

Wojskowa Akademia Techniczna
Katedra Pojazdów Mechanicznych i Transportu

LABORATORIUM TERMODYNAMIKI TECHNICZNEJ

Instrukcja do ćwiczenia T-04

Temat:
Pomiar wilgotności gazu.
Wyznaczanie ciepła topnienia lodu.

Opracował:
Dr inż. Mirosław Karczewski
WAT Warszawa 2007

1. Pomiar wilgotności gazu.

1.1. Powietrze wilgotne - wprowadzenie.

Powietrze jest przykładem roztworu gazowego, w którym jednym ze składników jest para wodna.

Mianem wilgotności powietrza określa się zawartość pary wodnej w powietrzu. Para wodna w powietrzu pochodzi z parowania zachodzącego ze swobodnych powierzchni wodnych i powierzchni lądowych (gruntu, roślinności...). Ze względu na skomplikowany charakter zależności wilgotności powietrza od temperatury powietrza, stosuje się szereg różnych miar, charakteryzujących wilgotność

Ilość pary wodnej w powietrzu wilgotnym przy ustalonym ciśnieniu i temperaturze jest zmienna, stąd, aby określić stan powietrza wilgotnego należy podać zawartość wilgoci. Do tego celu służą następujące wielkości:

Prężnością pary wodnej: określa ciśnienie parcjale (cząstkowe), wywierane przez parę wodną w powietrzu. Jednostką pomiaru jest hPa. Można to wyobrazić sobie jako różnicę ciśnienia w zamkniętej objętości powietrza i bez zmiany jego temperatury przed i po całkowitym usunięciu z tej objętości znajdującej się pary wodnej.

Nie można mieszać dowolnej ilości pary wodnej z dowolną ilością powietrza (tak, jak to można zrobić na przykład z azotem i tlenem). Ilość pary wodnej, która znaleźć się może w powietrzu (rozpuścić w powietrzu) zależy od jego temperatury. Im wyższa temperatura, tym więcej pary wodnej może "rozpuścić się" w powietrzu. Maksymalną ilość pary wodnej, jaką jest w stanie zawierać powietrze w danej temperaturze określa się mianem **prężności maksymalnej** lub **prężnością pary nasyconej** i oznacza zazwyczaj symbolem E . Wartości E w funkcji temperatury powietrza przedstawia tabela poniżej (tab. 1).

Tab.1. Wartości prężności maksymalnej pary wodnej (hPa) w funkcji temperatury powietrza (°C)

t (°C)	E (hPa)	t (°C)	E (hPa)
50	123,3	0	6,11
45	95,77	-5	4,21
40	73,72	-10	2,68
35	56,20	-15	1,90
30	42,41	-20	1,25
25	31,66	-25	0,80
20	23,27	-30	0,50
15	17,05	-35	0,309
10	12,28	-40	0,185
5	8,72	-45	0,108

Na podstawie tabeli 1 można stwierdzić, że zależność $E = f(t)$ jest silnie nieliniowa. W niskich temperaturach już minimalna ilość pary wodnej nasycza powietrze natomiast w wysokich temperaturach do nasycenia powietrza potrzeba bardzo dużo pary wodnej.

Prężność pary wodnej, jaka występuje w danej chwili w powietrzu nazywa się **prężnością aktualną** i oznacza zazwyczaj symbolem e . Prężność aktualna w atmosferze zmienia się stosunkowo powoli, aby wzrosła, musi wzrosnąć również zawartość pary w powietrzu. Proces parowania, który dostarcza pary wodnej do powietrza jest procesem energochłonnym, przez to powolnym. Zmniejszenie zawartości pary wodnej w powietrzu jest związane z wystąpieniem procesów kondensacji.

Różnicę, między prężnością maksymalną (E) w temperaturze powietrza, w której została zmierzona prężność aktualna a wartością prężności aktualnej (e), wyrażona w hPa:

$$d = E - e \text{ [hPa]} \quad (1)$$

określa się mianem **niedosytu wilgotności**, który informuje o tym, ile jednostek prężności potrzeba do całkowitego nasycenia danego powietrza. Od wartości niedosytu wilgotności zależy między innymi prędkość zachodzących **procesów parowania**, im jest on większy, tym parowanie jest szybsze.

Wartość prężności aktualnej nie jest miarą wystarczająco pogładową, informacja, że np. prężność aktualna równa jest 5 hPa, bez znajomości temperatury powietrza i precyzyjnej znajomości $E = f(t)$, niewiele jeszcze mówi.

Z tego względu powszechnie używa się kolejnej miary wilgotności powietrza, jaką jest **wilgotność względna** (oznaczana najczęściej jako ϕ), która jest definiowana jako:

$$\phi = (e/E) * 100 \text{ [%]} \quad (2)$$

określa w jakim procencie, w stosunku do maksymalnie możliwego w danej temperaturze (tj. temperaturze, w której zmierzono e) powietrze jest nasycone parą wodną. Zauważmy, że w różnych temperaturach powietrza taka sama wartość wilgotności względnej (np. 50%) będzie oznaczała zupełnie różne ilości pary wodnej znajdującej się w powietrzu. Przykładowo wilgotność względna 50% w temperaturze 0°C wystąpi przy $e = 3.05$ hPa, w temperaturze +20°C przy $e = 11.7$ hPa.

Zmiany wilgotności powietrza wraz ze zmianami temperatury można przedstawić na przykładzie. W powietrzu, które ma temperaturę 20°C zmierzono wartość $e = 12.3$ hPa. Obniżamy temperaturę tego powietrza do 0°C. W takim razie $e = 12.3$, zaś wartość prężności maksymalnej jest taka, jaka wynika z temperatury tego powietrza (20°C; $E = 23.4$ (tabela 1), co oznacza, że wilgotność względna wynosi ~52.6% ($12.3 / 23.4$). Przy obniżeniu temperatury do 15°C wilgotność względna tego powietrza wzrośnie do 72.3% ($12.3 / 17.0$), przy dalszym obniżeniu temperatury, do 10°C wartość prężności maksymalnej E zrównała się z wartością prężności aktualnej e ($e = E$) i wilgotność względna osiągnęła wartość 100% ($12.3 / 12.3$), czyli powietrze jest już całkowicie nasycone parą wodną (osiągnęło stan "roztworu nasyconego"). Dalszy spadek temperatury powietrza powoduje przejście powietrza w stan przesycenia, który spowoduje, że cały nadmiar ilości pary wodnej ponad wartość E wynikający z nowej, obniżonej temperatury powietrza ulegnie kondensacji. W powietrzu pojawią się mikrokrople wody, występujące w całej jego objętości, które tworzyć będą roztwór koloidalny wody w powietrzu.

Temperatura, do której należy schłodzić powietrze, aby przy danej prężności aktualnej wilgotność względna osiągnęła 100% i rozpoczęły się w nim procesy kondensacji nosi nazwę temperatury punktu rosy. Temperatura punktu rosy powietrza, w którym nie zachodzą procesy kondensacji, zależy jedynie od wartości prężności aktualnej. Tak długo, jak temperatura powietrza nie spadnie poniżej temperatury punktu rosy, temperatura punktu rosy tego powietrza pozostaje stała. Podobnie stała temperatura punktu rosy pozostaje przy wzroście temperatury powietrza (o tak zachowujących się elementach meteorologicznych mówimy, że wykazują one właściwości konserwatywne).

Powracając do przykładu. Od chwili, gdy powietrze osiągnęło temperaturę punktu rosy (10°C) i temperatura powietrza dalej powoli spada, cały czas wilgotność względna ma wartość 100% i temperatura punktu rosy tego powietrza jest równa jego temperaturze. Cały nadmiar pary wodnej, ponad wartość prężności maksymalnej w danej temperaturze ulega kondensacji, czyli wykropleniu. Tak więc po ochłodzeniu powietrza do 5°C, jego wilgotność względna wyniesie dalej 100%, jego temperatura punktu rosy wyniesie 5°, prężność aktualna e równa E będzie wynosić 8.7 hPa, wykropleniu w tej objętości powietrza ulegnie tyle wody, ile wynosi różnica między prężnością aktualną (maksymalną) w temperaturze, gdy po raz pierwszy powietrze to doszło do temperatury punktu rosy (czyli 10°) a prężnością aktualną (maksymalną) przy temperaturze 5°. Dalsze powolne ochłodzenie do temperatury 0°C doprowadzi do tego, że

temperatura punktu rosy tego powietrza spadnie do 0°C, prężność aktualna do 6.1 hPa a wykropleniu uległa taka ilość wody, która odpowiada zmniejszeniu wilgotności powietrza o 6.2 jednostek prężności.

Tak więc, w analizowanym przypadku, z chwilą, gdy powietrze osiągnęło wilgotność względną równą 100%, czyli temperaturę punktu rosy zachodzące procesy kondensacji powodujące zmianę stanu skupienia wody w powietrzu, przy dalszym spadku temperatury powietrza powodują utrzymywanie się wilgotności względnej na poziomie 100% i obniżanie się ilości pary wodnej w powietrzu. Spada przy tym, tak samo jak i temperatura powietrza, temperatura punktu rosy.

Przedstawiony przykład oczywiście upraszcza rzeczywistość. W przypadku bardzo szybkiego spadku temperatury powietrza może zaistnieć sytuacja, że wilgotność względna będzie wyższa od 100%, co można wytłumaczyć "nienadążaniem" procesów kondensacji za spadkiem temperatury powietrza.

Należy jednocześnie zwrócić uwagę, że bardzo wszechstronną miarą wilgotności powietrza może być para temperatur - temperatura powietrza (t_p) i temperatura punktu rosy tego powietrza (t_d). Należy zauważyć, że temperatura powietrza nie może być niższa od jego temperatury punktu rosy. Jeśli wyobrazimy sobie procesy kształtowania wilgotności powietrza, bez zmian ilości pary wodnej w powietrzu, związane ze zmianami temperatury tego powietrza w ten sposób, że obie te wartości znajdują się na osi liczbowej, to temperatura punktu rosy (t_d) będzie stała w miejscu na osi (zależy jedynie od e). Wzrost temperatury (t_p) spowoduje oddalenie t_p od t_d , spadek temperatury zbliżenie t_p do t_d . W ten sposób różnica temperatury powietrza i temperatury punktu rosy informuje nas o tym, jaka jest wilgotność względna (duża różnica - mała wilgotność, mała różnica - duża wilgotność, czyli powietrze bliskie nasycenia parą wodną). W każdym momencie wiemy, jaki spadek temperatury doprowadzi do początków wystąpienia procesów kondensacji. Jeśli znamy prognozowaną wielkość spadku temperatury, natychmiast możemy ocenić, czy nastąpią procesy kondensacji, czy też nie nastąpią.

Wilgotnością względną często natomiast operuje się w celach praktycznych - na przykład w warunkach przewozu szeregu ładunków, pracy mechanizmów i urządzeń, warunków przebywania ludzi, etc. określa się wartości wilgotności względnej (od - do) które muszą być zachowane.

Gdybyśmy wrócili do omawianego przykładu i zastanowili się, co się będzie działo w sytuacji, gdy ochłodzone do temperatury 0°C nasze powietrze zacznie się ponownie nagrzewać, to zauważymy, że w powietrzu tym prężność aktualna pary wodnej jest równa 6.1 hPa. W tym przypadku, wzrost tempertury spowoduje wzrost wartości E i jego wilgotność względna zacznie maleć. Temperatura punktu rosy tego powietrza pozostanie równa 0°C tak długo, jak nie zacznie się proces parowania mikrokropeł znajdujących się w jego objętości. Proces parowania wymaga jednak dostarczenia do układu bardzo dużych ilości energii (ciepła; patrz "procesy kondensacji"). Bez dostarczenia tej energii, parowanie nie nastąpi i zawartość pary wodnej w powietrzu pozostanie bez zmian. Jak widzimy, procesy te nie są symetryczne (w pełni odwracalne), temperatura punktu rosy może spaść (obniżyć się) w wyniku ochłodzenia temperatury powietrza i występujących procesów kondensacji, ale bez powtórnego wzbogacenia powietrza w parę wodną temperatura punktu rosy nie wzrośnie.

Oprócz wymienionych miar wilgotności powietrza stosuje się szereg innych, z których najważniejsze to:

wilgotność absolutna: informująca ile kg pary wodnej znajduje się w 1 m³ powietrza (przy czym nie bierze się pod uwagę występujących ewentualnie produktów kondensacji - wody w stanie ciekłym lub stałym). Wilgotność absolutna (a) jest związana z prężnością aktualną (e , hPa) następującą zależnością:

$$a = 0.8 * (e / (1 + m*t)) \quad (3)$$

gdzie:

- m - współczynnik objętościowego rozszerzania gazów równy 1/273,
 t - temperatura powietrza w °C.

współczynnik zmieszania (r), określający stosunek masy pary wodnej do masy powietrza suchego, znajdującego się w danej objętości wilgotnego powietrza (g / kg), obliczany jako funkcja prężności aktualnej (e) i ciśnienia atmosferycznego (p):

$$r = 622 * (e / (p - e)) \quad (4)$$

gdzie: p - ciśnienie atmosferyczne (hPa).

Temperatura suchego termometru (t_s) jest to temperatura mieszaniny parowo-gazowej wyznaczona przez zanurzenie w niej termometru, którego czujnik nie jest zwilżony.

Temperatura mokrego termometru (t_m) jest to temperatura równoważna, osiągnięta przez małą ilość cieczy odparowującej do dużej (masy) nienasyconej mieszaniny powietrza z parą wodną.

Wilgotność bezwzględna masowa (X) (wilgotność absolutna, zawartość wody) oznacza masę pary wodnej przypadającą na 1 g suchego powietrza:

$$X = \frac{m_{pw}}{m_{sp}} \quad (5)$$

gdzie:

- m_{pw} - masa pary wodnej w kg,
 m_{sp} - masa suchego powietrza w kg.

Wilgotność bezwzględna objętościowa (ρ_{pw}) (rzadziej stosowana) jest to masa pary wodnej przypadająca na jednostkę objętości powietrza wilgotnego:

$$\rho_{pw} = \frac{m_{pw}}{V} \quad (6)$$

gdzie:

- m_{pw} - masa pary wodnej w kg,
 V - objętość powietrza wilgotnego w m³.

Jest to gęstość pary wodnej zawartej w gazie pod jej ciśnieniem cząstkowym p_{pw} i w temperaturze mieszaniny. Maksymalna wilgotność objętościowa równa się gęstości pary nasyconej w danej temperaturze.

Wilgotność względna powietrza (φ) (inaczej definiowana) jest to stosunek wilgotności bezwzględnej objętościowej rzeczywistej do maksymalnej w tej samej temperaturze:

$$\varphi = \left(\frac{\rho_{pw}}{\rho_{pwnas}} \right)_T \quad (7)$$

gdzie:

- m_{pw} - masa pary wodnej w kg,
 V - objętość powietrza wilgotnego w m³.

Prawo Daltona Przy wartościach ciśnienia P i temperatury T odległych od warunków krytycznych powietrze suche i para wodna zachowują się jak gazy doskonałe

$$p = p_{sp} + p_{pw} \quad (8)$$

gdzie:

- p_{pw} - ciśnienia pary wodnej,
 m_{sp} - ciśnienie powietrza suchego,

Objętość wilgotna (v) jest to objętość zajmowana przez masę $(1+X)$ powietrza wilgotnego w kg odniesiona do 1 kg powietrza suchego:

$$v = 22.4 \left(\frac{1}{29} + \frac{X}{18} \right) \frac{T}{273}, \frac{m^3}{\text{kg.s.p.}} \quad (9)$$

Gęstość powietrza wilgotnego (ρ) odnosi się do masy i objętości powietrza wilgotnego:

$$\rho = \frac{1+X}{v} = \frac{m_{sp} + m_{pw}}{V} = \frac{m}{V} = \frac{p}{RT} \quad (10)$$

1.2. Metody pomiaru powietrza wilgotnego.

Pomiar ilości pary wodnej zawartej w gazach (powietrze atmosferyczne, spaliny, czynnik suszący) ma znaczenie nie tylko przy opisie procesów klimatyzacji i suszenia, ale także przy bilansowaniu różnych procesów technologicznych. Zawartość wilgoci w gazie określa się najczęściej przez podanie wilgotności względnej, czyli ilorazu aktualnej ilości pary wodnej w gazie i maksymalnej ilości pary wodnej w gazie w warunkach nasycenia dla danej temperatury (wilgotność względną można również zdefiniować jako stosunek aktualnego ciśnienia cząstkowego pary wodnej do ciśnienia nasycenia przy danej temperaturze). Innym sposobem określenia ilości wilgoci w gazach jest podanie stopnia zawilżenia gazu definiowanego jako stosunek ilości (masy) pary wodnej zawartej w gazie do ilości (masy) gazu suchego.

Istnieje wiele metod pomiaru ilości (lub udziału) pary wodnej w gazach. Ze względu na zasadę pomiaru metody te można podzielić na grawimetryczne, termometryczne, chemiczne, elektryczne, radiacyjne i higroskopowe.

Metody grawimetryczne polegają na pomiarze masy gazu suchego i pary wodnej. Ilość pary wyznacza się poprzez ważenie wilgoci zaabsorbowanej przez odpowiednie substancje (najczęściej są to $\text{Mg}(\text{ClO})_4$ lub P_2O_3). Masę gazu suchego wyznacza się zazwyczaj z równania stanu. Jest to metoda o stosunkowo dużej dokładności.

Metody termometryczne - wykorzystują różne zjawiska fizyczne zachodzące w gazie dwuskładnikowym jakim jest gaz wilgotny. Do grupy tej należą tzw. higrometry punktu rosy działające na zasadzie pomiaru temperatury nasycenia dla danego stopnia zawilżenia gazu. Pomiar ten odbywa się przez obserwację powierzchni lustrzanej ochładzanej płytki. Obserwację można prowadzić sposobem bezpośrednim lub z wykorzystaniem elementów fotoelektrycznych. Do tej grupy należy również psychometryczna metoda pomiaru. Polega ona na zastosowaniu dwóch termometrów z których jeden „suchy” mierzy temperaturę badanego gazu, natomiast drugi tzw. „mokry” temperaturę gazu w którym nastąpiło odparowanie wody w ilości umożliwiającej osiągnięcie stanu nasycenia. Różnica wskazań obu termometrów jest wskaźnikiem wilgotności gazu.

- **Psychometr Augusta** składa się z dwóch termometrów: suchego i mokrego. Zbiorniczek z rtęcią termometru mokrego jest owinięty tkaniną zwilżoną wodą destylowaną. Termometry znajdują się w nieruchomym powietrzu.
- **Psychometr aspiracyjny Assmana** składa się również z dwóch termometrów: suchego i mokrego. Zbiorniczek z rtęcią termometru mokrego jest owinięty tkaniną zwilżoną wodą destylowaną. Wentylator promieniowy powoduje przepływ powietrza wokół termometrów.

Metody chemiczne - swoją zasadą działania są podobne do chromatografów. W analizatorach chemicznych badany gaz wilgotny wdmuchuje się do cieczy absorbującej, którą jest zazwyczaj kwas siarkowy. Określenia zawartości pary wodnej w gazie dokonuje się na podstawie pomiaru zmian przewodności elektrycznej absorbentu przed i po absorpcji.

Metody elektryczne - wyróżnia się tutaj higrometry oporowe i z ogrzewanym czujnikiem. W higrometrach oporowych stosuje się czujniki elektrolityczne i sorpcyjne. Zasada działania tych

czujników jest podobna - wskutek pochłaniania wilgoci zmieniają się w pewnym stopniu własności elektryczne tego czujnika. Zmiany tych własności są odpowiednio przetwarzane na sygnał elektryczny.

Metody radiometryczne - pomiar wilgotności gazu tą metodą opiera się na zjawisku absorpcji promieniowania podczerwonego o określonej długości fali przez parę wodną zawartą w gazie.

Metody higroskopowe - najbardziej znanym higrometrem jest higrometr włosowy. W higrometrze tym jest wykorzystane zjawisko zmiany długości włosa w zależności od stopnia nasycenia go wilgocią. Przyrost długości włosa w zakresie wilgotność względnej 0 - 100 % jest rzędu ok. 2.5 %. Zakres stosowania higrometrów włosowych ograniczony jest do czynników o temperaturze nie przekraczającej 50°C. Nie ma takiego ograniczenia co do najniższych wartości temperatury w jakich może on być stosowany. Wyznaczanie wilgotności względnej i stopnia zwilżenia powietrza higrometrem izochorycznym.

1.3. Sposób pomiarów powietrza wilgotnego

- Zbiorniczki z rtęcią dwóch szklanych termometrów owinać gazą (dwa zwoje), a następnie każdy z nich należy zanurzyć w wodzie o temperaturze mniejszej od temperatury otoczenia i większej od temperatury otoczenia. Termometry umieścić w nieruchomym powietrzu i notować ich wskazania w funkcji czasu - co 30 sekundy. Odczyty prowadzić do momentu ustabilizowania się warunków, jednak nie krócej niż 15 minut.
- W czasie doświadczenia należy również mierzyć temperaturę powietrza trzecim termometrem, którego zbiorniczek z rtęcią nie jest owinięty gazą.
- Czynności opisane w punkcie a należy powtórzyć umieszczając tym razem termometr suchy i termometry mokre w strudze powietrza wypływającego z wentylatora. Pomiary wykonać w taki sam sposób jak w punkcie a i b.
- Z barometru znajdującego się w laboratorium odczytać wartość ciśnienia – przed pomiarami oraz po ich zakończeniu

1.4. Opracowanie wyników – wilgotność powietrza

- Narysować przebieg zmian temperatury termometru mokrego t_m , termometru suchego t_s oraz różnicy temperatur $t \Delta$ dla poszczególnych przypadków.
- Określić poszczególne wielkości podane we wzorze do sprawozdania dla Psychometru Augusta oraz psychometru Asmana (o ile badanie było przeprowadzone).
- Porównać i ocenić otrzymane wyniki dla zwilżania wodą ciepłą i zimną.
- Porównać i ocenić otrzymane wyniki dla poszczególnych psychometrów.

2. Ciepło topnienia lodu – przemiany fazowe.

2.1. Ciepło topnienia lodu - wprowadzenie

W czasie topienia ciało stałe pochłania ciepło. Celem doświadczenia jest wyznaczenie ciepła topnienia lodu q , czyli ciepła potrzebnego do stopienia jednego grama lodu. Badane zjawisko sprowadza się do stopienia kostki lodu wrzuconej do podgrzanej wody. Pomiary polegają na wyznaczeniu spadku temperatury podgrzanej wody m_w spowodowanego stopieniem kostki lodu o masie m_l . W celu wyznaczenia spadku temperatury badamy przebieg zależności temperatury wody w czasie topienia się kostki lodu wrzuconej do tej wody.

$$\Delta t = t_{\max} - t_{\min} \quad (11)$$

W czasie topienia woda m_w traci ciepło:

$$Q_w = m_w c_w \Delta t = m_w c_w (t_{\max} - t_{\min}) \quad (12)$$

lód pobiera ciepło na stopienie:

$$Q_t = m_w q \quad (13)$$

woda powstała z stopionego lodu pobiera ciepło:

$$Q_{wl} = m_l c_w t_{\min} \quad (14)$$

gdzie:

- c_w - ciepło właściwe wody,
- m_w - masa wody,
- m_l - masa lodu
- q - ciepło topnienia lodu.

Ciepło tracone przez wodę musi być równe sumie ciepła pobranego przez lód:

$$Q_w = Q_t + Q_{wl} \quad (15)$$

Po podstawieniu mamy:

$$m_w c_w (t_{\max} - t_{\min}) = m_l q + m_l c_w t_{\min} \quad (16)$$

skąd można obliczyć ciepło topnienia lodu q :

$$q = c_w \frac{(m_w - m_l) t_{\max} + m_l t_{\min}}{m_l} \quad (17)$$

Masa lodu jest zazwyczaj mała w stosunku do początkowej masy wody w kalorymetrze dlatego też błąd popełniany z temperaturą lodu jest niewielki.

2.2. Sposób wyznaczania ciepła topnienia lodu.

1. Należy przygotować kostki lodu do wykonania pomiarów. Do kalorymetru (lub innego naczynia –np. kubka styropianowego) należy włożyć kilka kostek lodu z zamrażalnika i dolać niewielką ilość wody. Po pewnym czasie powinna się ustalić temperatura wody równa 0°C . Można wówczas kontrolować temperaturę za pomocą czujnika w naczyniu zawierającym wodę z lodem. Uwaga! Lód wyjęty z zamrażalnika ma temperaturę niższą od 0°C . Lód współistniejący z wodą ma temperaturę 0°C .
2. Należy wykonać ważenie przygotowanego pustego „kalorymetru” z dokładnością do ułamków grama (przynajmniej do 1g). Określona zostaje w ten sposób masa m_1 .
3. Należy podgrzać wodę w czajniku, a następnie napełnić kalorymetr do 2/3 objętości kubka wodą podgrzaną do około 30°C i wykonać ponowne ważenie. Oznaczyć wynik przez m_2 .
4. Jedną lub dwie kostki najlepiej rozdrobnić i umieścić na szmacie lub ligninowej serwetce, by je osuszyć.
5. Wykonać pomiary zmian temperatury w czasie (dokonywać odczytów, co 20 sekund). Wprowadzić czujnik temperatury do „kalorymetru” i odczekać około co najmniej 1 minutę w celu ustabilizowania wskazań (kiedy wskazania temperatury przestaną się zmieniać). Następnie należy wsypać do kalorymetru przygotowany uprzednio lód. Rejestrować zmiany temperatury do chwili jej ustalenia się przy jednoczesnym mieszaniu wody z lodem.
6. Wykonać ważenie „kalorymetru” z wodą i stopionym lodem. Wynik oznaczamy jako m_3 .
7. O ile to możliwe powtórzyć czynności z punktów 2-6.
8. Odczytaj temperatury: początkową - t_p , oraz końcową t_k z wykresu. t_p jest ustabilizowana temperaturą przed wprowadzeniem lodu, a t_k ustabilizowaną wartością temperatury po stopieniu lodu.

2.3. Opracowanie wyników – ciepło topnienia lodu

1. Narysować przebieg zmian temperatury w kalorymetrze w funkcji czasu, zaznaczyć temperaturę t_p oraz końcową t_k
2. Wyznaczyć ciepła topnienia lodu.
3. Określić błąd wyznaczania ciepła topnienia. Obliczyć procentowy błąd względny wyniku,

4. W obliczeniach przyjmujemy $c_w = 4,19 \text{ J g}^{-1}\text{K}^{-1}$
5. Przeanalizuj wpływ zastosowanej metody na wielkość błędu bezwzględnego.
6. Porównaj ciepło topnienia lodu z ciepłem topnienia innych substancji spotykanych w otoczeniu. Jest ono bardzo duże. Czy tak jest?
7. Przedyskutuj wpływ dużej wartości ciepła topnienia lodu na klimat.

3. Instrukcja do wykonania sprawozdania

- Podać cel realizacji ćwiczenia, omówić sposób jego realizacji.
- Przedstawić schemat stanowiska pomiarowego, zaznaczyć jego najważniejsze elementy.
- Zamieścić wszystkie niezbędne wzory i obliczenia
- Wykonać zalecenia z punktów 1.4 oraz 2.3,
- Przeprowadzić analizę błędów pomiarowych.
- Zamieścić wnioski i spostrzeżenia dotyczące poszczególnych punktów ćwiczenia.
- Przeanalizować otrzymane wyniki.
- Do sprawozdania załączyć niezbędne wykresy – Format A4, papier milimetrowy.
- **Do sprawozdania należy dołączyć protokół pomiarów – ksero lub oryginał!**
- **Sprawozdanie powinno być spięte w sposób uniemożliwiającej jego łatwe rozdzielanie – najlepiej zszyte zszywaczem w górnym rogu.**

4. Pytania kontrolne

1. Co to jest parowanie cieczy?
2. Co to jest: para nasycona i nienasycona, prężności aktualna, prężności pary nasyconej, wilgotność względna?
3. Co to jest zjawisko rosy?
4. Jak jest definiowana wilgotność względna i bezwzględna?
5. Jak są zbudowane przyrządy do wyznaczania wilgotności powietrza?
6. Co to jest przemiana fazowa?
7. Co to jest punkt potrójny?
8. Jaka jest różnica między ciepłem topnienia a ciepłem krzepnięcia?
9. Co to jest ciepło właściwe?

5. Literatura:

1. JASIAK ANDRZEJ, Pomiary inżynierskie, Poznań: Wydaw. Politechniki Poznańskiej, 1999.
2. POMIARY, Pomiary w technice cieplnej. red. Feliks Kotlewski, Marian Mieszkowski Warszawa: Wydaw. Nauk.-Tech., 1972.
3. Michalski L., Eckersdorf K.: Pomiary temperatury. Warszawa, WNT 1986.
4. Romer E.: Miernictwo przemysłowe. Warszawa, PWN 1970.

6. Tabele pomiarowe

6.1. Pomiary powietrza wilgotnego

	Psychometr 1, Po=[]				Psychometr2, Po=[]			
Nr	t _{m1} [°C]	t _{m2} [°C]	t _{m3} [°C]	t _s [°C]	t _{m1} [°C]	t _{m2} [°C]	t _{m3} [°C]	t _s [°C]
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								
11								
12								
13								
14								
15								
16								
17								
18								
19								
20								
21								
22								
23								
24								
25								
26								
27								
28								
29								
30								
31								
32								
33								
34								
35								
36								
37								
38								
39								
40								

6.2. Wyznaczanie ciepła topnienia lodu

Nr	Czas [s]	t_{w1} [°C]
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		
13		
14		
15		
16		
17		
18		
19		
20		
21		
22		
23		
24		
25		
26		
27		
28		
29		
30		

Nr	Czas [s]	t_{w2} [°C]
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		
13		
14		
15		
16		
17		
18		
19		
20		
21		
22		
23		
24		
25		
26		
27		
28		
29		
30		

Wielkość	Oznaczenie	Jednostka	Pomiar 1	Pomiar 2
Masa kalorymetru	$m_1 =$	[]		
Masa kalorymetru z wodą	$m_2 =$	[]		
Masa kalorymetru z wodą i lodem	$m_3 =$	[]		
Początkowa temperatura	$t_p =$	[]		
Końcowa temperatura	$t_k =$	[]		

WOJSKOWA AKADEMIA TECHNICZNA
WYDZIAŁ MECHANICZNY
KATEDRA POJAZDÓW MECHANICZNYCH I TRANSPORTU

LABORATORIUM TERMODYNAMIKI TECHNICZNEJ

SPRAWOZDANIE
Z ćwiczenia laboratoryjnego nr T-04

Temat: Pomiar wilgotności gazu. Wyznaczanie ciepła topnienia lodu

Wykonał:

Grupa:

Data wykonania ćwiczenia:

Data oddania ćwiczenia:

Prowadzący:

1. Cel ćwiczenia

2. Schematy stanowisk

3. Przebieg ćwiczenia

4. Wzory stosowane do obliczeń i przykładowe obliczenia:

5. Wyniki pomiarów i obliczeń:

5.2. Wyznaczanie ciepła topnienia lodu:

Wielkość	Oznaczenie	Jednostka	Pomiar 1	Pomiar 2
Masa wody	$m_w =$	[]		
Masa lodu	$m_l =$	[]		
Przyrost temperatury	$\Delta t =$	[]		
Obliczone ciepło topnienia	$q =$	[]		
Odczytane z tablic ciepło topnienia lodu	$q_t =$	[]		
Błąd bezwzględny ciepła topnienia lodu	Δq	[]		
Błąd względny ciepła topnienia lodu	$\Delta q\%$	[]		

5.1. Wyznaczanie wilgotności powietrza:

a) Na podstawie wyników pomiarów powietrza wilgotnego wyznaczono:

Wskazanie barometru wynosi $h_t = \dots\dots\dots$ [] przy temperaturze $t = \dots\dots\dots$ °C

Ciśnienie otoczenia $p_{ot} = \dots\dots\dots$ [],

Temperatura termometru suchego $t_s = \dots\dots\dots$ [°C],

Temperatura termometru mokrego $t = \dots\dots\dots$ [°C]

Ciśnienie nasycenia parą wodną w temp. t_s $p''_s = \dots\dots\dots$ [mbar] = $\dots\dots\dots$ [Tr]

Ciśnienie nasycenia parą wodną w temp. t_m $p''_m = \dots\dots\dots$ [mbar] = $\dots\dots\dots$ [Tr]

Ciśnienie składnikowe pary wodnej: $p_p \dots\dots\dots$ [mbar] = $\dots\dots\dots$ [Tr]

Wilgotność względna powietrza $\phi = \dots\dots\dots$ [%]

b) Na podstawie wyników poprzedniego pomiaru wyznaczyć:

Gęstość pary wodnej nasyconej przy temperaturze t_s

$\rho_p'' = \dots\dots\dots$ [g/m³] = $\dots\dots\dots$ [kg/m³]

Stopień zwilżenia

$X = \dots\dots\dots$ [kg pary/kg.s.p.]

= $\dots\dots\dots$ [kmoli pary/kmoli s.p./]

c) Odczytać z wykresu i-X wartość entalpii, temperatury punktu rosy i maksymalnego stopnia zwilżenia badanego powietrza.

Entalpia powietrza wilgotnego $i_{1+x} = \dots\dots\dots$ [kJ/kg]

Temperatura rosy $t_r = \dots\dots\dots$ [°C] = $\dots\dots\dots$ [K]

Maksymalny stopień zawilżenia $X_{max} = \dots\dots\dots$ kg/kg

d) Gęstość badanego powietrza $\rho = \dots\dots\dots$ [] = $\dots\dots\dots$ [kg/m³],

e) Do jakiego ciśnienia należy sprężyć izotermicznie badane powietrze, by rozpoczął się proces wykrapłania wody?

$p = \dots\dots\dots$ [MPa] = $\dots\dots\dots$ [Tr] = $\dots\dots\dots$ [At] = $\dots\dots\dots$ [at],

f) Do jakiej temperatury należy oziębić badane powietrze, by rozpoczął się proces wykrapłania wody?

$t = \dots\dots\dots$ [K] = $\dots\dots\dots$ [°C] $\dots\dots\dots$ [F],

6. Wnioski: