

Teoria cieplna procesów odlewniczych

Ćw. laboratoryjne nr 5

Określanie stopnia zwilżania powietrza oraz entalpii właściwej powietrza wilgotnego

I. Wprowadzenie

Wilgotność bezwzględna powietrza ρ_p jest stosunkiem masy pary m_p do objętości V powietrza wilgotnego

$$\rho_p = \frac{m_p}{V} \quad [\text{kg} / \text{m}^3] \quad (2)$$

m_p - masa pary wodnej, kg,

ρ_p - gęstość pary wodnej, kg / m^3

V - objętość powietrza wilgotnego, m^3 .

Wilgotność względna powietrza wilgotnego φ jest stosunkiem wilgotności bezwzględnej ρ_p do maksymalnej wilgotności bezwzględnej ρ_p'' dla tej samej temperatury. Może być również określona jako stosunek ciśnienia składnikowego pary p_p do jej ciśnienia maksymalnego p_p'' w tej samej temperaturze

$$\varphi = \left(\frac{\rho_p}{\rho_p''} \right) = \left(\frac{p_p}{p_p''} \right) \quad (3)$$

φ - wilgotność względna (ułamek jednościi),

ρ_p - rzeczywista gęstość pary wodnej w powietrzu,

p_p'' - ciśnienie pary suchej nasyconej.

W termodynamice przyjęto umownie, że wskaźnikiem " (bis) oznacza się stany (parametry) odnoszące się do pary suchej nasyconej.

Wartości ρ_p'' jako funkcji temperatury, podane są w literaturze w tablicach opisujących własności nasyconego powietrza wilgotnego (np. Zagórski – Zarys techniki cieplnej, s. 415).

Zawartość wilgoci (stopień wilgoci) X jest stosunkiem masy pary wodnej m_p do ilości powietrza suchego m_g

$$X = \frac{m_p}{m_g} = \frac{\rho_p V}{\rho_{gs} V} = \frac{\rho_p}{\rho_{gs}} \quad \left[\frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg gs}} \right] \quad (4)$$

m_p - masa pary wodnej,

m_g - masa powietrza suchego.

Parametr X zwany jest również stopniem zwilżenie gazu.

Z równania stanu gazu mamy:

$$\frac{\rho_p}{\rho_{gs}} = \frac{p_p}{R_p T} \frac{R_{gs} T}{p_{gs}} = \frac{R_{gs}}{R_p} \frac{p_p}{p_{gs}} \quad (5)$$

W przypadku wilgotnego powietrza otrzymamy

$$X = \frac{R_{gs}}{R_p} \frac{p_p}{p_{gs}} = \frac{287}{461.9} \frac{p_p}{p_{gs}} \approx 0.622 \frac{p_p}{p_{gs}} \quad (6)$$

R_{gs} - stała gazowa powietrza suchego, J/(kg · K),

R_p - stała gazowa (indywidualna) pary wodnej, J/(kg · K).

Wykorzystując **prawo Daltona**

$$p_{gs} = p_b - p_p \quad (7)$$

oraz wzór definicyjny na wilgotność względną w postaci

$$p_p = \varphi p_{gs} \quad (8)$$

otrzymamy praktyczną zależność do obliczania zawartości wilgoci

$$X \approx 0.622 \frac{\varphi p_{gs}}{p_b - \varphi p_{gs}} \quad (9)$$

Ciśnienie pary nasyconej powietrza w danej temperaturze uzyskuje się z tablic lub z zależności

$$p_{gs} = 13.21 - 0.4444 \cdot t + 0.04735 \cdot t^2 \quad (10)$$

t - temperatura wyrażona w $^{\circ}\text{C}$.

Entalpią powietrza wilgotnego i o zawartości wilgoci x [kg/kg] nazywa się entalpię mieszaniny 1 kg powietrza suchego i x kg pary wodnej. Przyjmując, że dla takiej mieszaniny powietrza suchego oraz całej zawartości wilgoci w postaci cieczy w temperaturze $^{\circ}\text{C}$ entalpia równa się zeru, otrzymuje się:

$$i = c_{pg} t + x (c_{pp}'' t + r_0) \quad (11)$$

c_{gs} - ciepło właściwe powietrza suchego, $c_{gs} = 1000 \text{ J}/(\text{kg K})$,

c_{pp}'' - ciepło właściwe pary wodnej, $c_{pp}'' = 1965 \text{ J}/\text{kg}$,

r - ciepło parowania wody, $r = 2500000 \text{ J}/\text{kg}$,

t - temperatura w $^{\circ}\text{C}$.

Po podstawieniu stałych uzyskujemy wzór

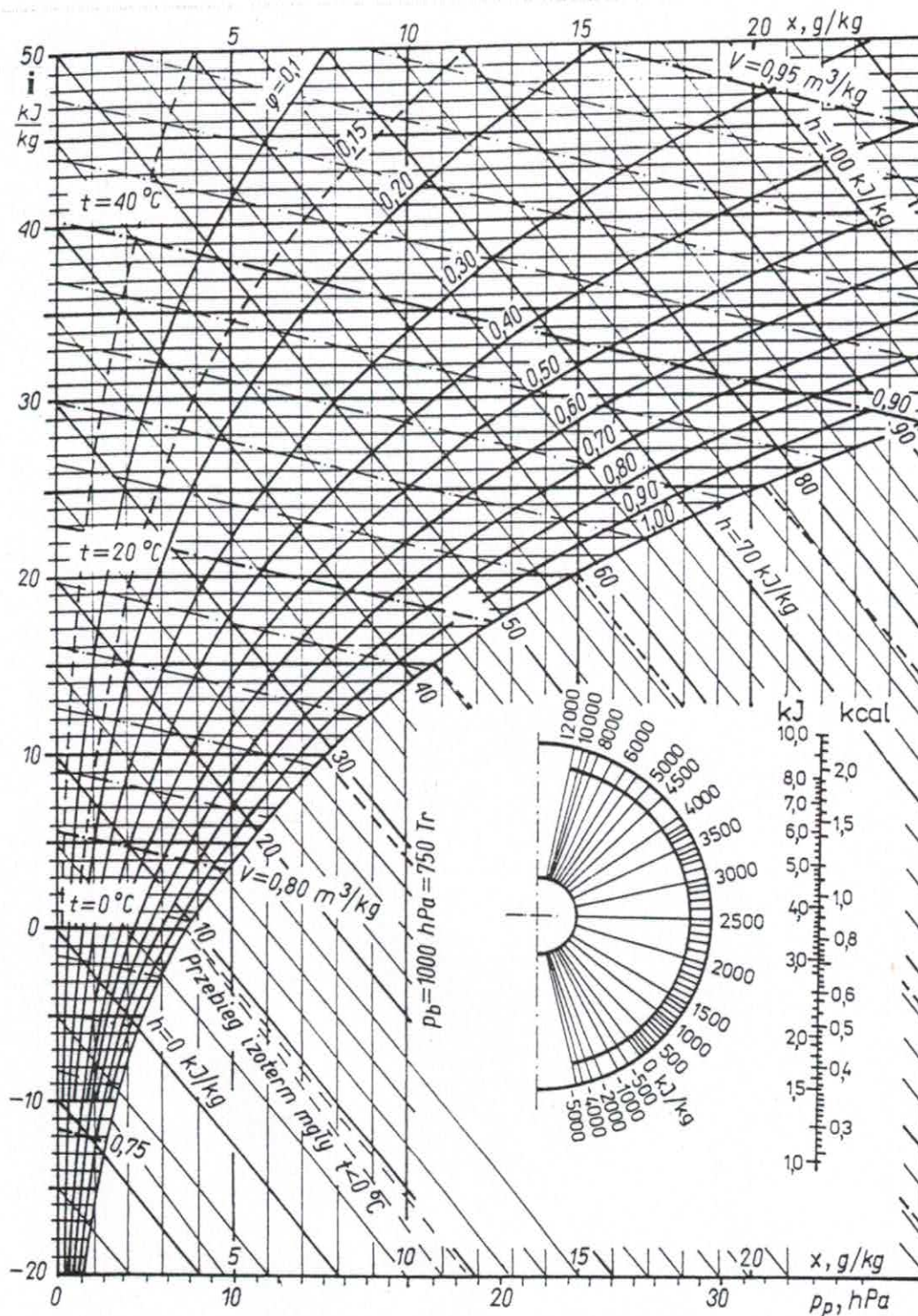
$$i = 1000 \cdot t + x (1965 \cdot t + 2500000) \quad (12)$$

1.2. Wykres Molliera $i - x$

W takich działach techniki, jak wentylacja, klimatyzacja, suszarnictwo, w celu obrazowego przedstawienia procesów fizycznych zachodzących w wilgotnym powietrzu oraz uproszczonego dokonywania obliczeń, powszechne zastosowanie znajdują wykresy prezentujące w sposób graficzny zależności parametrów t , φ , i oraz x przy stałym ciśnieniu ($p_b = \text{const}$).

Do budowy wykresu $i - x$ (rys. 1) stosuje się ukośny układ współrzędnych. Na osi poziomej jest naniesiona skala zawartości x , w g/kg - linie stałej zawartości wilgoci są pionowe. Na lewej osi pionowej znajduje się skala entalpii i , w kJ/kg - linie stałej entalpii biegną ukośnie (zazwyczaj pod kątem 135° od osi pionowej); w prostokątnym układzie współrzędnych obszar powietrza niedosyconego wypadłby zbyt wąski.

Linie stałej wilgotności względnej $\varphi = \text{const}$. stanowią rodzinę krzywych biegnących skośnie od lewego dolnego rogu wykresu ku górze. Krzywa $\varphi = 1$ (stan nasycenia powietrza parą) oddziela obszar powietrza niedosyconego (powyżej krzywej $\varphi = 1$) od obszaru mgły (poniżej krzywej $\varphi = 1$).



Rys. 1. Wykres $i - x$ dla powietrza wilgotnego.

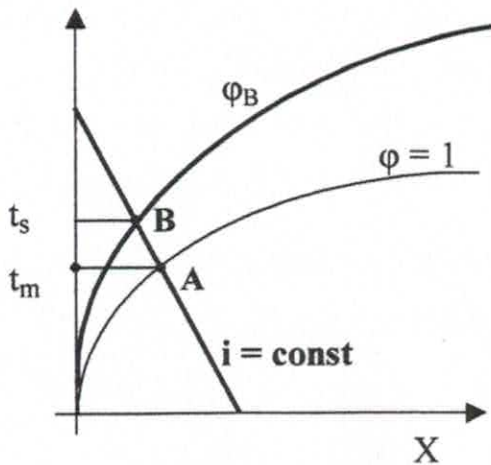
Izotermy stanowią w obszarze powietrza nienasyconego układ prostych nierównoległych, przy czym izoterma $t = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ w obszarze powietrza nienasyconego jest pozioma.

Na linii nasycenia $\varphi = 1$ izotermy ulegają załamaniu i w obszarze mgły są układem prostych prawie równoległych do **izentalp**.

Ponieważ przyjęto, że entalpia 1 kg powietrza suchego dla $t = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$ równa się zero, więc linie $t = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$ oraz $i = 0$ przecinają się na lewej osi pionowej.

Sposób określania wilgotności jest następujący (rys. 2):

1. Szukamy **wartości entalpii** i_p dla powietrza nasyconego wilgocią, czyli dla wartości $\varphi = 1$ dla temperatury termometru mokrego (punkt A)
2. korzystając z zasady niezmienności entalpii (w psychrometrze zachodzi **proces izoentalpowy**) szukamy dla temperatury termometru suchego punktu **B** = $f(i_p; t_s)$
3. według położenia punktu B odczytujemy wilgotność względną φ_B i zawartości wilgoci x (lub X).



Rys. 2.
Wyznaczanie wilgotności względnej φ_B
z wykresu Molliera

II. Przebieg ćwiczenia

Wyznaczanie współczynnika zawartości wilgoci (stopnia zwilżania) powietrza oraz entalpii właściwej powietrza wilgotnego

1. Określenie parametrów powietrza wilgotnego:
 - ciśnienia przy pomocy manometru
 - temperatury za pomocą termometru
2. Wyznaczenie wilgotności względnej powietrza wilgotnego przy użyciu psychrometru Assmanna
3. Wyznaczenie stopnia zwilżania X powietrza wilgotnego przy pomocy wykresu Molliera $i - x$
4. Korzystając z zależności zamieszczonych we rozdziale 1 oraz wykresu Molliera $i - x$ należy wyznaczyć współczynnik zawartości wilgoci (stopnia zwilżania) powietrza wilgotnego oraz entalpii właściwej powietrza wilgotnego oraz sporządzić sprawozdanie z wykonanego ćwiczenia laboratoryjnego.