

Prawa strona równania jest sumą pochodnych cząstkowych:

✓ entropii fazy $\Rightarrow -S_i = \frac{\partial F_i}{\partial T_i}$

✓ ciśnienia działającego od strony fazy $\Rightarrow -p_i = \frac{\partial F_i}{\partial v_i}$

✓ chemicznego potencjału fazy $\Rightarrow \mu_i = \frac{\partial F_i}{\partial m_i}$

Przepływ ciepła od (bez wymiany masy) powoduje zmianę składowej „T”, a przeniesienie substancji fazy wywołane jest wpływem czynników, określających tzw. pełny potencjał termodynamiczny:

$$\theta_c = \frac{p_c}{\rho_c} + \sum \mu_c + \theta_g$$

$$dF_w = -S_w dT + \theta dm$$

Energia swobodna

Entropia właściwa materialu

Potencjał wspólny dla wszystkich faz

$$dF = -SdT + \theta dm$$

Wymiana ciepła

Wymiana wilgoci

Potencjał wilgoci to podstawowe pojęcie z omawianego zakresu. Jest on tzw. motorem przepływu wilgoci (podobnie jak temperatura jest „potencjałem” przepływu ciepła)

Wprowadzono skalę potencjałów wilgoci, przyjmując za podstawowy materiał – bibułę filtracyjną (ma ona w stanie suchym – 0W (stopni wilgoci)).

Przy przepływie wilgoci odbywa się jej pochłanianie i przewodzenie

Pochłanianie wilgoci określa się pojemnością wilgotnościową materiału (c_w):

$$c_w = \frac{\partial \mu}{\partial \Theta} \quad \text{Zależy od zawartości wilgoci } (\mu) \text{ i potencjału wilgotności } (\Theta) - \text{kg/kg } ^0W$$

Przewodzenie wilgoci przez materiał określa zależność:

$$\mathbf{g}_w = -\mathbf{b}_w \nabla \Theta \quad \text{Natężenie strumienia wilgoci jest zależne od współczynnika przewodności wilgoci } (b - \text{kg/m}^0Wh) \text{ i gradientu potencjału wilgotności } (\Theta - ^0W/m)$$

W praktyce badań ruchu wilgoci stosuje się zależność:

$$\mathbf{g}_w = -\mathbf{b}_h \rho_o \nabla W_w$$

b_h – współczynnik przewodzenia wilgoci, m^2/h , ρ_o – gęstość suchego materiału, kg/m^3

Dyfuzja pary wodnej

Ruch wilgoci w materiale budowlanym odbywa się pod wpływem gradientu ciśnienia cząstkowego pary wodnej (∇p), który jest w tym przypadku potencjałem wilgotności (warunek: sorpcja wilgoci przez materiał jest ściśle związana z tym materiałem oraz dla fazy ciekłej jest niezmienna)

Strumień wilgoci opisuje *prawo Fica*:

$$g_w = -\delta \frac{\partial p}{\partial x} \nabla p = -\delta \nabla p$$

δ - współczynnik paroprzewodności (g/mhPa), $\partial p / \partial x$ – spadek ciśnienia na jednostkę np. grubości przegrody (wzdłuż osi X)

Przy zmianach ciśnienia cząstkowego pary wodnej (wzrost) w porach materiału dochodzi do pochłaniania wilgoci (absorpcja) lub przy zmniejszaniu – wydzielania się wilgoci (desorpcja)

Przy założeniu równowagi potencjałów pary i wody, zmiana ciśnienia o Δp powoduje wzrost wilgotności o ΔW , a więc:

$$\Delta W = \kappa \Delta p \quad \kappa - \text{to parochłonność właściwa materiału}$$

W praktyce obliczeń procesów przepływu wilgoci i sprawdzania możliwości wykroplenia pary wodnej konieczne jest zdefiniowanie stosunku ciśnień cząstkowych (p_p) i nasycenia (p_s)

$$\varphi = \left(\frac{p_p}{p_s} \right)_{T = \text{idem.}} \quad 100\%$$

Przenikanie pary wodnej

Opisuje go jedna z postaci równania *Ficka*:

$$g_w = \frac{p_i - p_e}{H_c}, \quad \frac{g}{m^2 h}$$

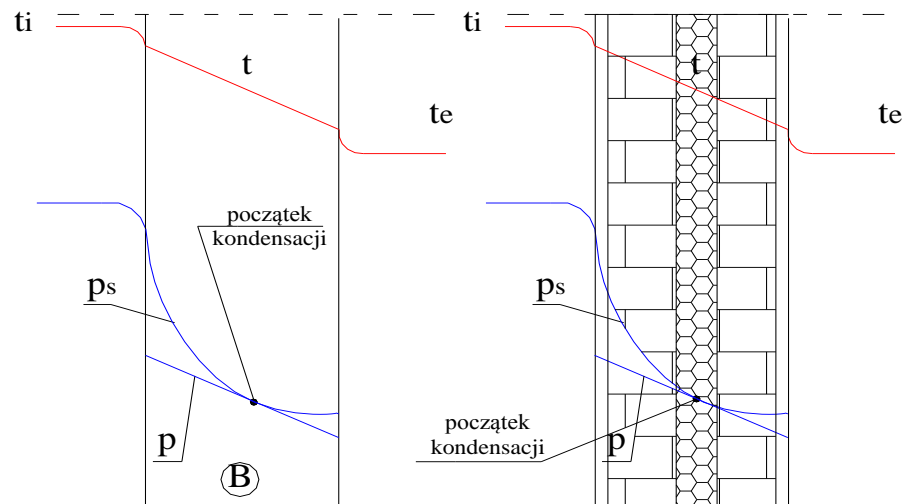
p_i, p_e – ciśnienia cząstkowe pary wodnej w powietrzu wewnętrznym i zewnętrznym, H_c – całkowity opór przenikania wilgoci dla przegrody, $Pahm^2/g$

$$H_c = \frac{1}{\beta_i} + \sum_{j=1}^n \frac{d_j}{\delta_j} + \frac{1}{\beta_e}$$

$\beta_i = 0,0385 \text{ g/mhPa}$ – współczynnik wnikania pary wodnej
 $\beta_e = 0,0769 \text{ g/mhPa}$ – współczynnik odpływu pary wodnej

W czasie przenikania pary wodnej przez przegrody może wystąpić jej kondensacja powodująca zawilgocenie przegród, a w konsekwencji pogorszenie ich izolacyjności cieplnej oraz zmniejszenie trwałości

W jednym z przekrojów przegrody może wystąpić równość obu ciśnień, co oznacza początek procesu kondensacji wilgoci. Temperatura zewnętrzna odpowiadająca takiemu stanowi nosi nazwę temperatury początku kondensacji



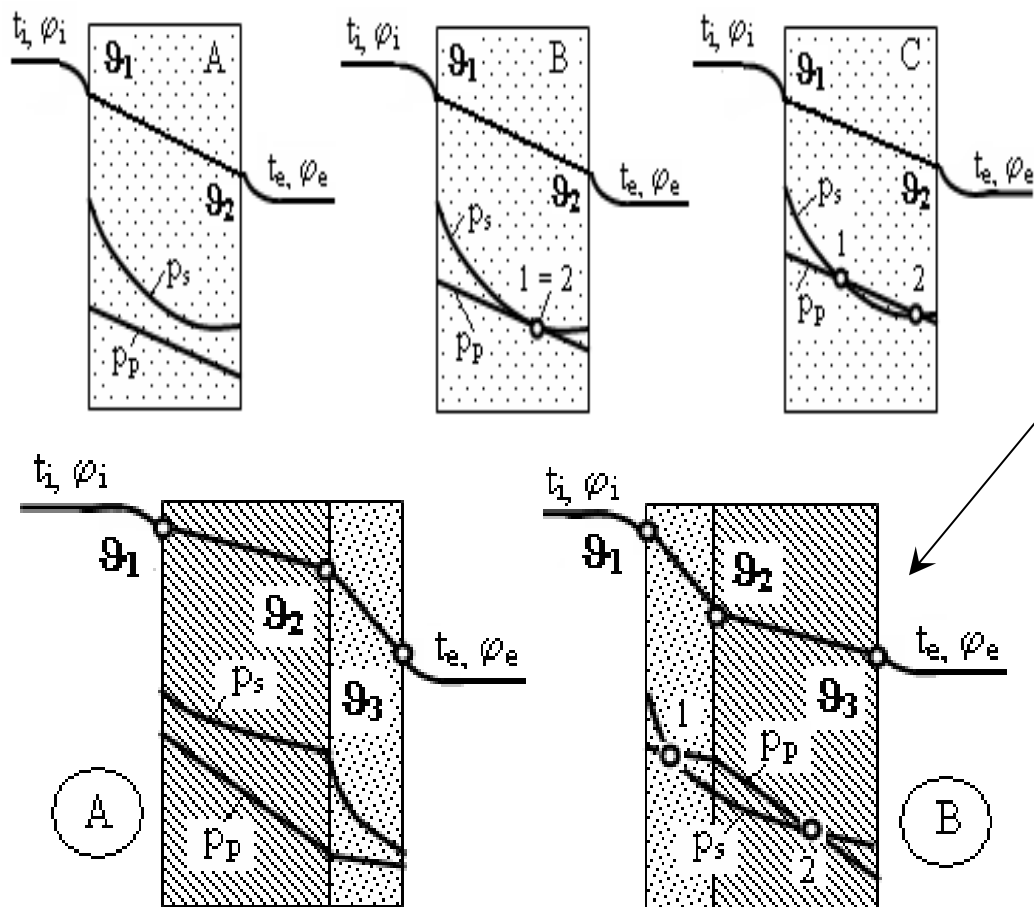
Współczynniki napływu i odpływu pary wodnej β_i oraz β_e jako małe w stosunku do oporów dyfuzyjnych warstw materiałowych są zazwyczaj w obliczeniach pomijane. Do oceny możliwości pojawienia się kondensacji w głębszej konieczna jest znajomość rozkładów temperatur oraz wartości ciśnień nasycenia i ciśnień cząstkowych. W tym miejscu należy podkreślić, że jedynie zmiana ciśnień cząstkowych ma charakter liniowy.

Określenie ciśnień nasycenia pary wodnej, wymaga dysponowania tylko wartościami temperatur, zaś dla ciśnień cząstkowych niezbędna jest znajomość drugiego parametru oprócz jego temperatury. Dotyczy to głównie przegród wielowarstwowych, dla których ciśnienia cząstkowe na granicach warstw oblicza się z prawa spadku ciśnień cząstkowych:

$$\frac{p_p^i - p_p^e}{H_w} = \frac{p_p^i - p_p^j}{H_w^j} \rightarrow p_p^j = p_p^i - \frac{H_w^j}{H_w} (p_p^i - p_p^e)$$

gdzie p_p^i oraz p_p^e to ciśnienia cząstkowe w środowisku wewnętrznym i zewnętrznym (Pa), p_p^j jest ciśnieniem cząstkowym na j-tej granicy warstw materiałowych (Pa), H_w to całkowity opór dyfuzyjny przegrody (m^2hPa/g), zaś H_w^j jest oporem dyfuzyjnym warstw położonych przed rozpatrywaną ich granicą począwszy od wnętrza (m^2hPa/g)

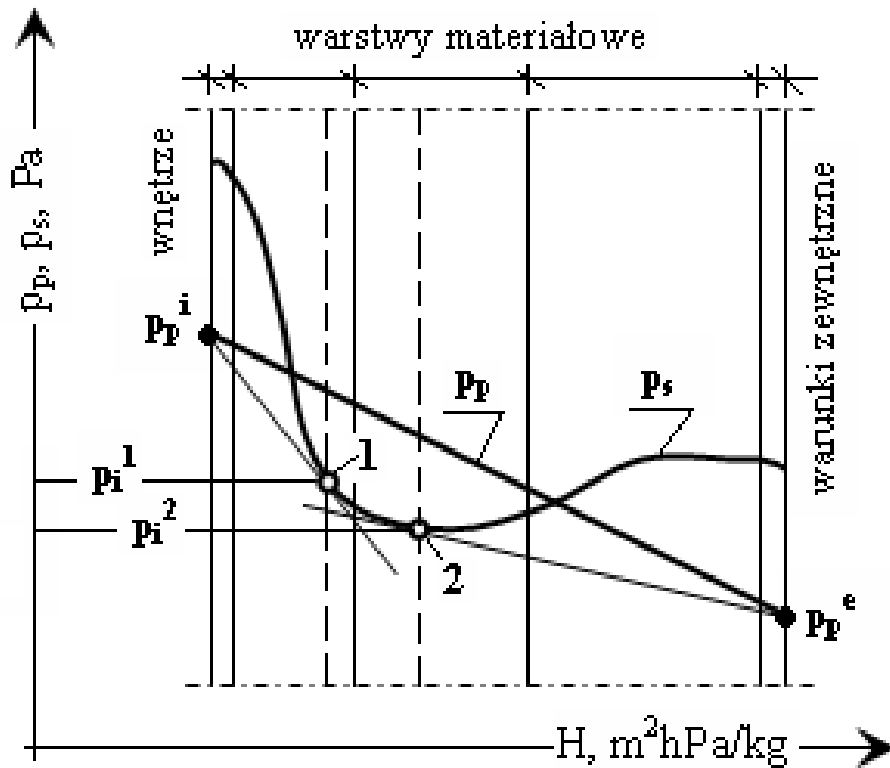
W czasie przenikania pary wodnej przez przegrody może wystąpić jej kondensacja powodująca zawilgocenie przegród, a w konsekwencji pogorszenie ich izolacyjności cieplnej oraz zmniejszenie trwałości. W jednym z przekrojów przegrody wystąpi równość obu ciśnień. Wystąpi zatem początek kondensacji. Temperatura zewnętrzna odpowiadająca takiemu stanowi nosi nazwę temperatury początku kondensacji



Warstwa izolacji cieplnej powinna być umieszczana po zewnętrznej stronie przegrody (przypadek A). W innym przypadku (B) może zachodzić kondensacja, której uniknąć można stosując **warstwę paroizolacji** od wewnętrznej części przegrody (**paroizolacja** jest warstwą przeciwdziałającą przenikaniu pary wodnej z pomieszczenia do zewnętrznych warstw przegrody, wykonywaną z tworzyw sztucznych, czasem pokrytych cienką warstwą aluminium); spełnia ona rolę *opóźniacza* przenikania pary, co zazwyczaj jest wystarczające, gdyż mała ilość pary ma zazwyczaj szansę wyparować przez dalsze warstwy przegrody)

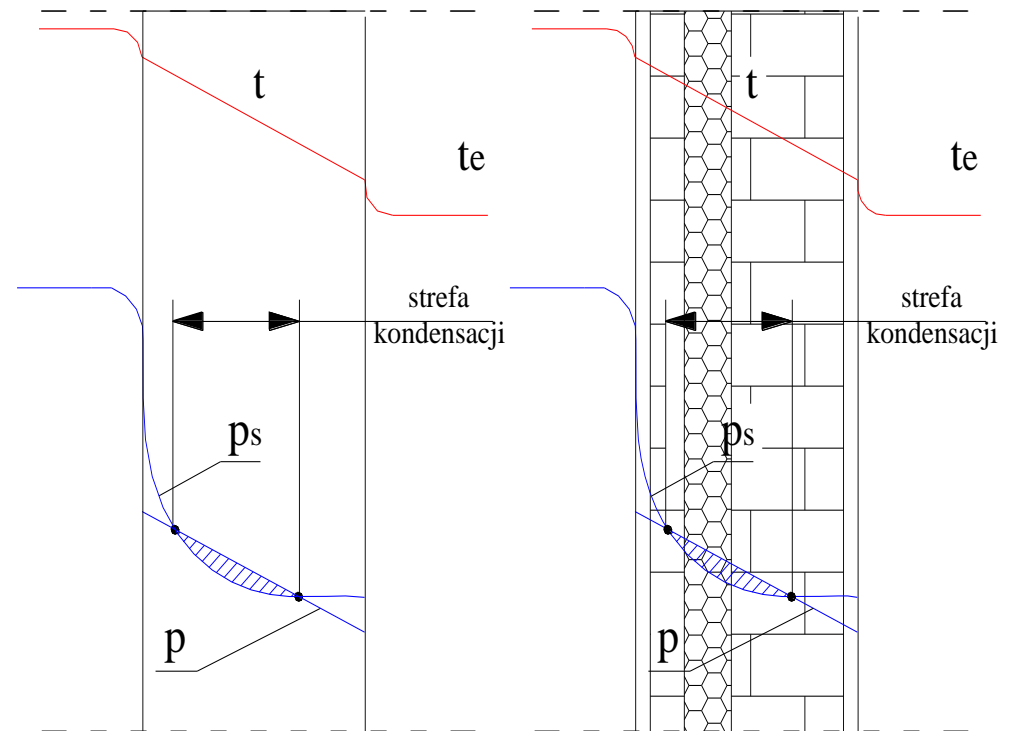
W przypadku stwierdzenia istnienia w przegrodzie przekrojów, w których $p_p > p_s$, możliwe jest obliczenie ilości dyfundującej pary wodnej. W tym celu przegrodę należy umieścić na wykresie, którego przykładem jest przykład z rysunków poniżej. Dla przegrody tej wykreślono linie ciśnień nasycenia i cząstkowych. Następnie przeprowadzając z punktów p_p^i oraz p_p^e styczne do linii ciśnień nasycenia, znajduje się punkty styczności (1 i 2 na rys.), które określają różnice ciśnień cząstkowych. Ilość dyfundującej pary wodnej wynosi:

$$g_w = \frac{p_p^i - p_i^1}{H_{i \rightarrow 1}} = \frac{p_i^2 - p_p^e}{H_{2 \rightarrow e}}$$



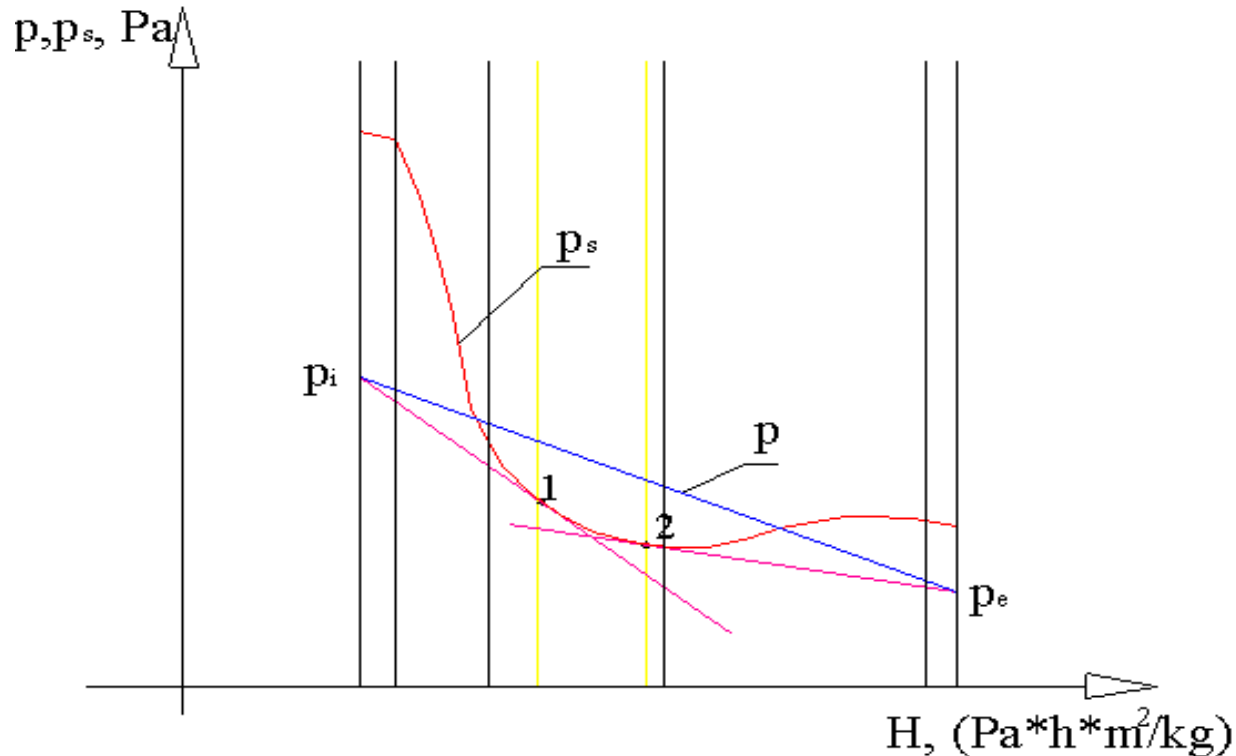
Przy pomocy tego typu wykresów można określać nie tylko różnice ciśnień cząstkowych konieczne dla obliczenia ilości dyfundującej pary wodnej, ale także sprawdzić przy jakiej wilgotności względnej powietrza w pomieszczeniu nie nastąpi kondensacja i jaka dodatkowa izolacja paroszczelna jest potrzebna, aby w danych warunkach zapobiec kondensacji

Wystąpienie w przegrodzie strefy kondensacji określonej jej przekrojami, w których ciśnienie pary wodnej są większe od ciśnień nasycenia.



Są różne metody określania ilości jak i samego faktu wykraplania się wilgoci w przegrodzie budowlanej. Wśród nich możemy wyróżnić metody: *Fokina*, *Gläsera*, *Andjurowiczi*, który rozwinął metodę Gläsera. Metoda Fokina i Gläsera są ze sobą powiązane, są oparte na tych samych zasadach obliczeniowych. Należy zaznaczyć że Gläser posługuje się w swoich obliczeniach nie współczynnikiem oporu dyfuzyjnego δ , lecz wskaźnikiem oporu dyfuzyjnego μ . Wartość μ podaje, ile razy opór dyfuzyjny danego materiału jest większy od oporu dyfuzyjnego warstwy powietrza tej samej grubości i tej samej temperaturze

W metodzie Glaser'a wszystkie potrzebne wartości znajduje się sposobem graficznym. Na osi odciętych zaznacza się przekrój przegrody, proporcjonalnie do oporów dyfuzyjnych danej przegrody, natomiast na osi rzędnych ciśnienie pary wodnej – cząstkowe i nasycenia. Wykres ciśnienia cząstkowego w takim układzie współrzędnych jest linią prostą. Linię ciśnień nasycenia tworzy się na podstawie znajomości, w poszczególnych punktach przekroju przegrody, wartości temperatur



Andjurowiczi rozwija teorię i metodę Glasera, zadając sobie pytanie: **Czy w czasie kiedy warunki klimatyczne nie sprzyjają wykraplaniu się wilgoci (okres letni), wilgoć nagromadzona w przegrodzie się odparuje z przegrody?** W przypadku niektórych przegród, fakt że przyrost wilgoci jest większy od dopuszczalnego, nie musi oznaczać dyskwalifikacji rozwiązania tej przegrody. Jeżeli kondensacja wilgoci następuje w porowatym materiale przegrody i wilgoć ta ma możliwość odpływu z przegrody w okresie, gdy temperatura powietrza zewnętrznego jest wyższa od temperatury początku kondensacji, przegrody takie można dopuścić do warunkowego zastosowania. **Warunkiem jest sprawdzenie, czy przegroda w danym okresie wyschnie**

1. Sporządzamy wykresy rozkładu temperatury i ciśnień pary wodnej w skali oporu dyfuzyjnego, analogicznie do rysunku podanego wyżej, dla temperatury $t_e = -5^\circ\text{C}$ i wilgotności względnej powietrza $\varphi_e = 85\%$

2. Wyznaczamy powierzchnie maksymalnej kondensacji PMK, w punkcie gdzie jest max. Różnica pomiędzy wykresami p_s i p_e

3. Określamy opór dyfuzyjny dla części przegrody licząc od wewnętrznej powierzchni do płaszczyzny PMK

4. Dla powierzchni PMK dla warunków: $t_e = 0^\circ\text{C}$ i $\varphi_e = 85\%$ obliczamy ciśnienia pary wodnej.

5. Jeżeli $p > p_s$ to obliczenia powtarzamy dla kolejnych parametrów powietrza zewnętrznego: $t_e = +5^\circ\text{C}$ i $\varphi_e = 85\%$

6. Jeżeli $p < p_s$ to obliczenia przerywamy i wyznaczamy taką temperaturę, dla której $p - p_s = 0$. Jest to tzw. temperatura początku kondensacji t_e'

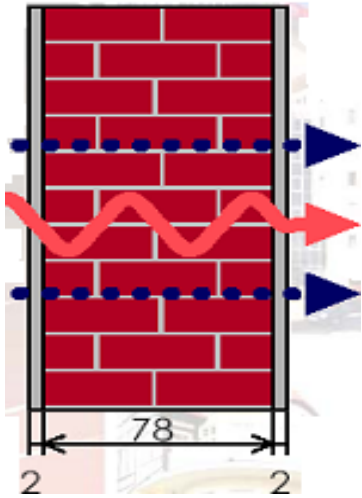
7. Wyznaczamy, korzystając z norm, liczbę dni o temperaturze równej lub niższej od t_e' oraz temperaturę średnią okresu kondensacji t_e''

8. Mając temperatury t_e' i t_e'' oraz odpowiadające im wartości ciśnienia nasycenia, obliczamy ilość wykraplającej się wilgoci ze wzoru, gdzie Z liczbą dni w których wykrapla się wilgoć:

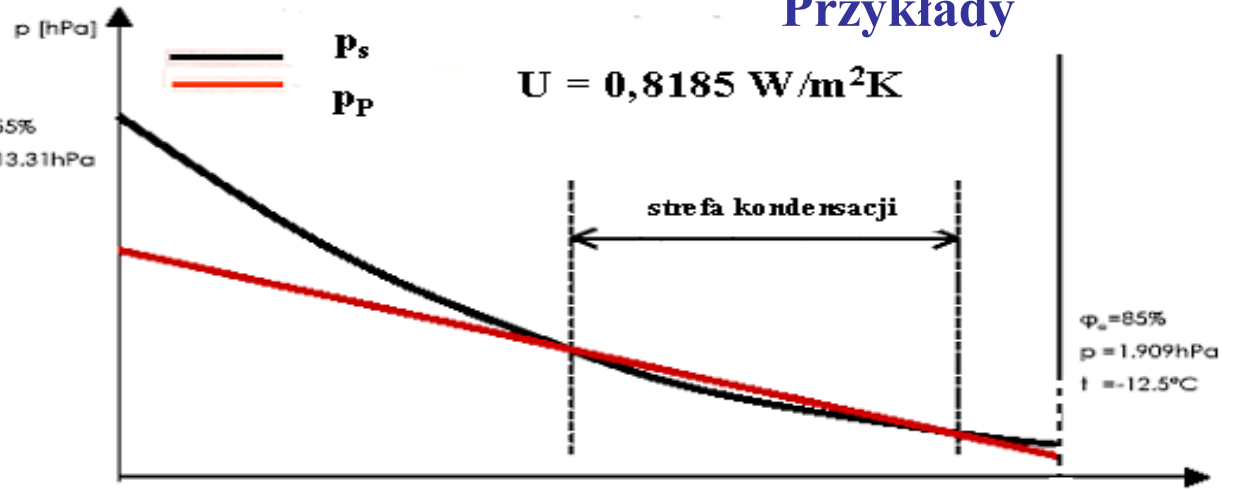
$$W = 24 \cdot Z \cdot \left(\frac{p_i - p_1}{H_{i-1}} - \frac{p_2 - p_e}{H_{2-e}} \right), \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

Ostatnim etapem jest obliczenie przyrostu wilgotności materiału ΔU , w którym nastąpiła kondensacja, pamiętając że jest on funkcją gęstości materiału, a następnie porównanie go z wartością maksymalną ΔU_{\max} , określoną normą. Jeżeli $\Delta U > \Delta U_{\max}$ to znak że przegroda się nie wysuszy, a gdy $\Delta U \leq \Delta U_{\max}$ to przegroda w czasie okresu letniego ulegnie osuszeniu

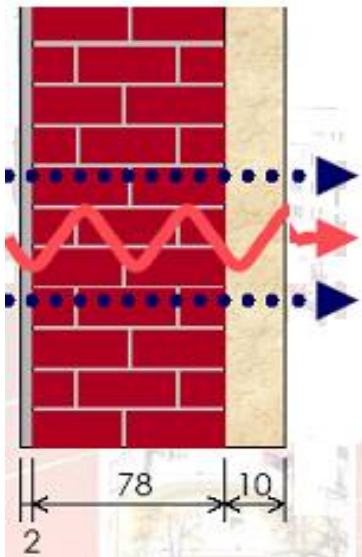
Przykłady



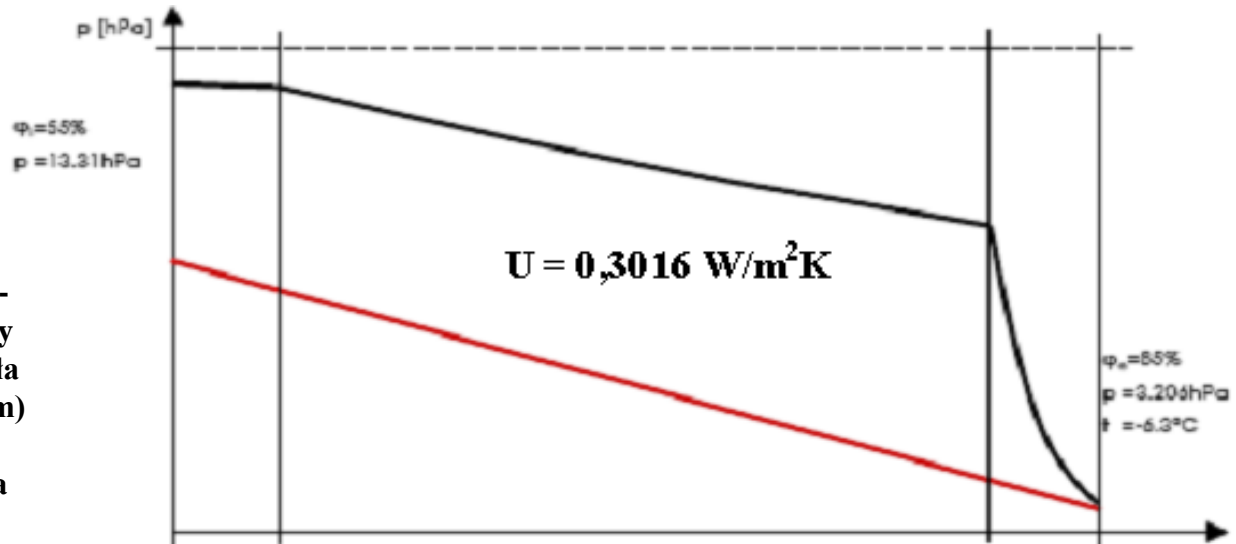
Tynki wapienno-cementowe i cegła pełna



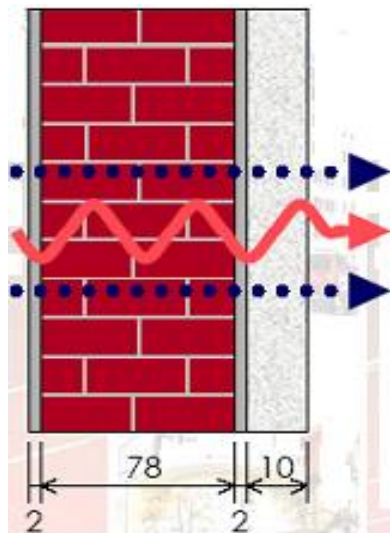
Kondensacja pary wodnej 8g (od temperatury $t_e = -9^{\circ}\text{C}$); zdolność odparowania 3667g



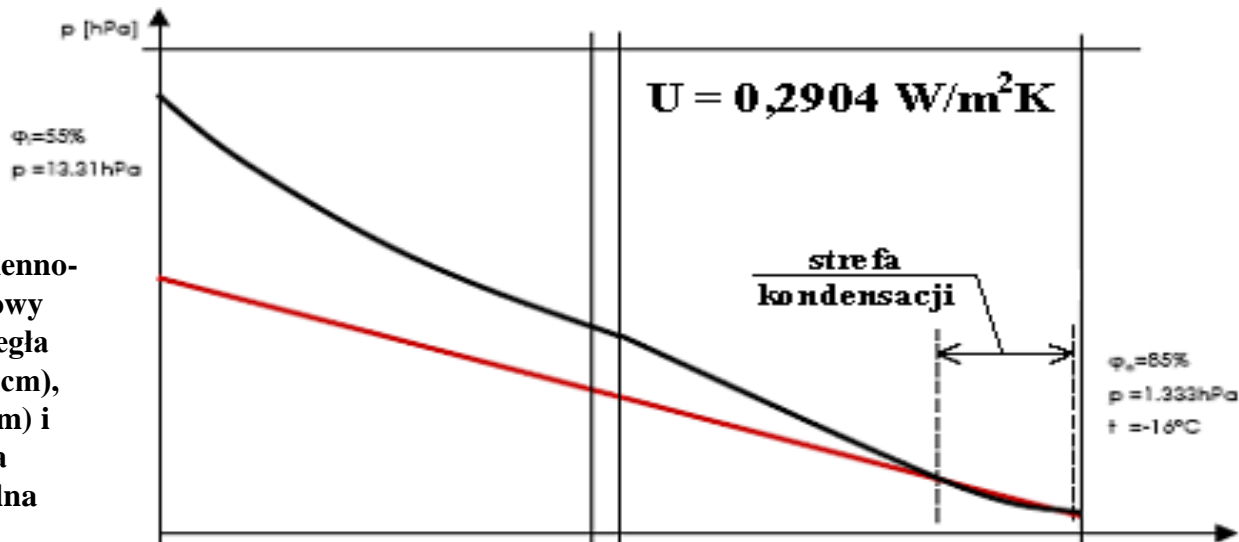
Tynk wapienno-cementowy (2cm), cegła pełna (78cm) i wełna mineralna



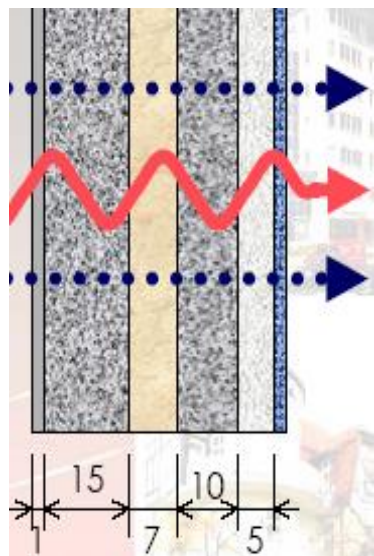
Nie ma miejsce wykroplenie pary wodnej (temperatura krytyczna $t_e = -16^{\circ}\text{C}$)



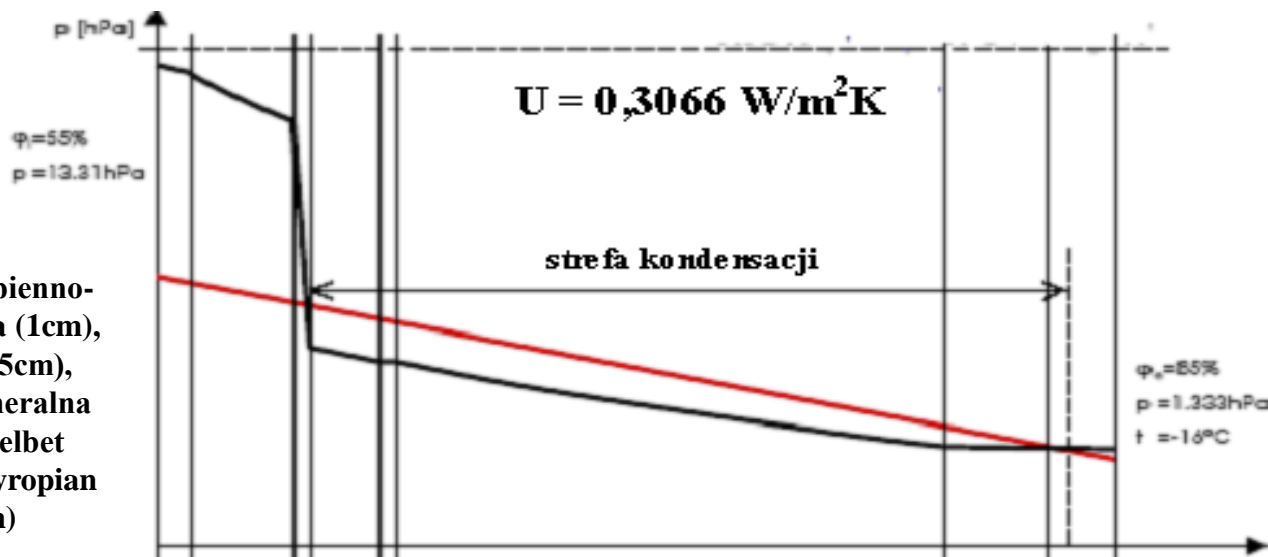
Tynk wapienno-cementowy (2cm), cegła pełna (78cm), tynk (2cm) i wełna mineralna



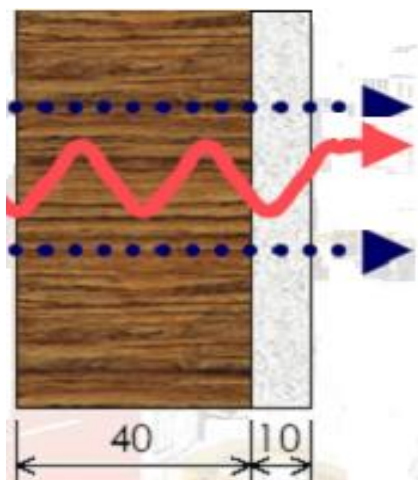
Niewielkie wykroplenie pary wodnej (temperatura krytyczna $t_e = -10^{\circ}\text{C}$)



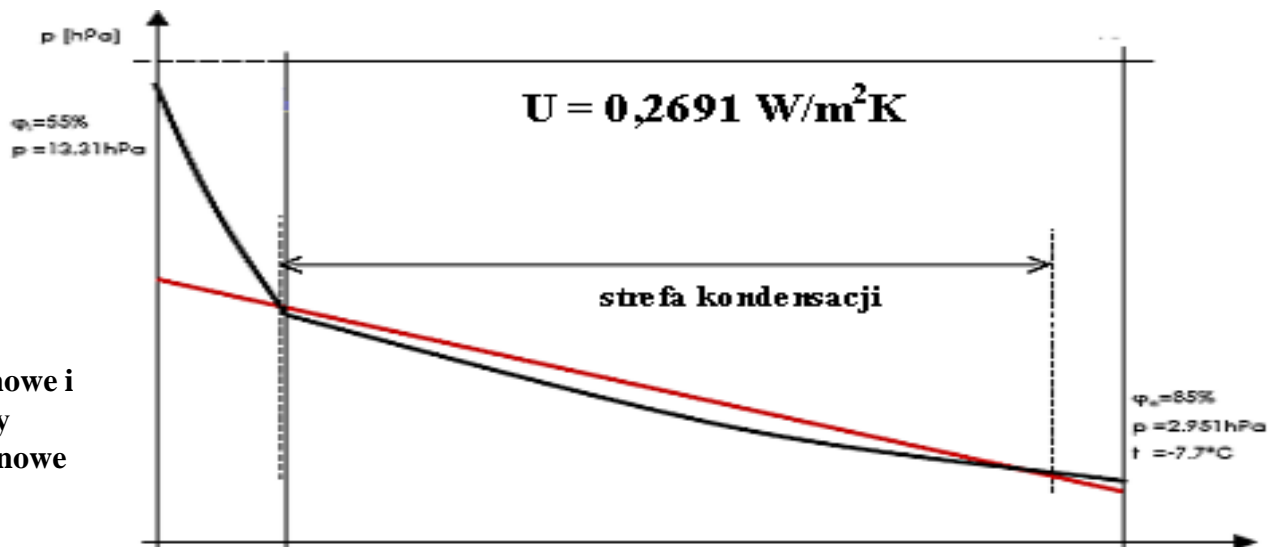
Gładź wapienno-cementowa (1cm), żelbet (15cm), wełna mineralna (7cm), żelbet (10cm), styropian (5cm)



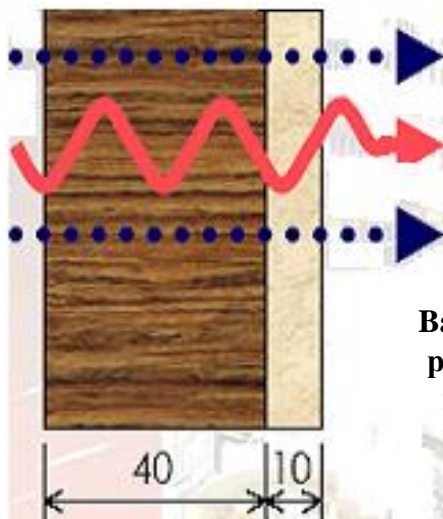
Kondensacja pary wodnej 666g (od temperatury $t_e = +3^{\circ}\text{C}$); zdolność odparowania 6619 g



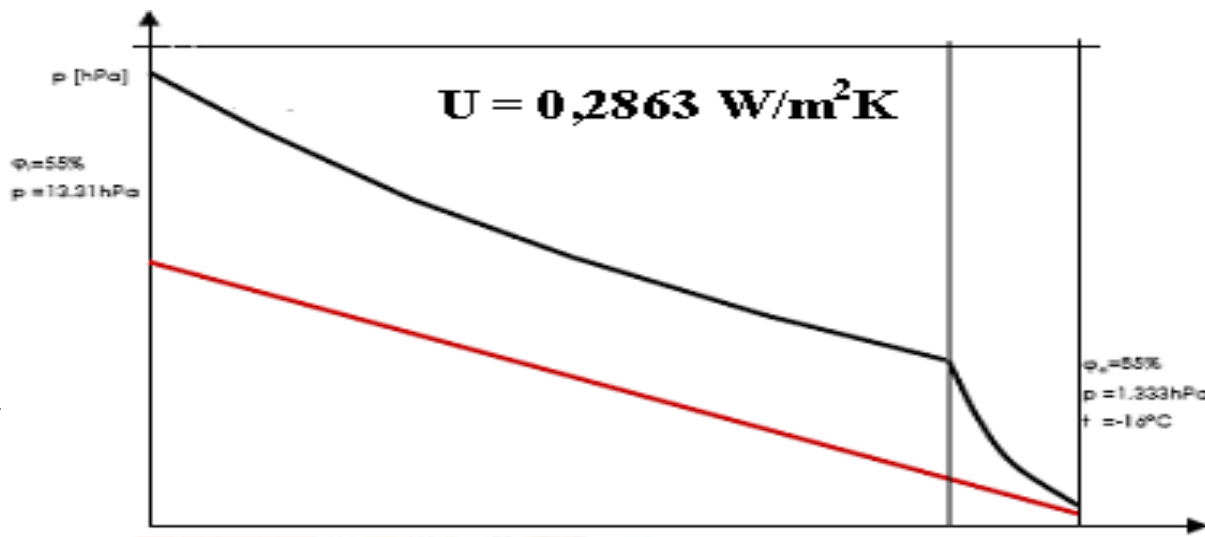
Bale sosnowe i
 płyty
 styropianowe



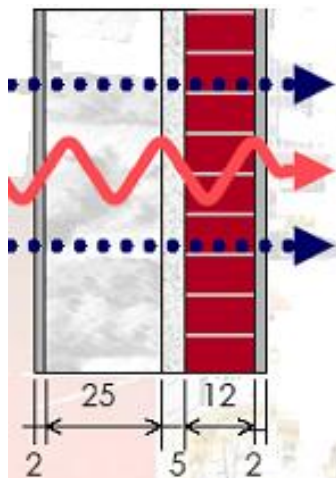
Kondensacja pary wodnej 48g (od temperatury $t_e = -4^{\circ}\text{C}$); zdolność odparowania 3831 g



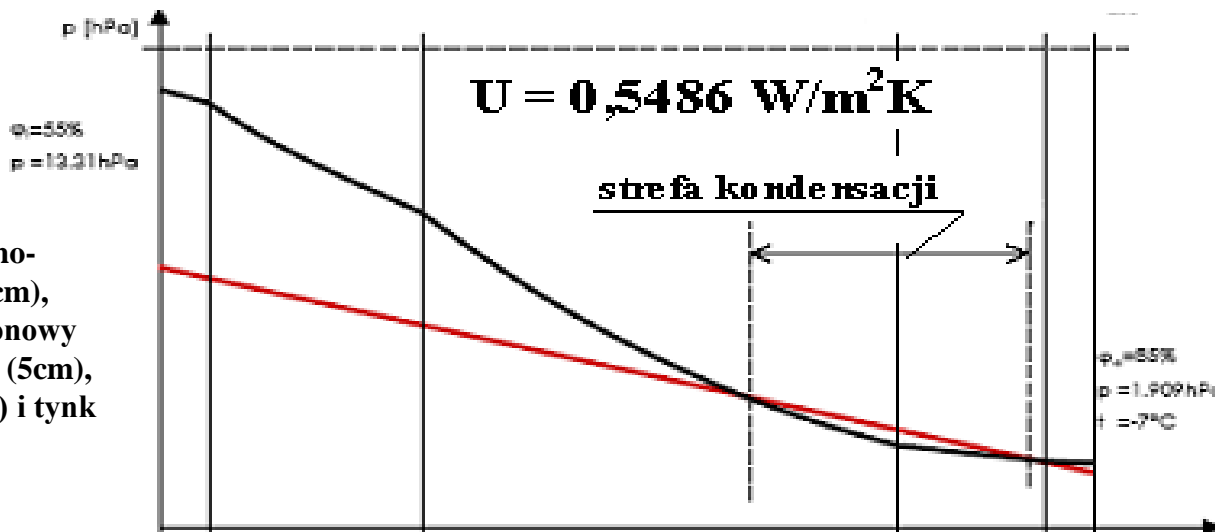
Bale sosnowe
 płyty z wełny
 mineralnej



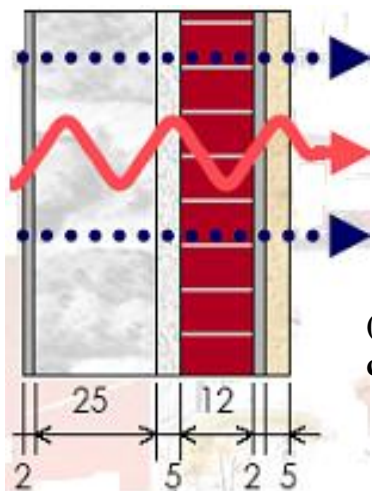
Nie ma miejsce wykroplenie pary wodnej (temperatura krytyczna $t_e = -16^{\circ}\text{C}$)



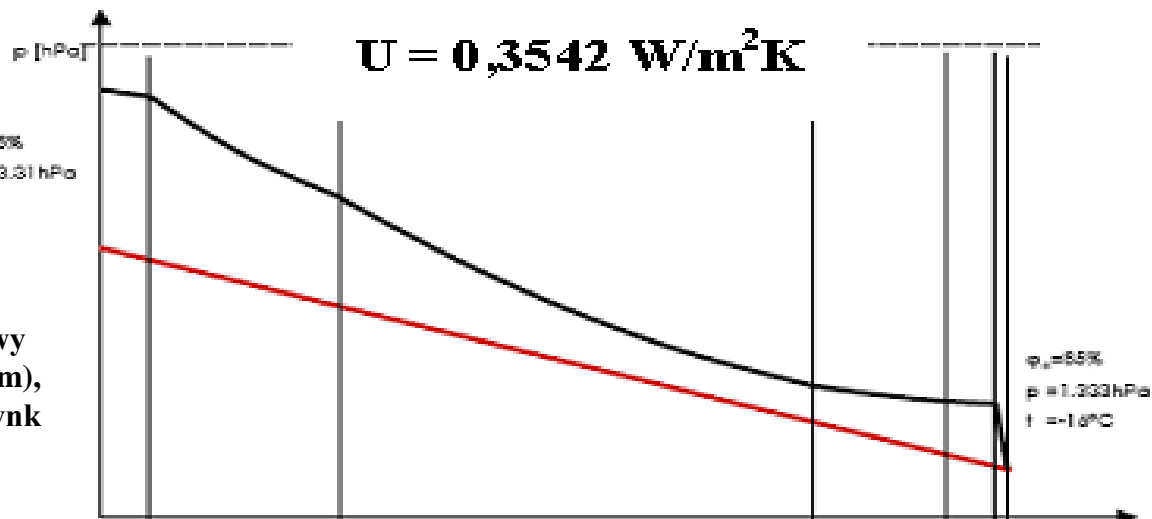
Tynk wapienno-cementowy (2cm), pustak żużłobetonowy (25cm), styropian (5cm), cegła pełna (12cm) i tynk jw. (2cm)



Kondensacja pary wodnej 45g (od temperatury $t_e = -3^{\circ}\text{C}$); zdolność odparowania 2557 g



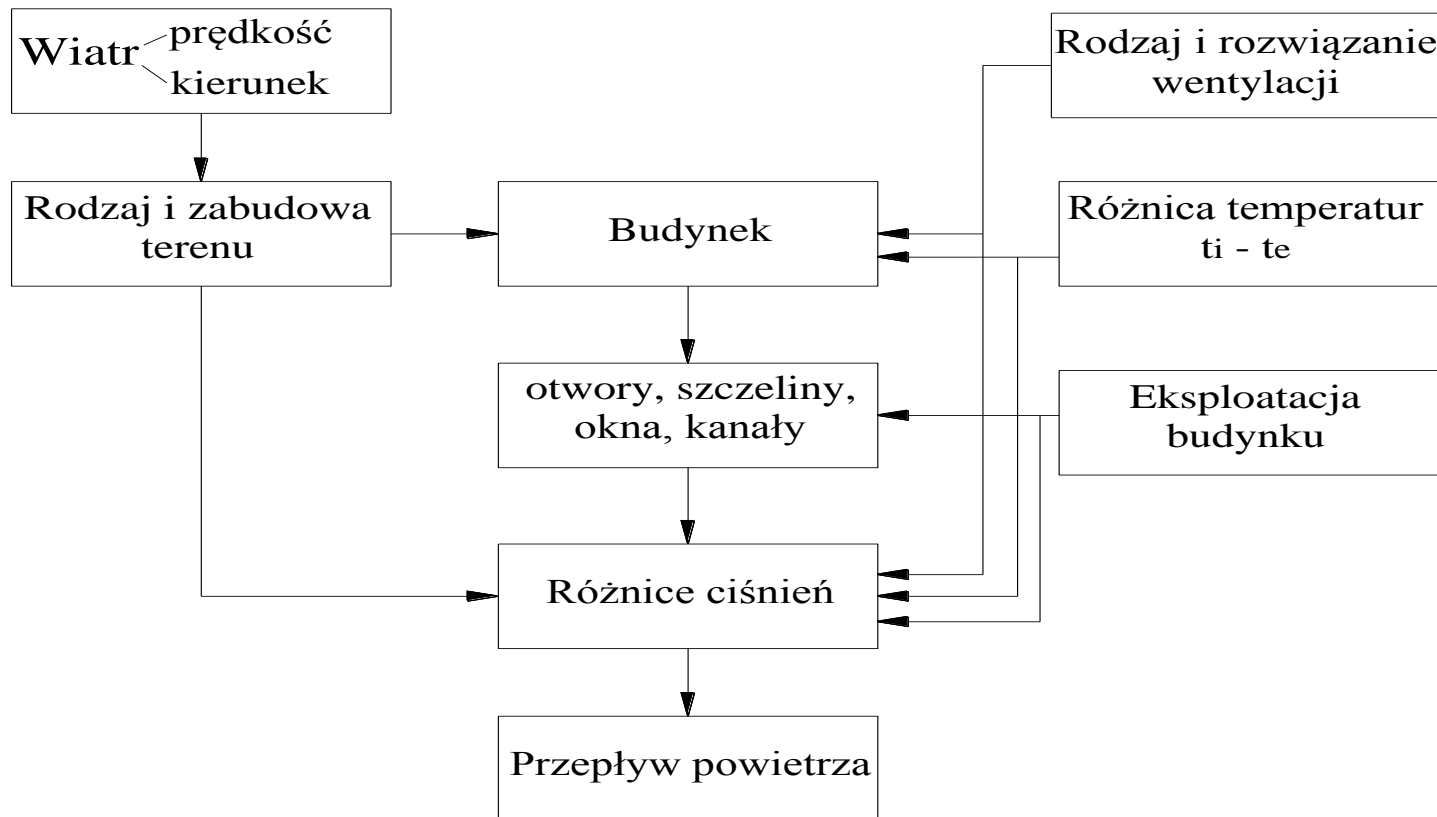
Tynk wapienno-cementowy (2cm), pustak żużłobetonowy (25cm), styropian (5cm), cegła pełna (12cm), tynk jw. (2cm) i wełna mineralna.



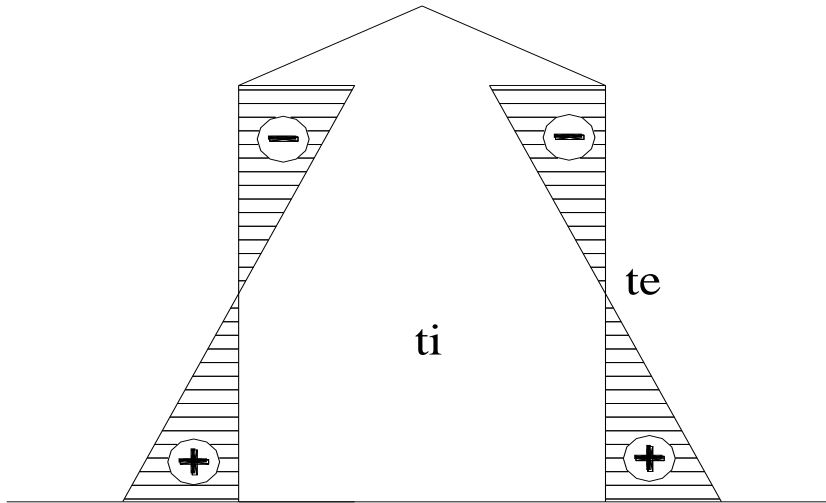
Brak kondensacji pary wodnej

Procesy przepływu (ruchu) powietrza

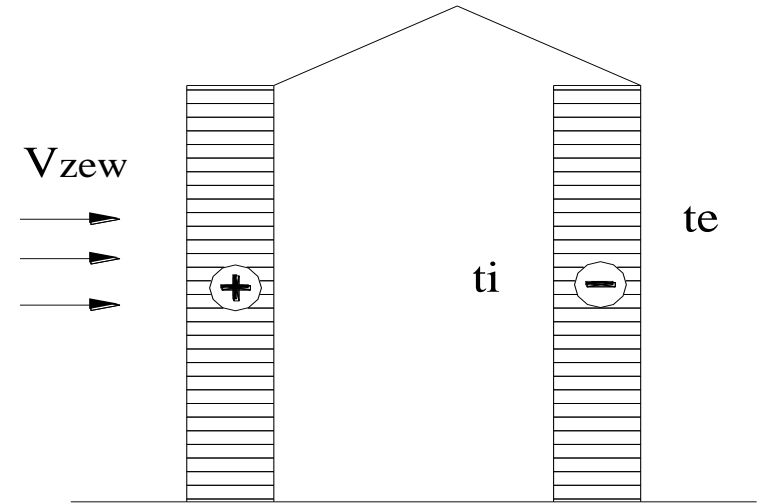
Pomiędzy pomieszczeniami a otoczeniem zewnętrznym istnieje ciągła wymiana powietrza, a dynamika tego procesu zależy nie tylko od sił naturalnych, ale i od pracy urządzeń wentylacyjnych



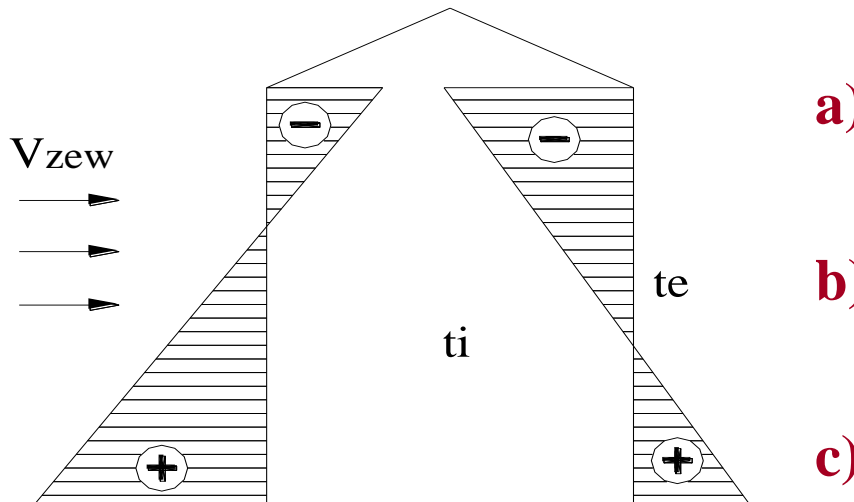
a) $t_i > t_e, V_{zew} = 0$



b) $t_i = t_e, V_{zew} > 0$



c) $t_i > t_e, V_{zew} > 0$



Rozkład różnicy ciśnień

- a) wywołanych różnicą temperatur,
- b) wywołanych działaniem wiatru,
- c) przy równoczesnym działaniu temperatury i wiatru

Jedną z charakterystycznych cech materiałów budowlanych jest przepuszczalność powietrza. Powietrze przenika przez większość tych materiałów. Ilości tego powietrza mogą mieć praktyczne znaczenie jedynie w przypadku materiałów porowatych, włóknistych lub sypkich, a także w złączach płyt ściennych, w miejscach osadzenia stolarki budowlanej w przegrodach oraz przez nieszczelności w stolarce. W zależności od temperatury i kierunku przepływu powietrza przez przegrody i nieszczelności, a także ilości tego powietrza, zmianie ulegać mogą temperatury w pomieszczeniach, a przede wszystkim - rozkłady temperatur w przegrodach, a co z tym jest związane, stan cieplno-wilgotnościowy warstw materiałowych w tych przegrodach

Podstawowe znaczenie dla określania gęstości strumienia powietrza przenikającego przez materiał budowlany (szczeliny) mają warunki ciśnieniowe. Opisuje to wzór *Darcy'ego*:

$$g_p = i \cdot \text{grad}(p)$$

Jednostkowa ilość powietrza przenikającego przez szczeliny w przegrodach jest więc uzależniona od gradientu ciśnień, a współczynnikiem proporcjonalności jest współczynnik „i” nazywany współczynnikiem filtracji lub przenikania powietrza

Przenikanie ciepła przez przegrody przepuszczalne dla powietrza

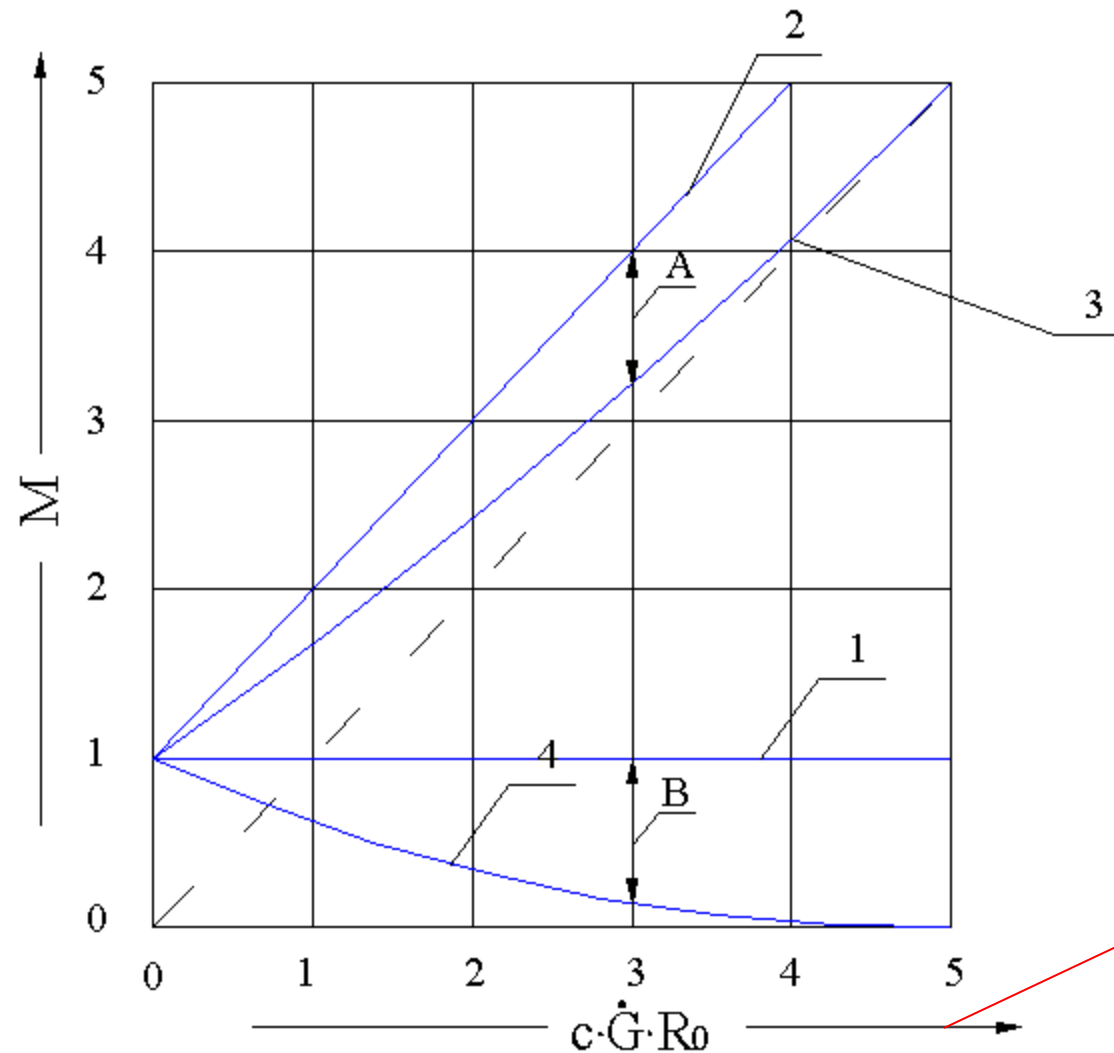
Przy filtracji powietrza pole temperatur oraz proces przejmowania ciepła na powierzchniach porowatej przegrody ulega znacznej zmianie. Wywołane jest to przeniesieniem przez strumień powietrza pewnej ilości ciepła. Natężenie przepływu powietrza przenikającego przez przegrodę jest niewielkie i zazwyczaj mniejsze od $10 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ powierzchni. Powietrze przez pory i kapilary przepływa z bardzo małymi prędkościami (przy liczbie *Reynoldsa* około 0,05) i jego temperatura we wszystkich przekrojach przegrody praktycznie biorąc równa jest temperaturze materiału przegrody. Okoliczność ta w znacznym stopniu upraszcza matematyczną analizę procesu przenikania ciepła przez przepuszczalną dla powietrza przegrodę

Jednoczesny przepływ ciepła i powietrza (materiał porowaty)

Podstawowym przykładem jest bilans cieplny elementarnej warstwy Δx położonej w odległości x od zewnętrznej powierzchni przegrody, przez którą powietrze zewnętrzne przenika (infiltruje lub eksfiltruje) w ilości G_p :

$$G_p = aA(|\Delta p|)^\alpha \cdot \text{sgn}(\Delta p) \quad (\text{kg}/(\text{s Pa}))$$

$$\frac{d^2 t}{dR^2} + c_p G \frac{dt}{dR} = 0 \quad \Rightarrow \quad t_x = t_e + (t_i - t_e) \cdot \frac{e^{c_p \cdot G \cdot R_x} - 1}{e^{c_p \cdot G \cdot R_0} - 1}$$



1. straty ciepła związane z jego przenikaniem
 2. Jw. lecz suma potrzeb wynikających z przenikania ciepła i ogrzewania powietrza infiltrującego.
 3. Jw. lecz infiltracja powietrza przez porowaty materiał.
 4. Jw. eksfiltracja powietrza przez porowaty materiał.
- M - współczynnik chłodzenia przegrody, będący stosunkiem ciepła napływającego na przegrodę przy występowaniu przenikania powietrza, do ciepła przy jego pominięciu.

➤ względny współczynnik wymiany ciepła towarzyszącej zjawisku infiltracji powietrza, który jest określony stosunkiem pojemności cieplnej strumienia powietrza do współczynnika przenikania ciepła

Wpływ przenikania powietrza na jednostkowe potrzeby ciepłe

- ❑ Linia nr 1 obrazuje nam zmianę przenikania powietrza zewnętrznego (zimnego),
- ❑ linia nr 2 – zmianę przenikania ciepła i powietrza,
- ❑ linia nr 3 – tylko przenikanie ciepła,
- ❑ linia nr 4 – zmianę przenikania powietrza wewnętrznego na zewnątrz (eksfiltracja).

Przedstawione zmienności, doskonale charakteryzują niektóre praktyczne możliwości wynikające z przenikania powietrza przez porowate materiały budowlane. Możliwości te są związane ze zmniejszeniem zapotrzebowania na ciepło, zarówno przy infiltracji jak i ekxfiltracji powietrza (obszary A i B na rysunku). Wraz ze wzrostem infiltracji współczynnik chłodzenia M szybko rośnie: dla $\kappa > 4$ straty ciepła są prawie całkowicie pokrywane ciepłem przenoszonym z powietrzem (podobnie dla ekxfiltracji przy $\kappa < 4$)

$$\chi = c_p GR_0$$

Przy infiltracji powietrza, strumień cieplny na wewnętrznej powierzchni przegrody osiąga wartość maksymalną. W miarę zbliżania się do powierzchni zewnętrznej wartość q ulega zmniejszeniu. Zjawisko to jest spowodowane odzyskiwaniem (częściowym zwrotem do pomieszczenia) tej części ciepła, która nagrzała powietrze zewnętrzne przepływające przez przegrodę naprzeciw strumienia ciepła.

Współczynnik chłodzenia ε równy jest stosunkowi napływającego na przegrodę strumienia ciepła q_{wew} przy występowaniu filtracji do strumienia ciepła q_0 braku filtracji powietrza:

$$\varepsilon = \frac{q_{wew}}{q_0} = \frac{c_p G^{c_p GR_0}}{e^{c_p GR_0} - 1} \cdot \frac{1}{R_0} = \frac{\chi e^\chi}{e^\chi - 1}$$

Przy dużych ilościach powietrza infiltrującego przez porowatą przegrodę straty ciepła w ujęciu konwencjonalnym nie będą występowały, gdyż niemal cała ilość ciepła przewodzonego przez przegrodę zostanie wykorzystana (przejęta) na ogrzewanie napływającego powietrza zewnętrznego. Istnieje więc możliwość wykorzystania efektu nagrzewania się powietrza w materiale porowatym przegrody i uwzględnienia go w analizie ekonomicznej wentylacji pomieszczeń

Zużycie ciepła można znacznie zmniejszyć, jeżeli zamiast zwykłego przewietrzania z podgrzewaniem powietrza zewnętrznego przyjąć, że przewietrzanie pomieszczenia będzie odbywać się przez zewnętrzną porowatą przegrodę

Przepływ ciepła przez przegrodę w strefie nieszczelnego połączenia elementów przegród

Typowym przykładem tego typu nieszczelności są złącza płyt ściennych (lub stropów). Przez szczelinę mogą przepływać znaczne ilości powietrza sięgające nawet $5 \text{ m}^3/\text{mh}$ przy $\Delta p = 1 \text{ daPa}$. Podobnie jak to występuje w materiale porowatym, powietrze to ogrzewa się od materiału szczeliny, jednak jego temperatury na wlocie do pomieszczenia jest z reguły znacznie niższa od temperatury na wewnętrznej powierzchni przegrody. Najistotniejsze znaczenie ma obniżenie temperatury na wewnętrznej powierzchni w pobliżu szczeliny. Jej obniżenie zależy głównie od ilości powietrza przepływającego przez nie oraz od materiału termoizolacyjnego zastosowanego w przegrodzie. Im większy jest opór cieplny przegrody (tzn. małe współczynniki przewodzenia λ przez termoizolację), tym bardziej oddziałuje infiltracja na obniżenie temperatury powierzchniowej w pobliżu szczeliny