

HALINA KOCZYK, KAROL BANDURSKI\*

## WPŁYW RODZAJU WENTYLACJI NA ZUŻYCIĘ ENERGII PRZEZ BUDYNEK I KOMFORT CIEPLNY MIESZKAŃCÓW

### IMPACT OF VENTILATION CONCEPT ON BUILDING ENERGY CONSUMPTION AND OCCUPANTS THERMAL COMFORT

#### Streszczenie

Artykuł dotyczy koncepcyjnego projektowania budynku jednorodzinne z wykorzystaniem programów do symulacji energetycznej budynków (konstrukcja wraz z izolacją i technicznym wyposażeniem – HVAC). Modele analizowanego obiektu stworzono w programach: TRNSYS (model cieplny) i CONTAM (strefowy model przepływów powietrza). Te narzędzia obliczeniowe umożliwiają symulację dynamiczną: poddanie budynku warunkom brzegowym zmiennym w ciągu godziny, dnia, tygodnia czy roku. Przedstawiono wyniki analizy zużycia energii przez budynek przy zastosowaniu różnych rozwiązań wentylacyjnych (wentylacja naturalna, hybrydowa i mechaniczna) oraz spełnienia warunków komfortu cieplnego dla poszczególnych rozwiązań.

*Słowa kluczowe: wentylacja, symulacja wydajności energetycznej budynków, Trnsys, Contam, komfort termiczny*

#### Abstract

This paper refers to conceptual design of the one-story building using building performance simulation software. Coupling TRNSYS and CONTAM are used to create model of the building, respectively: thermal and multizone airflow model. The dynamic simulation, with changing boundary condition during hour, day, week and year, is possible using these computational tools. The investigations of three ventilation concept (natural, hybrid and mechanical) are performed to analyze building energy consumption and inside thermal comfort as a function of particular concept.

*Keywords: ventilation, building performance simulation, Trnsys, Contam, thermal comfort*

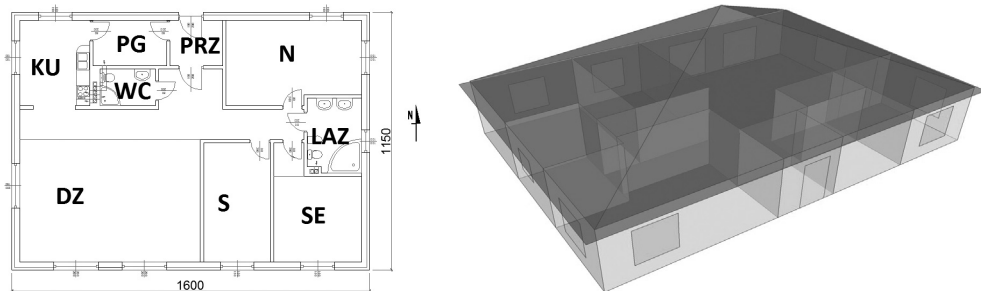
\* Prof. dr hab. inż. Halina Koczyk, mgr inż. Karol Bandurski, Instytut Inżynierii Środowiska, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Poznańska, Program strategiczny NCBiR: Zintegrowany system zmniejszania eksploatacyjnej energochłonności budynków.

## 1. Wstęp

Symulacje komputerowe stają się powoli ważnym narzędziem, które jest wykorzystywane zarówno przez projektantów do koncepcyjnego projektowania budynków, jak i użytkowników lub zarządców do optymalnej ich eksploatacji. Jak zauważono w [1], lata badań nad symulacjami energetycznymi budynków doprowadziły do trzeźwego spojrzenia na możliwości tego narzędzia, jego zalety i ograniczenia. Można stwierdzić [1], że przeprowadzanie symulacji wydajności energetycznej budynków stało się nowym rzemiosłem, nową dziedziną nauki, której uprawianie wymaga odpowiedniej wiedzy i umiejętności. Jednym z ważnych zagadnień w tej dziedzinie jest tworzenie profilów użytkowania [2]. Niewłaściwe zamodelowanie tego elementu wejściowego jest jednym z głównych powodów różnic pomiędzy wynikami symulacji energetycznej a rzeczywistą wydajnością budynku (zużycie energii i komfort) [3]. Profile użytkowania mogą mieć charakter deterministyczny i stochastyczny. Im bardziej ogólne zagadnienie jest rozważane, tym bardziej należy oprzeć się na profilach stochastycznych, które czynią model odpornym na losowość profili użytkowania (w pewnych określonych ramach) w czasie jego eksploatacji. Często w przypadku braku szczegółowych i pewnych danych dotyczących profilu użytkowania budynku praktykuje się korzystanie z danych statystycznych dotyczących budżetu czasu ludności, szczególnie w przypadku budynków mieszkalnych. Ostatnie badania dotyczące budżetu czasu przeprowadzone w Polsce w latach 2003–2004 [4], zostały wykorzystane w niniejszej pracy. W prezentowanym artykule przedstawiony zostanie sposób i wyniki symulacyjnego badania energochłonności oraz oceny (komfort cieplny) systemu wentylacji w parterowym budynku jednorodzinnym, którego przegrody spełniają aktualne wymagania warunków technicznych z [5].

## 2. Model

Modelowany budynek przedstawiono na rys. 1, a w tabeli Tab. 1 zestawiono parametry wszystkich stref, na jakie podzielono jego bryłę. Budynek nie jest podpiwniczony, znajduje się w Poznaniu, dane pogodowe przyjęto dla Lotniska Ławica. Poddasze jest nieużytkowe i pokryte dachem bez izolacji cieplnej. Parametry przegród zewnętrznych budynku spełniają wymagania ujęte w [5].



Rys. 1–2. Analizowany budynek

Fig. 1–2. The investigated building

## Strefy budynku

Strefa	Przeznaczenie	A	V	t	VN
DZ	pokój dzienny	71,34	192,61	20	65-naw
KU	kuchnia z jadalnią	13,80	37,25	20	70-wyw
S	sypialnia 1 dziecka	17,52	47,31	20	30-naw
SE	sypialnia 2 dzieci	19,35	52,23	20	30-naw
N	sypialnia rodziców	24,42	65,93	20	60-naw
LAZ	łazienka	9,41	25,42	24	50-wyw
WC	toaleta	5,29	14,29	24	50-wyw
PG	pomieszczenie gospodarcze	7,81	21,08	13	15-wyw
PRZ	przedsiónek	5,69	15,36	13	-
PDD	poddasze	-	200,80	-	-

## 2.1. Wentylacja

Budynek analizowano w trzech wariantach, przy zastosowaniu następujących rodzajów wentylacji:

1. Naturalna: dopływ świeżego powietrza zapewniony jest jedynie przez otwory okienne lub przyokienne. Zakłada się, że powietrze zużyte odpływa przez kratki wywiewne w łazience oraz WC. W kuchni okresowo działa okap wyciągowy o wydajności 120 m<sup>3</sup>/h.
2. Hybrydowa: dopływ świeżego powietrza jest regulowany za pomocą otworów okiennych i przyokiennych, jednak w przypadku wystąpienia: ciągu wstecznego w wywiewnikach (łazienka, WC), temperatury zewnętrznej powyżej 18°C lub wiatru powyżej 8 m/s, włączone zostają wentylatory wyciągowe w kuchni, łazience i WC, o wydajności kolejno 70, 50 i 30 m<sup>3</sup>/h. W przypadku korzystania z funkcji okapu wentylator kuchenny zwiększa wydajność do 120 m<sup>3</sup>/h i włączane są równolegle wentylatory w łazience i WC.
3. Mechaniczna: dopływ świeżego powietrza następuje jedynie za pośrednictwem instalacji wentylacyjnej nawiewno-wywiewnej obsługiwanej przez centralę o wydajności 185 m<sup>3</sup>/h, wyposażonej w rekuperator krzyżowy o efektywności ok. 69%, nagrzewnicę oraz chłodnicę powietrza. Powietrze nawiewane przez cały rok ma temperaturę utrzymaną na poziomie 21°C.

Charakterystykę otworów okiennych, wentylacji wywiewnej (hybrydowej) oraz okapu określono na podstawie normy [6]. Założono dla wszystkich wariantów idealną instalację ogrzewania (bez ograniczeń w zużyciu energii), która zapewnia minimalną temperaturę w strefach (Tab. 1).

## 2.2. Użytkowanie

Przyjęto, że budynek jest użytkowany przez rodzinę z trójką dzieci. Rodzice posiadają własną sypialnię w N, SE jest sypialnią dwójki, a S jednego dziecka. Profile użytkowania oraz związane z nimi zyski ciepła oraz wilgoci zostały zamodelowane w oparciu o [2, 4, 7, 8]. Profile mają charakter deterministyczny, ale wyróżniono w nich 4 rodzaje dni w ciągu tygodnia (soboty, niedziele, robocze parzyste i nieparzyste) oraz wprowadzono element stochastyczny z [7] w profilu regulacji otworów okiennych (wentylacja naturalna i hybrydowa), aby uczynić model bardziej realistycznym.

Sposób użytkowania budynku jest bezpośrednio zależny od ilości jego użytkowników. Czas ich przebywania w budynku, z podziałem na strefy oraz aktywność określono na podstawie [4]. Zyski ciepła i wilgoci od mieszkańców przyjęto zgodnie z danymi z [9]. Każda aktywność mieszkańców wymagała odpowiedniego oświetlenia. W oparciu o promieniowanie krótkofalowe i powierzchnię okien oszacowano natężenie oświetlenia w strefie w luksach, w funkcji którego regulowano oświetleniem i zacięciem. Sztuczne oświetlenie włączano przy 180 lux, a wyłączano po wzroście do 300 lux. Żaluzje opuszczano przy natężeniu 4000 lux, a podciągano przy spadku do 600 lux. Sztuczne oświetlenie, w zależności od strefy, generowało zyski ciepła rzędu 100 W. Pomieszczenia bezokienne (PG i WC) były oświetlane zawsze podczas użytkowania ich. Zacięciem ograniczało przezroczystość okien o 95%. Powyższe progi przyjęto w oparciu o [2, 10]. Wentylacja naturalna jest rozumiana jako infiltracja przez otwory okienne i przyokienne. W wariantcie z wentylacją mechaniczną infiltracja była opisana przez współczynnik infiltracji  $a$  (okna pozostawały cały czas zamknięte). Z kolei w pozostałych wariantach określono dla otworów okiennych maksymalny strumień powietrza przepływający przez nie przy różnicy ciśnień 10 Pa. Parametry otworów (dobrane w fazie modelowania) w CONTAMie przedstawiono w Tab. 3. Regulacja otworów odbywała się na bazie zmodyfikowanego algorytmu z [7] i dotyczyła tylko wentylacji naturalnej i hybrydowej. Nastawy przedstawione w Tab. 3 (ostatnia kolumna) określają mnożniki strumienia powietrza przepływającego przez otwory. Wspomniany algorytm jest stochastyczną metodą regulacji otworów okiennych w budynkach biurowych, którą sporządzono na podstawie badań przeprowadzonych w Wielkiej Brytanii, działa on w funkcji temperatury zewnętrznej i wewnętrznej temperatury operatywnej. Jego zmodyfikowana wersja uwzględnia: mniejszą wrażliwość człowieka na czynniki komfortu cieplnego w budynkach mieszkalnych, maksymalną temperaturę komfortowego snu ( $24^{\circ}\text{C}$ ), wietrzenie pomieszczeń sypialnych, wietrzenie pomieszczeń o wilgotności względnej powyżej 70% i zapobieganie przeciągom.

Zyski ciepła i wilgoci od urządzeń określono w oparciu o [2, 8], a częstotliwość ich użytkowania zgodnie z [4]. Przy korzystaniu z danych statystycznych budżetu czasu ważnym jest uwzględnienie korzystania z niektórych urządzeń (np. telewizor) równolegle przez wielu użytkowników.

**Otwory budynku w kontekście modelowania wentylacji.**  
**Oznaczenia: *n* – wentylacja naturalna, *h* – went. hybrydowa, *m* – went. mechaniczna**

Strefa	Otwór	VP	a	Rozmiar	Regulacja (nastawy)
DZ	okno poł.1	n,h: 10	m: 0,3	–	–
	okno poł.2	n: 35; h: 25	m: 0,3	–	1/0,3/0,2
	okno zach.	n,h: 10	m: 0,3	–	–
KU	okno zach.	n,h: 10	m: 0,3	–	–
	okno pół.	n: 35; h: 25	m: 0,3	–	1/0,3/0,2
	wejście DZ	–	–	2 × 1,88 [m]	
S	okno	n: 35; h: 25	m: 0,3	–	1/0,3/0,2
	drzwi	–	–	2 × 0,8 [m]	–
SE	okno	n: 35; h: 25	m: 0,3	–	1/0,3/0,2
	drzwi	–	–	2 × 0,8 [m]	–
N	okno wsch.	n: 35; h: 25	m: 0,3	–	1/0,3/0,2
	okno pół.	n,h: 10	m: 0,3	–	–
	drzwi	–	–	2 × 0,8 [m]	–
LAZ	okno	n,h: 10	m: 0,3	–	h: 0,2; n: 0,2/1
	drzwi	–	–	h,m: 1000; n: 200 [cm <sup>2</sup> ]	n: 1/50
WC	drzwi	–	–	h,m: 1000; n: 200 [cm <sup>2</sup> ]	–
PG	drzwi KU	–	–	n,h: 80; m: 1000 [cm <sup>2</sup> ]	–
	drzwi PRZ	–	–	n,h: 80; m: 1000 [cm <sup>2</sup> ]	–
PRZ	drzwi DZ	–	–	80 [cm <sup>2</sup> ]	–
	drzwi EXT	–	1	–	–

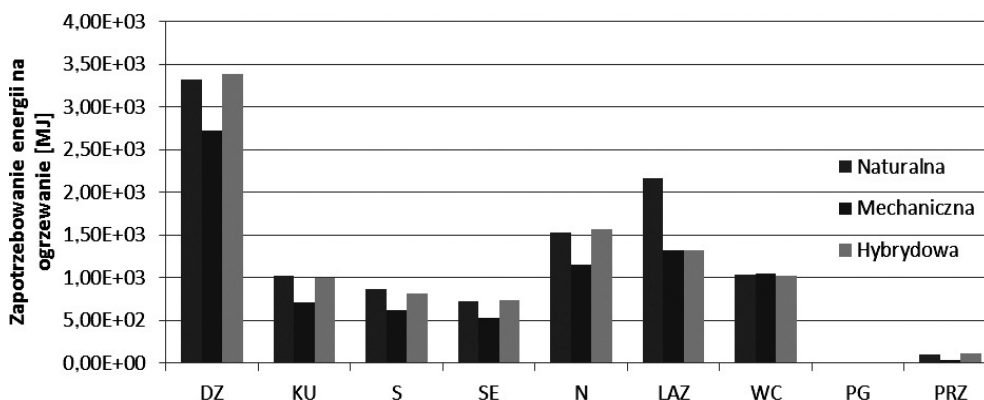
### 3. Wyniki symulacji

Analizie symulacyjnej poddano dwa okresy roku o skrajnych warunkach atmosferycznych (temperatura zewnętrzna, wilgotność względna i bezwzględna, promieniowanie słoneczne). Selekcji okresów dokonano na podstawie danych pogodowych programu TRNSYS. Wybrano: 1–28 stycznia i 27 maja–1 lipca. Dla każdego okresu obliczono przebieg parametrów komfortu termicznego (temperatura operatywna, wilgotność względna, ilość dostarczonego świeżego powietrza) oraz zużycie energii na ogrzewanie (idealne), napęd wentylatorów oraz, dla wariantu z wentylacją mechaniczną, pomocniczą nagrzewnicę i chłodnicę powietrza zainstalowane w centrali wentylacyjnej.

Wszystkie wykresy, dotyczące zarówno zużycia energii, jak i komfortu cieplnego, zamieszczono w [11], poniżej zaprezentowano jedynie dwa ważniejsze.

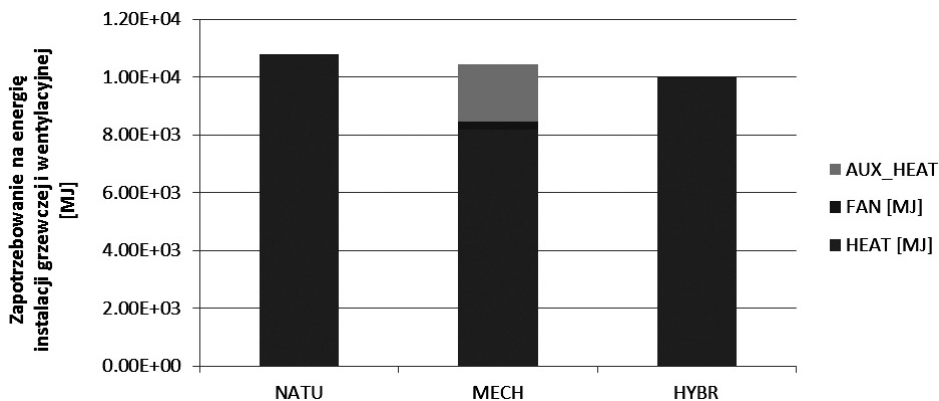
#### 3.1. Okres zimowy: 1–28 stycznia

Warianty z wentylacją naturalną i hybrydową są porównywalne i zdecydowanie bardziej energochłonne dla sypialni, pokoju dziennego i kuchni (rys. 3). W przypadku łazienki wentylacja hybrydowa daje takie same oszczędności energii jak wentylacja mechaniczna, a straty ciepła spowodowane wentylacją naturalną są o ponad 60% wyższe od pozostałych wariantów. Obliczenia nie wykazały zdecydowanych różnic między wariantami w zapotrzebowaniu na energię grzewczą dla WC i przedsionka. Okazało się, że pomieszczenie gospodarcze w ogóle nie wymaga ogrzewania przy temperaturze projektowej 13 °C. Porównując zsumowane zapotrzebowanie na energię grzewczą dla całego budynku najkorzystniej przedstawia się wentylacja mechaniczna (rys. 4). Jednak po uwzględnieniu energii potrzebnej na pracę wentylatorów i nagrzewnicy najoszczędniejsze okazuje się zastosowanie wentylacji hybrydowej, chociaż różnice między wariantami są niewielkie, rzędu kilku procent, i oscylują wokół średniej 10 000 [MJ].



Rys. 3. Zapotrzebowanie na energię grzewczą dla poszczególnych stref, w zależności od zastosowanego rodzaju wentylacji, w okresie zimowym

Fig. 3. Impact of ventilation concept on heating energy demand of the zones, the winter season (1<sup>st</sup>–28<sup>th</sup> of January)



Rys. 4. Zapotrzebowanie na energię budynku na cele ogrzewania i wentylacji w okresie zimowym

Fig. 4. Heating and ventilation building energy demand in winter season (1<sup>st</sup> – 28<sup>th</sup> of January)

W kontekście komfortu cieplnego najbardziej wyróżnia się wentylacja mechaniczna. Jest ona najmniej korzystna z uwagi na wilgotność względną powietrza ponieważ w każdej strefie doprowadza do niższej wilgotności o kilkanaście procent, co w tej porze roku powoduje dyskomfort suchego powietrza. W niektórych strefach można zauważyć też niższą temperaturę operatywną dla tego wariantu, ale odchyłka jest zaniedbywalna ponieważ wynosi ok. 0,1 K w stosunku do pozostałych wariantów. Świeże powietrze jest zagwarantowane w sposób ciągły w stałej ilości przy zastosowaniu wentylacji mechanicznej. Pozostałe warianty działają bardziej w sposób doraźny, czyli w okresach szczególnego zapotrzebowania na wymianę powietrza w strefie (wietrzenie pomieszczeń po śnie, wietrzenie łazienki, zbyt duża wilgotność w pomieszczeniu). W przypadku sypialni wydajność wentylacji naturalnej i hybrydowej oscyluje wokół wydajności wentylacji mechanicznej. Do kuchni najwięcej powietrza infiltruje przy wariacie z went. hybrydową (16 do 40 m<sup>3</sup>/h), mniej z went. naturalną (ok. 18 m<sup>3</sup>/h), a najmniej z went. mechaniczną (ok. 3. m<sup>3</sup>/h). Dodatkowo powietrze jest pobierane z sąsiednich stref (w każdym wariacie), najwięcej w przypadku went. mechanicznej (blisko 70 m<sup>3</sup>/h). Z kolei w strefie DZ mechaniczna wentylacja dostarcza 65 m<sup>3</sup>/h, naturalna ok. 25 m<sup>3</sup>/h, a hybrydowa między ok. 25 a 63 m<sup>3</sup>/h.. W łazience najwięcej świeżego powietrza dociera przy zastosowaniu wentylacji grawitacyjnej – średnio ok. 75 m<sup>3</sup>/h, a przy hybrydowej średnio ok. 38 m<sup>3</sup>/h, went. mechaniczna zapewnia stały dopływ 50 m<sup>3</sup>/h powietrza z pozostałych stref. Toaleta otrzymuje jedynie powietrze z pozostałych stref, w went. mechanicznej przepływ przez nią wynosi 50 m<sup>3</sup>/h, w hybrydowej średnio ok. 35 m<sup>3</sup>/h, a w naturalnej jest o ok. 2 m<sup>3</sup>/h niższy.

### 3.2. Okres letni: 27 maja – 11lipca

W tym okresie zapotrzebowanie na energię jest zdecydowanie niższe, prawie dziesięciokrotnie. Ogrzewanie wydaje się istotne jedynie dla łazienki i WC. Podsumowując zapotrzebowanie na energię grzewczą najniekorzystniej wypada wentylacja naturalna, jednak

po uwzględnieniu obsługi instalacji wentylacyjnej najwięcej energii zużywa budynek z instalacją mechaniczną – ponad 1200 [kJ], a najmniej – 58 % tego – budynek z wentylacją hybrydową (rys. 5).

Głównymi zjawiskami prowadzącymi do dyskomfortu są przeciągi i wzrost wilgotności, które występują przy stosowaniu wentylacji naturalnej i, w mniejszym stopniu, wentylacji hybrydowej. Wyższa temperatura operatywna charakteryzuje wentylację mechaniczną, maksymalne różnice w stosunku do pozostałych wynosi maksymalnie trochę ponad 1 K. Gdyby jednak obniżyć temperaturę powietrza nawiewanego, komfort byłby większy, lecz zwiększyłoby się zapotrzebowanie na energię.

#### 4. Wnioski

W okresie najbardziej energochłonnym różnice pomiędzy zużyciem energii przez poszczególne warianty nie są zbyt istotne. Z kolei w kwestii komfortu można zauważyć osuszanie powietrza przez wentylację mechaniczną. Ilość świeżego powietrza dopływającego do poszczególnych pomieszczeń, choć różna, wydaje się być wystarczająca (zgodna z potrzebami) we wszystkich przypadkach. Możliwość regulacji tego parametru (wentylacja hybrydowa i naturalna) może zresztą wywołać większą tolerancję mieszkańców na warunki komfortu w pomieszczeniu.

Okres letni pod względem energochłonności jednoznacznie wskazuje na rozwiązanie hybrydowe jako najkorzystniejsze, jednak w porównaniu z okresem zimowym zapotrzebowanie na energię jest znikome. Komfort termiczny najskuteczniej zapewnia wentylacja mechaniczna, ale wentylacja hybrydowa jest wyraźnie lepsza od wentylacji grawitacyjnej, dzięki czemu może być rozwiązaniem konkurencyjnym.

Symulacje obejmujące cały rok, zdecydowanie bardziej czasochłonne, mogłyby mieć istotny wpływ na porównanie analizowanych wariantów. Jednak już teraz można zauważyć wyzwania, których rozwiązania mogą być przedmiotem kolejnych symulacji i porównań:

- zmniejszenie energochłonności urządzeń wentylacyjnych i/lub ich redukcja,
- uzależnienie wydajności wentylacji mechanicznej od profilu użytkowania budynku,
- efektywne rozwiązania struktury i kontroli instalacji hybrydowej.

Istotnym dla powyższego zagadnienia jest również weryfikacja i doskonalenie wykorzystanej metody analizy badanych wariantów. W tym celu pożądane byłoby przeprowadzenie analogicznych obliczeń w innym programie symulacyjnym, jak ESP-r lub/i Apache ([www.iesve.com](http://www.iesve.com)). Bardzo pomocna byłaby również weryfikacja eksperymentalna zastosowanego modelu.

#### Oznaczenia

$A$	–	powierzchnia podłogi strefy [ $m^2$ ],
$a$	–	współczynnik infiltracji [ $m^3/(m \cdot h \cdot daPa^{2/3})$ ],
$d$	–	grubość warstwy [m],
$t$	–	nastawiona temperatura ogrzewania [ $^{\circ}C$ ],
$U$	–	współczynnik przenikania ciepła przez przegrodę [ $W/(m^2K)$ ],



- $V$  – kubatura strefy[m<sup>3</sup>],  
 $VN$  – strumień objętości wentylacji mechanicznej[m<sup>3</sup>/h],  
 $VP$  – strumień objętości infiltrujący przy różnicy ciśnień 10 [Pa] [m<sup>3</sup>/h],

### Literatura

- [1] Hensen J.L.M., Lamberts R. (red.), *Building Performance Simulation for Design and operation*, Son Press 2011.
- [2] Robinson D., Haldi F. (red.) *Journal of Building Performance Simulation* Vol. 4, No. 4, 2011 & Vol. 5, No. 1, 2012.
- [3] Hoes P. et al., *User behavior in whole building simulation*, Energy and Buildings 41, 2009, 295-302.
- [4] *Budżet czasu ludności 1 VI 2003-31 V 2004*, Główny Urząd Statystyczny, Warszawa 2005.
- [5] Dz. U. Nr 201 z 13 listopada 2008, Poz. 1238: Rozp. MI z d. 6.11.2008 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie warunków technicznych, jakimi powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie.
- [6] PN-83/B-03430/Az3 Wentylacja w budynkach mieszkalnych zamieszkania zbiorowego i użyteczności publicznej.
- [7] Rijal H.B. et al., *Using results from field surveys to predict the effect of open windows on thermal comfort and energy use in buildings*, Energy and Buildings 39, 2007, 823-836.
- [8] Firląg S., *Wpływ rodzaju system ogrzewczego na komfort cieplny i zużycie energii w jednorodzinnych budynkach pasywnych*, Rozprawa Doktorska, Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Środowiska, Warszawa 2009.
- [9] Projektowanie instalacji wentylacji i klimatyzacji (<http://www.instsani.webd.pl/projwe2.htm>).
- [10] PN-EN 12464-1:2011 Światło i oświetlenie – Oświetlenie miejsc pracy, Część 1: Miejsca pracy we wnętrzach.
- [11] Strona autora, w opracowaniu ([www.put.poznan.pl/~karol.bandurski](http://www.put.poznan.pl/~karol.bandurski)).