

Model jakości środowiska wewnętrznego – przykładowa ocena budynku jednorodzinnego

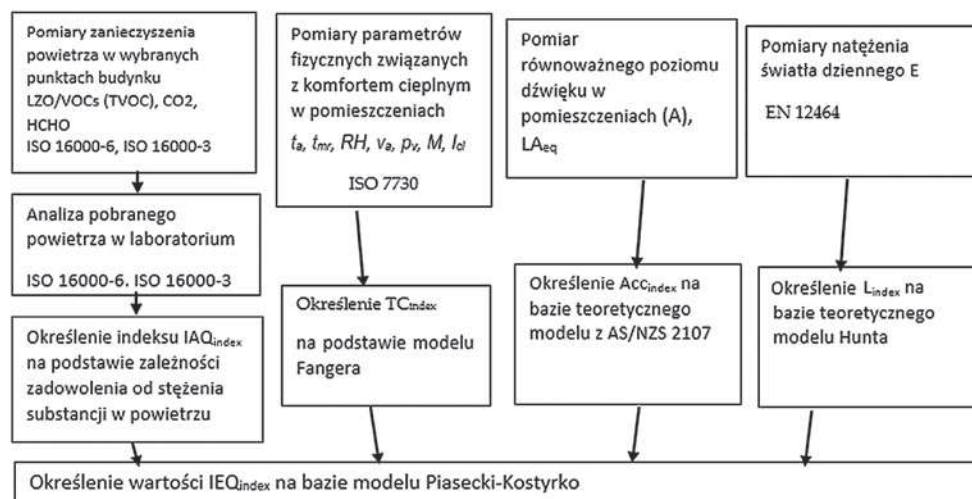
Dr inż. Michał Piasecki, Instytut Techniki Budowlanej

1. Wprowadzenie

Zazwyczaj ludzie w miastach europejskich spędzają 8–10 godzin dziennie w biurach, następnie kilkanaście godzin w domach. Środowisko wewnętrzne budynków wpływa na ich zdrowie, komfort, samoocenę i wydajność pracy. Ostatnie badania pokazują, że koszty globalne poniesione przez pracodawcę, właściciela budynku oraz społeczeństwo, spowodowane złymi warunkami środowiska wewnętrznego w budynkach biurowych, mogą być wyższe niż koszty zużycia energii w budynku [1–2]. Odpowiednia jakość środowiska wewnętrznego może poprawić wydajność pracy i zmniejszyć liczbę zwolnień zdrowotnych dla pracowników [3]. Aby ocenić, jaki jest wpływ warunków środowiska wewnętrznego na człowieka i użytkownika, niezbędne są prace badawcze. Obecnie zagadnienie to jest dość szeroko omawiane w literaturze, niemniej wciąż brakuje prostych i kompleksowych narzędzi do wykorzystania w codziennej praktyce inżyniera. Grupa badaczy ITB zajmuje się tym zagadnieniem od roku 2016 oraz promuje stosowanie uproszczonej metody oceny jakości środowiska wewnętrznego budynków (IEQ), która dzięki wykorzystaniu znanych metod pomiarowych w relatywnie szybkim czasie może odpowiedzieć na pytanie, czy budynek jest komfortowy dla użytkowników, tj. jaki jest przewidywany odsetek osób niezadowolonych z poszczególnych parametrów środowiska. Przydatne podsumowanie literatury dotyczącej IEQ przedstawił Al Horr [3]. Badania autorów [4–12] wskazują, że IEQ_{index} jest akceptowanym i uznanym już

narzędziem do oceny komfortu użytkowników budynków. Wybór istotnych wewnętrznych parametrów środowiskowych do modelu IEQ sugeruje nowa norma EN 16798:2019 Energy performance of buildings – Ventilation of buildings – Part 1: Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics z 2018 roku (wcześniej była to norma EN 15251) dotycząca klasyfikacji środowiska wewnętrznego budynków. Główne zalecenie dotyczące włączenia informacji o środowisku wewnętrznym budynków do świadectwa energetycznego budynku podano też w art. 7 dyrektywy 2010/31/UE (dalej EPBD). Stwierdzono w niej, że do celów certyfikacji energetycznej może być konieczne przekształcenie złożonych informacji o środowisku wewnętrznym w jeden prosty ogólny wskaźnik jakości środowiska wewnętrznego w budynku. Wskaźnik ten, zgodny z założeniami modelu IEQ_{index} , ma obejmować cztery elementy jakości środowiska wewnętrznego: komfort termiczny, jakość powietrza w pomieszczeniu, komfort akustyczny i komfort wizualny. Wśród wielu uczestników procesu budowlanego panuje zgoda, że charakterystyka energetyczna bez części dotyczącej środowiska wewnętrznego nie ma żadnego sensu. W nowych budynkach o niskim zapotrzebowaniu na energię, w budynkach o niemal zerowym zużyciu energii według standardu NZEB, analizowane są problemy techniczne często z pominięciem jakości powietrza i komfortu [13]. Zgodnie z doświadczeniem autora problem ten jest powszechny, a dodatkowo w opinii

Rys. 1. Schemat postępowania badawczego w celu oznaczenia jakości środowiska wewnętrznego



autora co najmniej 30% nowych budynków ma istotne problemy wynikające z obniżonego komfortu (zła akustyka, zła jakość powietrza, niski komfort termiczny zimą i latem, złe oświetlenie). Obecnie metody komercyjnej oceny środowiskowej budynków (BREEAM, LEED etc.) pomimo że są bardzo popularne w Polsce (ok. 600 budynków certyfikowanych), nie przekładają się na liczbę obiektów realizowanych zgodnie z kryteriami zrównoważoności w skali globalnej. Liczba budynków mieszkalnych oraz budynków jednorodzinnych z wysokim komfortem środowiskowym jest wciąż stosunkowo niewielka (nie ma też dobrych danych na ten temat), przypuszczalnie jest to zaledwie kilkadziesiąt budynków w stosunku do tysięcy nowych budynków wznoszonych każdego roku. Spełnienie wymagań przepisów krajowych, jakim muszą odpowiadać budynki i ich lokalizacja – nie gwarantuje, że budynki będą zdrowe i przyjazne dla użytkownika, dlatego istnieją wyzwania badawcze i wdrożeniowe w omawianym w artykule zakresie.

2. Model jakości środowiska wewnętrznego

Wskaźnik jakości środowiska wewnętrznego IEQ (%) odnosi się do jakości środowiska budynku i wyraża przewidywany procent zadowolonych mieszkańców/użytkowników budynków ze względu na parametry środowiskowe. Morfologię modelu IEQ można wykorzystać do oceny komfortu budynków istniejących i projektowanych. Model IEQ uwzględnia następujące składowe: komfort termiczny TC_{index} , jakość powietrza wewnętrznego IAQ_{index} , komfort akustyczny Acc_{index} i jakość oświetlenia naturalnego L_{index} – na podstawie pomiarów właściwości fizycznych lub projektowanych. Modele cząstkowe zostały opracowane i przedstawione w literaturze [5, 14] na podstawie badań sensorycznych grup panelowych (w tym badań autorskich) [15]. Danemu parametrowi fizycznemu (np. natężeniu światła lub stężeniu lotnego związku organicznego) odpowiada odsetek zadowolonych, który podstawia się według wzoru w celu obliczenia wartości współczynnika. Uproszczony schemat analizy całościowej w oparciu o model IEQ dla budynku przedstawiono na rysunku 1.

Przedstawione podejście schematyczne, omówione w [17] pozwala przedstawić złożone informacje o środowisku budynku jako jeden ogólny wskaźnik jakości środowiska wewnątrz budynku. Wiarygodność modelu, w tym niepewność pomiarów i danych dla tego modelu, została omówiona w pracy [16], gdzie autorzy przedstawili także dyskusję ewentualnych wewnętrznych niezgodności w strukturze modelu IEQ oraz uzasadnienie zastosowania metody wag dla każdego komponentu składowego. IEQ_{index} składa się z następujących komponentów (SI_i): komfort cieplny (TC_{index}), jakość powietrza w pomieszczeniu (IAQ_{index}), akustyka (Acc_{index}) i jakość oświetlenia (L_{index}). Wzory dla modeli cząstkowych podano w rozdziale 3.1. Mnożenie przez ich wagi W_i prowadzi do równania:

$$IEQ_{index} = \sum W_i \cdot SI_i \quad (1)$$

Autor przyjął system ważenia, w którym wszystkie elementy są ważone w taki sam sposób (0,25 dla wag W_1 - W_4), jak pokazano w równaniu (2):

$$IEQ_{index} = 0,25 \cdot TC_{index} + 0,25 \cdot IAQ_{index} + 0,25 \cdot Acc_{index} + 0,25 \cdot L_{index} \quad (2)$$

W wyniku równania podskładniki SI_i (przewidywany procent spełnionych) można obliczyć za pomocą równania (3).

$$SI_i = 100 - PD(SI_i) \quad (3)$$

gdzie:

– PD jest przewidywanym odsetkiem niezadowolonych mieszkańców (PPD), a PD (SI_i) to odsetek osób niezadowolonych z poziomu podskładnika IEQ (SI_i).

Autorzy [16] przeprowadzili symulacje dla subindeksów IEQ_{index} oraz wstępną analizę metrologiczną ogólnego dopasowania modelu IEQ za pomocą testów Monte Carlo.

3. Wykorzystanie modelu w praktyce

3.1. Modele cząstkowe IEQ wybrane do oceny budynku

Fizyczne modele cząstkowe do wyznaczenia indeksu odsetka zadowolonych IEQ przedstawiono w tabeli 1. Podano wartości wejściowe do modelu, tj. mierzone wartości parametrów fizycznych w przykładowym budynku NZEB (wartości wejściowe uśrednione z serii pomiarowych).

3.2. Przykładowy budynek poddany ocenie

Przedmiotem oceny jest dom jednorodzinny w Polsce (okolicie Trójmiasta). Został zrealizowany jako dom jednorodzinny dla jednej rodziny (2 + 2). Budynek wzniesiono z uwzględnieniem standardów: domu pasywnego, standardu komfortu (wg EN 15251), wymagań optymalnych pod względem kosztów, krajowych norm dotyczących efektywności energetycznej (wg NF15 i WT2017). Obiekt jest budynkiem mieszkalnym, parterowym, bez piwnicy, przykryty symetrycznym spadzistym dachem o kącie nachylenia 35°. Powierzchnia działki wynosi 645 m², objętość budynku to 796 m³, łączna powierzchnia wynosi 250,4 m², a powierzchnia użytkowa – 176,2 m². Liczba pięter nad ziemią wynosi dwa, a wysokość budynku to 7,98 m. Budynek jest otwarty na światło od południa i zamknięty od strony północnej i wschodniej, gdzie nie ma pomieszczeń do stałego pobytu mieszkańców ani odpoczynku, ale są łazienki, kuchnia lub pomieszczenia techniczne, takie jak garderoba. Źródłem ciepła i wody grzewczej w domu jest ciepło energii zawarte w ziemi, pobierane i przetwarzane przez pompę ciepła. Wewnętrzne instalacje zastosowane w budynku to: instalacja wodna (sieć domowa), instalacja sanitarna (z wodną stacją uzdatniania wody), ogrzewanie podłogowe, instalacja wentylacji mechanicznej z rekuperacją ciepła, instalacja elektryczna

Tabela 1. Modele cząstkowe komfortu oraz parametry fizyczne mierzone na obiekcie (uśrednione z wielu pomiarów) oraz wzór na IEQ

Składowa	Zależność PD (SI _i) – odsetek niezadowolonych	Wartości wejściowe
TC _{index}	PMV (Fanger-ISO 7730) $PMV = f(t_{a,r}, t_{r}, v_{a,r}, p_{a,r}, M, I_{cl,dyn})$ $PD_{TC} = f(PMV)$	I _{cl} 0.7 clo
		t _a 24.3°C
		t _r 23.8°C
		v _a 0.15 m/s
		RH 28.4%
		M 1.05 met
ΣIAQ _{index} Modele cząstkowe	$PD_{IAQ(CO_2)} = 395 \cdot \exp(-15.15 \cdot \Delta C_{CO_2}^{-0.25})$ $PD_{IAQ(TVOC)} = 405 \cdot \exp(-11.3 \cdot C_{TVOC}^{-0.25})$ $PMV_{HCHO} = 2 \log \frac{C_{HCHO}}{0.01}$ $PD_{HCHO} = 100 - 95 \cdot \exp(-0.03353 \cdot PMV^4 - 0.2179 \cdot PMV^2)$	c = 416 ppm
		c = 95 mg/m ³
		c = 0.010 mg/m ³
ΣIAQ _{index}	$IAQ_{VOC} = 0.9 \cdot IAQ_{variant1}(TVOC) + 0.1 \cdot IAQ_{variant1}(HCHO)$ $\Sigma IAQ_{index}(1) = 0.5 \cdot IAQ(CO_2) + 0.5 \cdot IAQ_{variant1}(VOC)$	
Acc _{index}	$PD_{Acc} = 2 \cdot (Zmierzony\ poziom\ dźwięku\ [dB(A)] - Projektowany\ [dB(A)])$ Aktualny równoważny poziom dźwięku Projektowany poziom dźwięku	36 dB (A) 35 dB (A)
L _{index}	$PD_L = -0.0175 + 1.0361 / \{1 + \exp(+4.0835 \cdot (\log_{10}(E_{min}) - 1.8223))\}$	480 lux
IEQ _{index}	$IEQ_{index} \pm SD = W_1 \times TC_{index} + W_2 \times \Sigma IAQ_{index}(1) + W_3 \times Acc_{index} + W_4 \times L_{index}$	

Uwaga: Przewidywana rozszerzona niepewność modelu wynosi ok. 32% przy współczynniku ufności k=95%. Analiza metrologiczna zagadnienia badawczego jest elementem innego artykułu [16].

(sieć + ogniwa fotowoltaiczne 1 kW), oświetlenie (LED systemy), instalacja teletechniczna. Systemy ogrzewania i wentylacji uzupełnia rekuperacja, która z mechanicznej cyrkulacji powietrza w budynku odzyskuje ciepło. Systemy te są prawie niezależne energetycznie, energia do ich zasilania może pochodzić z ogniw fotowoltaicznych zamontowanych na dachu budynku. Do budynku dobudowano wiatę z płaskim dachem (służącą jako garaż), pełniącą funkcję tarasu (piętro I). W budynku zastosowano elementy o wysokich parametrach termicznych, według obowiązujących norm efektywności energetycznej (przegrody – wymagania cieplne WT2021). Obliczone roczne zapotrzebowanie na energię do ogrzewania i wentylacji ($Q_{H,nd}$) wynosi 4355 kWh/rok, gdzie: projektowana temperatura robocza wynosi 20°C, powierzchnia pomieszczeń z regulowaną temperaturą (A_p) wynosi 163,5 m². Roczne zapotrzebowanie na ciepłą wodę użytkową ($Q_{W,nd}$) wynosi 2466 kWh/rok, przy założeniu: ciepło właściwe wody wynosi 4,19 kJ/kgK, projektowana temperatura ciepłej wody wynosi 45°C, projektowana temperatura zimnej wody wynosi 10°C, oczekiwane dzienne zużycie gorącej wody (woda wynosi 35 dm³ na osobę). Energia na urządzenia pomocnicze do ogrzewania i wentylacji wynosi 1312,75 kWh/rok, a energia na urządzenia pomocnicze do instalacji ciepłej wody wynosi 65,39 kWh/rok. Roczne zużycie energii pierwotnej ($Q_p = Q_{p,H} + Q_{p,W}$) wynosi 12 042 kWh/rok, końcowe zużycie energii końcowej (EK) wynosi 16,1 kWh/(m²·rok), roczny wskaźnik obliczeniowy zapotrzebowania na odnawialną energię pierwotną do ogrzewania, wentylacji i przygotowania ciepłej wody EP (Q_p/A_p) wynosi 73,7 kWh/(m²·rok). Na komfort mieszkańców związany z jakością powietrza

w pomieszczeniu wpływ mają głównie materiały wykończeniowe emitujące lotne związki organiczne LZO. Przy wyborze materiałów zwrócono uwagę na materiały niskoemisyjne (tynki, farby, kleje) i wyroby o istotnych parametrach akustycznych.

3.3. Metody pomiarowe

Punkty pomiarowe znajdowały się na parterze i pierwszym piętrze budynku, w pokojach, w których mieszkańcy spędzają większość czasu (południe). Punkty znajdowały się mniej więcej w środku pomieszczeń, po dwa na górze i dwa na dole budynku w odległości nie większej niż 3,5 m od okien budynku. W punktach pomiarowych umieszczono urządzenia pomiarowe i wykonano pomiary. Próbkę powietrza zostały zbadane zgodnie z normami ISO 16000-6: 2011 i ISO 16000-3: 2011 oraz ISO 16000-26:2012. Pomiary termiczne środowiska przeprowadzono za pomocą przyrządu mikroklimatycznego HD32.1 zgodne z ISO 7726 i ISO 7730. Komfort wizualny potwierdzono za pomocą przyrządu MAVOLUX 5032C z detektorem 3C15683, zgodnie z wymaganiami EN 12464. Wyniki badań akustycznych oceniono w odniesieniu do wymagań normy PN-87/B-02151/02 Tabela 1 – Dopuszczalne poziomy hałasu A w pomieszczeniach przeznaczonych do zamieszkania przez ludzi.

3.4. Uzyskane wyniki oceny budynku

W ramach oceny całościowej uzyskano wartości czterech indeksów cząstkowych IEQ (zgodnie z tabelą 1). Dla wskaźnika komfort termiczny (TC_{index}) uzyskana wartość średnia dla budynku wynosi 91% przewidywanych zadowolonych,

dla wskaźnika jakość powietrza wewnętrznego uzyskana wartość IAQ_{index} wynosi 94%, dla indeksu komfort akustyczny Acc_{index} wynosi 99%, dla indeksu komfort wizualny $L_{index} = 96%$. Obliczona wartość indeksu komfortu budynku IEQ_{index} wynosi 95% (przewidywany odsetek zadowolonych z jakości środowiskowej).

4. Podsumowanie

Jakość środowiska wewnętrznego (IEQ) jest miarą postrzegania komfortu przez osoby przebywające w środowisku wewnętrznym budynków. Zagadnienie jest aktualnym tematem badawczym zrównoważonego budownictwa i ekologii w budownictwie [18–20]. Oczekuje się, że ocena efektywności energetycznej budynku powinna obejmować też ocenę środowiskowego wnętrza obiektu. Efektywność energetyczna nie powinna być uzyskiwana kosztem odczuć mieszkańców i użytkowników. W artykule przedstawiono modele cząstkowe obejmujące komfort cieplny, jakość powietrza w pomieszczeniu, komfort akustyczny i oświetlenie dzienne. Model wykorzystano do oceny przykładowego budynku w standardzie NZEB. Wykazano wysoki poziom jakości środowiskowej tego budynku ze względu na wszystkie oceniane parametry. Przedstawiona propozycja modelu IEQ została opracowana, aby wspierać praktykę inżynierów jako wygodne narzędzie do oceny jakości środowiska wewnętrznego budynków obok oceny zapotrzebowania na ciepło.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Al Horr Y., Arif M., Katafygiotou M., Mazroei A., Kaushik A., Elsarrag E., Impact of indoor environmental quality on occupant well-being and comfort: A review of the literature, *Int. J. Sustain. Built Environ.*, tom 5, 1/2016, str. 1–11
- [2] Heerwagen J., Green buildings, organizational success and occupant productivity, *Build. Res. Inf.*, tom 28, 5–6/2000, str. 353–367
- [3] Al Horr Y., Arif M., Kaushik A., Mazroei A., Katafygiotou M., Elsarrag E., Occupant productivity and office indoor environment quality: A review of the literature, *Build. Environ.*, tom 105, 2016, str. 369–389
- [4] Geng Y., Ji W., Lin B., Zhu Y., The impact of thermal environment on occupant IEQ perception and productivity, *Build. Environ.*, tom 121, 2017
- [5] Piasecki M., Kostyrko K., Pykacz S., Indoor environmental quality assessment: Part 1: Choice of the indoor environmental quality sub-component models, *J. Build. Phys.*, tom 41 (3) 2017, str. 264–289
- [6] Frontczak M., Schiavon S., Goins J., Arens E., Zhang H., Wargocki P., Quantitative relationships between occupant satisfaction and satisfaction aspects of indoor environmental quality and building design, *Indoor Air*, tom 22, 2/2012, str. 119–131
- [7] Lee Y. S., Guerin D. A., Indoor Environmental Quality Related to Occupant Satisfaction and Performance in LEED-certified Buildings, *Indoor Built Environ.*, tom 18, 4/2009
- [8] Mihai T., Lordache V., Determining the Indoor Environment Quality for an Educational Building, in *Energy Procedia*, tom 85, 2016
- [9] Ncube M., Riffat S., Developing an indoor environment quality tool for assessment of mechanically ventilated office buildings in the UK – A preliminary study, *Build. Environ.*, tom 53, 2012
- [10] Sakellaris I. A. et al., Perceived indoor environment and occupants comfort in European Modern office buildings: The OFFICAIR Study, *Int. J. Environ. Res. Public Health*, tom 13, 5/2016
- [11] Sarbu I., Sebarchievici C., Aspects of indoor environmental quality assessment in buildings, *Energy and Buildings*, tom 60, 2013
- [12] Nimlyat P. S., Indoor environmental quality performance and occupants' satisfaction [IEQPOS] as assessment criteria for green healthcare building rating, *Build. Environ.*, tom 144, 2018, str. 598–610
- [13] Węglarz A., Pierzchalski M., Comparing construction technologies of single family housing with regard of minimizing embodied energy and embodied carbon, *E3S Web Conf.*, tom 49, 2018, str. 126
- [14] Kostyrko K. B., Wargocki P., Pomiary zapachów i odczuwalnej jakości powietrza w pomieszczeniach, *Monografia ITB*, 2012
- [15] Piasecki M., Fedorczak-Cisak M., Biskupski J., Furtak M., Experimental Confirmation of the Reliability of Fanger's Thermal Comfort Model – Case Study of a Near-Zero Energy Building (NZEB) Office Building, *Sustainability* 11 (9) 2019, str. 2461
- [16] Piasecki M., Kostyrko K. B., Indoor environmental quality assessment, part 2: Model reliability analysis, *J. Build. Phys.*, tom 5, 2018
- [17] Piasecki M., Kozicki M., Firląg S., Goljan A., Kostyrko K., The Approach of Including TVOCs Concentration in the Indoor Environmental Quality Model (IEQ) – Case Studies of BREEAM Certified Office Buildings, *Sustainability* 10 (11) 2018, str. 3902
- [18] Czarnecki L., Kaproń M., Budownictwo przyszłości = zrównoważone budownictwo, *Materiały Budowlane* 1/2012
- [19] Piasecki M., Kryteria oceny wyrobów i obiektów budowlanych pod kątem zgodności z wymaganiami zrównoważonego rozwoju, *Budownictwo, Technologie, Architektura* 2/2010
- [20] Runkiewicz L., Błaszczynski T., *Ekologia a budownictwo*, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, 2016

TARGI Nowy DOM Nowe MIESZKANIE

19-20 października

AmberExpo



**WSTĘP
WOLNY**