

METODA OKREŚLANIA DOPUSZCZALNEJ WILGOTNOŚCI W POMIESZCZENIU JAKO OCHRONA PRZED KONDENSACJĄ POWIERZCHNIOWĄ I MOŻLIWYM ROZWOJEM PLEŚNI

Aleksander STARAKIEWICZ, Lech LICHOLAŁAI, Przemysław MIĄSIK

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

Streszczenie: W pracy przedstawiono możliwości występowania kondensacji na powierzchni przegród budowlanych w zależności od parametrów mikroklimatu wewnętrznego i zewnętrznego oraz izolacyjności przegrody budowlanej. Wykonano obliczenia sprawdzania kondensacji powierzchniowej i rozwoju pleśni wg procedury PN-EN ISO 13788 – metoda I. Przedstawiono również metodę wyznaczania dopuszczalnej wilgotności względnej powietrza wewnętrznego $\varphi_{i,max}$ jako ochronę przed kondensacją powierzchniową i rozwojem pleśni – metoda II. Zaprezentowano wyniki obliczeń kondensacji powierzchniowej dwiema metodami, wskazując na identyczne okresy występowania lub jej brak. Metoda II jest alternatywą dla procedury normowej wg której, w przypadku wystąpienia kondensacji powierzchniowej należy zwiększyć izolacyjność cieplną przegrody. Metoda II pozwala obliczyć dopuszczalną wilgotność względną w pomieszczeniu $\varphi_{i,max}$ przy zachowaniu założeń normowych.

Słowa kluczowe: kondensacja powierzchniowa, rozwój pleśni, wilgotność względna powietrza wewnętrznego.

1. WPROWADZENIE

Kondensacja pary wodnej na powierzchni przegród budowlanych to jedno ze zjawisk fizycznych występujące w budynkach, głównie na wewnętrznej ich powierzchni. Przyczyną powstawania tego zjawiska jest wysoka wilgotność powietrza wewnętrznego (przekroczenie temperatury powierzchni przegrody przez temperaturę punktu rosy powietrza). Zjawisko to występujące w przeszłości bardzo sporadycznie, obecnie jest dość powszechne zarówno w budownictwie jednorodzinnych jak i zamieszkania zbiorowego. W dobie wznoszenia budynków o coraz wyższej izolacyjności cieplnej przegród zewnętrznych a tym samym wysokiej temperaturze ich

wewnętrznych powierzchni, zjawisko to jest tym bardziej niepokojące. Przyczyny występowania kondensacji powierzchniowej są wielorakie, począwszy od klimatu zewnętrznego, konstrukcji i geometrii przegrody, technologii wznoszenia, jakości wykonania, sposobu użytkowania (zabudowy), na mikroklimacie wewnętrznym kończąc. Środek ciężkości występowania tych przyczyn przesunięty jest głównie na mikroklimat wewnętrzny, technologię i jakość wykonania.

Zadaniem projektanta, jest zatem tak zaprojektować przegrodę budowlaną, aby w określonych warunkach klimatu zewnętrznego i mikroklimatu wewnętrznego oraz przyjętym zapasie normowym przegroda funkcjonowała poprawnie.

Na przestrzeni ostatnich dziesięcioleci zmieniało się podejście do projektowania przegród budynku pod kątem unikania kondensacji powierzchniowej jak i same wymagania określone w warunkach technicznych (WT). Budynki natomiast cały czas funkcjonują pomimo braku zaleceń eksploatacyjnych dla pomieszczeń i ich użytkowników po przeprowadzanych modernizacjach i termomodernizacjach przegród zewnętrznych.

W pracy podjęto próbę przedstawienia wpływu środowiska wewnętrznego na funkcjonowanie przegród budowlanych w określonych warunkach klimatu zewnętrznego w ciągu roku. Przedstawiono warunek normowy uniknięcia kondensacji powierzchniowej i rozwoju pleśni, określono zmiany wilgotności wewnętrznej φ_i , wilgotność początku kondensacji $\varphi_{i,kon}$ oraz przedstawiono algorytm, jak obliczyć dopuszczalną wilgotność w pomieszczeniu $\varphi_{i,max}$ przy zachowaniu warunku normowego uniknięcia kondensacji powierzchniowej i rozwoju pleśni.

2. PROJEKTOWANIE POD KĄTEM ROZWOJU PLEŚNI

Aby uniknąć rozwoju pleśni, wilgotność względna powierzchni nie powinna przekraczać wartości 0,8 ciśnienia rzeczywistego pary wodnej w pomieszczeniu przez kilka dni.

2.1. Procedura sprawdzania warunku uniknięcia kondensacji i rozwoju pleśni wg PN-EN ISO 13788 [1]

Dla każdego miesiąca w roku należy:

1. Zdefiniować temperaturę powietrza zewnętrznego (średnia miesięczna wartość wg najbliższej stacji meteorologicznej);
2. Zdefiniować wilgotność powietrza zewnętrznego – średnią miesięczną wartość ciśnienia pary wodnej lub wilgotności objętościowej można obliczyć ze średniej temperatury i wilgotności względnej, stosując równania:

$$\overline{p_e} = \overline{\varphi_e} \cdot p_{sat}(\overline{\Theta_e}) \quad (1)$$

$$\overline{v_e} = \overline{\varphi_e} \cdot v_{sat}(\overline{\Theta_e}) \quad (2)$$

3. Zdefiniować temperaturę powietrza wewnętrznego, zgodnie z przeznaczeniem budynku;
4. Obliczyć ciśnienie cząstkowe pary wodnej w pomieszczeniu na podstawie Δv lub Δp lub przyjmując wilgotność względną w klimatyzowanym pomieszczeniu jako stałą, uwzględniając poprawkę na margines bezpieczeństwa:

- a. Na podstawie klasy wilgotności wewnętrznej (Δp);

$$p_{i,PN} = p_e + \Delta p \cdot 1,1 \quad (3)$$

- b. Na podstawie wilgotności względnej w pomieszczeniu (φ_i);

$$p_{i,PN} = (\varphi_i + 0,05) \cdot p_{sat}(\Theta_i) \quad (4)$$

5. Obliczyć minimalne dopuszczalne ciśnienie pary nasyconej na powierzchni przegrody (odpowiadające temperaturze powierzchni, Θ_{si}). Przyjmuje się maksymalną dopuszczalną wilgotność względną na powierzchni $\varphi_{si}=0,8$.

$$p_{sat}(\Theta_{si}) = \frac{p_{i,PN}}{0,8} \quad (5)$$

6. Określić minimalną dopuszczalną temperaturę powierzchni przegrody $\Theta_{si,min}$ (na podstawie p_{sat}):

$$p_{sat} \rightarrow (PN) \rightarrow \Theta_{si,min}$$

7. Obliczyć minimalny dopuszczalny czynnik temperaturowy $f_{Rsi,min}$:

$$f_{Rsi,min} = \frac{\Theta_{si,min} - \Theta_e}{\Theta_i - \Theta_e} \quad (6)$$

8. Określić miesiąc krytyczny i $f_{Rsi,max}$ (Największa wartość $f_{Rsi,min}$ z 12 miesięcy jest $f_{Rsi,max}$).

9. Określić warunek projektowy:

$$f_{Rsi} > f_{Rsi,max} \quad (7)$$

$$f_{Rsi} = \frac{U^{-1} - R_{si}}{U^{-1}} = \frac{1 - R_{si}}{U} = \frac{R_T - R_{si}}{R_T} \quad (8)$$

10. Jeżeli warunek projektowy nie jest spełniony, należy obliczyć minimalną izolacyjność cieplną przegrody

$$f_{Rsi,max} = \frac{R_{T,min} - R_{si}}{R_{T,min}} \rightarrow R_{T,min} = \frac{R_{si}}{1 - f_{Rsi,max}} \quad (9)$$

lub maksymalną wartość współczynnika przenikania ciepła:

$$f_{Rsi,max} = \frac{1 - R_{si}}{\frac{1}{U_{max}}} \rightarrow U_{max} = \frac{1 - f_{Rsi,max}}{R_{si}} \quad (10)$$

2.2. Algorytm obliczania dopuszczalnej wilgotności w pomieszczeniu $\varphi_{i,max}$

Procedura sprawdzania kondensacji powierzchniowej sprowadza się do porównania dwóch czynników temperaturowych. Czynnika temperaturowego f_{Rsi} wynikającego z konstrukcji przegrody i czynnika $f_{Rsi,max}$ wynikającego z warunków wilgotnościowych panujących w pomieszczeniu. Jeżeli warunek projektowy nie jest spełniony należy, dla spełnienia tego warunku, obliczyć minimalną izolacyjność cieplną przegrody (równanie 9) lub maksymalną wartość współczynnika przenikania ciepła (równanie 10). Jest to procedura jednostronna, gdyż sprowadza się do zmiany (poprawienia) izolacyjności cieplnej przegrody. W przypadku występowania kondensacji powierzchniowej istotna jest również odpowiedź na pytanie: Jaka może być dopuszczalna wilgotność względna w pomieszczeniu $\varphi_{i,max}$ aby na powierzchni ściany nie dochodziło do kondensacji i zachowany był warunek normowy?

Rozważono sytuację gdy na powierzchni ściany rozpoczyna się (lub kończy) kondensacja. Można to zapisać następującym równaniem:

$$f_{Rsi} = f_{Rsi,min} = f_{Rsi,kon} \quad (11)$$

Czynnik temperaturowy f_{Rsi} przegrody określony jest wzorem:

$$f_{Rsi} = \frac{\Theta_{si} - \Theta_e}{\Theta_i - \Theta_e} \quad (12)$$

Przekształcając równanie (12) i uwzględniając równanie (11) można wyznaczyć temperaturę powierzchni przegrody, przy której rozpoczyna się proces kondensacji:

$$\Theta_{si} = f_{Rsi} (\Theta_i - \Theta_e) + \Theta_e = \Theta_{si,kon} = \Theta_{si,min} \quad (13)$$

Na podstawie obliczonej temperatury kondensacji (równej temperaturze przegrody) określono ciśnienie kondensacji $p_{i,kon}$ (równe ciśnieniu pary wodnej nasyconej odpowiadające temperaturze powierzchni przegrody) [2]:

$$\Theta_{si,kon} = \Theta_{si} \rightarrow (PN) \rightarrow p_{i,kon} = p_{sat}(\Theta_{si}) \quad (14)$$

Aby nie występowała kondensacja powierzchniowa, dopuszczalne ciśnienie w pomieszczeniu ($p_{i,PN}$) może stanowić 80% wartości ciśnienia określonego w formule (14):

$$p_{i,PN} = 0,8 \cdot p_{i,kon} \quad (15)$$

lub

$$p_{i,kon} = \frac{p_{i,PN}}{0,8} \quad (15a)$$

Zakładany przez PN zapas zawilgocenia ze względu na niejednorodność wilgotności powietrza w pomieszczeniu wynosi: 5% wilgotności względnej (φ_i) lub 10% przyrostu zawilgocenia (Δp).

Dopuszczalną wilgotność względną powietrza w pomieszczeniu ($\varphi_{i,max}$), dla przypadku 5% zapasu wilgoci, można określić z zależności analogicznej jak w równaniu (4):

$$p_{i,PN} = (\varphi_{i,max} + 0,05) \cdot p_{ni} \quad (16)$$

po przekształceniu:

$$\varphi_{i,max} = \frac{p_{i,PN} - 0,05 \cdot p_{ni}}{p_{ni}} \quad (17)$$

podstawiając za $p_{i,PN}$ równanie (15) można otrzymać:

$$\varphi_{i,max} = \frac{0,8 \cdot p_{i,kon} - 0,05 \cdot p_{ni}}{p_{ni}} \quad [-] \quad (18)$$

lub

$$\varphi_{i,max} = \left(\frac{0,8 \cdot p_{i,kon} - 0,05 \cdot p_{ni}}{p_{ni}} \right) \cdot 100\% \quad [\%] \quad (18a)$$

Natomiast dopuszczalną wilgotność względną powietrza w pomieszczeniu ($\varphi_{i,max}$), dla przypadku 10% zapasu przyrostu zawilgocenia, można określić z równania:

$$\varphi_{i,max} = \frac{p_{i,max}}{p_{ni}} = \frac{p_e + \Delta p_{max}}{p_{ni}} \quad (19)$$

Dopuszczalny przyrost zawilgocenia w pomieszczeniu Δp_{max} wyznacza się z równania (3),

$$p_{i,PN} = (p_e + I, I \cdot \Delta p_{max}) \quad (20)$$

podstawiając za $p_{i,PN}$ równanie (15) można otrzymać:

$$0,8 \cdot p_{i,kon} = (p_e + I, I \cdot \Delta p_{max}) \quad (21)$$

po przekształceniu:

$$\Delta p_{max} = \frac{0,8 \cdot p_{i,kon} - p_e}{1,1} \quad (22)$$

Ostateczną formułę na dopuszczalną wilgotność w pomieszczeniu ($\varphi_{i,max}$) można otrzymać po wstawieniu Δp_{max} danego równaniem (22) do równania (19):

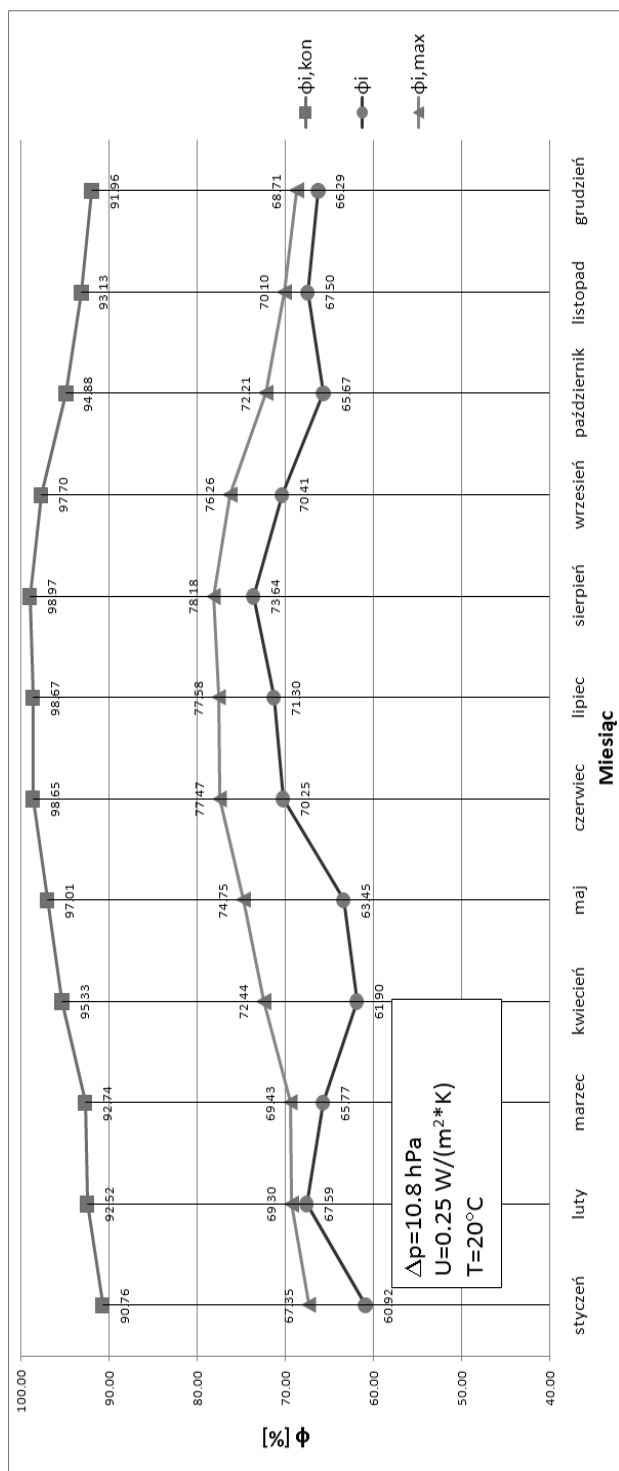
$$\varphi_{i,max} = \frac{p_e + \Delta p_{max}}{p_{ni}} = \frac{0,8 \cdot p_{i,kon} + 0,1 \cdot p_e}{1,1 \cdot p_{ni}} \quad (23)$$

lub

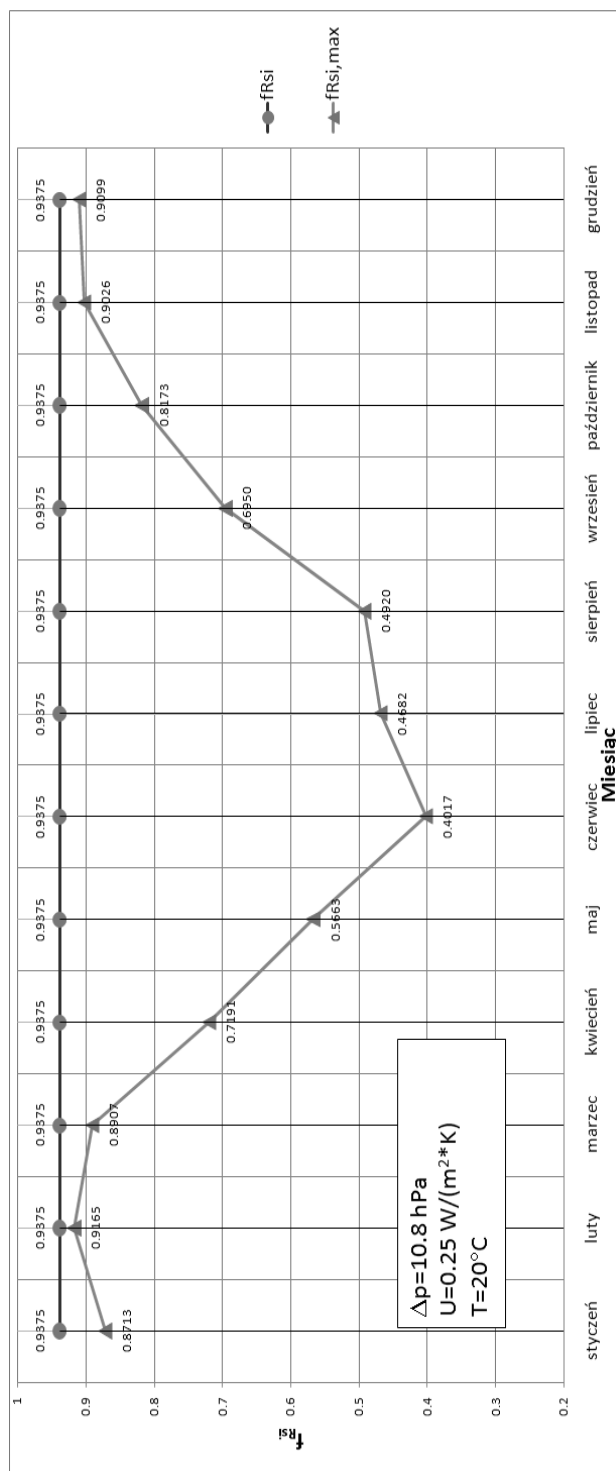
$$\varphi_{i,max} = \left(\frac{0,8 \cdot p_{i,kon} + 0,1 \cdot p_e}{1,1 \cdot p_{ni}} \right) \cdot 100\% \quad [\%] \quad (23a)$$

3. WYNIKI OBLICZEŃ KONDENSACJI POWIERZCHNIOWEJ I ROZWOJU PLEŚNI DLA PIĘCIU KLAS WILGOTNOŚCI WEWNĘTRZNEJ

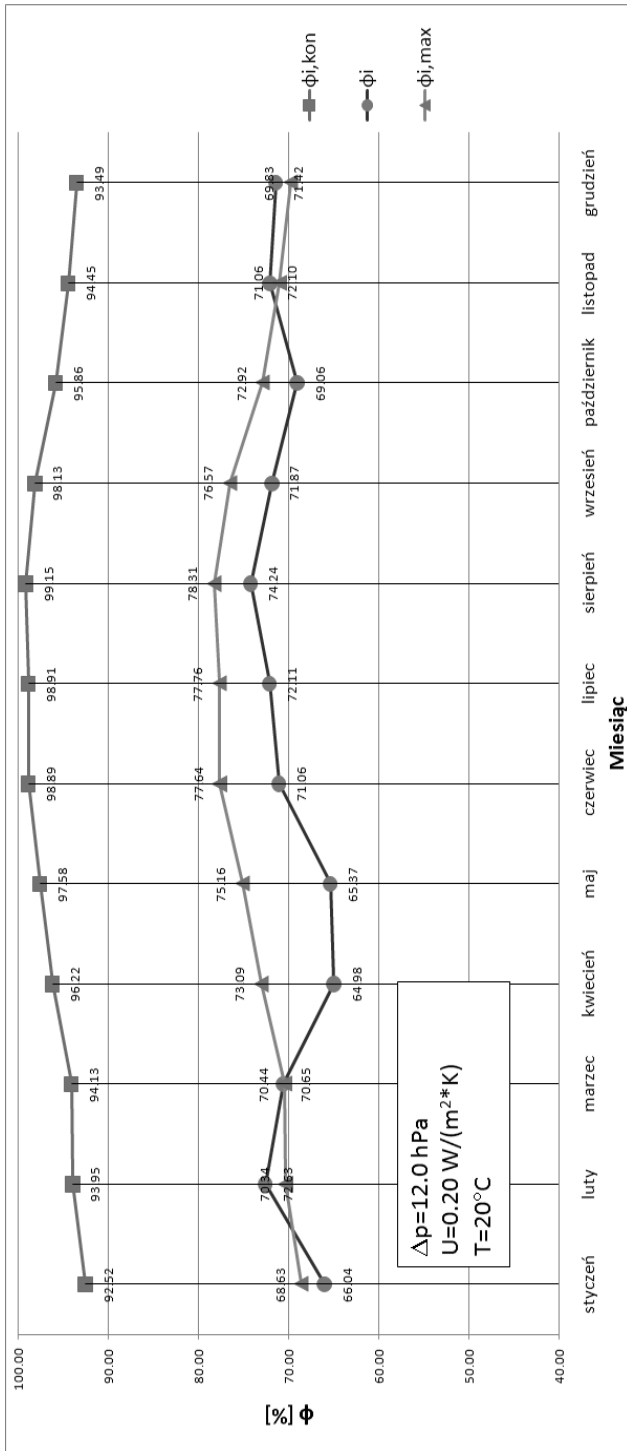
Do obliczeń przyjęto następujące założenia: dane klimatyczne dla stacji meteorologicznej Rzeszów-Jasionka [3], temperaturę powietrza wewnętrznego $T_i = 20^\circ\text{C}$, przyrost zawilgocenia w pomieszczeniu dla pięciu klas wilgotności wewnętrznej: $\Delta p_I = 2,7$ hPa; $\Delta p_{II} = 5,4$ hPa; $\Delta p_{III} = 8,1$ hPa; $\Delta p_{IV} = 10,8$ hPa; $\Delta p_V = 12,0$ hPa, współczynnik przenikania ciepła przegrody zewnętrznej U w przedziale od 0,10 - 1,40 W/(m²K) co 0,05 i co 0,2; opór przyjmowania ciepła na wewnętrznej powierzchni przegrody $R_{si} = 0,25$ m²K/W. Obliczenia wykonano dla dwunastu kolejnych miesięcy roku, dla każdego przypadku izolacyjności przegrody zewnętrznej (U) i przyjętych przyrostów zawilgocenia w pomieszczeniu (Δp). Obliczone czynniki temperaturowe przegrody f_{Rsi} porównano z czynnikami temperaturowymi charakteryzującymi mikroklimat wewnętrzny $f_{Rsi,min}$. Na tej podstawie dla każdego przypadku sprawdzono normowy warunek uniknięcia kondensacji powierzchniowej i rozwoju pleśni (wzór nr 7) obliczając $\Delta f_{Rsi} = f_{Rsi} - f_{Rsi,min}$. Dodatnia wartość Δf_{Rsi} oznacza spełnienie warunku projektowego (normowego) i brak kondensacji, natomiast ujemna wartość Δf_{Rsi} oznacza zagrożenie kondensacją powierzchniową i rozwojem pleśni. Wyniki obliczeń dla przyjętych założeń przedstawiono w tabeli 1. Równoległe obliczenia przeprowadzono dla zaprezentowanej metody określania dopuszczalnej wilgotności w pomieszczeniu $\varphi_{i,max}$. Sprawdzono warunek uniknięcia kondensacji powierzchniowej obliczając $\Delta \varphi_i = \varphi_{i,max} - \varphi_i$, gdzie podobnie, dodatnia wartość $\Delta \varphi_i$ oznacza spełnienie warunku normowego i brak kondensacji a ujemna wartość $\Delta \varphi_i$ oznacza zagrożenie kondensacją. Wybrane wyniki obliczeń wilgotności względnych powietrza φ_i , $\varphi_{i,max}$ i $\varphi_{i,kon}$ oraz czynników temperaturowych f_{Rsi} i $f_{Rsi,min}$ dla przyjętych założeń przedstawiono na rys. 1-4.



Rys. 1. Roczny przebieg wilgotności względnej powietrza w pomieszczeniu: $\phi_{i,kon}$, $\phi_{i,max}$ i ϕ_i przy braku kondensacji powierzchniowej dla $\Delta p=10,8$ hPa, $U=0,25$ W/(m²*K) i $T_i=20^\circ$ C.
 Fig. 1. The annual course of relative humidity in the room; $\phi_{i,kon}$, $\phi_{i,max}$ and ϕ_i in the absence of surface condensation for $\Delta p=10,8$ hPa, $U=0,25$ W/(m²*K) and $T_i=20^\circ$ C.

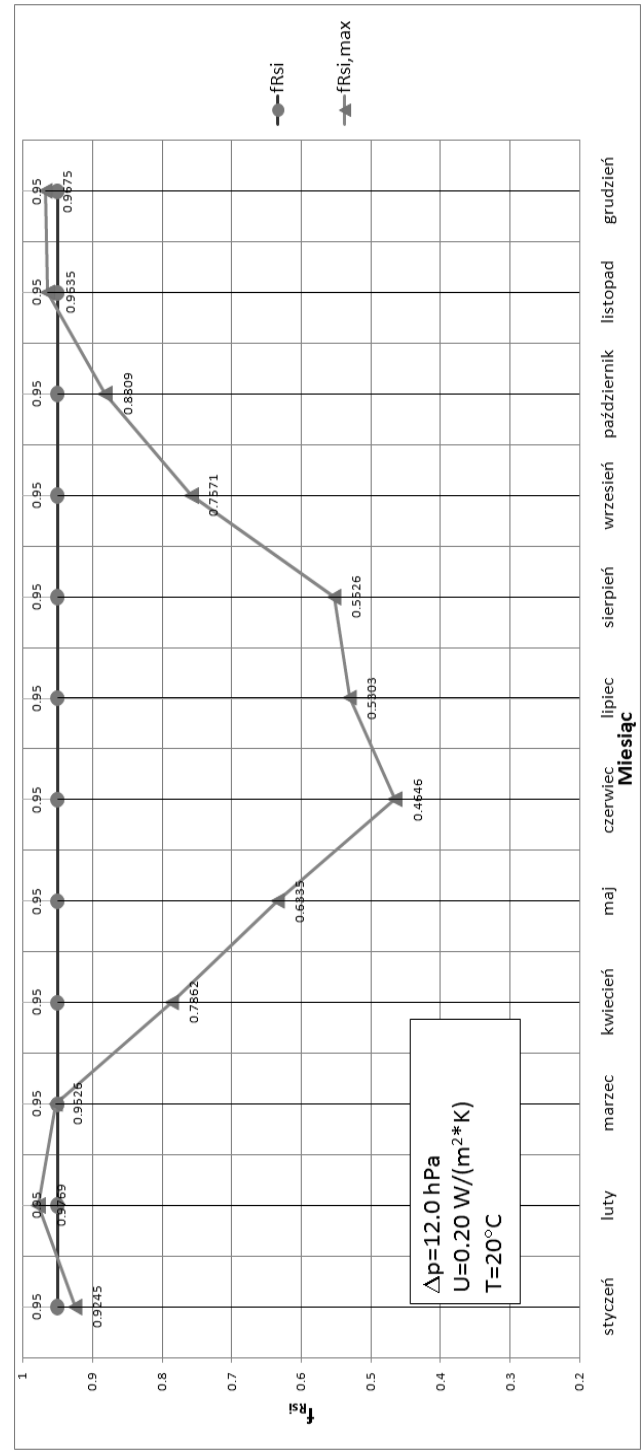


Rys. 2. Roczny przebieg czynników temperaturowych w pomieszczeniu: f_{Rsi} i $f_{Rsi,max}$ przy braku kondensacji powierzchniowej dla $\Delta p=10,8$ hPa, $U=0,25$ W/(m²*K) i $T_i=20^\circ$ C.
 Fig. 2. The annual course of temperature factors in the room: f_{Rsi} and $f_{Rsi,max}$ in the absence of surface condensation for $\Delta p=10,8$ hPa, $U=0,25$ W/(m²*K) and $T_i=20^\circ$ C.



Rys. 3. Roczny przebieg wilgotności względnej powietrza w pomieszczeniu: $\phi_{i,kon}$, $\phi_{i,max}$ i ϕ_i z kondensacją powierzchniową w lutym, listopadzie i grudniu dla $\Delta p=12,0$ hPa, $U=0,20$ W/(m²·K) i $T_i=20$ °C.

Fig. 3. The annual course of relative humidity in the room: $\phi_{i,kon}$, $\phi_{i,max}$ and ϕ_i with surface condensation in February, November and December for $\Delta p=12,0$ hPa, $U=0,20$ W/(m²·K) and $T_i=20$ °C.



Rys. 4. Roczny przebieg czynników temperaturowych w pomieszczeniu: f_{Rsi} i $f_{Rsi,min}$ z kondensacją powierzchniową w lutym, listopadzie i grudniu dla $\Delta p=12,0$ hPa, $U=0,20$ W/(m²·K) i $T_i=20$ °C.

Fig. 4. The annual course of temperature factors in the room: f_{Rsi} and $f_{Rsi,min}$ with surface condensation in February, November and December for $\Delta p=12,0$ hPa, $U=0,20$ W/(m²·K) and $T_i=20$ °C.

Tabela 1. Kondensacja powierzchniowa w zależności od izolacyjności przegrody U oraz poziomów zawilgocenia Δp w pomieszczeniu.

Table 1. Surface condensation depending on the barrier insulation U and moisture levels Δp in the room.

T		20°C									
		12 hPa		10.8 hPa		8.1 hPa		5.4 hPa		2.7 hPa	
U	Δp	0.9769		0.9165		0.7642		0.5865		0.3590	
	f _{RSI,max}	f _{RSI,max}	f _{RSI,max}	f _{RSI,max}	f _{RSI,max}	f _{RSI,max}	f _{RSI,max}	f _{RSI,max}	f _{RSI,max}	f _{RSI,max}	f _{RSI,max}
	f _{RSI}	miesiące kondensacji		miesiące kondensacji		miesiące kondensacji		miesiące kondensacji		miesiące kondensacji	
[W/m ² *K]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
1.40	0.6500	-0.3269	I-IV, IX-XII	-0.2665	I-IV, IX-XII	-0.1142	I-III, X-XII	0.0635	brak kond.	0.2910	brak kond.
1.20	0.7000	-0.2769	I-IV, IX-XII	-0.2165	I-IV, X-XII	-0.0642	I-III, XI-XII	0.1135	brak kond.	0.3410	brak kond.
1.00	0.7500	-0.2269	I-IV, IX-XII	-0.1665	I-III, X-XII	-0.0142	II, XI-XII	0.1635	brak kond.	0.3910	brak kond.
0.80	0.8000	-0.1769	I-III, X-XII	-0.1165	I-III, X-XII	0.0358	brak kond.	0.2135	brak kond.	0.4410	brak kond.
0.60	0.8500	-0.1269	I-III, X-XII	-0.0665	I-III, XI-XII	0.0858	brak kond.	0.2635	brak kond.	0.4910	brak kond.
0.40	0.9000	-0.0769	I-III, XI-XII	-0.0165	II, XI-XII	0.1358	brak kond.	0.3135	brak kond.	0.5410	brak kond.
0.30	0.9250	-0.0519	II-III, XI-XII	0.0085	brak kond.	0.1608	brak kond.	0.3385	brak kond.	0.5660	brak kond.
0.25	0.9375	-0.0394	II-III, XI-XII	0.0210	brak kond.	0.1733	brak kond.	0.3510	brak kond.	0.5785	brak kond.
0.20	0.9500	-0.0269	II-III, XI-XII	0.0335	brak kond.	0.1858	brak kond.	0.3635	brak kond.	0.5910	brak kond.
0.15	0.9625	-0.0144	II, XI-XII	0.0460	brak kond.	0.1983	brak kond.	0.3760	brak kond.	0.6035	brak kond.
0.10	0.9750	-0.0019	II	0.0585	brak kond.	0.2108	brak kond.	0.3885	brak kond.	0.6160	brak kond.

4. PODSUMOWANIE

Przedstawione wyniki obliczeń występowania kondensacji powierzchniowej, wykonane dwiema różnymi metodami, prowadzą do tych samych efektów finalnych. Efekt finalny, dotyczący występowania kondensacji powierzchniowej lub jej braku, występuje dla każdego rozpatrywanego przypadku w tym samym miesiącu. Można stwierdzić, że zaprezentowana metoda określania dopuszczalnej wilgotności względnej powietrza w pomieszczeniu ($\varphi_{i,max}$) powinna być alternatywą dla obowiązującej metody normowej. Zaprezentowana metoda daje użyteczne informacje eksploatacyjne o pomieszczeniu: występujący poziom wilgotności względnej (φ_i), wilgotność dopuszczalną ($\varphi_{i,max}$) oraz faktyczną wilgotność wystąpienia kondensacji powierzchniowej ($\varphi_{i,kon}$).

METHOD FOR DETERMINING THE PERMISSIBLE MOISTURE IN ROOM AS PROTECTION AGAINST SURFACE CONDENSATION AND DEVELOPMENT MOULD

Summary: The paper presents the possibility of the occurrence of condensation on the surface of the building envelope, depending on the microclimate parameters and the internal and external insulation of building insulation. Calculations were performed to check surface condensation and mold growth by procedures PN EN-ISO 13788 also presents a method for determining acceptable indoor air humidity $\varphi_{i,max}$ as protection against surface condensation and mold growth. The results of calculations of surface condensation of two methods, indicating the presence of identical periods or lack thereof. The method is an alternative to standardized procedures according to which, in the case of surface condensation should be enhanced thermal insulation baffles. This method allows to calculate the allowable humidity in $\varphi_{i,max}$ while maintaining principles of code.

Literatura

- [1] PN-EN ISO 13788:2003. *Cieplno-wilgotnościowe właściwości komponentów budowlanych i elementów budynku. Temperatura powierzchni wewnętrznej konieczna do uniknięcia krytycznej wilgotności powierzchni i kondensacja międzywarstwowa. Metoda obliczania.*
- [2] Starakiewicz A., Szalacha A. *Występowanie i zapobieganie grzybom pleśniowym na przegrodach budowlanych - rozważania na przykładzie lokalu mieszkalnego.* VIII Konferencja Fizyka Budowli w Teorii i Praktyce, Łódź 2001.
- [3] <http://www.mir.gov.pl/> Dane klimatyczne dla stacji meteorologicznej Rzeszów-Jasionka.