

Rys. 2.5.-12 Przykładowy typowy rozkład wilgotności w materiale podczas procesu wysychania: 1_j, 1_d - po jednym tygodniu, 2_j, 2_d - po dwóch tygodniach (j - wysychanie jednostronne, d - wysychanie dwustronne).

W przegrodach niejednorodnych, rozkład wilgoci jest dużo bardziej skomplikowany i uzależniony od takich czynników, jak:

- stopień dostępu powietrza, jego prędkość, temperatura i wilgotność,
- rodzaj i własności materiałów,
- opory dyfuzyjne względem pary wodnej materiałów,
- wilgotność początkowa materiałów,
- rozkład temperatury w materiałach.

2.5.9. Dyfuzja pary wodnej w przegrodach

Powietrze jest mieszaniną wielu gazów, a jednym z nich jest para wodna. W zakresie spotykanych w budownictwie ciśnień i temperatur powietrza, można przyjąć, że każdy ze składników powietrza zachowuje się jak gaz doskonały - czyli spełnia prawo *Dalton'a*. Prawo to mówi, że każdy składnik gazowy mieszaniny zachowuje się tak, jakby sam zajmował całą jej objętość i wywiera przy tym swoje ciśnienie cząstkowe, których suma jest równa ciśnieniu całkowitemu mieszaniny (powietrza). Para wodna spełnia więc równanie *Clapeyron'a*:

$$p_p v_p = R_p T, \quad \text{m}^2/\text{s}^2 \quad (2.5.-39)$$

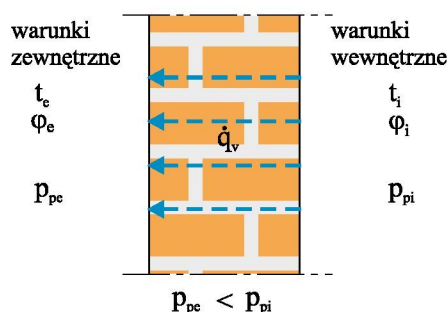
gdzie:

- p_p - ciśnienie cząstkowe pary wodnej w powietrzu, N/m²
- v_p - objętość właściwa pary wodnej, m³/kg
- R_p - stała gazowa pary wodnej, J/kgK
- T - temperatura bezwzględna powietrza, K

Mnożąc obustronnie to równanie przez masę pary wodnej m_p zawartej w objętości powietrza V , po przekształceniu, otrzymamy:

$$p_p = \frac{m_p R_p T}{V}, \quad \text{N/m}^2 \quad (2.5.-40)$$

Z równania tego widać, że jeśli wzrośnie zawartość masy pary wodnej m_p w powietrzu lub jeśli wzrośnie jego temperatura, to wzrośnie ciśnienie cząstkowe pary wodnej w powietrzu - i odwrotnie. Jeśli zatem, dwa ośrodki powietrza mające różne wartości ciśnienia cząstkowego pary wodnej (rysunek 2.5.-13) rozdzieli się przegrodą budowlaną przepuszczalną dla powietrza, to zgodnie z prawem *Dalton'a*, para wodna będzie przemieszczać się z ośrodka o wyższym ciśnieniu cząstkowym p_{pi} do ośrodka o ciśnieniu cząstkowym p_{pe} niższym. Proces taki będzie trwał tak długo, aż ciśnienia cząstkowe pary po obu stronach przegrody się wyrównają. Proces samoistnego



Rys. 2.5.-13 Przegroda budowlana rozdzielająca dwie strefy powietrza: wewnętrznego i zewnętrznego o różnych ciśnieniach cząstkowych pary wodnej.

przemieszczania się cząstek pary wodnej przez pory i kanaliki materiału - wywołanego różnicą ciśnień cząstkowych pary - nazywa się **dyfuzją pary wodnej**. Zjawisko to istnieje dzięki temu, iż droga swobodna cząstki pary wodnej zawartej w powietrzu (ok. $0,7 \times 10^{-5}$ cm) jest wyraźnie mniejsza niż większość średnic porów materiałów budowlanych (ponad 10^{-5} cm).

Dopóki w materiałach przegrody nie zajdzie zjawisko kondensacji kapilarnej i nie będzie jeszcze menisków wody w kapilarach (► p. 2.5.2.), dyfuzja pary wodnej odbywać się będzie w postaci gazowej - razem z powietrzem. Gęstość strumienia \dot{q}_v dyfundującej pary wodnej określić można - zgodnie z prawem dyfuzji *Fick'a* w stanie ustalonym - równaniem:

$$\dot{q}_v = -\frac{D}{R_p \cdot T} \cdot \text{grad } p_p, \quad \text{kg/m}^2\text{s} \quad (2.5.-41)$$

gdzie:

- D - współczynnik dyfuzji pary wodnej w powietrzu ($0,080 \text{ m}^2/\text{h}$)
- R_p - indywidualna stała gazowa pary wodnej ($461,9 \text{ J/kgK}$)
- T - temperatura bezwzględna materiału przegrody, K

Równanie to w roku 1954 zmodyfikował *Krischer* do postaci stosowanej obecnie:

$$\dot{q}_v = -\frac{D}{R_p \cdot T \cdot \mu} \cdot \text{grad } p_p, \quad \text{kg/m}^2\text{s} \quad (2.5.-42)$$

gdzie:

- μ - współczynnik oporu dyfuzji pary wodnej.

Współczynnik oporu dyfuzji pary wodnej μ jest to stosunek natężenia dyfuzji pary wodnej przez warstwę powietrza o grubości takiej samej jak warstwa materiału, do natężenia dyfuzji pary przez warstwę materiału. Często określany także jako stosunek oporu dyfuzji względem pary wodnej danej warstwy materiału, do oporu dyfuzji warstwy powietrza o tej samej grubości, co materiał i w tych samych warunkach fizycznych.

Równanie (2.5.-42) - przez analogię do równania *Fourier'a* - często występuje także w znanej postaci:

$$\dot{q}_v = -\delta \cdot \text{grad } p_p, \quad \text{kg/m}^2\text{s} \quad (2.5.-43)$$

gdzie:

- δ - **współczynnik przepuszczalności pary wodnej** - określony wzorem:

$$\delta = \frac{D}{R_p \cdot T \cdot \mu}, \quad \text{kg}/(\text{msPa}) \quad (2.5.-44)$$

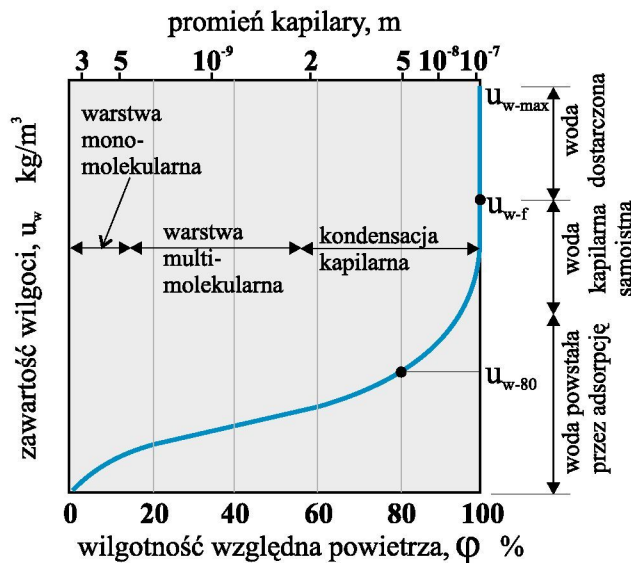
Równanie (2.5.-44) często wykorzystywane jest w praktyce projektowej, bowiem część produktów stosowanych w budownictwie, ma określane przez producentów współczynniki oporu dyfuzyjnego wobec pary wodnej μ , zaś część ma określane wartości współczynnika przepuszczalności pary wodnej δ . Zachodzi więc potrzeba określenia oporu dyfuzji μ mając znany współczynnik δ - lub odwrotnie.

Z równania (2.5.-43) wynika, iż gęstość strumienia dyfundującej pary wodnej \dot{q}_v przez przegrodę, jest wprost proporcjonalna do gradientu ciśnienia cząstkowego pary p_p oraz współczynnika przepuszczalności pary wodnej δ (paroprzepuszczalności). Z równania (2.5.-42) wynika ponadto, że im większa jest wartość współczynnika oporu dyfuzyjnego μ wobec pary wodnej, tym mniejsza jest gęstość strumienia dyfundującej pary wodnej \dot{q}_v przez przegrodę.

Z badań wynika, że wartość współczynnika przepuszczalności pary wodnej δ w zakresie wilgotności sorpcyjnej jest dla danego materiału stała - przy dodatniej temperaturze materiału. Jeżeli materiał osiągnie wilgotność ponad sorpcyjną, pojawia się w nim kondensacja pary wodnej tam zawartej. Skutkiem tego, gęstość strumienia dyfundującej wilgoci \dot{q}_v silnie wzrasta. W przypadku obniżenia temperatury materiału poniżej 0 °C, wartość \dot{q}_v kilkakrotnie spada [38]. Oznacza to, że równania prawa dyfuzji *Fick'a* mogą być stosowane wyłącznie w zakresie wilgotności sorpcyjnej. W zakresie wilgotności ponadsorpcyjnej (zmiana formy transportu wilgoci, gdy pojawia się kondensacja w kapilarach), stosować należy równania potencjału wilgoci (2.5.-13) lub (2.5.-13a).

Schemat powstawania wilgoci sorpcyjnej oraz ponadsorpcyjnej w materiałach porowatych przedstawia rysunek 2.5.-14 [25]. Przykładowe zmiany współczynnika dyfuzji wilgoci α_m od stopnia nasycenia wilgocią ω podczas sorpcji wilgoci dla niektórych materiałów budowlanych przedstawia rysunek 2.5.-15 [53]. Zmiany współczynnika oporu dyfuzyjnego μ wobec pary wodnej niektórych materiałów budowlanych wg [53] przedstawiają rysunki: 2.5.-16, 2.5.-17 oraz 2.5.-18.

Dopóki w materiałach przegrody j -warstwowej nie występuje zjawisko kondensacji pary wodnej, dopóty w warunkach ustalonych w czasie (stacjonarnych), gęstość strumienia dyfundującej pary wodnej \dot{q}_v przez przegrodę, oblicza się z przekształcenia równania (2.5.-43) do postaci:



Rys. 2.5.-14 Mechanizm tworzenia wilgoci sorpcyjnej i ponadsorpcyjnej w materiałach porowatych: - wilgotność maksymalna sorpcyjna, - wilgotność maksymalna ponadsorpcyjna (możliwa do wchłonięcia przez wolne pory nie wypełnione dotąd wodą). (wg [25] i [53])

$$\dot{q}_v = \frac{p_{pi} - p_{pe}}{\sum_{j=1}^{j=n} \left(\frac{d_j}{\delta_j} \right)}, \quad \text{kg/m}^2\text{s} \quad (2.5.-45)$$

gdzie:

- p_{pi} - ciśnienie cząstkowe pary wodnej w otoczeniu cieplejszym, Pa
- p_{pe} - ciśnienie cząstkowe pary wodnej w otoczeniu chłodniejszym, Pa
- d_j - grubość j -tej warstwy przegrody, m
- δ_j - współczynnik przepuszczalności pary wodnej przez j -tą warstwę, kg/(msPa)