

ZADANIE G2

1 Wstęp

Ćwiczenie składa się z dwóch części. Celem pierwszej części jest wyznaczenie na podstawie własnych pomiarów różnych wielkości fizycznych opisujących zawartość pary wodnej w powietrzu. Pomiary wykonywane będą na platformie pomiarowej na dachu budynku, w pomieszczeniu pierwszej pracowni fizycznej, oraz na zewnątrz budynku. Celem drugiej części ćwiczenia jest analiza zmienności czasowej wybranych parametrów meteorologicznych. Dane potrzebne w tej części ćwiczenia pochodzą z automatycznej stacji meteorologicznej znajdującej się na platformie pomiarowej na dachu budynku.

2 Teoria

Powietrze to mieszanina gazów i aerozoli stanowiąca atmosferę ziemską. W skład suchego powietrza wchodzi azot (78%), tlen (21%), para wodna i inne gazy śladowe (takie jak dwutlenek węgla, argon czy ozon) [2].

Zawartość pary wodnej w powietrzu jest bardzo zmienna. Dlatego powietrze często traktowane jest jako mieszanina dwóch gazów doskonałych - suchego powietrza i pary wodnej. Suche powietrze to powietrze całkowicie pozbawione pary wodnej. Ma ono gęstość $1,293 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ (przy temperaturze 273 K i ciśnieniu 1013,25 hPa). Skład suchego powietrza pozostaje praktycznie niezmienny aż do wysokości 50 km.

Masa molowa suchego powietrza wynosi $M_d = 28,84 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$.¹

Masa molowa pary wodnej to $M_v = 18,02 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$.

2.1 Gęstość powietrza

Gęstość powietrza traktowanego jako mieszaniny pary wodnej i powietrza suchego wyraża się wzorem

$$\rho = \frac{m_d + m_v}{V}, \quad (1)$$

gdzie m_d - to masa suchego powietrza a m_v to masa pary wodnej. Masę powietrza suchego i pary wodnej można wyznaczyć na podstawie równania stanu gazu doskonałego. Równanie stanu gazu doskonałego ma postać:

$$pV = nRT, \quad (2)$$

gdzie p to ciśnienie, V - objętość, n - liczba moli, R - stała gazowa ($R = 8,314 \frac{\text{J}}{\text{mol K}}$) a T to temperatura.

Liczbę moli można wyrazić poprzez masę substancji m oraz jej masę molową M

¹wartość obliczona z prawa Daltona, traktując suche powietrze jako mieszaninę gazów idealnych

$$n = \frac{m}{M}. \quad (3)$$

Dla powietrza traktowanego jako mieszaniny powietrza suchego i pary wodnej całkowite ciśnienie to suma ciśnień parcjalnych (cząstkowych) powietrza suchego p_d i pary wodnej e

$$p = p_d + e. \quad (4)$$

Równanie stanu gazu można zapisać dla obu składników mieszaniny

$$p_d V = n_d R T, \quad (5)$$

$$e V = n_e R T. \quad (6)$$

Równanie 5 to równanie stanu gazu suchego powietrza, a równanie 6 to równanie stanu gazu dla pary wodnej.

Podstawiając 3 do równań 5 i 6 otrzymujemy

$$m_d = \frac{p_d V M_d}{R T}, \quad (7)$$

$$m_v = \frac{e V M_v}{R T}. \quad (8)$$

2.2 Wilgotność względna vs właściwa, ciśnienie parcjalne

Wilgotność jest miarą zawartości pary wodnej (nie wody!) w powietrzu.

Wilgotność właściwa to stosunek masy pary wodnej zawartej w danej objętości powietrza do całkowitej masy powietrza. Wilgotność właściwa jest oznaczana jako q i jest wielkością bezwymiarową. Często ze względu na małą zawartość pary wodnej, wilgotność właściwą podaje się w gramach pary wodnej na kilogram powietrza

$$q = \frac{m_v}{(m_v + m_d)}. \quad (9)$$

Ciśnienie parcjalne pary wodnej (lub inaczej ciśnienie cząstkowe) to ciśnienie wywierane tylko przez parę wodną. Ogólnie, ciśnienie parcjalne to ciśnienie, jakie wywierałby dany składnik mieszaniny gazów, gdyby w tej samej temperaturze sam zajmował objętość całej mieszaniny. Ciśnienie parcjalne pary wodnej oznaczane jest najczęściej jako e (wzór 6) (jednostką są oczywiście Pa).

Maksymalna zawartość pary wodnej w powietrzu jest zależna od temperatury. Po przekroczeniu tej wartości para wodna zaczyna kondensować - tworząc np. kropelki chmury. Stan, w którym zawartość pary wodnej osiągnęła swoją maksymalną wartość to stan nasycenia. Ciśnienie parcjalne pary wodnej w stanie nasycenia jest jedynie funkcją temperatury. Opisuje to wzór Clausiusa-Clapeyrona [1] :

$$\frac{de_s}{dT} = \frac{L(T)e_s M_v}{R T^2}, \quad (10)$$

gdzie L to ciepło utajone przemiany fazowej.

Zależność $L(T)$ jest słaba i często się ją pomija. W praktyce często korzysta się z empirycznego wzoru na prężność pary wodnej w stanie nasycenia w granicach temperatur od $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $35\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ma on postać [1]:

$$e_s(T) = 6,112 \exp\left(\frac{17,67T}{T + 243,5}\right). \quad (11)$$

(Temperaturę należy podawać w $^{\circ}\text{C}$. Ciśnienie parcjalne jest obliczone w hPa).

Wilgotność względna to stosunek ciśnienia parcjalnego pary wodnej w stanie aktualnym do ciśnienia parcjalnego w stanie nasycenia. Jest to wielkość bezwymiarowa, często podawana w %

$$f = \frac{e}{e_s} 100\%. \quad (12)$$

2.3 Temperatura odczuwalna

Temperatura odczuwalna określa, jakie odczucie termiczne wystąpi przy danych warunkach meteorologicznych. Wielkość ta nie jest dobrze zdefiniowana, gdyż odczucie temperatury zależy od bilansu energetycznego powietrzni skóry człowieka. Bilans ten zależy od takich parametrów meteorologicznych jak temperatura powietrza, prędkość wiatru czy wilgotność. Wprowadzono wiele różnych modeli obliczania temperatury odczuwalnej. Jeden z nich daje następującą zależność temperatury odczuwalnej od temperatury i prędkości wiatru:

$$T_{wc} = 13,12 + 0,6215T - 11,37v^{0,16} + 0,3965Tv^{0,16}, \quad (13)$$

gdzie T_{wc} to temperatura odczuwalna, a v to prędkość wiatru.

Temperaturę do wzoru podstawiamy wyrażoną w $^{\circ}\text{C}$ a prędkość wiatru w $\frac{\text{km}}{\text{h}}$.

Można zauważyć, że przy małych prędkościach wzór daje temperaturę odczuwalną większą niż rzeczywista zmierzona temperatura.

3 Aparatura pomiarowa

Termohigrometr Vaisala HMI41 służy do pomiaru wilgotności względnej i temperatury. Do pomiaru wilgotności względnej używany jest kondensator, którego pojemność zależy od wilgotności. Zakresy pomiarowe oraz dokładność pomiaru przedstawiono w tabeli 1.

Psychrometr Assmana służy do pomiaru wilgotności względnej i temperatury. Składa się on z dwóch termometrów (suchego i wilgotnego) umieszczonych w oprawie z urządzeniem wentylującym (aspiratorem) wymuszającym przepływ powietrza wokół zbiorniczków termometru. Wentylacja wymusza



Rysunek 1: Termohigrometr.



Rysunek 2: Psychrometr aspiracyjny Assmana.

mierzony parametr	zakres	dokładność
temperatura powietrza	od $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ przy $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$
wilgotność względna	od 0% do 100%	$\pm 2\%$ od 0% do 90% $\pm 3\%$ od 90% do 100%

Tabela 1: Parametry termohigrometru Vaisala HMI41 [5].

parowanie wody z batystu. Ciepło utajone przemiany fazowej (parowania) powoduje spadek temperatury zwilżonego termometru.

Przed pomiarami termometr, którego zbiorniczek owinięty jest batystem należy zwilżyć. Następnie uruchamia się aspirator. Odczytu z termometrów dokonuje się po ustaleniu temperatury na termometrze zwilżonym. Wartość wilgotności względnej odczytuje się z tablic psychrometrycznych (w zestawie razem z psychrometrem).

Automatyczna stacja meteorologiczna Vaisala WXT510 umieszczona jest na platformie pomiarowej na dachu budynku. Stacja rejestruje m.in. temperaturę powietrza, ciśnienie atmosferyczne i wilgotność względną (zasada pomiaru wilgotności jest taka sama jak dla termohigrometru). Zakresy pomiarowe oraz dokładność pomiarów odpowiednich wielkości przedstawione zostały w tabeli 2.

mierzony parametr	zakres	dokładność
temperatura powietrza	od $-52\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\pm 0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ przy $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$
ciśnienie atmosferyczne	od 600 hPa do 1100 hPa	$\pm 0,5\text{ hPa}$ przy $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$
wilgotność względna	od 0% do 100%	$\pm 3\%$ od 0% do 90% $\pm 5\%$ od 90% do 100%

Tabela 2: parametry automatycznej stacji meteorologicznej Vaisala WXT510 [6].

4 Wykonanie ćwiczenia

4.1 Część pierwsza

Na podstawie pomiarów wykonanych przy pomocy psychrometru aspiracyjnego Aassmana należy wyznaczyć wraz z niepewnościami:

- wilgotność względną (przy pomoc tablic),
- ciśnienie parcjale pary wodnej w stanie nasycenia,
- ciśnienie parcjale pary wodnej w stanie aktualnym,
- wilgotność właściwą,
- gęstość powietrza.

Potrzebne w dwóch ostatnich punktach ciśnienie atmosferyczne można spisać z pomiarów stacji meteorologicznej znajdującej się na Ursusie (www.meteo.waw.pl) lub następnego dnia z pomiarów naszej stacji meteorologicznej (<http://metobs.igf.fuw.edu.pl>) Wyniki należy porównać z pomiarami wykonanymi przy pomocy termohigrometru Vaisala HMI41.

4.2 Część druga

Ze strony (<http://metobs.igf.fuw.edu.pl>) należy pobrać pliki z danymi z automatycznej stacji meteorologicznej z trzech ostatnich dni. Należy wykreślić przebiegi dobowe:

- ciśnienia parcjalego pary wodnej,
- wilgotności właściwej,
- wilgotności względnej,
- temperatury,
- temperatury odczuwalnej.

Dane przedstawione na wykresach należy uśrednić co 5 min.

Zwróć uwagę na to, które z parametrów opisujących zawartość pary wodnej w powietrzu mają podobny przebieg. Czy któreś się różnią? Czy widać wpływ temperatury na wilgotność względną? Czy temperatura odczuwalna różni się od rzeczywistej temperatury mierzonej przez stację? Dlaczego?

Częstym problemem w tej części ćwiczenia jest duża liczba danych pomiarowych dostarczanych przez automatyczną stację badawczą. Aby sobie z tym łatwo poradzić zachęcamy do napisania własnego programu/skryptu rysującego wykresy.

W czasie pracowni pokazany zostanie skrypt uśredniający dane ze stacji meteorologicznej, napisany w języku programowania awk. Uśrednione parametry zapisywane są do nowego pliku o nazwie

'metedata_averaged'. W kolejnych kolumnach są następujące dane: minuty, temperatura, odchylenie standardowe od średniej dla temperatury, ciśnienie i odchylenie standardowe od średniej dla ciśnienia, wilgotność względna wraz z odchyleniem oraz średnia prędkość wiatru, która jest już uśredniona w pliku wejściowym. Następnie do zrobienia wykresów (np. przebiegu zmian temperatury w czasie) można użyć poniższego przykładowego skryptu napisanego w programie *gnuplot*: [3, 4]. Wynik jego działania przedstawia wykres 3.

```
1  set encoding iso_8859_2
2  set terminal svg
3  set output 'tmp.svg'

4  del = 0.3 # niepewność przyrządu

5  set title ''
6  set xlabel 'czas'
7  set ylabel 'temperatura [C]'
8  set xrange [0:1440]
9  set grid
10 set xtics ('00:00' 0, '04:00' 240, '08:00' 480, '12:00' 720, \
            '16:00' 960, '20:00' 1200, '24:00' 1440)
11 set style line 1 linetype 1 lw 2 linecolor rgb "steelblue"
12 set style line 2 linetype 1 lw 2 linecolor rgb "light-blue"
13 plot \
    'tmp' using 1:2:($2-sqrt(($3)**2+(del**2)/3)) \
        with filledcurves ls 2 notitle,\
    'tmp' using 1:2:($2+sqrt(($3)**2+(del**2)/3)) \
        with filledcurves ls 2 notitle,\
    'tmp' using 1:2 with lines ls 1 notitle
14 set output
15 set terminal X11
```

Linijka 1 opisuje kodowanie znaków (polskie znaki) pod Linuxem, pod Windowsem należy zamienić `iso_8859_2` na `cp1250`.

Linijka 2 to wybór formatu zapisu wykresu.

Polecamy zapisywanie wykresów w formie grafiki wektorowej (np. `svg`, `eps`). Aby zmienić format zapisu na `eps` należy wpisać `set terminal postscript`. Linijka 3 to wybór nazwy pliku, do którego zostanie zapisany generowany wykres.

Linijka 4 zawiera informację o niepewności pomiaru temperatury.

Linijki 5 - 9 to wybór takich opcji jak tytuł wykresu, tytuły osi, zakres osi czy siatka.

Linijka 10 to wybór etykiet podziałki na osi x .

Linijki 11 - 12 to wybór stylu linii rysowanych na wykresie.

Linijka 13 to polecenie narysowania na wykresie przebiegu temperatury wraz z zaznaczoną na nim niepewnością pomiarową.

Linijki 14 - 15 to zamknięcie wykresu.

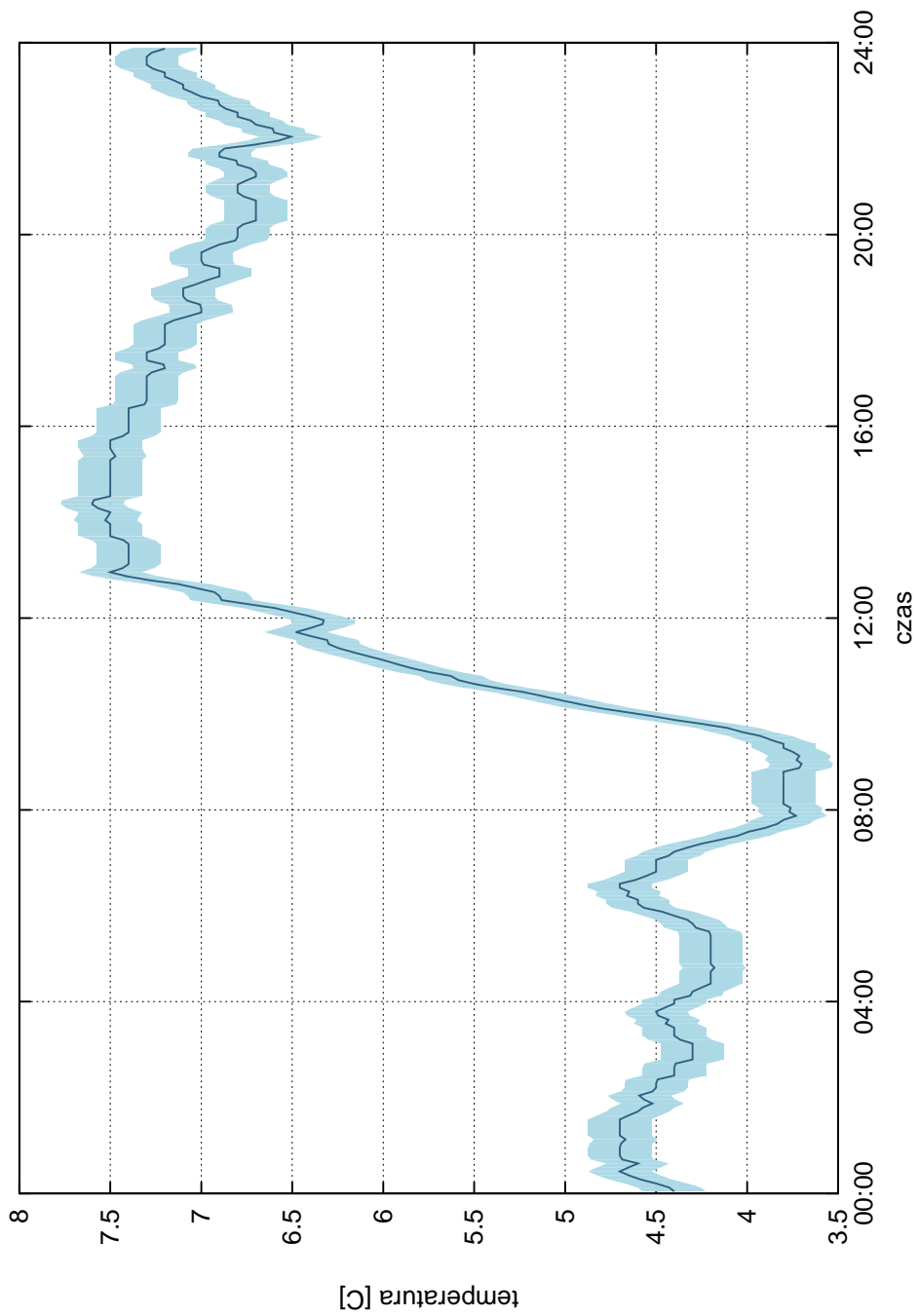
4.3 Pytania na rozmowę wstępną

- Czego temperaturę mierzy termometr?
- Czy temperatura wilgotnego termometru powinna być wyższa czy niższa niż temperatura suchego termometru? Dlaczego?
- Jak można zmierzyć wilgotność powietrza?
- Jak na podstawie pomiarów wilgotności względnej (i ciśnienia atmosferycznego) wyznaczyć wilgotność właściwą i gęstość powietrza?
- Czy gęstość suchego powietrza jest mniejsza czy większa niż gęstość powietrza wilgotnego?

Zachęcamy również do napisania raportu w $\text{L}^{\text{T}}\text{E}^{\text{X}}$ 'u [7].

Literatura

- [1] R.R. Rogers and M.K. Yau *A Short Course in Cloud Physics (third edition)*, Bttenworth-Heinemann, 1996.
- [2] Glossary of Meteorology <http://amsglossary.allenpress.com/glossary>.
- [3] Gnuplot homepage <http://www.gnuplot.info/>.
- [4] Gnuplot tutrial <http://www.ibm.com/developerworks/library/l-gnuplot/>.
- [5] Specyfikacja termohigrometru <http://www.vaisala.com/en/industrialmeasurements/products/humidityanddewpoint/portable/Pages/HMI41.aspx>
- [6] Specyfikacja automatycznej stacji badawczej http://www.vaisala.com/VaisalaDocuments/UserGuidesandQuickRefGuides/WXT510_User_Guide_in_English.pdf
- [7] Helmut Kopka and Patrick W. Daly, *A Guide to L^TE^X: Document Preparation for Beginners and Advanced Users*, fourth edition, Addison-Wesley (2004).



Rysunek 3: Przykładowy wykres przebiegu zmian temperatury.