

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 jednorodzinny, wykonany w standardzie energooszczędny, 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

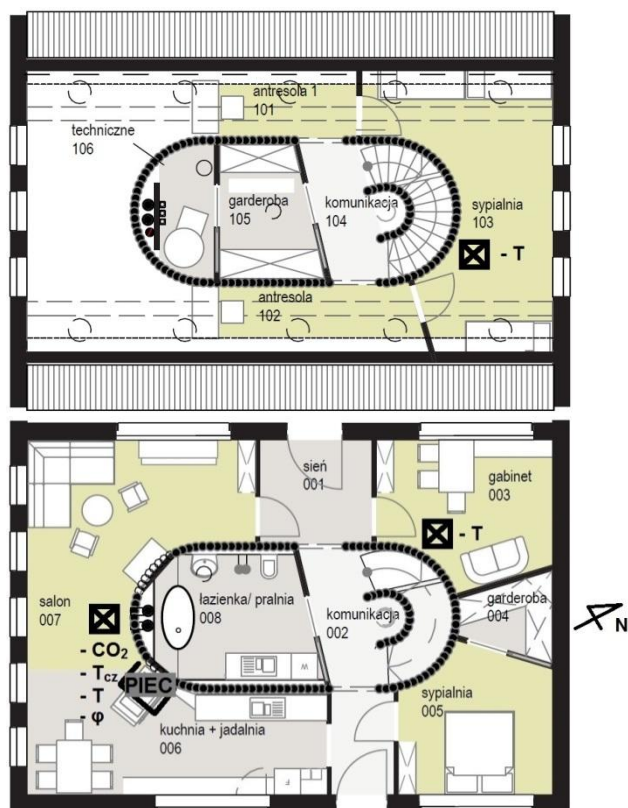
Jednym z obecnych priorytetów branży budowlanej jest tworzenie budynków zrównoważonych [1], tzn. racjonalnych pod względem energetycznym, ekologicznym i ekonomicznym. Niniejszy artykuł ma na celu zaprezentowanie analizy wyników pomiarów wybranych parametrów środowiska wewnętrznego drewnianego domu energooszczędnego *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 użytkownika 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 jednorodzinny budynek drewniany, 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 kuchenki 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 – temperatura, 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 cieplną 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:

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

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

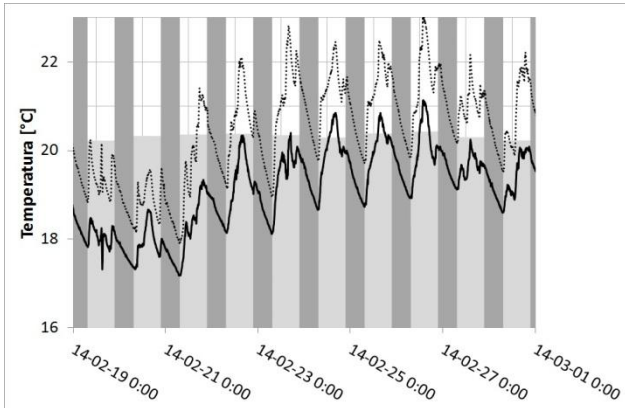
2. ANALIZA POMIARÓW

Zbrane 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.

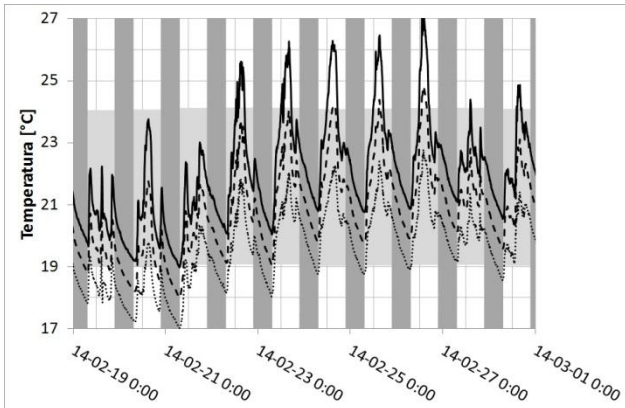
2.1. Temperatura wewnętrzna

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

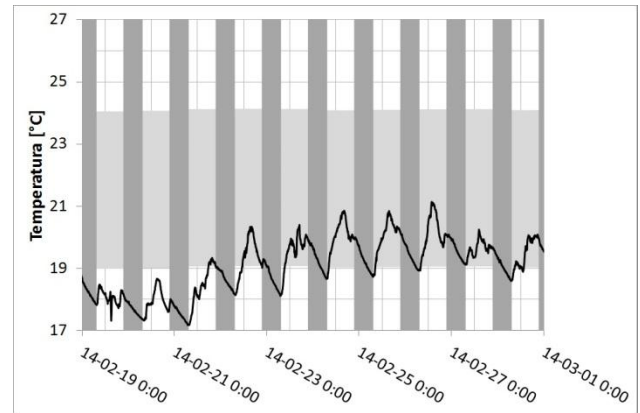
odpowiednim miejscem do spania jednak w początkowym okresie nie spełniał swojej funkcji jako pomieszczenie do pracy biurowej. W Salonie temperatura operatywna (średnia pomiędzy temp. powietrza i średnią temp. promieniowania) znajduje się cały czas na odpowiednim poziomie, natomiast w przypadku odrębnego 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].

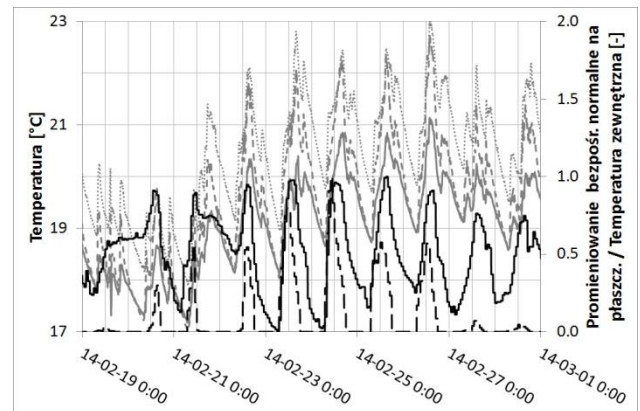


Rys. 3. Temperatura powietrza (linia krokowana), średnia temp. promieniowania (linia ciągła, założona $v_{pow}=0.2$ m/s) i temp. operatywna (linia kreskowana) w Salonie, odcieniami szarości oznaczono noc (godz. 22-7) i zakres komfortu dla pomieszczeń innych niż sypialnia i łazienka wg [4].
Fig. 3. Living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

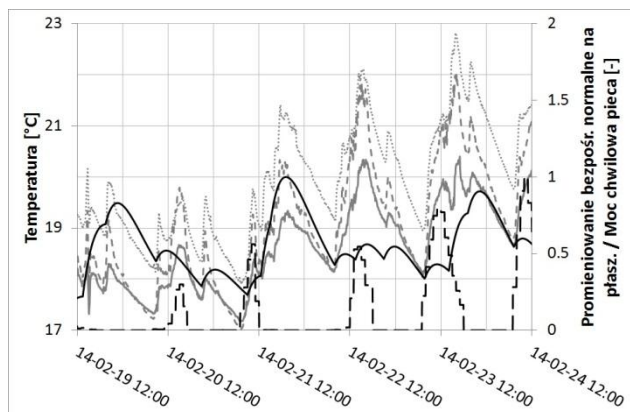


Rys. 4. Temperatura powietrza w Gabinetce (linia czarna), odcieniami szarości oznaczono noc (godz. 22-7) i zakres komfortu dla pomieszczeń innych niż sypialnia i łazienka wg [4].
Fig. 4. Study room air temperature (solid line), grays represent night-time (10PM-7AM) and comfort temperature range for living 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 wewnątrz 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).

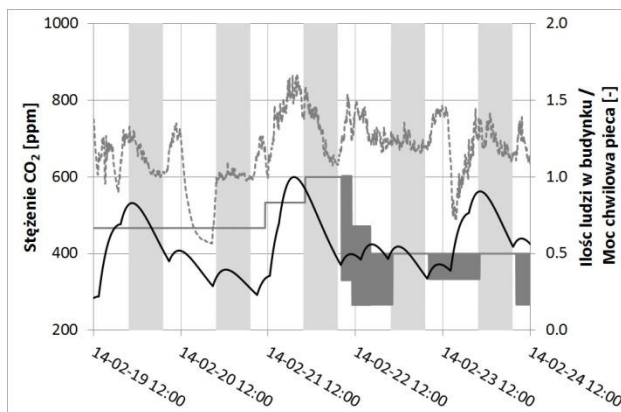


Rys. 6. Temperatura powietrza wewnątrz w różnych strefach (szare linie), bezwymiarowa energia promieniowania normalnego na płaszczyznę (linia czarna przerywana) i bezwymiarowa moc cieplna chwilowa pieca (linia czarna ciągła).
Fig. 6. Air temperature of different zones of investigated building (gray lines),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

2.2. Stężenie CO₂ i zawartość wilgoci

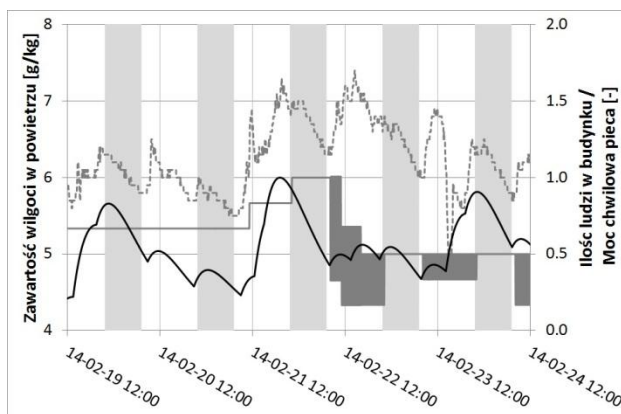
Okazuje się, że sposób notowania liczby osób w budynku był zbyt zgrubny, aby można było zaobserwować bezpośredni wpływ mieszkańców na stężenie dwutlenku węgla (rys. 7). Ponadto sprawnie działająca wentylacja mechaniczna ustawiona na spełnienie kryterium higienicznego skutecznie oczyszcza środowisko wewnętrzne 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 spalanego 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).

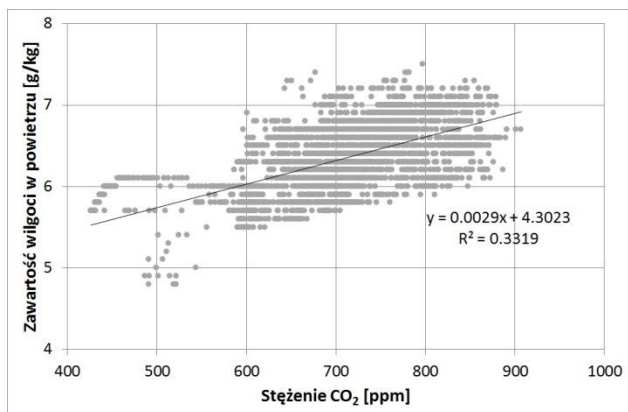
Fig. 7. Carbon dioxide concentration (gray dotted line), dimensionless instantaneous heat power of accumulation stove (black solid line), dimensionless number of people in the building (gray solid line). Gray stripes represent night-time (10PM-7AM).



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. WPLYW PIECA OPALANEGO DREWNIEM NA MIKROKLIMAT I ZUŻYCIĘ ENERGII

Piec użytkowany w *DomieTrzon* ma dwojaki 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 zaślepiony, 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 λ_K=1.3 dla kuchenki i λ_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 zimiejszy. 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 polepszyłyby 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/>