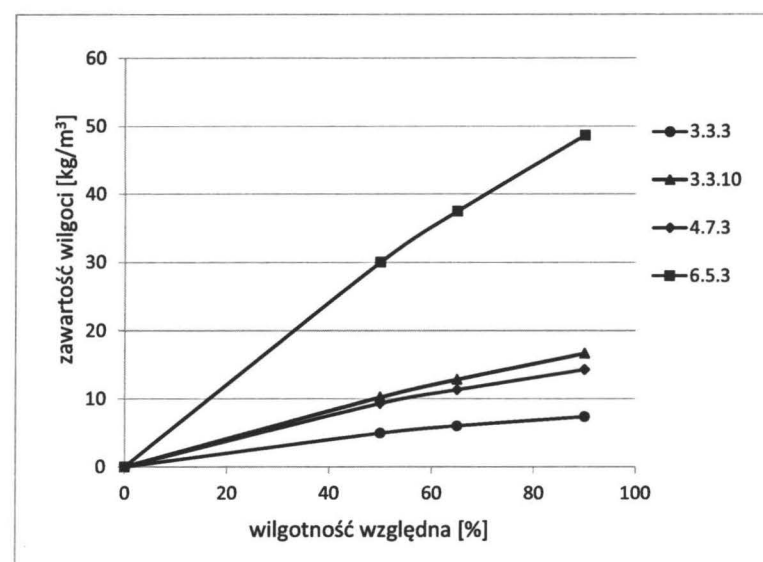
Gęstość poszczególnych materiałów wyznaczono zgodnie z normą PN-EN 1602:1999 [9], na pięciu próbkach z każdego rodzaju materiału. Przed badaniem próbki były kondycjonowane w ustabilizowanych warunkach temperatury (23 ± 2) °C i wilgotności powietrza (50 ± 5) %. Badanie polegało na ważeniu próbek, określeniu ich objętości oraz obliczeniu gęstości jako ilorazu masy i objętości. Uzyskane wyniki przedstawiono w tabeli 1.

2.3. Izoterma sorpcji

Badania wykonano w komorze klimatycznej zgodnie z normą PN-EN ISO 12571:2002 [7]. Próbki o wymiarach 100 x 100 mm i grubościach w zakresie 40-80 mm

umieszczano kolejno w ciągu środowisk o stopniowo rosnącej wilgotności względnej 50 %, 65 %, 90 % i stałej temperaturze 23 °C.

Dla każdego badanego materiału sorpcję określono na pięciu próbkach, a następnie obliczono wartości średnie. Zależność pomiędzy wilgotnością sorpcyjną materiału a wilgotnością względną powietrza otaczającego, przedstawiono graficznie w postaci izotermy sorpcji na rys. 1.



Rys. 1. Izotermy sorpcji dla badanych materiałów.

Fig. 1. Sorption isotherms for tested materials.

2.4. Współczynnik oporu dyfuzyjnego i przepuszczalności pary wodnej

Współczynnik przepuszczalności pary wodnej został wyznaczony zgodnie z normą PN-EN ISO 12572:2004 [8]. Badania przeprowadzono dla każdego rodzaju materiału na trzech próbkach o wymiarach $\phi 127 - 128$ mm i grubościach w zakresie 40 - 80 mm.

Tabela 1. Właściwości cieplno-wilgotnościowe materiałów.

Table 1. Hygrothermal properties of materials.

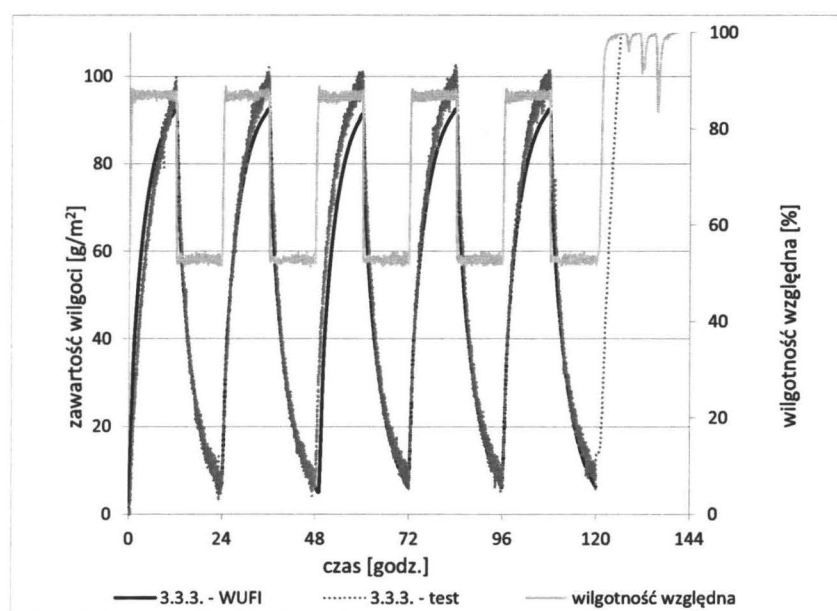
Właściwość	Materiał			
	3.3.3	3.3.10	4.7.3.	6.5.3
grubość [mm]	40	40	80	70
objętość [cm ³]	0,0021	0,0021	0,0041	0,0036
gęstość [kg/m ³]	159	163	96	370
paroprzepuszczalność δ [mg/(m·h·Pa)]	0,178	0,178	0,355	0,065
współczynnik oporu dyfuzyjnego μ [-]	4	4	2	11
współczynnik przewodzenia ciepła [λ]	0,045	0,043	0,049	0,13
współczynnik S_d [m]	0,16	0,16	0,16	0,77

Przed przystąpieniem do badań próbki kondycjonowano w temperaturze $(23 \pm 5) ^\circ\text{C}$ i wilgotności względnej powietrza $(50 \pm 5) \%$ do czasu ustabilizowania masy w trzech kolejnych ważeniach, tak aby ich ciężar zawierał się w zakresie 5 %. Następnie, próbki umieszczono w specjalnych metalowych naczyniach na dnie których umieszczono środek osuszający (CaCl_2). Ważenia próbek dokonywano w 24 godzinnych odstępach czasowych aż pięć kolejnych określeń zmiany masy w jednostce czasu było stałe z tolerancją $\pm 5 \%$ wartości średniej dla każdej badanej próbki. Na podstawie uzyskanych wyników obliczono wartości zmiany masy poszczególnych próbek, gęstość strumienia pary wodnej, współczynnik przepuszczalności pary wodnej oraz współczynnik oporu dyfuzyjnego μ . Uzyskane wyniki dla poszczególnych materiałów przedstawiono w tablicy 1.

3. BADANIA SYMULACYJNE

3.1. Badania weryfikacyjne

Model symulacyjny został zweryfikowany poprzez porównanie zawartości wilgoci w próbce materiału o numerze 3.3.3. otrzymanej na podstawie badania absorpcji w warunkach laboratoryjnych oraz na podstawie obliczeń numerycznych z programu WUFI Pro 5.0 (rys. 2). Próbkę poddano kondycjonowaniu w temperaturze $23 ^\circ\text{C}$ oraz wilgotności względnej powietrza równej 50 %. Po osiągnięciu przez próbkę stanu równowagi, skokowo co 12 godzin, zwiększano wilgotność powietrza do 80 % i ponownie obniżano do 50 %. Badanie prowadzono przez okres 120 godz. (10 cykli). W badaniu wzorowano się na metodzie badania opisanej w niemieckiej normie DIN 18947 [2] dla tynków glinianych.



Rys. 2. Sorpcja materiału 3.3.3. dla profilu obciążeń wilgocią 12 godz. 50% / 12 godz. 80% na podstawie badań i symulacji w programie WUFI.

Fig. 2. Sorption test for moisture load profile 12 h 50% / 12 h 80% based on research and simulation in WUFI for the 3.3.3. material.

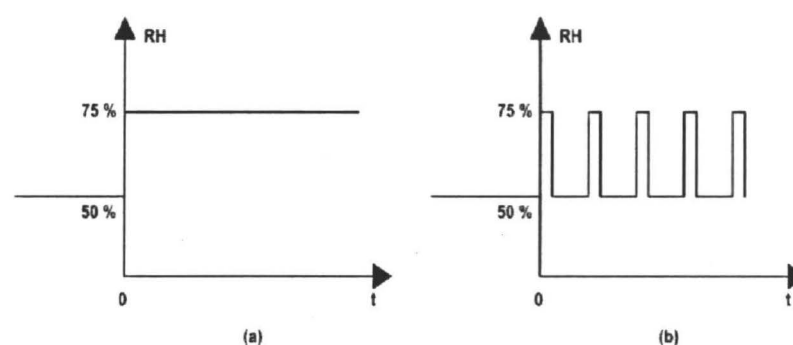
Na podstawie przeprowadzonych badań widać, że wartości maksymalnej wilgoci zaabsorbowanej przez materiał otrzymane z programu są niższe o ok. 10 % od wartości otrzymanych z pomiaru. Pozostałe wartości nie wykazują różnic większych niż 1 %. Różnice te mogą wynikać z faktu, że do programu wprowadzono krzywe sorpcji wyznaczone w badaniach laboratoryjnych dla innych próbek tego samego materiału aniżeli próbki dla których wykonywano pomiary sorpcji w cyklach 12 godz.

3.2. Zakres przeprowadzonych symulacji

Badania symulacyjne przeprowadzono dwuetapowo. W pierwszym etapie materiały zostały poddane skokowej zmianie obciążenia wilgocią do wartości równej 75 % przez okres ok. 1300 godz. Analizie poddano czas dojścia do stanu ustalonego oraz końcową zaabsorbowaną przez poszczególne materiały zawartość wilgoci.

W drugim etapie materiały poddano dwóm różnym dziennym profilom obciążeń 9 godz. 75 % / 15 godz. 50 % oraz 2 godz. 75 % / 22 godz. 50 %. W tym przypadku analizie poddano ilość zaabsorbowanej wilgoci przez poszczególne materiały oraz ilość wilgoci pozostałej w materiale przy zmiennym profilu obciążeń wilgocią w stanie quasi-ustalonym.

Za stan początkowy przyjęto warunki równowagi dla 50 % wilgotności względnej i $23 ^\circ\text{C}$. Profile obciążeń wilgocią dla dwóch etapów badań symulacyjnych przedstawiono na rys. 3.



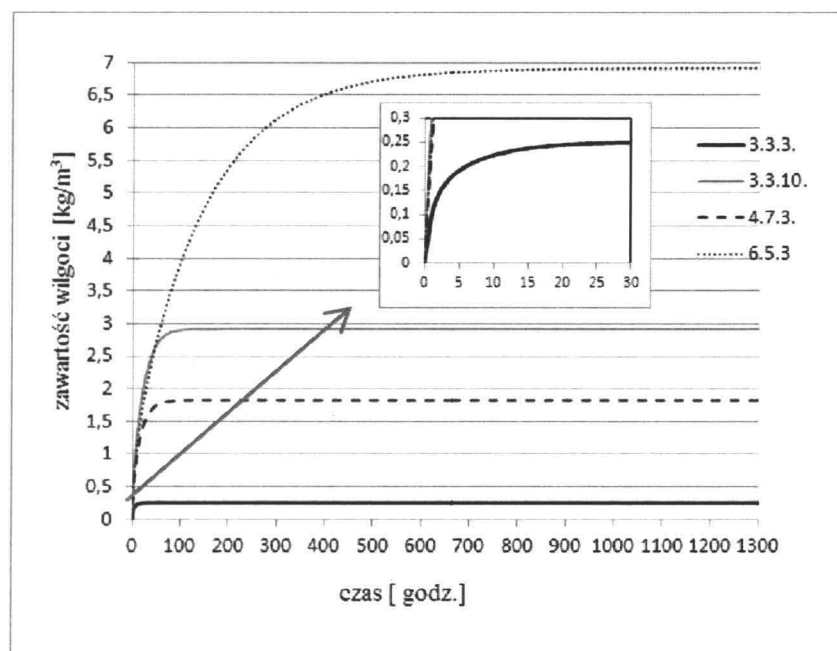
Rys. 3. Profile obciążenia wilgocią dla dwóch etapów symulacji a) skokowe obciążenie wilgocią b) dzienne obciążenie wilgocią.

Fig. 3. Moisture load profiles for two stage of simulation a) step moisture load b) daily moisture load.

3.3. Wyniki badań symulacyjnych

Na podstawie wyników uzyskanych z pierwszego etapu badań symulacyjnych, pokazanych na rys. 4 można stwierdzić, że końcowa wartość zaabsorbowanej wilgoci w stanie ustalonym dla 75 % obciążenia wilgocią przez materiał 6.5.3. jest ok. 27 razy większa od wartości dla materiału 3.3.3. Materiał 6.5.3. absorbuje ok. $6,92 \text{ kg/m}^3$ wilgoci w przypadku gdy materiał 3.3.3. tylko $0,25 \text{ kg/m}^3$. Materiał 6.5.3. charakteryzuje się również najdłuższym

czasem dojścia do stanu ustalonego ok. 1300 godz., podczas gdy materiał 3.3.3. osiąga ten stan po 27,5 godz. Za stan ustalony uznano stan, kiedy dzienny przyrost wagi materiału był mniejszy niż 0,1 % całkowitego przyrostu wagi w pięciu kolejnych następujących po sobie cyklach. Czas dojścia do stanu ustalonego oraz ilość zaabsorbowanej wilgoci przez poszczególne materiały przedstawiono w tabeli 2.



Rys. 4. Czasowe przebiegi dochodzenia do stanu ustalonego po skokowej zmianie obciążenia wilgocią do 75 %.

Fig. 4. Time courses of reach a steady state after a step change in load humidity to 75%.

Tabela 2. Porównanie wartości końcowych dla pierwszego etapu symulacji.

Table 2. Comparison the final value for the first-stage simulations.

Materiał	Czas dojścia do stanu ustalonego [godz.]	Ilość zaabsorbowanej wilgoci [kg/m ³]
3.3.3.	27,5	0,25
3.3.10.	92	2,92
4.7.3.	125	1,83
6.5.3.	1300	6,92

W drugim etapie symulacji poszczególne materiały zostały poddane zmiennym, dziennym profilom obciążenia wilgocią 9 godz. 75 % / 15 godz. 50 % oraz 2 godz. 75 % / 22 godz. 50 %. Za stabilny cykl magazynowania wilgoci uznano moment, kiedy ilość pozostałej wilgoci w materiale w ciągu

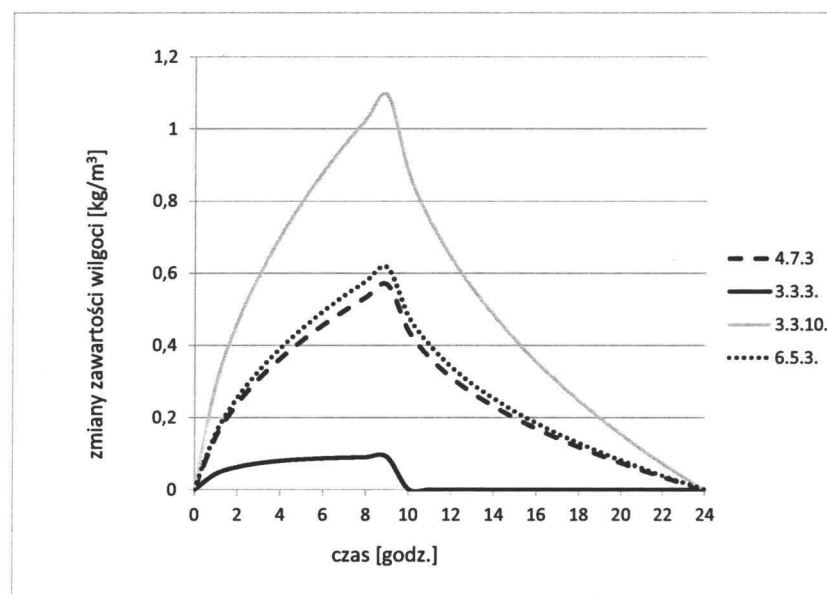
jednodniowego cyklu obciążeń była mniejsza od 0,1 % zmiany wagi próbki podczas całego cyklu obciążeń. Czasy osiągnięcia przez dany materiał przy danym profilu obciążeń stanu ustabilizowanego podano w tabeli 3. Poszczególne materiały charakteryzują się porównywalnym czasem dojścia do stabilnego cyklu magazynowania wilgocią bez względu na profil obciążenia wilgocią. Przy czym należy tutaj zwrócić uwagę, że poszczególne materiały w różny sposób magazynują wilgoć. Ilość zmagazynowanej wilgoci przez poszczególne materiały w przypadku profilu obciążeń 9/15 jest większa w poszczególnych cyklach aniżeli w przypadku profilu obciążeń 2/22.

Tabela 3. Czas dojścia do stanu ustabilizowanego dla różnych profili obciążenia wilgocią.

Table 3. Time to reach steady-state for different moisture load profiles.

Materiał	Profil obciążeń 9/15godz.	Profil obciążeń 2/22godz.
3.3.3.	2 dni	2 dni
3.3.10.	5 dni	5 dni
4.7.3.	6 dni	6 dni
6.5.3.	40 dni	33 dni

Krzywe absorpcji wilgoci przy danym profilu obciążenia wilgocią dla poszczególnych materiałów w stanie ustalonym porównano na rys. 5 – 6.

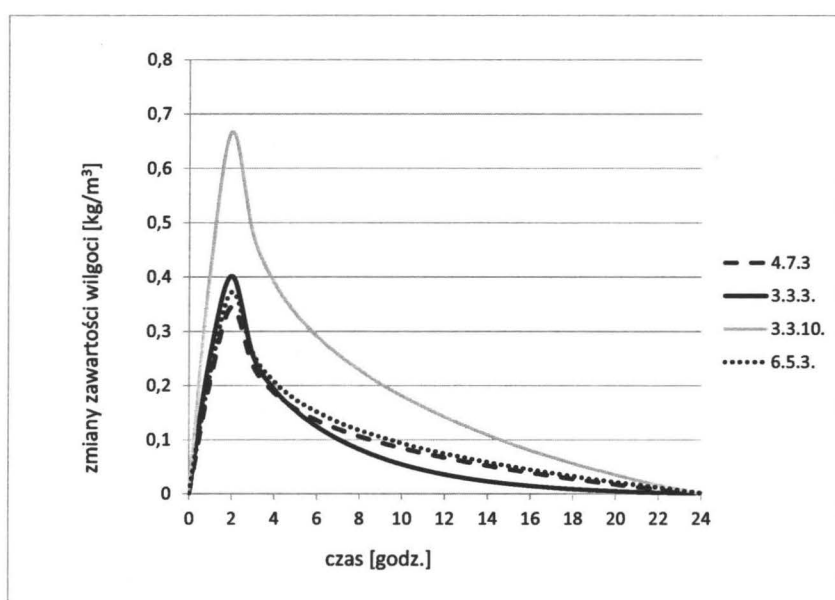


Rys. 5. Krzywe absorpcji wilgoci przy profilu obciążeń wilgocią 9/15 godz.

Fig. 5. Moisture absorption curves under 9/15 moisture load profile.

Widzimy, że ilość zaabsorbowanej wilgoci przez dany materiał jest zmienna i uzależniona od profilu obciążeń wilgocią. Wszystkie materiały za wyjątkiem materiału 3.3.3. dla profilu obciążeń 9/15 pochłaniają więcej wilgoci niż dla krótszego profilu obciążenia wilgocią 2/22. Materiał 3.3.3. pod obciążeniem 2/22 pochłania $0,40 \text{ kg/m}^3$, a pod obciążeniem 9/15 - $0,09 \text{ kg/m}^3$, czyli o ok. 77 % mniej niż w przypadku obciążenia 2/22.

W przypadku skokowego obciążenia wilgocią materiał 6.5.3. w stanie ustalonym pochłania najwięcej wilgoci $6,92 \text{ kg/m}^3$. W dużym stopniu wpływa na to jego o wiele większa zdolność do pochłaniania wilgoci niż pozostałych materiałów (izoterma sorpcji). W przypadku obciążeń dynamicznych sytuacja ulega zmianie, w tym przypadku zarówno pod wpływem profilu obciążeń 9/15 jak i 2/22 materiałem, który pochłania największą ilość wilgoci jest materiał 3.3.10. (rys. 5, 6). Widzimy zatem, że w przypadku obciążeń dynamicznych ilość wilgoci pochłanianej i oddawanej przez dany materiał jest zmienna na co wpływ oprócz chłonności wody ma również przepuszczalność pary wodnej.



Rys. 6. Krzywe absorpcji wilgoci przy profilu obciążeń wilgocią 2/22 godz.

Fig. 6. Moisture absorption curves under 2/22 moisture load profile.

4. PODSUMOWANIE

W artykule skupiono się na badaniach wpływu zróżnicowanych profili obciążeń wilgocią oraz wpływu pozostałej w materiale wilgoci w poszczególnych cyklach obciążeń na zdolności magazynowania wilgoci przez poszczególne materiały. Wpływ tych czynników jest silnie uzależniony od właściwości danego materiału. Przebadano materiały charakteryzujące się dużą chłonnością wilgoci i oporem dyfuzyjnym $\mu > 10$, tak jak materiał 6.5.3. oraz materiały o małej chłonności i niskim oporze dyfuzyjnym $\mu < 5$ takie jak 3.3.3., 3.3.10., oraz 4.7.3. Materiał 6.5.3.

pomimo bardzo dużej zdolności do pochłaniania wilgoci przy zmiennych profilach dziennego obciążenia wilgocią nie wykazuje największych zdolności do akumulowania wilgoci. Z kolei materiał 3.3.10., który ma zdecydowanie mniejszą zdolność do pochłaniania wilgoci przy zmiennych cyklach obciążenia wilgocią akumuluje zdecydowanie więcej wilgoci. A zatem widzimy, że przy zmiennych profilach obciążeń na zdolność magazynowania wilgoci oprócz sorpcji wpływa także opór dyfuzyjny materiału.

Należy również podkreślić znaczenie grubości danego materiału na jego zdolność do akumulacji wilgoci. Pomimo podobnych właściwości jakimi charakteryzuje się materiał 3.3.10. oraz materiał 4.7.3. widzimy, że materiał 4.7.3., który jest o 40 mm grubszy od materiału 3.3.10. akumuluje zdecydowanie mniejszą ilość wilgoci niż materiał 3.3.10.

Praca naukowa finansowana ze środków finansowych na naukę w latach 2013-2017 przyznanych na realizację projektu międzynarodowego współfinansowanego.

INVESTIGATIONS OF HYGROTHERMAL PROPERTIES OF NATURAL HYGROSCOPIC MATERIALS

Summary: This paper presents the study of basic hygrothermal properties of natural, hygroscopic materials. The results were used for further studies to determine the effect of different moisture load profiles on the possibility to absorb and release moisture by different materials. Results of this study confirmed that the behavior of individual materials under the influence of the moisture load profile is affected by the moisture sorption properties and water vapor permeability.

Literatura

- [1] Casey S.P., Hall M.R., Tsang S.C.E., Khan M.A. *Energetic and hygrothermal analysis of a nano-structured material for rapid-response humidity buffering in closed environments*. Building and Environment 60 (2013) 24-36.
- [2] DIN 18947, Earth plasters – Terms and definitions, requirements, test methods
- [3] Ge H., Yang X., Fazio P., Rao J. *Influence of moisture load profiles on moisture buffering potential and moisture residuals of three groups of hygroscopic materials*. Building and Environment 81 (2014) 162-171
- [4] Li Z., Chen W., Deng S., Lin Z. *The characteristics of space cooling load and indoor humidity control for residences in the subtropics*. Building and Environment 41 (2006) 1137-1147
- [5] Osanyintola O.F., Simonson C.J. *Moisture buffering capacity of hygroscopic building materials: experimental facilities and energy impact*. Energy and Buildings 38 (2006) 1270-1282
- [6] Osanyintola O.F., Talukdar P., Simonson C. *Effect of initial conditions, boundary conditions and thickness on the*

moisture buffering capacity of spruce plywood. Energy and Buildings 38 (2006) 1283-1292

[7] PN-EN ISO 12571:2002 Ciepłno-wilgotnościowe właściwości materiałów i wyrobów budowlanych. Określenie właściwości sorpcyjnych

[8] PN-EN ISO 12572:2004 Ciepłno-wilgotnościowe właściwości użytkowe materiałów i wyrobów budowlanych. Określenie właściwości związanych z transportem pary wodnej

[9] PN-EN 1602:2013-07 Wyroby do izolacji cieplnej w budownictwie. Określenie gęstości pozornej

[10] PN-EN 12664 :2002 Właściwości cieplne materiałów i wyrobów budowlanych. Określanie oporu cieplnego metodami osłoniętej płyty grzejnej i czujnika strumienia cieplnego. Suche i wilgotne wyroby o średnim i małym oporze cieplnym

[11] PN-EN 12667:2002 Właściwości cieplne materiałów i wyrobów budowlanych. Określenie oporu cieplnego metodami osłoniętej płyty grzejnej i czujnika strumienia cieplnego. Wyroby o dużym i średnim oporze cieplnym

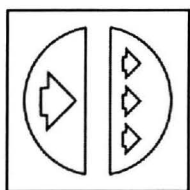
[12] PN-EN ISO 10456:2009/AC:2010 Materiały i wyroby budowlane. Właściwości cieplno-wilgotnościowe. Tabelaryczne wartości obliczeniowe i procedury określania deklarowanych i obliczeniowych wartości cieplnych

[13] Wołoszyn M., Kalamees T., Abadie M.O., Steeman M., Kalagasidis A.S. *The effect of combining a relative-humidity-sensitive ventilation system with the moisture-buffering capacity of materials on indoor climate and energy efficiency of buildings*. Building and Environment 44 (2009) 515-524.

[14] WUFI Pro 5.0 Program do symulacji cieplno-wilgotnościowych przegród budowlanych opracowany przez Fraunhofer Institut für Bauphysik (Niemcy)

[15] Yang X, Fazio P, Ge H, Rao J. *Evaluation of moisture buffering capacity of interior surface materials and furniture in a full scale experimental investigation*. Building and Environment 47 (2012) 88-196

[16] www.h-house.project.eu



WPLYW RAMKI DYSTANSOWEJ NA ROZKŁAD TEMPERATURY NA POWIERZCHNI SZYBY ZESPOLONEJ W ŚWIECLE BADAŃ TERMOWIZYJNYCH

Lech LICHOLAŁ^{*}, Aleksander STARAKIEWICZ^{*},
Paweł MURIAS^{*}, Jerzy SZYSZKA^{*}

^{*} Politechnika Rzeszowska, Zakład Budownictwa Ogólnego
ul. Poznańska 2 35-959 Rzeszów, e-mail: Lech.Licholai@prz.edu.pl

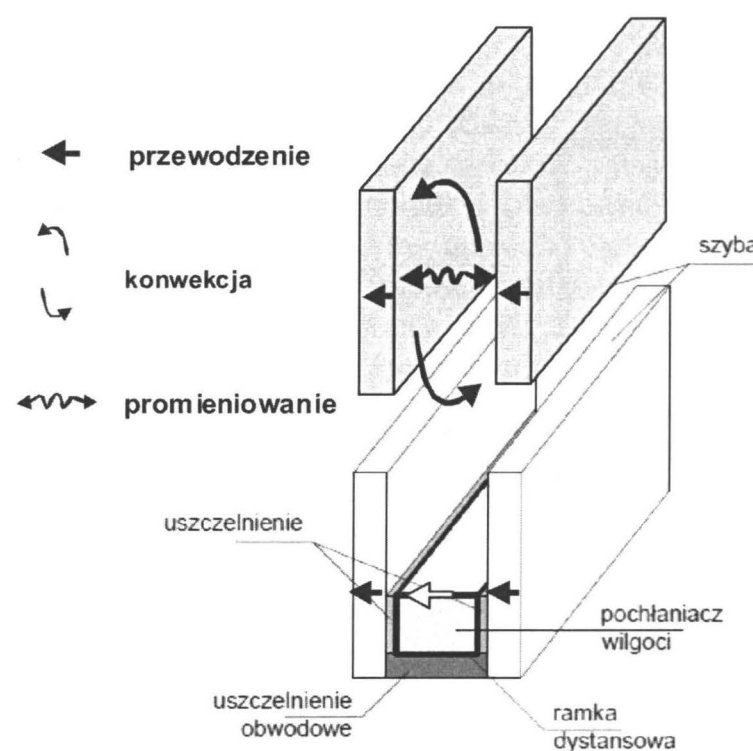
Streszczenie: Przegrody przezroczyste są integralną częścią budynku. Ich rodzaj i jakość wpływa na wewnętrzny komfort użytkowy, a także na bilans cieplny całego obiektu. Poszczególne elementy zestawów szybowych mają znaczenie dla ogólnej charakterystyki termicznej konkretnego rozwiązania okiennego. W niniejszej pracy zamieszczono wyniki badań termowizyjnych różnorodnych zespołów szybowych. Analizie poddano wpływ zastosowanych ramek dystansowych na rozkład temperatury powierzchni szyby w okolicach jej obrzeża, a w konsekwencji na wartość współczynnika przenikania ciepła szyby U_g .

Słowa kluczowe: przegrody przezroczyste, ramka dystansowa, przenikanie ciepła, badania termowizyjne,

1. WPROWADZENIE

Przegrody transparentne jako nieodłączny element obiektów budowlanych mają istotny wpływ na ich bilans energetyczny [1,2]. Udział powierzchni okien w powierzchni ścian zewnętrznych reguluje „Rozporządzenie w sprawie warunków technicznych jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie”, określając stosunek ich powierzchni do powierzchni podłogi, w pomieszczeniach przeznaczonych na pobyt ludzi, na poziomie nie mniejszym niż 1:8. W związku z rosnącymi wymaganiami termoizolacyjnymi jakie powinny spełniać budynki, istotny jest świadomy i przemyślany dobór stolarki okiennej w zależności od warunków klimatycznych oraz usytuowania względem stron świata. Na bilans cieplny tego typu przegród, obok rodzaju zastosowanych powłok niskoemisyjnych oraz wewnętrznego gazu, może mieć wpływ rodzaj materiału, z którego wykonano ramki dystansowe. Obrzeże szyby charakteryzuje przepływ ciepła

związany ze zjawiskiem przewodzenia wzdłuż grubości tafli szkła i ramki dystansowej. Towarzyszy mu przepływ ciepła o większej intensywności w stosunku do centralnej części szyby, gdzie przepływ ciepła ograniczany jest koniecznością wymiany radiacyjno-konwekcyjnej między szybami [5,6]. Zasięg strefy przykrawędziowej obejmuje pas o szerokości w przedziale od 0,063 – 0,07 metra od obrzeża szyby [1,2,3,7].

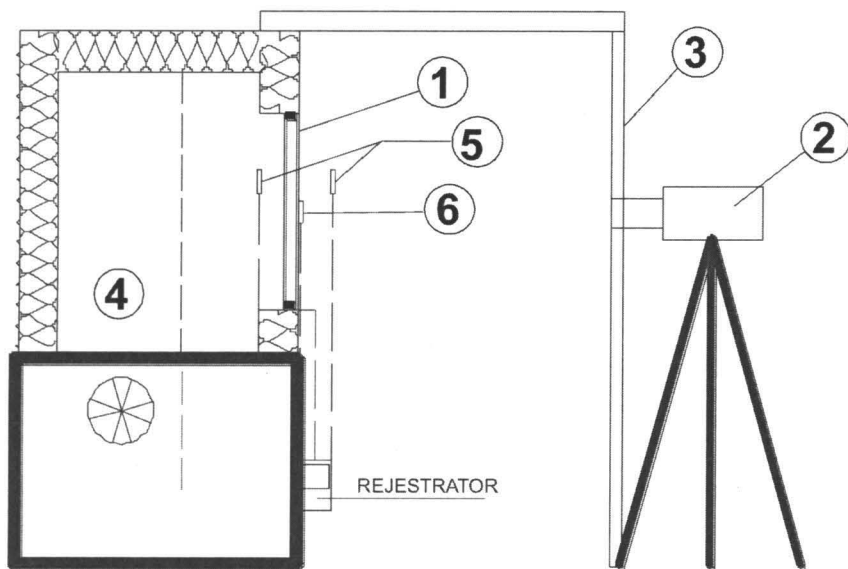


Rys.1. Schemat wymiany ciepła w strefach przeszklenia.
Fig. 1. Scheme of heat exchange in zones of the glazing.

O gęstości strumienia ciepła, wymienianego w tej strefie decydują obok gradientu temperatury powietrza, właściwości termicznych materiału, z którego zostały wykonane ramki oraz ich grubości, decydują także właściwości termiczne ramy okiennej oraz głębokość osadzenia szyby. Ten aspekt w niniejszej pracy został jednak pominięty. W pracy określono wpływ zastosowanych ramek dystansowych na rozkład temperatury powierzchni szyby w okolicach jej obrzeża, a w konsekwencji na wartość współczynnika przenikania ciepła szyby U_g .

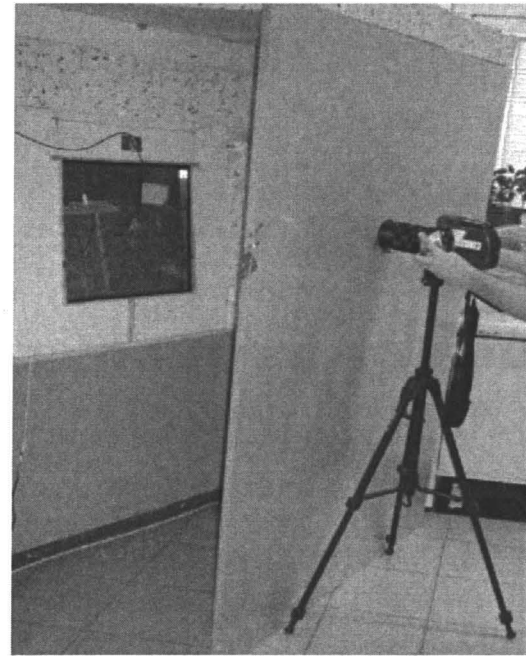
2. METODYKA BADAŃ

Badania termowizyjne przegrody transparentnej ze względu na jej refleksyjność jest skomplikowane zaś analiza ilościowa obarczona jest dużym prawdopodobieństwem błędu pomiarowego [4]. Z tego względu badania przeprowadzono z wykorzystaniem specjalnie przygotowanego stanowiska laboratoryjnego ograniczającego możliwość odbicia niepożądanych elementów na powierzchni obserwowanej szyby.



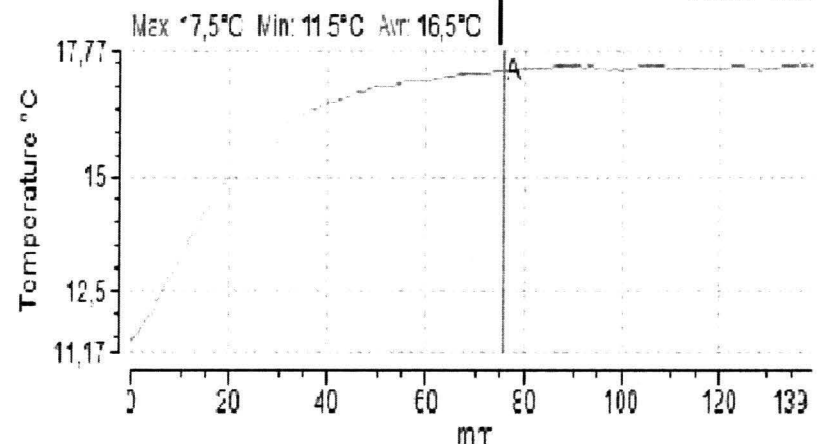
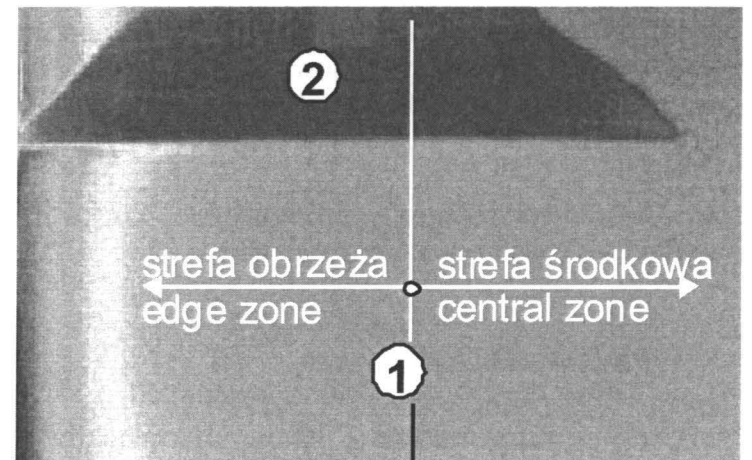
Rys. 2. Schemat stanowiska badawczego: 1. badana szyba, 2. kamera termowizyjna, 3. osłona przeciwlrefleksyjna, 4. komora chłodnicza, 5. sensory temperatury, 6. sensor gęstości strumienia ciepła.

Fig.2. Scheme of the test stand: 1. tested glass, 2. infrared camera, 3. antireflection cover, 4. refrigeration chamber, 5. temperature sensors, 6. sensor of heat flow.



Rys. 3. Stanowisko badawcze.
Fig.3. The test stand.

Stanowisko umożliwiło przeprowadzenie badań dla gradientu temperatury powietrza na poziomie 10 – 25°K. Warunkiem wykonania termogramu przy założonym gradientie temperatury była stabilizacja gęstości strumienia ciepła mierzonego w centralnej części badanej szyby.



Rys.4. Termogram oraz linia profilowa temperatury przykładowej próbki: 1. próbka, 2. znacznik dystansu.

Fig.4. Thermogram and temperature profile-line of the tested sample: 1. sample, 2. marker of distance.

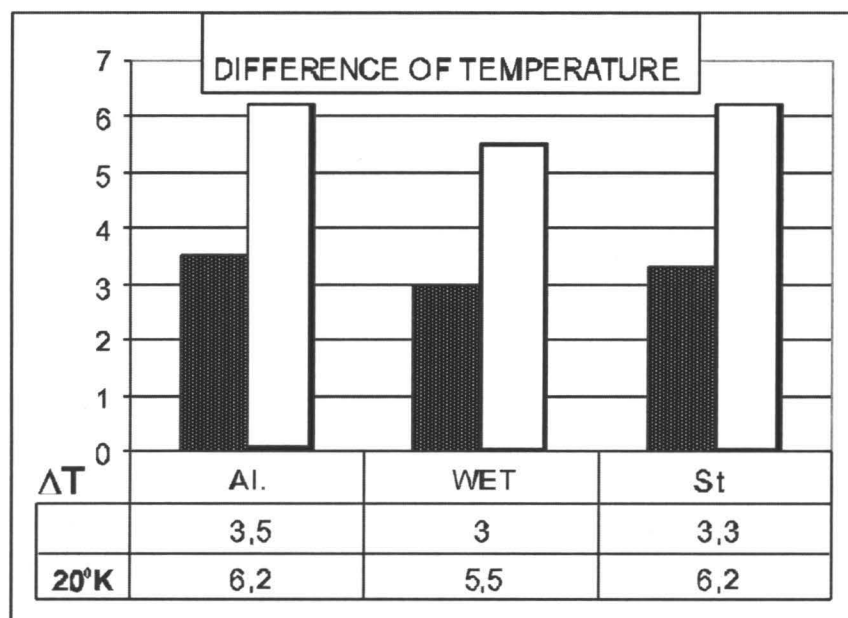
Badania wykonano dla trzech rodzajów materiału ramki dystansowej; aluminium, stal nierdzewna oraz tworzywo sztuczne WET (*ang. Warm Edge Technology*). Rozpatrzono zespolenia szybowe jedno i dwukomorowe o odstępach między szybami 12, 16 i 18 mm.

3. WYNIKI

Na podstawie analizy badań termowizyjnych przeprowadzonych dla poszczególnych zespołów szybowych określono różnicę temperatur na ich powierzchni, mierzonej od strony ciepłej, pomiędzy częścią centralną oraz obrzeżem.

3.1. Zespolenie szybowe jednokomorowe

Badania przeprowadzone na zespoleniach szybowych jednokomorowych nie wykazały istotnej różnicy w zmianie temperatury części centralnej szyby w stosunku do obrzeża dla zespołów wykonanych na bazie ramek z aluminium i stali nierdzewnej. Różnice zaobserwowano natomiast pomiędzy ramkami metalowymi i ramką ciepłą WET. Wahalała się ona w przedziale od 9% do blisko 14% w zależności od rozważanego gradientu temperatury.



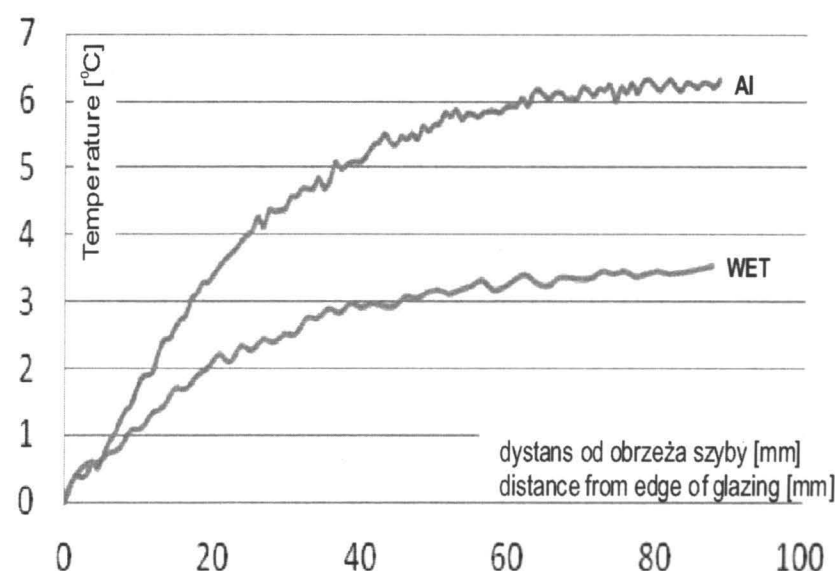
Rys. 5. Różnice temperatury części centralnej i obrzeża szyby jednokomorowej.

Fig.5. Difference of temperature for the single-chamber glazing between central and edge zone.

3.2. Zespolenia szybowe dwukomorowe

Zespolenia dwukomorowe cechuje wyższy od jednokomorowych opór termiczny. Wzrost oporu termicznego zespołów dwukomorowych związany jest z ograniczeniem wymiany ciepła przede wszystkim

w części centralnej. W części obrzeżnej szyby ze względu na wymianę ciepła wynikającą z przewodzenia wzdłuż grubości ramek i szyby, przyrost oporu termicznego jest znacznie niższy niż w strefie centralnej. W efekcie, zaobserwowano większe różnice temperatury na powierzchni tego typu szyb pomiędzy strefą środkową i obrzeżną.



Rys. 6. Rozkład temperatury w szybach dwukomorowych 4/16/4/16/4 z ramką WET i aluminiową.

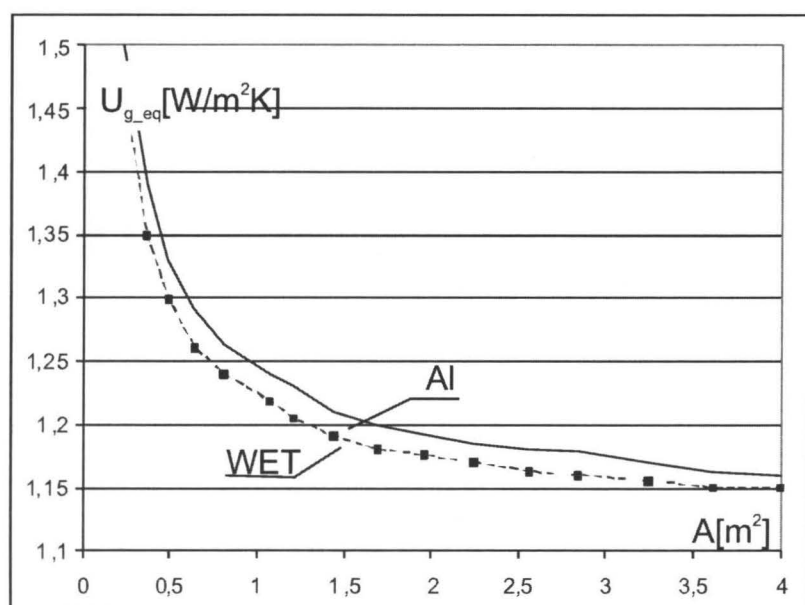
Fig.6. Distribution of temperature for the double-chamber glazing 4/16/4/16/4 with WET and frame spacer.

3.3. Ekwiwalentny współczynnik przenikania ciepła

$$U_{g_eq}$$

Stwierdzone różnice w zakresie rozkładu temperatur części środkowej szyby w stosunku do jej obrzeża oraz różnice temperatury wynikające z rodzaju zastosowanej ramki dystansowej, przekładają się na różnice gęstości strumienia ciepła wymienianego między poszczególnymi strefami szyby i otoczeniem. Aby określić wpływ omawianego zjawiska na wartość współczynnika przenikania ciepła szyby, który deklarowany jest dla strefy centralnej, wykonano obliczenia średnioważonego ekwiwalentnego współczynnika przenikania ciepła U_{g_eq} . Dla szyby, której współczynnik przenikania ciepła w części centralnej wynosił 1,1 W/m²K.

Z przedstawionego na rysunku 4 wykresu wynika, że wpływ strefy obrzeża na współczynnik przenikania ciepła szyby jest szczególnie istotny dla szyb o małych powierzchniach. Wraz ze wzrostem powierzchni szyby wpływ ten ulega redukcji. W szybach o powierzchni przekraczającej 3,5 m² obserwuje się stabilizację współczynnika przenikania ciepła na poziomie o 4,5 % wyższym od wartości określonej dla strefy centralnej w przypadku ramki WET oraz 6,5% dla ramki aluminiowej.



Rys. 7. Wpływ powierzchni szyby i zastosowanej ramki na ekwiwalentny współczynnik przenikania szyby $U_{g,eq}$.

Fig. 7. Influence of glass area and the used frame for an equivalent heat factor of glazing $U_{g,eq}$.

4. WNIOSKI

Różnice w rozkładzie temperatur szyby zespolonej strefy centralnej w stosunku do strefy obrzeża mają wpływ na jej izolacyjność termiczną. Jest ona niższa od wynikającej z deklarowanego dla strefy centralnej współczynnika przenikania ciepła. Niekorzystny wpływ strefy obrzeża szyby jest najbardziej zauważalny w szybach o małych powierzchniach i niskich wartościach współczynnika przenikania ciepła. Jego wartość maleje do poziomu w przedziale o 4,5 - 6,5 % wyższej wartości współczynnika przenikania ciepła od określonej dla części centralnej w szybach o powierzchni większej niż 3,5 m^2 . Ten niekorzystny wpływ można redukować poprzez osadzenie szyb w profilu okiennym. Wpływ głębokości osadzenia oraz oporu termicznego profilu okiennego na redukcję efektu obrzeża będzie stanowił temat przyszłych badań.

Literatura

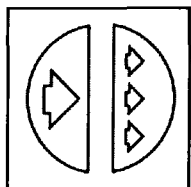
- [1] ASHARE: Standard method for determining and expressing the heat transfer and Total optical properties of fenestration products, BSR/ASHARE Standard 142P Atlanta, Georgia 1996
- [2] Aydin O., Conjugate heat transfer analysis of double pane windows. Building and Environment 41 (2006)

- [3] Chwieduk D. Modelowanie i analiza pozyskiwania oraz konwersji termicznej energii promieniowania słonecznego w budynku. Warszawa 2006
- [4] Nowak H., Zastosowanie badań termowizyjnych w budownictwie. Wrocław 2012
- [5] Starakiewicz A., Szyszka J., Wybrane aspekty doboru okien w budynkach. Izolacje 11/12/2008
- [6] Starakiewicz A., Bilans cieplny stolarki okiennej. Izolacje 1/2012
- [7] Van Den Bergh S., Hart R., Jelle B. P., Gustavsen A., Window spacers and edge seals in insulating glass units: A state-of-the-art review and future perspectives. Energy and Buildings, Volume 58, March 2013

INFLUENCE OF THE SPACER FRAME ON TEMPERATURE DISTRIBUTION ON SURFACE OF GLAZING IN THE LIGHT OF THERMOVISION TESTS

Transparent barriers are an integral part of the building. Their kind and quality has impact on usable interior comfort, and also on the heat balance of the whole object. The individual elements of the glass sets are important for the general thermal characteristic of each window. The paper presents the results of thermovision tests of different kinds of windows. The influence of used distance frames on the temperature distribution on the glass surface near its periphery, and consequently the value of heat transfer coefficient U_g of the glazing was analyzed.

Keywords: transparent barriers, spacer frame, heat transfer, thermovision research



POZIOM SZCZELNOŚCI JEDNORODZINNYCH BUDYNKÓW ENERGOOSZCZĘDNYCH W POLSCE

Artur MISZCZUK

*Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej, Instytut Inżynierii Budowlanej, Zespół Budownictwa Ogólnego i Zrównoważonego Rozwoju
Al. Armii Ludowej 16, 00-637 Warszawa, e-mail: a.miszczyk@il.pw.edu.pl*

Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki badań szczelności przeprowadzonych w budynkach jednorodzinnych o podwyższonym standardzie energetycznym. W pierwszej części przedstawiono główne wymagania dotyczące parametrów szczelności budynku zawarte w normach polskich, standardach europejskich oraz NFOŚiGW. W celu sformułowania wniosków przeprowadzone zostały ilościowe oraz jakościowe badania szczelności obudowy jednorodzinnych budynków pasywnych i energooszczędnych. Procedurę badawczą oparto na normie PN-EN 13829. Uzyskane wyniki wskazują w części budynków na odstępstwa od wymagań określonych w normach.

Słowa kluczowe: szczelność powietrzna budynku, Blower Door, budynek energooszczędny, wentylacja mechaniczna

1. ISTOTA ZACHOWANIA SZCZELNOŚCI BUDYNKU

Szczelność przegród zewnętrznych to zachowanie jak najwyższego ograniczenia swobodnej cyrkulacji powietrza między środowiskiem wewnętrznym, a zewnętrznym budynku. Niska szczelność budynku skutkuje szeregiem zagrożeń zarówno dla budynku oraz jego użytkowników.

Do najważniejszych zagrożeń należą:

- pojawienie się międzywarstwowej kondensacji pary wodnej,
- ryzyko powstania i rozwoju grzybów pleśniowych,
- obniżenie akustyki pomieszczeń.

Na szczelność powietrzną należy zwrócić uwagę w przypadku budynków energooszczędnych i pasywnych. W energetycznym bilansie całkowitym tych budynków dużą rolę odgrywają wszelkiego rodzaju nawet niewielkie straty energii. Bardzo często osiągnięcie pożądanego, bardzo niskiego zapotrzebowania na energię zależy od stopnia szczelności przegród [4].

2. WYMAGANIA

2.1. Wymagania międzynarodowe

Podpisanie dyrektywy dotyczącej charakterystyki energetycznej budynków (EPBD) przez państwa należące do Unii Europejskiej, wymusiło dążenie do ograniczania zużycia energii w budynkach. W poszczególnych krajach przyjęto zapisy dotyczące ograniczania infiltracji powietrza do/z budynków.

Tabela 1. Dopuszczalny minimalny poziom szczelności powietrznej budynków w Europie [1,5,6].

Table 1. Acceptable level of air-tightness in European buildings [1,5,6].

kraj	wymagania szczelności przy różnicy 50 Pa	
	wentylacja grawitacyjna	wentylacja mechaniczna
Polska	3,0 h ⁻¹	1,5 h ⁻¹
Niemcy	3,0 h ⁻¹ lub 7,8 m ³ /h na m ² powierzchni podłogi	1,5 h ⁻¹ lub 3,9 m ³ /h na m ² powierzchni podłogi
Czechy	4,5 h ⁻¹	bez odzysku ciepła: 1,5 h ⁻¹ z odzyskiem ciepła: 1,0 h ⁻¹
Litwa	3,0 h ⁻¹	1,5 h ⁻¹
Wielka Brytania	nowe mieszkania, budynki usługowe i użyteczności publicznej ponad 500 m ² : 10 m ³ /m ² h	

Niektóre kraje takie jak Polska, Czechy czy Niemcy mają różne wymagania dla systemu wentylacji grawitacyjnej i mechanicznej (tab.1). Jest to spowodowane tym, że wentylacja mechaniczna pracuje przy wyższej różnicy ciśnień (wentylacja wywiewna) [2].

Szczelność budynku opisywana jest najczęściej za pomocą liczby wymian powietrza w budynku w ciągu 1h - n_{50} [h^{-1}] (jest to stosunek strumienia przecieku powietrza przy różnicy ciśnień 50Pa (V_{50}) do kubatury wewnętrznej (V)) (równanie 1).

$$n_{50} = \frac{V_{50}}{V} [h^{-1}] \quad (1)$$

Dokładna metodologia według której należy przeprowadzić badanie szczelności budynku została przedstawiona w europejskiej normie PN-EN 13829:2002 [7], która obowiązuje również w Polsce.

W zdecydowanej większości krajów UE nie ma obowiązku przeprowadzania badań szczelności, jest ono jedynie zalecane. Brakuje również zapisów prawnych dotyczących podwyższenia szczelności dla budynków projektowanych jako pasywne czy energooszczędne.

W przypadku wystąpienia o wydanie certyfikatu (przez PHI bądź BBC-Effnergie) dla budynku pasywnego bądź energooszczędnego przeprowadzenie badania szczelności jest obowiązkowe. Dla budynku pasywnego (certyfikat PHI Darmstadt) szczelność budynku powinna zostać zapewniona na poziomie $n_{50} \leq 0,6 h^{-1}$. Francuski system certyfikacji (BBC-Effnergie) wymaga zapewnienia szczelności dla budynków jednorodzinnych lepszej niż $0,6 m^3/(h \cdot m^2)$ dla różnicy ciśnienia 4Pa lub $1,0 m^3/(h \cdot m^2)$ w przypadku budynków zamieszkania zbiorowego [2].

2.2. Wymagania krajowe

Wymagania dotyczące szczelności powietrznej dla nowych budynków określono w Warunkach Technicznych [8]:

„2.3.3. Zalecana szczelność powietrzna budynków wynosi: w budynkach z wentylacją grawitacyjną lub wentylacją hybrydową - $n_{50} < 3,0 h^{-1}$, w budynkach z wentylacją mechaniczną lub klimatyzacją - $n_{50} < 1,5 h^{-1}$.”

2.3.4. Zalecane jest, by po zakończeniu budowy budynek mieszkalny, zamieszkania zbiorowego, użyteczności publicznej i produkcyjny został poddany próbie szczelności ...”.

Zastąpienie w Warunkach Technicznych [8] słowa „wymagana” słowem „zalecana” powoduje, że przepis staje się całkowicie martwy i zdecydowana większość inwestorów/deweloperów nie przeprowadza takiego badania.

Podobnie jak w przypadku Francji czy Niemiec, w Polsce również istnieje instytucja (NFOŚiGW), która „docenia” inwestorów wznoszących budynki energooszczędne (NF40)

i pasywne (NF15). W celu uzyskania odpowiedniego dofinansowania, budynek musi przejść procedurę weryfikacyjną w skład której wchodzi między innymi badanie szczelności jego powłoki. Aby budynek zakwalifikować do standardu NF40, szczelność powinna spełniać warunek $n_{50} \leq 1,0 h^{-1}$, zaś dla NF15 odpowiednio $n_{50} \leq 0,6 h^{-1}$.

3. BADANIA

W celu sprawdzenia poziomu szczelności w obecnie wznoszonych w Polsce budynkach do których inwestor założył, że mają być energooszczędne zostały przeprowadzone badania zgodnie z normą PN-EN 13829:2002 [7].

3.1. Procedura przeprowadzenia badania

Do badań zostały zakwalifikowane budynki:

- jednorodzinne,
- pasywne lub o niskim zapotrzebowaniu na energię,
- wyposażone w wentylację mechaniczną z odzyskiem ciepła,
- znajdujące się w możliwie różnych strefach klimatycznych Polski,
- wzniesione w ostatnich latach (większość budynków została wybudowana po 2010r.).

Przebieg badania [7]:

- sprawdzenie, czy warunki atmosferyczne umożliwiają przeprowadzenie badania,
- przygotowanie budynku do badania (m.in. zamknięcie lub zatkanie poszczególnych otworów),
- lokalizacja ewentualnych nieszczelności, ich udokumentowanie i uszczelnienie,
- wykonanie docelowego pomiaru (pomiar różnicy ciśnienia i strumienia przepływu powietrza),
- sporządzenie raportu końcowego z badania.

3.2. Wyniki badań

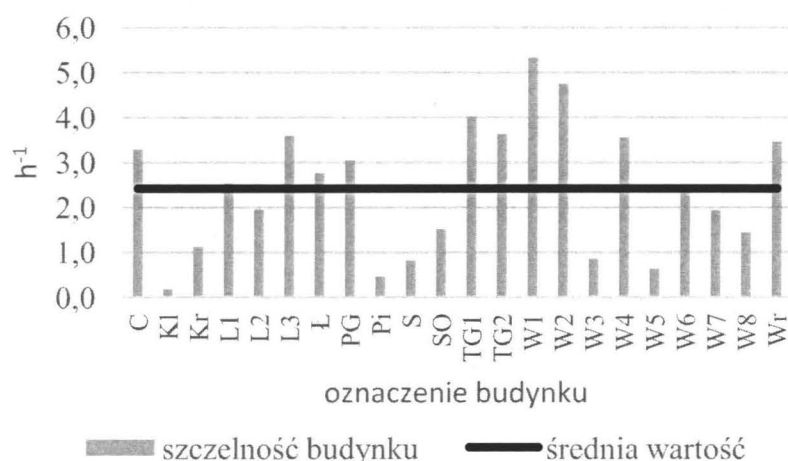
Do badania szczelności powłoki zewnętrznej zostały zakwalifikowane 25 budynki. Z powodu niesprzyjających warunków atmosferycznych, takich jak prędkość wiatru przekraczająca dopuszczalną wartość 6m/s określoną w normie [7] oraz silnych podmuchów i zmiany kierunku wiatru, które mogłyby przyczynić się do zafałszowania wyników, badanie zostało przeprowadzone na 22 budynkach (tabela 2).

Tabela 2. Zestawienie wyników przeprowadzonych badań i obliczeń.
Table 2. Summary of research results and calculations.

Miejscowość		Częstochowa	Kluczbork	Kraków	Lublin			Łódź	Pruszcz Gdański	Siedlce	Piła	Strzelce Opolskie	Tarnowskie Góry		Warszawa								Wrocław
Oznaczenie budynku	[-]	C	Kl	Kr	L1	L2	L3	Ł	PG	S	Pi	SO	TG1	TG2	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	W8	Wr
pow. ogrzewana budynku	[m ²]	114	140	143	135	95	125	276	109	197	161	130	145	145	113	168	141	133	102	214	140	172	138
pow. przegród zewnętrznych	[m ²]	266	336	373	414	295	502	366	457	409	604	388	349	349	244	602	459	339	417	423	537	408	445
szczelność budynku	[h ⁻¹]	3,29	0,17	1,12	2,53	1,95	3,58	2,75	3,04	0,82	0,45	1,51	4,02	3,62	5,33	4,74	0,86	3,55	0,63	2,43	1,93	1,44	3,46

Rozwiązania konstrukcyjne przebadanych budynków:

- fundament – większość z budynków posiada łąwę fundamentową, tylko 4 budynki (L3, PG, TG1, TG2) zastały posadowione na płycie fundamentowej,
- ściany - 4 budynki (C, L2, Pi, W4) posiadają lekką konstrukcję ścian (konstrukcja drewniana z wypełnieniem izolacją termiczną), pozostałe budynki charakteryzują się konstrukcją murowaną,
- dach - wszystkie budynki posiadają konstrukcję lekką (konstrukcję drewnianą z wypełnieniem termoizolacją).

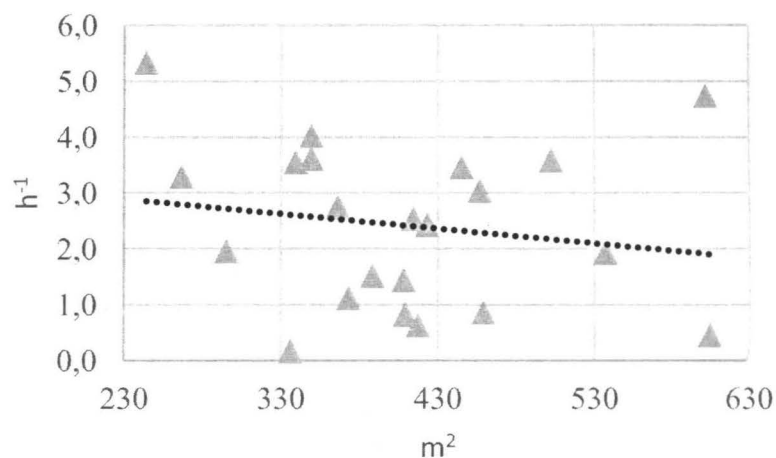


Rys. 1. Poziom szczelności obudowy budynku.
Fig. 1. Level of air-tightness of the building.

Budynki poddane analizie posiadały zróżnicowany poziom szczelności (od $n_{50}=0,17$ do $5,33h^{-1}$). W większości z nich przekroczona została zalecana dla budynków z wentylacją mechaniczną wartości infiltracji powietrza ($n_{50}<1,5 h^{-1}$) [8]. Średnia wartość infiltracji powietrza wyniosła $n_{50}=2,4h^{-1}$

(rys.1), przekracza ona ponad 1,5-krotnie również wartość dopuszczalną.

Zostało również wykonane odniesienie szczelności budynku do powierzchni przegród przez które dochodzi do niekontrolowanego przepływu powietrza zewnętrznego (rys. 2). Można sformułować następujący wniosek - wzrost powierzchni zewnętrznych przekłada się w niewielkim stopniu na wzrost szczelności budynku.

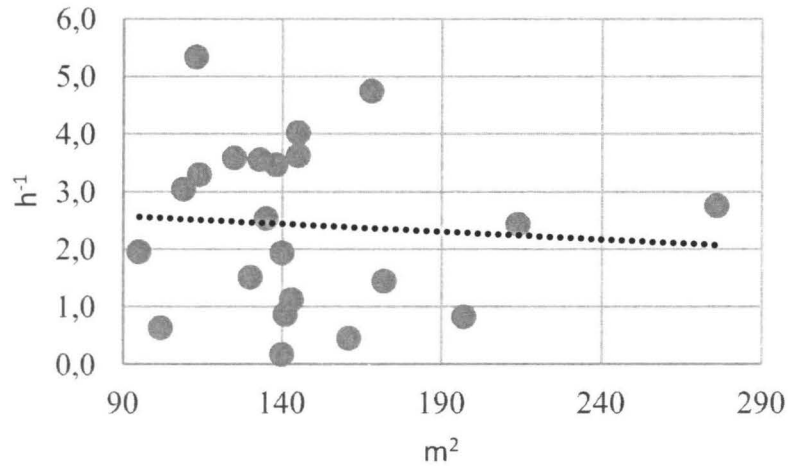


Rys. 2. Zależność szczelności budynku od powierzchni przegród zewnętrznych.
Fig. 2. The dependence of air-tightness from the external surfaces of the building.

W przypadku zaś odniesienia szczelności budynku do powierzchni użytkowej (rys.3) – wzrost powierzchni budynku nieznacznie wpływa na polepszenie szczelności. Do najczęściej występujących nieszczelności należą:

- połączenia ram okiennych/drzwiowych z ościeżami,
- połączenia różnych rodzajów przegród zewnętrznych (podłoga-ściana, dach-ściana, strop-ściana),

- przejścia instalacji (wodno-kanalizacyjnych, elektrycznych, wentylacyjnych, grzewczych i innych) przez przegrody zewnętrzne [3],
- przegrody oddzielające część ogrzewaną od nieogrzewanej.



Rys. 3. Zależność szczelności budynku od powierzchni użytkowej budynku.

Fig. 3. The dependence of air-tightness from floor area of the building.

4. PODSUMOWANIE

W wyniku przeprowadzonych badań uzyskano właściwe dla każdego z budynków wartości szczelności obudowy zewnętrznej. Poziom szczelności budynków (o czym wspomniano wcześniej) rozkładał się w przedziale od $n_{50}=0,17$ do $5,33\text{h}^{-1}$.

Analizowane budynki charakteryzowały się różną konstrukcją ścian, co nie wpływało znacząco na poziom szczelności. Zarówno budynek o najgorszym (W1) jak i najlepszym (K1) poziomie szczelności posiada taką samą konstrukcję ścian (ściany murowane).

Na osiągnięcie niższej niż przewidziano w normie szczelności budynku miał wpływ przede wszystkim czynnik ludzki. Brak doświadczenia oraz niedokładne wykonanie powłoki szczelnej obudowy budynku, szczególnie w miejscu występowania węzłów konstrukcyjnych, przyczyniło się do powstania niekontrolowanego przepływu powietrza zewnętrznego i znacznej utraty energii.

Bardzo często popełniane są podstawowe błędy wykonawcze podczas wykonywania izolacji powietrzno-szczelnej co później mocno rzutuje na poziom szczelności budynku.

Najczęstszymi miejscami takich błędów są nieszczelnie wykonane przejścia instalacji przez przegrody zewnętrzne oraz nieszczelności na połączeniach izolacji paroszczelnej.

LEVEL OF AIRTIGHTNESS IN ENERGY-EFFICIENT SINGLE-FAMILY HOUSES IN POLAND

Summary: This paper presents the results of the research tightness in the single family houses with higher energy standard. First part contains the requirements for the air tightness of the building from both Polish and European standards and also guidelines laid down by the NFOŚiGW. The test procedure was based on the PN-EN 13829. The results indicate derogation from the requirements specified in the standard in case of some buildings.

Literatura

- [1] Erhorn-Kluttig H., Erhorn H, Lahmidi H, Airtightness requirements for high performance building envelopes, ASIEPI European project, Report P157, 05.03.2009
- [2] Firląg Sz., Szczelność powietrzna budynków pasywnych i energooszczędnych – wyniki badań, Czasopismo Techniczne, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Zeszyt 3, rok 109.
- [3] Firląg Sz., Miszczuk A.; Szczelność powietrzna budynków energooszczędnych a instalacje, miesięcznik Rynek Instalacyjny 4'2015, Warszawa 2015.
- [4] Miszczuk A., Żmijewski K.; Analiza rynku budynków o niskim zapotrzebowaniu na energię w Polsce, miesięcznik Materiały Budowlane 1'2015, Warszawa 2015.
- [5] Peuhkuri R., Tschui A, Pedersen S, Application of the local criteria/standards and their differences for very low-energy and low energy houses in the participating countries, NORTHPASS European project, Report, 12.03.2010.
- [6] Conservation of fuel and power in new dwellings, HM Government, 2013.
- [7] PN-EN 13829:2002; „Właściwości cieplne budynków - Określanie przepuszczalności powietrznej budynków - Metoda pomiaru ciśnieniowego z użyciem wentylatora”
- [8] Rozporządzenie Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej z dnia 5.VII.2013 zmieniające rozporządzenie w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie;

ISSN 1734-4891