

**Katedra Silników Spalinowych  
i Pojazdów ATH  
ZAKŁAD TERMODYNAMIKI**

## **Pomiar stopnia suchości pary wodnej**

## Podstawy teoretyczne.

---

Para mokra jest układem dwufazowym w stanie równowagi. Stanowi ją mieszaniny drobnych kropelek wody ciekłej zawieszonych w parze nasyconej (suchej). Może ona powstać w procesie odparowania wody w wytwornicach pary lub podczas rozprężania pary przegrzanej.

Stan termodynamiczny faz pary mokrej jako układ dwufazowy, zgodnie z regułą faz Gibbsa:

$$s = k - f + 2$$

gdzie:

- $s$  to ilość parametrów termodynamicznych niezbędnych do określania stanu równowagi
- $k$  jest ilością składników w układzie ( $k=1$ )
- $f$  jest ilością faz składników ( $f=2$ )

określa jeden parametr termodynamiczny ( $s = 1 - 2 + 2 = 1$ ). Parametrem tym może być ciśnienie lub temperatura. Parametry te są związane równaniem linii parowania.

Właściwości energetyczne pary mokrej to jest układu dwufazowego, w którym stan termodynamiczny obu faz jest jednoznacznie określony, zależne są od udziału obu faz w mieszaninie. Skład pary mokrej określa się przez stopień suchości  $x$  definiowany równaniem:

$$x = \frac{m'}{m' + m''}$$

gdzie:

- $m'$  jest masą fazy ciekłej
- $m''$  jest masą fazy gazowej (pary suchej)

Wyznaczanie stanu pary mokrej przy pomocy podstawowych mierzalnych parametrów tj. ciśnienie i temperatura jest niemożliwe z uwagi na jednoznaczność wartości tych parametrów (są one związane linią parowania) dla wszystkich możliwych stopni suchości zmieniających się od zera (dla wody w stanie wrzenia) do jedności (dla pary nasyconej, suchej).

Określenie stanu pary mokrej wymaga zatem znajomości ciśnienia (lub temperatury) pary oraz stopnia suchości, bądź innego parametru dającego się wyznaczyć pośrednio metodą pomiarową (entalpia, objętość właściwa).

Korzystając z tablic parametrów wrzącej wody i pary suchej można dla określonego ciśnienia (lub temperatury) odczytać wartość dla objętości właściwej ( $v'$  i  $v''$ ), entalpii ( $h'$  oraz  $h''$ ), izobarycznego ciepła parowania ( $r = h'' - h'$ ) oraz entropii ( $s'$  oraz  $s''$ ) składników pary mokrej.

Znając równocześnie stopień suchości pary można przy pomocy znanych równań wyliczyć:

- objętość właściwą  $v = v' + x \cdot (v'' - v')$ ,
- entalpię  $h = h' + x \cdot (h'' - h') = h' + x \cdot r$ ,
- entropię  $s = s' + x \cdot (s'' - s')$ ,

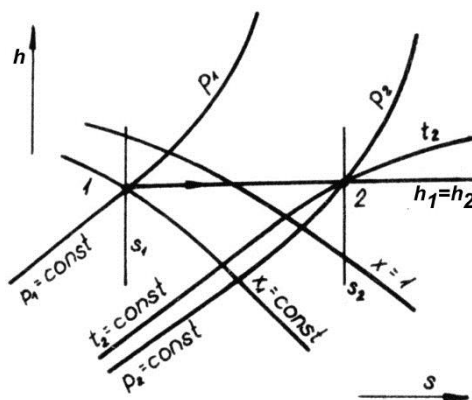
dla pary mokrej określając w ten sposób w pełni jej stan kaloryczny.

## Metodyka pomiaru.

W ćwiczeniu tym stopień suchości pary wyznaczany jest przy pomocy kalorymetru dławieniowego oraz kalorymetru kondensacyjnego.

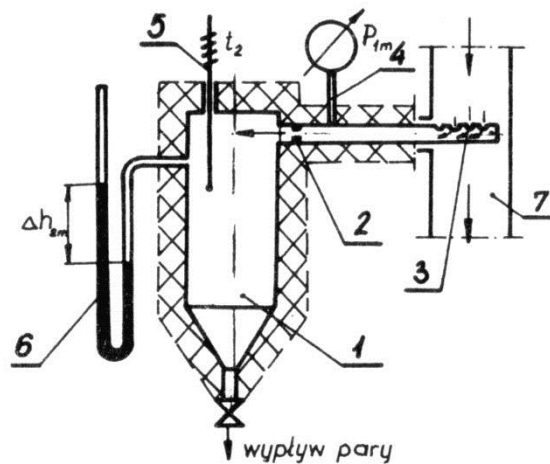
### Określenie stopnia suchości pary metodą kalorymetru dławieniowego.

W tej metodzie wyznaczania stopnia suchości, para podlega przemianie dławienia izentalpowego. Jak wiadomo, podczas dławienia izentalpowego zachodzącego w układzie adiabatycznym, cała praca rozprężania zamienia się na ciepło tarcia, które powodować będzie odparowanie wilgoci, a więc osuszanie pary mokrej. Przy dostatecznie dużym zdławieniu para przejdzie w stan pary przegrzanej. Stan pary przegrzanej określają jednocześnie ciśnienie i temperatura, a więc parametry, które mogą być w prosty sposób wyznaczone na drodze pomiarowej. Przemianę, jakiej podlega para w tej metodzie ilustruje rysunek 1.



Rys.1 Przemiana dławienia izentalpowego pary w układzie h-s.

Znając parametry pary po jej zdławieniu ( $p_2$  oraz  $t_2$ ) można określić stan „2”. Znając entalpię pary przegrzanej  $h_2$  oraz wykorzystując równanie przemiany  $h_1=h_2$  możemy wyznaczyć stopień suchości pary mokrej przed zdławieniem  $x_1$ . Można to zrobić metodą wykreślną posługując się wykresem parowym ( $h-s$ ) lub metodą obliczeniową przy wykorzystaniu tablic parowych dla pary nasyconej i pary przegrzanej.

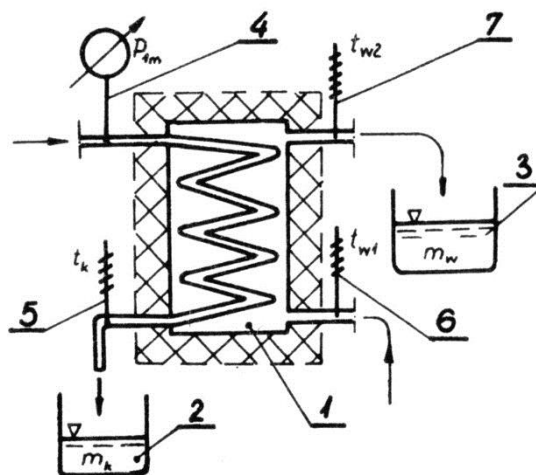


Rys.2 Schemat kalorymetru dławieniowego.

Dla stanu „2” z tablic pary przegrzanej odczytujemy  $h_2=h_1$ . Jednocześnie  $h_1 = h_1' + x \cdot (h_1'' - h_1')$ , stąd  $x = \frac{h_1 - h_1'}{h_1'' - h_1'}$ , gdzie  $h_1'$  oraz  $h_1''$  - odczytujemy z tablic pary nasyconej dla ciśnienia  $p_1$  (przed zdławieniem).

Określenie stopnia suchości pary metodą kalorymetru kondensacyjnego.

W metodzie tej badaną parę mokrą o znanym ciśnieniu skrapla się w dobrze zaizolowanym wymienniku ciepła. Schemat pomiarowy przedstawia poniższy rysunek.



Rys.3 Schemat kalorymetru kondensacyjnego.

- $\dot{m}_w$  strumień masy wody chłodzącej,
- $t_{w1}, t_{w2}$  temperatura wody chłodzącej na wlocie i wylocie z wymiennika,

- $\dot{m}_k$  strumień masy skroplin (równy strumieniowi pary dopływającej do kalorymetru),
- $t_k$  temperatura skroplin.

Ciepło przekazane przez parę podczas jej kondensacji w kalorymetrze jest równe ciepłu przekazanemu do wody chłodzącej, przy założeniu braku strat ciepła do otoczenia. Z bilansu tego układu dla stanu ustalonego:

$$\begin{aligned}\dot{H}_1 + \dot{H}_{w1} &= \dot{H}_{w2} + \dot{H}_k \\ \dot{m}_k h_1 + \dot{m}_w h_{w1} &= \dot{m}_w h_{w2} + \dot{m}_k h_k\end{aligned}$$

gdzie:

- $h_1$  to entalpia pary badanej przy ciśnieniu  $p_1$ ,
- $h_k$  jest entalpią powstałego kondensatu.

Entalpia kondensatu  $h_k = c_w \cdot t_k$  oraz  $h_w = c_w \cdot t_w$ , gdzie  $c_w$  to ciepło właściwe wody, stąd:

$$h_1 = c_w t_k + \frac{\dot{m}_w}{\dot{m}_k} c_w (t_{w2} - t_{w1})$$

Znając entalpię pary mokrej oraz jej ciśnienie  $p_1$  można jedną z podanych wyżej metod (wykreślną lub obliczeniową) wyznaczyć stopień suchości pary oraz pozostałe jej parametry.

### **Przebieg pomiarów i obliczeń.**

---

Pomiary należy rozpocząć po ustaleniu równowagi cieplnej układu i po odwodnieniu przewodów łączących wytwornicę z kalorymetrami, co następuje po upływie około 30min. od chwili uruchomienia stanowiska. Odczytów wielkości mierzonych dokonuje się równocześnie dla obu kalorymetrów (dławieniowego i kondensacyjnego). W ramach ćwiczenia należy wykonać dwie serie pomiarów dla dwu różnych ciśnień pary. Czas trwania jednej serii wyznacza czas napełnienia skroplinami naczynia pomiarowego. Natężenie przepływu wody chłodzącej wyznacza się przy pomocy zwężki wypływowej (danaidy) z wykorzystaniem jej wykreślnej charakterystyki. Podczas pomiaru należy zmierzyć:

w metodzie kalorymetru dławieniowego:

- $p_{m1}$  ciśnienie manometryczne pary badanej,
- $p_{m2}$  ciśnienie manometryczne pary po zdławieniu,
- $t_2$  temperaturę pary zdławionej [°C],

W metodzie kalorymetru kondensacyjnego:

- $p_{m1}$  ciśnienie manometryczne pary badanej,
- $t_{w1}$  temperaturę wody chłodzącej na wlocie [°C],
- $t_{w2}$  temperaturę wody chłodzącej na wylocie [°C],

- $t_k$             temperaturę kondensatu,
- $Z$              spiętrzenie wody w danaidzie,
- $V_k$             objętość zebranego kondensatu,
- $\tau$              czas napełniania naczynia kondensatem.

Należy ponadto zmierzyć ciśnienie otoczenia potrzebne do określenia ciśnienia bezwzględnego pary w wybranych punktach układu pomiarowego.

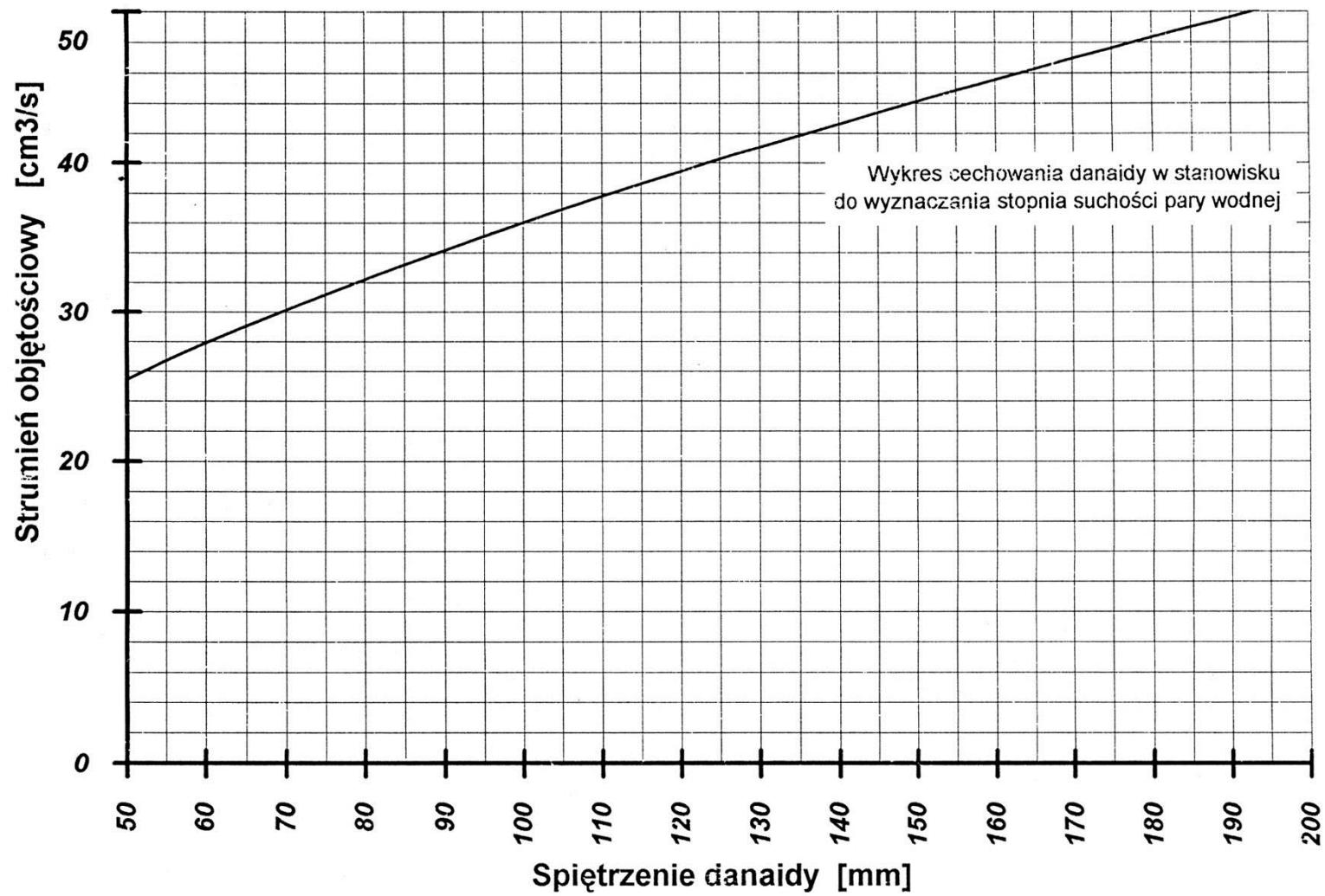
Wyniki pomiarów, odczytane wartości tablicowe oraz wyniki obliczeń należy zestawić w tabelach.

Entalpię pary badanej obliczamy z wzoru otrzymanego z bilansu kalorymetru

$$h_1 = c_w t_k + \frac{m_w}{m_k} c_w (t_{w2} - t_{w1})$$

gdzie:

- $m_w = \dot{m}_w \cdot \tau$  masa wody chłodzącej
- $\dot{m}_w$             masowe natężenie przepływu wody zmierzone danaidą (odczytane z wykresu)
- $c_w$             ciepło właściwe wody,  $c_w=4,19$  kJ/kgK



s

