

ĆWICZENIE NR 6

POMIAR ILOŚCI CIEPŁA I BADANIE CIEPŁOMIERZA

(opracował Eligiusz Pawłowski)

Cel i zakres ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z problematyką pomiaru ilości ciepła, obowiązującymi w tym zakresie przepisami a także z budową, zasadą działania i podstawowymi parametrami ciepłomierza oraz sposobem jego sprawdzania.

1. WSTĘP

Ciepło, podobnie jak energia elektryczna oraz nośniki energii chemicznej (w postaci paliw płynnych, węgla i gazu), jest towarem podlegającym operacjom kupna - sprzedaży pomiędzy jej wytwórcą, dystrybutorem i odbiorcą. Ustawa Prawo energetyczne (Dz. U. z 2006 r., Nr 89, poz. 625 z późn. zm.) nakłada na właściciela lub zarządcę każdego budynku obowiązek wyposażania go w układ pomiarowo rozliczeniowy, służący do obliczania należności za ciepło dostarczane do budynku oraz podziału kosztów ciepła na użytkowników w poszczególnych lokalach. Cena ciepła jest stosunkowo wysoka i koszty ogrzewania stanowią poważną część wydatków społeczeństwa. Dla zapewnienia rzetelności rozliczeń finansowych niezbędne są więc odpowiednie przyrządy pomiarowe do wyznaczania ilości ciepła, czyli mierniki ilości ciepła (*ang. heat meters*), zwane również licznikami ciepła (*niem. wärmzählern*) lub krótko ciepłomierzami. Ze względu na wysokie koszty wytwarzania i dystrybucji ciepła oraz jego duże znaczenie zarówno w produkcji przemysłowej jak i dla indywidualnych odbiorców, zagadnienia pomiaru ciepła są na tyle ważne, że zostały uregulowane prawnie poprzez uchwalenie odpowiednich ustaw oraz wydanie norm przemysłowych i rozporządzeń ministerialnych [1], [2], ... , [8].

Wszelkie działania, które wynikają z różnych wymagań ustawowych i dotyczą pomiarów, jednostek miar, przyrządów pomiarowych oraz metod pomiarowych i które są przeprowadzane przez kompetentne organy, stanowią szczególny dział metrologii nazywany **metrologią prawną**. Celem metrologii prawnej jest zapewnienie rzetelności wykonywanych pomiarów w handlu, usługach i innych ważnych dziedzinach działalności człowieka, takich jak: ochrona życia i zdrowia, obronność i bezpieczeństwo państwa, pobieranie podatków, kontrola celna oraz kontrola jakości produkcji itp. Kompetentne organy odpowiedzialne za działania metrologii prawnej, lub za część tych działań, są zwykle nazywane służbami metrologii prawnej (organami administracji miar). W Polsce naczelnym organem administracji miar jest Prezes Głównego Urzędu Miar [1].

Obowiązująca w Polsce Ustawa Prawo o miarach [1] wprowadza obowiązek prawnej kontroli metrologicznej przyrządów pomiarowych. **Prawna kontrola metrologiczna** są to działania zmierzające do wykazania, że przyrząd pomiarowy spełnia wymagania określone we właściwych przepisach. Jednocześnie w chwili obecnej, na mocy Ustawy O systemie zgodności [2] wszystkie wyroby (nie tylko przyrządy pomiarowe) przed wprowadzaniem do obrotu lub oddaniem do użytku w każdym kraju członkowskim Unii Europejskiej podlegają **ocenie zgodności** z zasadniczymi i/lub szczegółowymi wymaganiami określonymi w odpowiednich przepisach. Zasadnicze wymagania dla przyrządów pomiarowych określa tzw. dyrektywa MID Parlamentu Europejskiego (*Measuring Instruments Directive*), wdrożona do stosowania w Polsce rozporządzeniem Ministra Gospodarki [3]. Dyrektywa ta określa

również procedury oceny zgodności dla przyrządów pomiarowych, sposoby oznakowania metrologicznego przyrządów pomiarowych (znak M) oraz wzór znaku CE .

Zgodnie z Ustawą Prawo o miarach [1], prawnej kontroli metrologicznej podlegają przyrządy pomiarowe, które mogą być stosowane:

- 1) w ochronie zdrowia, życia i środowiska,
- 2) w ochronie bezpieczeństwa i porządku publicznego,
- 3) w ochronie praw konsumenta,
- 4) przy pobieraniu opłat, podatków i innych należności budżetowych oraz ustalania upustów, kar umownych, wynagrodzeń i odszkodowań, a także przy pobieraniu i ustalaniu podobnych należności i świadczeń,
- 5) przy dokonywaniu kontroli celnej,
- 6) w obrocie (handlu)

- i są określone w rozporządzeniu Ministra ds. gospodarki [4]. Szczegółowy sposób przeprowadzania tej kontroli określa kolejne rozporządzenie [5]. Dodatkowo, dla poszczególnych rodzajów przyrządów pomiarowych są określone wymagania opisane w odpowiednich normach. Wymagania, którym powinny odpowiadać ciepłomierze, są określone w rozporządzeniu [6] oraz w Polskiej Normie [7]. W znacznej części wszystkie te dokumenty oparte są na rekomendacji Międzynarodowej Organizacji Metrologicznej OIML [9]. Prawna kontrola metrologiczna obejmuje zatwierdzenie typu i legalizację. **Zatwierdzenie typu** jest to potwierdzenie, w drodze decyzji kompetentnego organu administracji miar, że typ przyrządu pomiarowego spełnia wymagania. **Legalizacja** (pierwotna, jednostkowa lub ponowna) jest to zespół czynności obejmujących sprawdzenie, stwierdzenie i poświadczenie dowodem legalizacji, że przyrząd pomiarowy spełnia wymagania. Zatwierdzenie typu dotyczy wszystkich przyrządów pomiarowych danego typu, natomiast legalizacja dotyczy każdego egzemplarza przyrządu pomiarowego z osobna. Zasadniczym elementem legalizacji jest wzorcowanie. **Wzorcowanie** są to czynności ustalające relację między wartościami wielkości mierzonej wskazanymi przez przyrząd pomiarowy a odpowiednimi wartościami wielkości fizycznych, realizowanymi przez wzorzec jednostki miary. W wyniku wzorcowania wyznaczane są błędy przyrządu pomiarowego.

Zgodnie z przepisami ciepłomierze podlegały obowiązkowi zatwierdzenia typu do 2007 roku, obecnie podlegają obowiązkowi dokonania oceny zgodności [6]. Po 5 latach ciepłomierze podlegają obowiązkowi legalizacji ponownej [5]. Legalizacji dokonują organy administracji miar przy pomocy podległych im urzędów na wniosek zgłaszającego [1]. Legalizacja może być dokonywana w punkcie legalizacyjnym utworzonym w porozumieniu z dyrektorem Okręgowego Urzędu Miar na terenie zgłaszającego, który powinien zapewnić niezbędne pomieszczenie, urządzenia techniczne i pomoc przy jej dokonywaniu.

2. ZASADA POMIARU ILOŚCI CIEPŁA

Zagadnienie wykorzystania ciepła do różnorodnych praktycznych celów, a szczególnie do wykonywania pracy mechanicznej, intrygowało ludzi od bardzo dawna. Już w starożytności budowano proste maszyny cieplne, poruszane siłą ogrzanego powietrza lub wody. Zdawano więc sobie sprawę, że ciepło i praca mechaniczna są ze sobą w jakiś sposób powiązane. Jednak niewątpliwie najstarszym i do dziś bardzo ważnym praktycznym zastosowaniem ciepła było i jest ogrzewanie miejsca pobytu ludzi.

Pierwszy przyrząd pomiarowy przydatny do techniki cieplnej, pierwowzór termometru zwany termoskopem, zbudował Galileusz w latach 1592-1603. Początki termodynamiki to prace Jamesa Watta (1736-1819) nad konstrukcją i badaniem maszyn parowych (jego odśrodkowy regulator obrotów maszyny parowej niewątpliwie jest pierwszym układem automatycznej regulacji z ujemnym sprzężeniem zwrotnym). Pierwsze wyniki badań nad

maszyną parową opublikował w 1824 r. Mikołaj Leonard Sadi Carnot w pracy „Rozważania nad poruszającą siłą ognia”. Największym jednak problemem było zdefiniowanie pojęcia *ciepło*. Początkowo panowała hipoteza, że ciepło jest pewną nieważką substancją (nazwę *caloricum* wprowadził w 1789 r. Anton Laurent Lavoisier), która przepływa pomiędzy dwoma ciałami na podobieństwo strumienia wody. Substancję tę zwano również *rodnikiem ciepła*. W 1842 r. Julius Robert Mayer stwierdził, że ciepło i praca są różnymi postaciami energii. Jako pierwszy określił wtedy przybliżony stosunek między ciepłem a pracą mechaniczną, z której ono powstało i sformułował pierwszą zasadę termodynamiki. Warto wspomnieć, że pojęcie energii wprowadził już w 1807 r. Tomasz Young (znany też z modułu Younga w prawie Hooke'a o odkształcaniu ciał sprężystych). Nad wyznaczeniem cieplnego równoważnika pracy mechanicznej pracował James Prescott Joule (1818-1889), który jako pierwszy podał jego dość dokładną wartość.

Obecnie przyjmuje się, że **energia jest właściwością materii, zaś ciepło jest jedną z form przekazywania energii pomiędzy dwoma układami, inną niż praca** [12], [13]. Proces przekazywania ciepła może przebiegać poprzez : **przewodnictwo cieplne, konwekcję** (przy czym rozróżnia się konwekcję swobodną - spowodowaną różnicą temperatur, siłą ciężkości lub różnicą ciśnień, oraz wymuszoną - spowodowaną czynnikami zewnętrznymi, np. przez pompę, sprężarkę, dmuchawę, mieszadło) lub **promieniowanie cieplne** (w tym : przyjmowanie ciepła - pomiędzy powierzchnią ciała stałego a płynem oraz przenikanie ciepła - pomiędzy dwoma płynami rozdzielonymi ścianką). Wielkość skalarną, określającą zmianę energii wewnętrznej układu wymienionymi sposobami nazywa się **ilością ciepła Q** , a jej praktycznie stosowanymi jednostkami są džul [J] oraz kilowatogodzina [kWh]. Podstawowym przyrządem stosowanym do pomiaru ilości ciepła jest **kalorymetr**, umożliwiający precyzyjne przeprowadzenie bilansu cieplnego układu podlegającego przemianie termodynamicznej. Jeżeli w układzie nie jest wykonywana praca i jest on ciałem jednorodnym, zmieniającym swój stan w sposób kwazistatyczny (bardzo wolno), to ilość ciepła Q wymieniona z otoczeniem jest określona znanym wzorem (1) :

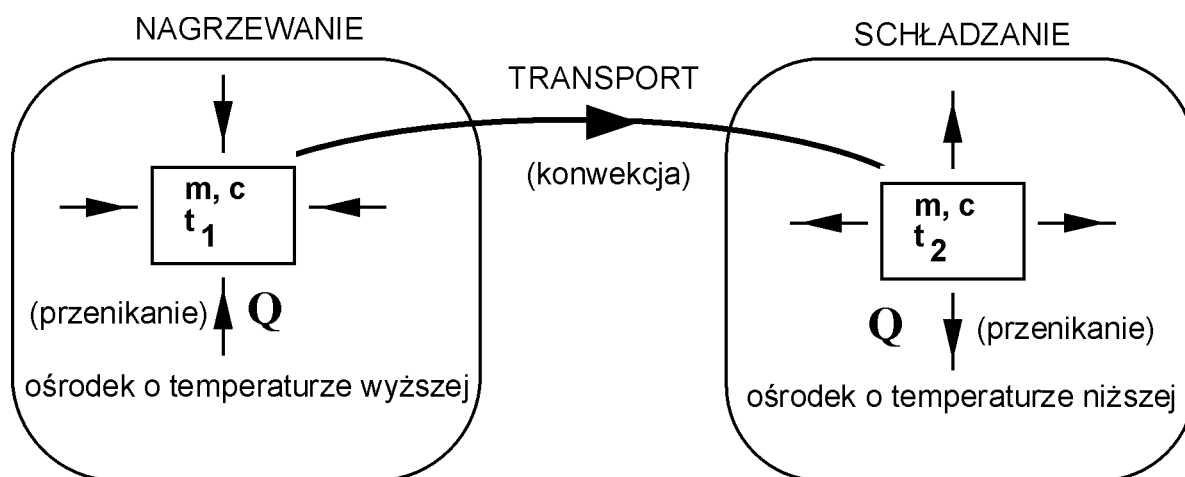
$$Q = m \int_{t_1}^{t_2} c(t) dt \quad (1)$$

Pomiar ilości ciepła Q wymaga więc wyznaczenia masy m układu podlegającego przemianie, jego ciepła właściwego c oraz temperatury t_1 przed i t_2 po przemianie. Ciepło właściwe c jest w ogólności zależne od temperatury t , co w wielu przypadkach znacznie komplikuje pomiary ilości ciepła.

Możliwość przekazywania ciepła pomiędzy różnymi układami jest wykorzystywana w instalacjach grzewczych. Zasada działania instalacji grzewczej (centralnego ogrzewania **c.o.**) (rys.1) polega na umieszczeniu ciała o masie m (nazywanego nośnikiem energii) w ośrodku o temperaturze wyższej, w którym pobierając ciepło (przez przenikanie) zwiększa swoją energię wewnętrzną i nagrzewa się do temperatury t_1 , i następnie przetransportowaniu go (przez konwekcję wymuszoną lub swobodną) do ośrodka o temperaturze niższej, w którym oddając (przez przenikanie) pobrane ciepło podwyższa temperaturę otoczenia, schładzając się jednocześnie do temperatury t_2 . Ilość przetransportowanego w ten sposób ciepła Q można wyznaczyć ze wzoru (1).

W rzeczywistości układ działa w sposób ciągły, tzn. po schłodzeniu do temperatury t_2 nośnik energii jest transportowany z powrotem do ośrodka o wyższej temperaturze, gdzie powtórnie nagrzewa się do temperatury t_1 i cały proces powtarza się wielokrotnie. W roli nośnika energii powszechnie stosowana jest woda, której transport po nagrzaniu jest stosunkowo prosty za pomocą systemu rurociągów i pomp. Zasada ta jest również stosowana

w instalacjach chłodniczych, klimatyzacyjnych, centralnej ciepłej wody użytkowej (**c.c.w.u.**) oraz w wielu procesach technologicznych. W roli nośnika energii stosuje się również parę wodną, słoń wodę, powietrze, olej, freon, amoniak, gazy spalinowe, a przy bardzo dużych mocach np. w reaktorach atomowych, również stopione metale (sód, cynk, ołów, rtęć). Stosowanie wody jest korzystne ze względu na stosunkowo dużą wartość jej ciepła właściwego c (Tabela 10).

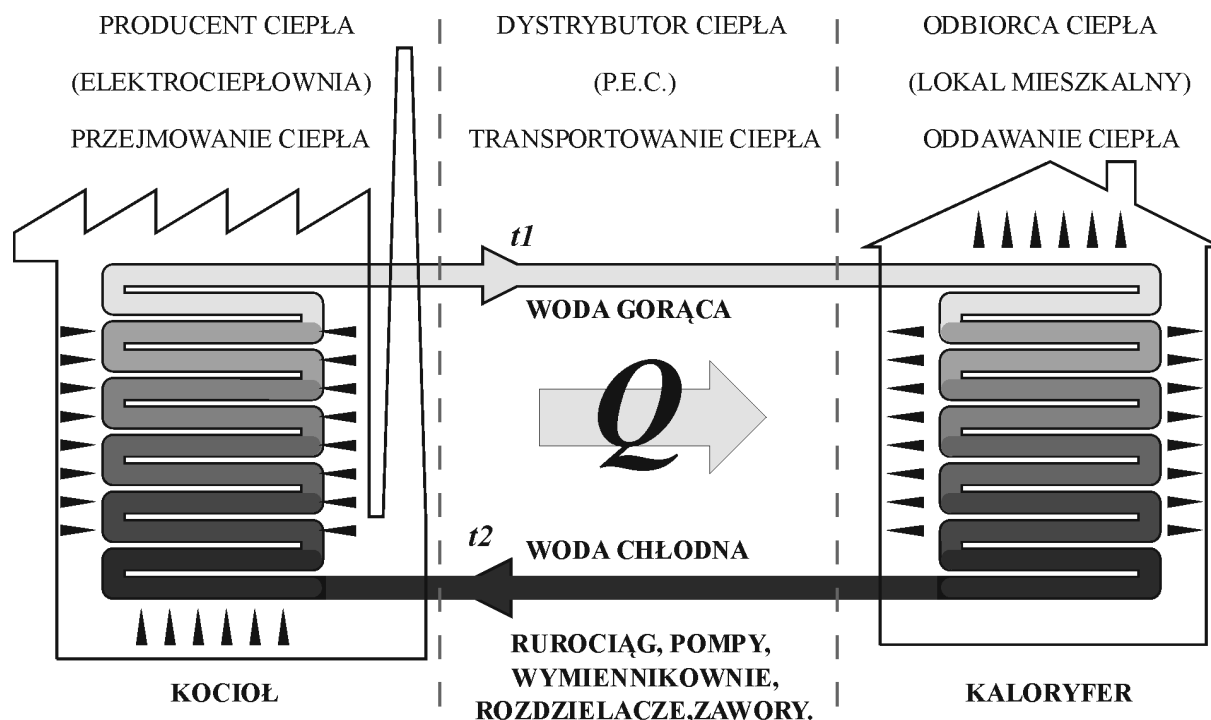


Rys.1. Zasada działania instalacji grzewczej c.o.

Zgodnie z drugą zasadą termodynamiki, w takiej instalacji jak na rys.1, **ciepło może być przekazywane jedynie w kierunku spadku temperatury**. Należy jednak dodać, że jeśli nośnik energii podlega nie tylko zmianom temperatury, ale w wyniku wykonywanej w układzie pracy również przemianom stanu skupienia, ciśnienia i objętości, to ciepło może być w instalacji transportowane również w kierunku przeciwnym, tzn. w kierunku wzrostu temperatury. Takie instalacje działają na zasadzie odwróconego silnika cieplnego. Stosuje się w nich najczęściej freon lub amoniak. Dla przykładu, w chłodzarce domowej ciepło jest właśnie transportowane w kierunku od temperatury niższej (wnętrze chłodziarki) do temperatury wyższej (otoczenie). Podobnie działają pompy ciepła, znajdujące ostatnio coraz szersze zastosowanie w systemach grzewczych wykorzystujących niekonwencjonalne, naturalne źródła ciepła, takie jak energia geotermiczna, słoneczna, odpadowa ze ścieków miejskich itp. W tych przypadkach pomiar ilości ciepła jest znacznie bardziej skomplikowany niż w zwykłej instalacji ciepłowniczej. Transportowanie ciepła w dowolnym kierunku jest również możliwe za pomocą tzw. **modułów Peltiera**, działających na zasadzie odwrotnego zjawiska Seebecka. Ich zastosowanie jest jednak na dziś ograniczone, ze względu na niewielkie wartości strumienia cieplnego, rzędu maksymalnie kilkuset watów.

Dalsze rozważania teoretyczne oraz eksperymenty pomiarowe dotyczą wyłącznie mierników ilości ciepła dla instalacji grzewczych z nośnikiem w postaci gorącej wody. Zgodnie z przepisami [6] dla takich przyrządów pomiarowych przyjęto nazwę: **ciepłomierze do wody**. W dalszej części instrukcji będą one nazywane w skrócie ciepłomierzami.

Uproszczony schemat rozpatrywanej dla potrzeb ćwiczenia instalacji grzewczej, w której należy dokonać pomiaru ilości ciepła, przedstawia rys.2. Nośnik ciepła, którego rolę pełni gorąca woda, jest w sposób ciągły transportowany pomiędzy źródłem ciepła (np. kotłem w elektrociepłowni), gdzie nagrzewa się do temperatury t_1 , a odbiornikiem ciepła (np. grzejnikiem w mieszkaniu), gdzie schładza się do temperatury t_2 , przekazując do otoczenia pewną ilość ciepła Q . W małych instalacjach (domek jednorodzinny) wystarczająca jest konwekcja swobodna (grawitacyjna), w większych konieczne jest zastosowanie pomp.



Rys.2. Uproszczony schemat instalacji centralnego ogrzewania c.o.

Niestety, bezpośrednie zastosowanie wzoru (1) do pomiaru ilości ciepła Q w przypadku tego rodzaju instalacji ciepłowniczej nie jest możliwe. Wynika to z faktu, że w instalacji tej ciepło Q jest transportowane w sposób ciągły w czasie, w jednym i tym samym kierunku (od źródła ciepła do jego odbiornika), ale nośnik energii (woda) jest transportowany w obu kierunkach. Nie jest więc możliwe w prosty sposób wyznaczenie masy m nośnika energii, będącego cały czas w ruchu i wielokrotnie wykorzystywanego w instalacji, nie są również stałe w czasie wartości temperatur t_1 i t_2 . Ilość ciepła Q dostarczona do odbiornika w czasie od τ_0 do τ_1 może być w takim przypadku wyznaczona ze wzoru całkowego (2) :

$$Q = \int_{\tau_0}^{\tau_1} q_m (h_1 - h_2) d\tau \quad (2)$$

gdzie : q_m - przepływ masowy nośnika ciepła,
 h_1 - entalpia właściwa nośnika ciepła w temperaturze wyższej t_1
 pod odpowiadającym jej ciśnieniem,
 h_2 - entalpia właściwa nośnika ciepła w temperaturze niższej t_2
 pod odpowiadającym jej ciśnieniem.

W uproszczeniu entalpia h może być rozumiana jako zasób energii ciała znajdującego się w odpowiednich warunkach (temperatura, ciśnienie, stan skupienia), jej jednostką jest [J kg^{-1}].

Stosowanie w praktyce wzoru (2) napotyka jednak również na trudności, gdyż ze względów technicznych pomiar przepływu masowego q_m nośnika energii zastępuje się zazwyczaj pomiarem przepływu objętościowego q_v , co dodatkowo wymaga uwzględnienia jego gęstości ρ , która niestety jest zależna od temperatury, a więc w praktyce zależy również od punktu zainstalowania miernika przepływu (na dopływie do odbiornika ciepła, tzn. w

rurociągu z gorącą wodą, lub na odpływie, czyli w rurociągu z wodą chłodną). Również ciepło właściwe nośnika c , a więc i jego entalpia właściwa h są zależne od temperatury. Dla uproszczenia pomiarów i związanych z nimi obliczeń wprowadzono **współczynnik cieplny**, oznaczany literą k , będący funkcją odpowiednich właściwości fizycznych nośnika ciepła oraz jego temperatury, zgodnie ze wzorem (3) :

$$k = \rho \frac{h_1 - h_2}{t_1 - t_2} \quad (3)$$

przy czym ρ jest gęstością nośnika ciepła w miejscu pomiaru przepływu tzn. w temperaturze t_1 lub t_2 i pod odpowiednim ciśnieniem. Współczynnik ten jest równy ilości ciepła jaką wymieni z otoczeniem 1 m³ nośnika energii, znajdującego się w odpowiednich warunkach, przy zmianie temperatury o 1 K, jego praktycznie stosowaną jednostką jest [MJ m⁻³ K⁻¹]. Wartości współczynnika cieplnego k dla wody stabelaryzowano i opublikowano [10]. Zawierają je Tabela 1 i Tabela 2, odpowiednio do miejsca pomiaru objętości na powrocie lub zasilaniu wymiennika ciepła. Tak zdefiniowany współczynnik cieplny k uwzględnia w sobie wszystkie niezbędne właściwości fizyczne nośnika ciepła (w tym przypadku wody) i pozwala na znaczne uproszczenie pomiaru. Ilość ciepła Q można prosto uzależnić od objętości V nośnika energii, który przepłynął przez odbiornik podczas pomiaru, wg wzoru (4) :

$$Q = \int_{V_0}^{V_1} k(t_1 - t_2) dV \quad (4)$$

Ze względu na bardzo duże stałe czasowe instalacji ciepłowniczych, przy pomiarach ilości ciepła oraz przy sprawdzaniu ciepłomierzy przyjmuje się w praktyce, że w czasie trwania pomiaru w instalacji panuje stan ustalony (zachodzi przemiana kwazistatyczna), co pozwala uprościć zależność (4). Przy takim założeniu poprawna ilość ciepła Q_c dostarczona do odbiornika przez nośnik energii o objętości V jest równa wartości obliczonej ze wzoru (5) :

$$Q_c = kV(t_1 - t_2) \quad (5)$$

Oczywiście, wzór (5) ma zastosowanie również w przypadku odwrotnym, tzn. może być zastosowany do obliczenia ilości ciepła pobranego przez nośnik. Zasada pomiaru ilości ciepła za pomocą ciepłomierza działającego w oparciu o wzór (5) jest przedstawiona na rys.3. Warto zwrócić uwagę na pewne podobieństwo do pomiaru energii elektrycznej licznikiem indukcyjnym, w którym jest dokonywany pomiar prądu, napięcia i realizowane są operacje mnożenia oraz całkowania. Ciepłomierz składa się z przelicznika wskazującego, dwóch czujników temperatury oraz przetwornika przepływu. Para czujników temperatury oraz przetwornik przepływu dostarczają do przelicznika wskazującego niezbędnych danych o temperaturze t_1 nośnika dopływającego do wymiennika i temperaturze t_2 nośnika odpływającego oraz o jego objętości V . Do pomiaru objętości wykorzystuje się najczęściej wodomierze wirnikowe z kontaktronowym nadajnikiem impulsów, w którym wirujący magnes trwały sprzęgnięty z liczydłem wodomierza i umieszczony w pobliżu kontaktronu cyklicznie zamyka i otwiera jego styki. Coraz częściej stosowane są również przepływomierze elektromagnetyczne (indukcyjne), ultradźwiękowe, wirowe, Coriolis'a lub oparte o inną zasadę działania. W starszych konstrukcjach stosowany był również pomiar za pomocą zwężki. Pomiar temperatur realizowany jest z wykorzystaniem pary czujników platynowych typu Pt 100, Pt 500 lub Pt 1000 [8]. Praktycznie częściej stosowane są czujniki o rezystancjach większych (500 Ω i 1000 Ω), gdyż zapewniają one większą wartość sygnału

Tabela 1. Współczynnik ciepłoty $k(t_1, t_2)$ dla wody w $[\text{MJ m}^{-3} \text{K}^{-1}]$
 Pomiar objętości wody na powrocie w temperaturze niższej t_2

	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190
20	4.1830																		
30	4.1802	4.1711																	
40	4.1790	4.1704	4.1595																
50	4.1788	4.1711	4.1603	4.1466															
60	4.1793	4.1721	4.1616	4.1482	4.1322														
70	4.1804	4.1736	4.1634	4.1502	4.1344	4.1162													
80	4.1820	4.1756	4.1657	4.1527	4.1371	4.1191	4.0990												
90	4.1842	4.1781	4.1684	4.1557	4.1403	4.1225	4.1027	4.0811											
100	4.1869	4.1811	4.1717	4.1592	4.1441	4.1266	4.1070	4.0857	4.0630										
110	4.1903	4.1848	4.1757	4.1635	4.1485	4.1313	4.1121	4.0911	4.0687	4.0449									
120	4.1944	4.1892	4.1804	4.1684	4.1538	4.1368	4.1179	4.0973	4.0752	4.0518	4.0272								
130	4.1992	4.1943	4.1858	4.1741	4.1598	4.1432	4.1246	4.1043	4.0826	4.0595	4.0354	4.0101							
140	4.2048	4.2003	4.1951	4.1807	4.1667	4.1504	4.1322	4.1123	4.0909	4.0682	4.0444	4.0195	3.9936						
150	4.2112	4.2071	4.1992	4.1882	4.1745	4.1586	4.1407	4.1211	4.1002	4.0779	4.0545	4.0300	4.0045	3.9779					
160	4.2186	4.2148	4.2073	4.1966	4.1833	4.1677	4.1502	4.1310	4.1104	4.0886	4.0656	4.0415	4.0164	3.9902	3.9631				
170	4.2270	4.2236	4.2164	4.2060	4.1931	4.1779	4.1608	4.1420	4.1218	4.1003	4.0777	4.0541	4.0294	4.0037	3.9769	3.948			
180	4.2364	4.2333	4.2265	4.2166	4.2040	4.1892	4.1725	4.1541	4.1343	4.1133	4.0911	4.0679	4.0436	4.0183	3.9920	3.962	3.932		
190	4.2469	4.2442	4.2378	4.2283	4.2161	4.2017	4.1854	4.1674	4.1481	4.1275	4.1058	4.0830	4.0592	4.0343	4.0085	3.979	3.950	3.921	
200	4.2586	4.2564	4.2504	4.2413	4.2295	4.2155	4.1997	4.1822	4.1633	4.1431	4.1219	4.995	4.0762	4.0519	4.0266	3.996	3.968	3.939	3.907

$t_1 [^{\circ}\text{C}]$

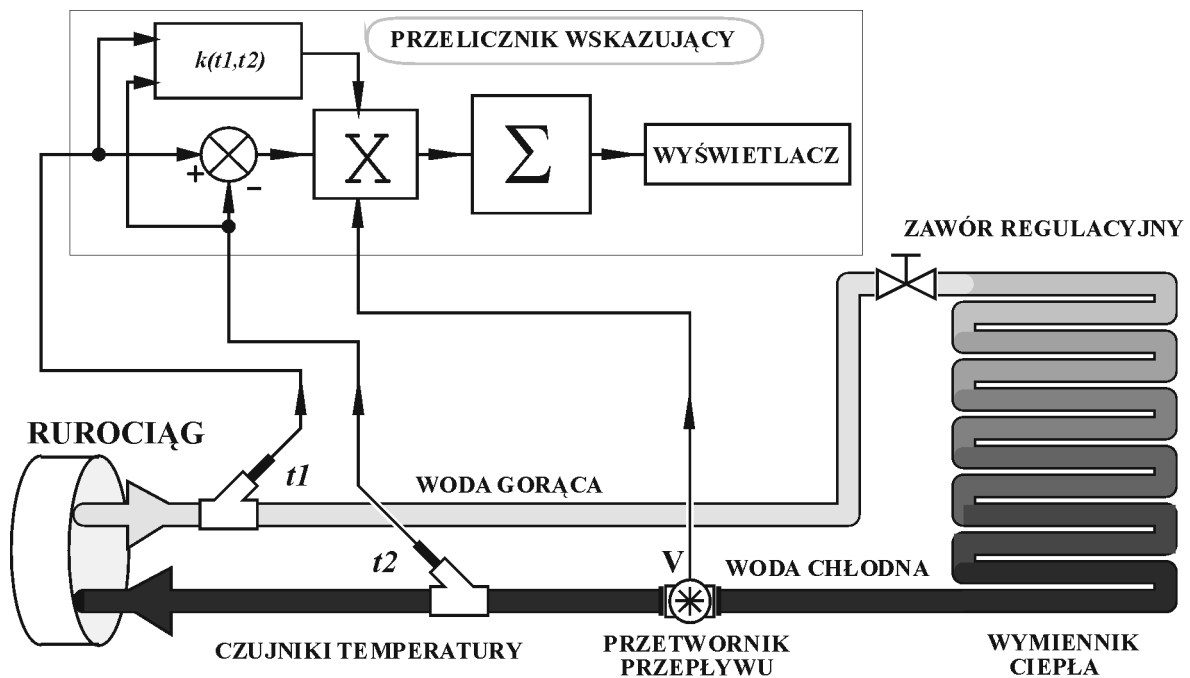
Tabela 2. Współczynnik cieplny $k(t_1, t_2)$ dla wody w [$\text{MJ m}^{-3} \text{K}^{-1}$]
Pomiar objętości wody na zasilania w temperaturze wyższej t_1

	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	
20	4.1768																			
30	4.1631	4.1603																		
40	4.1474	4.1454	4.1450																	
50	4.1296	4.1282	4.1282	4.1290																
60	4.1097	4.1088	4.1091	4.1102	4.1117															
70	4.0879	4.0874	4.088	4.0893	4.0910	4.0932														
80	4.0643	4.0642	4.0650	4.0665	4.0685	4.0709	4.0738													
90	4.0392	4.0393	4.0404	4.0422	4.0444	4.0470	4.0501	4.0538												
100	4.0126	4.0130	4.0144	4.0164	4.0188	4.0217	4.0251	4.0290	4.0336											
110	3.9874	3.9855	3.9871	3.9893	3.9920	3.9952	3.9988	4.0031	4.0080	4.0136										
120	3.9556	3.9567	3.9586	3.9611	3.9640	3.9675	3.9714	3.9760	3.9812	3.9872	3.9940									
130	3.9254	3.9268	3.9289	3.9317	3.9349	3.9387	3.9429	3.9478	3.9534	3.9598	3.9669	3.9749								
140	3.8941	3.8957	3.8982	3.9012	3.9048	3.9088	3.9134	3.9186	3.9246	3.9313	3.9388	3.9472	3.9565							
150	3.8616	3.8636	3.8663	3.8697	3.8735	3.8779	3.8828	3.8884	3.8947	3.9018	3.9096	3.9184	3.9281	3.9387						
160	3.8281	3.8304	3.8335	3.8371	3.8413	3.8416	3.8513	3.8573	3.8639	3.8714	3.8797	3.8889	3.8990	3.9102	3.9223					
170	3.7933	3.7960	3.7993	3.8033	3.8078	3.8128	3.8185	3.8248	3.8319	3.8397	3.8484	3.8580	3.8686	3.8801	3.8927	3.9064				
180	3.757	3.7603	3.7640	3.7683	3.7731	3.7785	3.7845	3.7912	3.7986	3.8069	3.8160	3.8260	3.8370	3.8489	3.8620	3.8762	3.8916			
190	3.7199	3.7233	3.7273	3.7319	3.7371	3.7428	3.7492	3.7563	3.7641	3.7728	3.7823	3.7927	3.8041	3.8165	3.8300	3.8447	3.8607	3.8782		
200	3.6811	3.6848	3.6891	3.6941	3.6996	3.7058	3.7125	3.7200	3.7282	3.7373	3.7473	3.7581	3.7700	3.7828	3.7969	3.8121	3.8287	3.8467	3.8664	

t_1 [°C]

t_2 [°C]

przy mniejszym prądzie zasilającym, co jest istotne przy powszechnym zasilaniu ciepłomierzy bateriami, przy wymaganym długim czasie nieprzerwanej pracy równym co najmniej okresowi ważności legalizacji (zazwyczaj 6 lat). Przelicznik współczesnych ciepłomierzy jest układem mikroprocesorowym wykonującym operacje matematyczne określone wzorem (5). Wartości współczynnika cieplnego k są zapisane w pamięci stałej ROM przelicznika (według tabeli 1 lub tabeli 2) albo są obliczane na bieżąco według znormalizowanych algorytmów [7]. Pomiary wykonywane są cyklicznie, a ich wyniki są sumowane i pamiętane przez okres całego sezonu grzewczego. Aktualna ilość dostarczonego ciepła jest pokazywana na wyświetlaczu. Przelicznik zazwyczaj umożliwia również odczytanie innych parametrów instalacji, np. temperatur nośnika t_1 i t_2 , mocy grzewczej, objętości V , liczby dni pracy itp. Czas trwania pojedynczego pomiaru jest dobierany tak, aby słuszne było założenie o stanie ustalonym w instalacji; w praktyce nie przekracza on kilku minut. Przelicznik powinien posiadać również dodatkowe wyjście elektryczne, którego sygnał umożliwia jego szybkie, proste i dokładne sprawdzanie przy pomocy uniwersalnych, laboratoryjnych przyrządów pomiarowych. Jeśli wymaganie to nie jest spełnione, to producent powinien zapewnić odpowiednie stanowisko pomiarowe (tester) do sprawdzania swoich wyrobów.



Rys 3. Ilustracja zasady pomiaru ilości ciepła ciepłomierzem.

3. WYMAGANIA STAWIANE CIEPŁOMIERZOM

Zgodnie z przepisami [6], ciepłomierz jest przyrządem pomiarowym służącym do pomiaru ilości ciepła pobranego lub oddanego w wymienniku ciepła przez nośnik energii. Wymiennik jest najczęściej odbiornikiem ciepła, tzn. temperatura nośnika na jego wejściu jest wyższa niż na wyjściu. W praktycznych realizacjach instalacji grzewczych nośnikiem ciepła najczęściej jest woda. Ciepłomierz powinien pokazywać ilość ciepła w legalnych jednostkach (zazwyczaj GJ lub kWh), a jego wskazania są podstawą do rozliczeń finansowych pomiędzy dostawcą a odbiorcą ciepła. W zależności od konstrukcji ciepłomierze dzielimy na :

- **ciepłomierze składane**, które są zestawami następujących rozdzielnych urządzeń: przetwornika przepływu, pary czujników temperatury i przelicznika wskazującego,

- **ciepłomierze zespolone** (kompaktowe), które stanowią nierozdzielny zespół wymienionych wyżej urządzeń.

Przetwornik przepływu jest częścią ciepłomierza, przez którą przepływa nośnik ciepła. Może on być umieszczony na zasilaniu lub na powrocie obiegu wymiany ciepła, jego wyjściowy sygnał elektryczny jest funkcją przepływu nośnika ciepła (jego objętości, masy, strumienia objętości lub strumienia masy).

Czujniki temperatury są częściami ciepłomierza, które wytwarzają sygnały będące funkcją temperatury nośnika ciepła, są one umieszczone na zasilaniu i powrocie obiegu wymiany ciepła. Należy przy tym zwrócić uwagę, że z ciepłomierzem nie mogą współpracować dwa dowolne egzemplarze czujników temperatury, lecz muszą one stanowić odpowiednio **dobraną parę**, tzn. ich charakterystyki termometryczne muszą być ze sobą zgodne, w granicach dopuszczalnego błędu. Nie każde więc dwa czujniki temperatury mogą stanowić parę czujników dla ciepłomierza. Dysponując dużą partią czujników temperatury, po wyznaczeniu ich charakterystyk termometrycznych, producent może dobrać czujniki stanowiące pary (jest to tzw. parowanie czujników temperatury).

Przelicznik wskazujący jest częścią ciepłomierza, która odbiera sygnały z przetwornika przepływu oraz czujników temperatury i przetwarzając je oblicza i wskazuje ilość ciepła, która została przekazana w obiegu wymiany ciepła.

Ciepłomierze umownie można podzielić również na domowe i przemysłowe. Ciepłomierze domowe są przeznaczone dla małych odbiorców ciepła - muszą reagować na duże i nagłe zmiany zapotrzebowania na energię, a więc wymagają szerokich zakresów pomiarowych różnicy temperatur i przepływu, szczególnie małych wartości minimalnych tych wartości. Ciepłomierze przemysłowe - przeznaczone dla dużych odbiorców - powinny charakteryzować się wysoką niezawodnością, możliwością odczytu lub rejestrowania oprócz ilości ciepła innych wielkości np.: temperatur t_1 i t_2 , różnicy temperatur Δt , objętości V , masy m , strumienia masy q_m , strumienia objętości q_v , mocy cieplnej P , czasu pracy τ , oraz możliwość sygnalizacji lub rejestrowania stanów awaryjnych, w tym wykroczeń poza zakres pomiarowy; powinny posiadać odpowiednie wyjścia analogowe, cyfrowe i do współpracy z komputerem oraz umożliwiające zdalny odczyt wskazań.

Do podstawowych parametrów charakteryzujących ciepłomierz należą [6] :

- **Temperatura wyższa t_1** która jest temperaturą na zasilaniu obiegu wymiany, jeżeli nośnik oddaje w nim ciepło lub temperaturą na powrocie - jeżeli nośnik pobiera ciepło,
- **Temperatura niższa t_2** która jest temperaturą na powrocie obiegu wymiany, jeżeli nośnik oddaje w nim ciepło lub temperaturą na zasilaniu - jeżeli nośnik pobiera ciepło,
- **Zakres temperatur** który jest określony najmniejszą wartością temperatury niższej t_{2min} i największą wartością temperatury wyższej t_{1max} , przy których ciepłomierz może pracować w sposób ciągły bez przekroczenia granicznych błędów dopuszczalnych,
- **Minimalna różnica temperatur Δt_{min}** która jest najmniejszą wartością różnicy temperatur na zasilaniu i powrocie obiegu wymiany, przy której ciepłomierz może pracować bez przekroczenia granicznych błędów dopuszczalnych,
- **Maksymalna różnica temperatur Δt_{max}** która jest największą wartością różnicy temperatur na zasilaniu i powrocie obiegu wymiany, przy której ciepłomierz może pracować bez przekroczenia granicznych błędów dopuszczalnych,
- **Przepływ minimalny q_{min}** który jest najmniejszym przepływem, przy którym ciepłomierz może pracować bez przekroczenia granicznych błędów dopuszczalnych,

- **Przepływ nominalny q_n** który jest największym przepływem, przy którym ciepłomierz może pracować poprawnie w sposób ciągły bez przekroczenia granicznych błędów dopuszczalnych,
- **Przepływ maksymalny q_{max}** który jest największym przepływem dopuszczalnym tylko w krótkich okresach czasu, przy którym ciepłomierz może pracować poprawnie bez przekroczenia granicznych błędów dopuszczalnych,
- **Minimalna moc cieplna P_{min}** której wartość jednoznacznie wynika z przepływu minimalnego i minimalnej różnicy temperatur przy dolnej granicy zakresu temperatur,
- **Maksymalna moc cieplna P_{max}** jest największą wartością mocy cieplnej, przy której ciepłomierz może pracować bez przekroczenia granicznych błędów dopuszczalnych, jeżeli nie odpowiada ona wartości wynikającej z przepływu maksymalnego i maksymalnej różnicy temperatur, to powinna być dodatkowo określona przez producenta ,
- **Stała przetwornika przepływu w** która określa zależność pomiędzy sygnałem wyjściowym przetwornika przepływu a objętością nośnika ciepła.

Na obudowie ciepłomierza powinna być umieszczona między innymi informacja o **miejscu pomiaru przepływu nośnika** wraz z wartością **stałej przetwornika przepływu**, odpowiednie parametry temperaturowe ciepłomierza oraz jego klasa metrologiczna. W widocznym miejscu powinien się znajdować również **znak zatwierdzenia typu** lub **oznaczenie zgodności z zasadniczymi wymaganiami CE** oraz **cecha legalizacyjna**.

Podstawowym parametrem ciepłomierza informującym o jego dokładności jest **klasa**. Ponieważ ciepłomierz realizuje pomiar ilości ciepła w sposób pośredni, zgodnie ze wzorem (5), a jego algorytm działania jest złożony, to błędy pomiaru są niestety stosunkowo duże i zależne od temperatur t_1 i t_2 . Błąd względny procentowy ciepłomierza E_Q określa się na podstawie wzoru (6) [6]:

$$E_Q = \frac{Q_i - Q_c}{Q_c} \cdot 100\% \quad (6)$$

gdzie : Q_i - ilość ciepła wskazana przez przelicznik ciepłomierza,
 Q_c - wartość poprawna ilości ciepła, wg wzoru (5).

Ze względu na błąd pomiaru przepisy zawarte w rozporządzeniu [6] dzielą ciepłomierze na trzy klasy dokładności: klasę 1, klasę 2 i klasę 3. Graniczny błąd dopuszczalny E_{Qd} ciepłomierza zespolonego (kompaktowego) zależy od różnicy temperatur Δt oraz wartości przepływu q i dla poszczególnych klas ciepłomierzy nie może przekroczyć wartości podanych w Tabelicy 3 [6]. W każdym przypadku błąd E_{Qd} nie powinien przekraczać $\pm 10\%$.

Tablica 3. Graniczny błąd dopuszczalny E_Q ciepłomierza zespolonego.

Klasa ciepłomierza	Graniczny błąd dopuszczalny E_{Qd} ciepłomierza wyrażony w procentach (6)
Klasa 1	$\pm(2 + 4 \Delta t_{min}/\Delta t + 0,01 q_n/q)$
Klasa 2	$\pm(3 + 4 \Delta t_{min}/\Delta t + 0,02 q_n/q)$
Klasa 3	$\pm(4 + 4 \Delta t_{min}/\Delta t + 0,05 q_n/q)$

Błąd ciepłomierza składanego E_{Qd} jest sumą algebraiczną błędów jego urządzeń składowych: błędu E_{Ld} przelicznika wskazującego, błędu E_{Td} pary czujników temperatury oraz błędu E_{Pd} przetwornika przepływu.

Błąd graniczny dopuszczalny względny przelicznika wskazującego E_{Ld} , wyrażony w procentach, w zależności od różnicy temperatury Δt , oblicza się według wzoru (7):

$$E_{Ld} = \pm(0,5 + \Delta t_{min}/\Delta t) \quad (7)$$

Błąd graniczny dopuszczalny względny pary czujników temperatury E_{Td} , wyrażony w procentach, w zależności od różnicy temperatury Δt , oblicza się według wzoru (8):

$$E_{Td} = \pm(0,5 + 3 \Delta t_{min}/\Delta t) \quad (8)$$

Błąd graniczny dopuszczalny bezwzględny pojedynczego czujnika temperatury, wchodzącego w skład pary czujników temperatury, wynosi ± 2 °C.

Błąd graniczny dopuszczalny względny przetwornika przepływu E_{Pd} , wyrażony w procentach, w zależności od przepływu q oraz klasy dokładności ciepłomierza, oblicza się według wzorów (9):

$$\begin{aligned} \text{dla klasy 1:} & \quad E_{Pd} = \pm(1 + 0,01 q_n/q) \\ \text{dla klasy 2:} & \quad E_{Pd} = \pm(2 + 0,02 q_n/q) \\ \text{dla klasy 3:} & \quad E_{Pd} = \pm(3 + 0,05 q_n/q) \end{aligned} \quad (9)$$

W każdym przypadku wartość błędu E_{Pd} nie powinna przekraczać ± 5 %.

Dobierając ciepłomierz do konkretnego zastosowania należy tak dobrać jego typ, aby wartości przepływów nośnika ciepła i jego temperatury w odpowiednich punktach instalacji zawsze były zgodne z odpowiednimi parametrami podanymi przez producenta. Może to być trudne do spełnienia w przypadku wspólnych instalacji **c.o.** i **c.c.w.u.** w których warunki w okresie letnim i zimowym znacznie się od siebie różnią. Może wtedy okazać się konieczne zastosowanie dwóch różnych ciepłomierzy oraz odpowiednich dodatkowych instalacji.

4. ZASADA SPRAWDZANIA CIEPŁOMIERZA

Sprawdzanie ciepłomierza w jego rzeczywistym układzie pracy przedstawionym na rys.3, bezpośrednio w oparciu o wzór (5), jest technicznie bardzo trudne, gdyż wymagałoby rozbudowanego stanowiska pomiarowego, umożliwiającego zadawanie stosunkowo dużych mocy cieplnych (nawet rzędu wielu MW), trudnych do rozproszenia w warunkach laboratoryjnych. Zgodnie z rozporządzeniem [6] przyjmuje się, że błąd ciepłomierza jest sumą algebraiczną błędów jego wszystkich urządzeń składowych. Można więc sprawdzanie ciepłomierza zrealizować poprzez oddzielne sprawdzanie wszystkich jego części składowych. Dlatego w praktyce do sprawdzania ciepłomierza potrzebne są trzy stanowiska pomiarowe :

- stanowisko do sprawdzania przeliczników wskazujących,
- stanowisko do sprawdzania par czujników temperatury,
- stanowisko do sprawdzania przetworników przepływu.

4.1. Sprawdzenie przelicznika wskazującego

Sprawdzenie przelicznika wskazującego polega na dołączeniu do jego wejść odpowiednich układów zastępujących czujniki temperatury i przetwornik przepływu oraz zasymulowaniu wymaganych wartości temperatury wyższej t_1 i niższej t_2 oraz przepływu q . Umożliwia to porównanie ilości ciepła Q_i wskazanej przez przelicznik z wartością poprawną Q_c , wyliczoną ze wzoru (5). Błąd przelicznika obliczamy wg zależności (6). Czujniki temperatury mogą być stosunkowo łatwo symulowane przez oporniki o rezystancjach

odpowiadających odpowiednim punktom ich znormalizowanej charakterystyki termometrycznej [8]. Spotyka się również specjalne, elektroniczne symulatory rezystancji, działające na zasadzie sterowanego źródła napięciowego ze sprzężeniem zwrotnym od przepływającego w zewnętrznym obwodzie pomiarowym prądu. Przetwornik przepływu może być symulowany przez przekaźnik kontaktronowy, sterowany z generatora fali prostokątnej niskiej częstotliwości. Zakres wymaganych częstotliwości w praktyce nie przekracza pojedynczych herców, przy wypełnieniu sygnału około 50 %. Zazwyczaj konieczne jest zastosowanie dodatkowo odpowiedniego wzmacniacza sterującego cewkę przekaźnika kontaktronowego.

Przelicznik wskazujący powinien być sprawdzony co najmniej przy **trzech** następujących wartościach symulowanej różnicy temperatury Δt :

$$\Delta t_{min} \leq \Delta t \leq 1.2 \Delta t_{min}$$

$$10^{\circ}\text{C} \leq \Delta t \leq 20^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta t_{max} - 5^{\circ}\text{C} \leq \Delta t \leq \Delta t_{max}$$

gdzie : Δt_{min} i Δt_{max} - minimalna i maksymalna różnica temperatur, określona w zatwierdzeniu typu ciepłomierza.

Symulowany przepływ nie powinien przekraczać maksymalnej wartości q_{max} określonej dla przelicznika. Ze względów praktycznych korzystnie jest symulować przepływ możliwie duży, bliski wartości maksymalnej. Temperatura niższa t_2 powinna mieć wartość: $40^{\circ}\text{C} \leq t_2 \leq 70^{\circ}\text{C}$, jeżeli w świadectwie zatwierdzenia typu nie postanowiono inaczej. W każdym przypadku temperatury t_1 i t_2 muszą zawierać się w dopuszczalnym zakresie temperatur dla badanego ciepłomierza, ale korzystnie jest stosować możliwie duże różnice temperatur (spełniające wymagania). Pomiary można wykonywać wykorzystując elektryczne wyjście testowe przelicznika, ale przynajmniej w jednym punkcie należy wykonać pomiar z odczytem liczydła głównego przelicznika.

4.2. Sprawdzenie pary czujników temperatury

Sprawdzenie pary czujników temperatury polega na wyznaczeniu błędów ich charakterystyk termometrycznych względem siebie (błąd pomiaru różnicy temperatury) oraz względem charakterystyki wzorcowej zawartej w Tabeli 4 wg PN [8] (błąd pomiaru temperatury). Sprawdzenie należy przeprowadzić w każdym z trzech poniższych zakresów temperatury t :

- 1) $t_{min} \leq t \leq t_{min} + 10^{\circ}\text{C}$ – jeśli $t_{min} < 20^{\circ}\text{C}$
 albo: $35^{\circ}\text{C} \leq t \leq 45^{\circ}\text{C}$ – jeśli $t_{min} \geq 20^{\circ}\text{C}$
- 2) $75^{\circ}\text{C} \leq t \leq 85^{\circ}\text{C}$
- 3) $t_{max} - 30^{\circ}\text{C} \leq t \leq t_{max}$

gdzie : t_{min} , t_{max} - dolna i górna granica zakresu temperatur określona w zatwierdzeniu typu ciepłomierza lub pary czujników temperatury.

Stanowisko do sprawdzania par czujników temperatury do ciepłomierza powinno zawierać następującą aparaturę :

- termostaty cieczowe z regulatorami umożliwiającymi utrzymanie zadanej temperatury z zakresu $+30 \dots +150^{\circ}\text{C}$ przy gradiencie temperatury nie przekraczającym $0,05^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ i szybkości jej zmian w stanie ustalonym mniejszej niż $0,02^{\circ}\text{C}/\text{min.}$, posiadające komorę roboczą o głębokości zanurzeniowej nie mniejszej niż 300 mm.

- platynowe czujniki wzorcowe - etalony kontrolne II lub III rzędu przeznaczone do sprawdzania czujników użytkowych klasy 1,2 lub 3 w zakresach pomiarowych od 0 °C do 630 °C z błędem nie przekraczającym $\pm 0,02$ °C.
- układ do czteroprzewodowego pomiaru rezystancji par czujników temperatury z błędem nie przekraczającym $\pm 0,02\%$.

Tabela 4. Charakterystyka termometryczna czujnika termorezystancyjnego Pt 500

t °C	R Ω	t °C	R Ω	t °C	R Ω	t °C	R Ω	t °C	R Ω
0	500.00	40	577.70	80	654.46	120	730.30	160	805.22
1	501.95	41	579.63	81	656.37	121	732.19	161	807.08
2	503.91	42	581.56	82	658.28	122	734.07	162	808.94
3	505.86	43	583.49	83	660.18	123	735.95	163	810.80
4	507.81	44	585.41	84	662.09	124	737.84	164	812.66
5	509.76	45	587.34	85	663.99	125	739.72	165	814.51
6	511.71	46	589.27	86	665.90	126	741.60	166	816.37
7	513.66	47	591.20	87	667.80	127	743.48	167	818.23
8	515.61	48	593.12	88	669.71	128	745.36	168	820.09
9	517.56	49	595.05	89	671.61	129	747.24	169	821.94
10	519.51	50	596.98	90	673.51	130	749.12	170	823.80
11	521.46	51	598.90	91	675.41	131	751.00	171	825.65
12	523.41	52	600.82	92	677.31	132	752.87	172	827.51
13	525.35	53	602.75	93	679.21	133	754.75	173	829.36
14	527.30	54	604.67	94	681.11	134	756.63	174	831.21
15	529.24	55	606.59	95	683.01	135	758.50	175	833.07
16	531.19	56	608.51	96	684.91	136	760.38	176	834.92
17	533.13	57	610.44	97	686.81	137	762.25	177	836.77
18	535.08	58	612.36	98	688.71	138	764.13	178	838.62
19	537.02	59	614.28	99	690.60	139	766.00	179	840.47
20	538.96	60	616.20	100	692.50	140	767.88	180	842.32
21	540.91	61	618.12	101	694.40	141	769.75	181	844.17
22	542.85	62	620.03	102	696.29	142	771.62	182	846.02
23	544.79	63	621.95	103	698.19	143	773.49	183	847.87
24	546.73	64	623.87	104	700.08	144	775.36	184	849.72
25	548.67	65	625.78	105	701.97	145	777.23	185	851.56
26	550.61	66	627.70	106	703.87	146	779.10	186	853.41
27	552.55	67	629.62	107	705.76	147	780.97	187	855.26
28	554.48	68	631.53	108	707.65	148	782.84	188	857.10
29	556.42	69	633.45	109	709.54	149	784.71	189	858.95
30	558.36	70	635.36	110	711.43	150	786.57	190	860.79
31	560.30	71	637.27	111	713.32	151	788.44	191	862.63
32	562.23	72	639.18	112	715.21	152	790.31	192	864.48
33	564.17	73	641.10	113	717.10	153	792.17	193	866.32
34	566.10	74	643.01	114	718.99	154	794.04	194	868.16
35	568.03	75	644.92	115	720.87	155	795.90	195	870.00
36	569.97	76	646.83	116	722.76	156	797.77	196	871.84
37	571.90	77	648.74	117	724.65	157	799.63	197	873.68
38	573.83	78	650.65	118	726.53	158	801.49	198	875.52
39	575.77	79	652.56	119	728.42	159	803.35	199	877.36

Podczas sprawdzania, na podstawie zmierzonych wartości rezystancji każdego z czujników w każdej z trzech temperatur należy ułożyć trzy równania kwadratowe zgodnie z wzorem (10), określającym zależność oporu rezystora platynowego od temperatury (słusznym w zakresie temperatur od 0 do 850 °C) zgodnie z PN [8].

$$R_t(t) = R_0(1 + At + Bt^2) \quad (10)$$

gdzie: R_t - opór rezystora termometrycznego w temperaturze t °C,
 R_0 - opór nominalny rezystora termometrycznego w temperaturze 0 °C,
 t - temperatura w °C.

Z otrzymanego układu równań należy wyliczyć dla każdego z czujników wartości trzech stałych: R_0 , A , B . Równanie błędu każdego z czujników otrzymuje się po odjęciu jego równania od równania idealnego. Dla opornika platynowego Pt 500/1,3850 odpowiednie współczynniki równania idealnego wynoszą [8]:

$$\begin{aligned} R_0 &= 500,0 \, \Omega \\ A &= 3,90802 \cdot 10^{-3} \, ^\circ\text{C}^{-1}, \\ B &= -5,802 \cdot 10^{-7} \, ^\circ\text{C}^{-2}. \end{aligned}$$

Na podstawie otrzymanych równań błędów każdego z czujników stanowiących parę, należy obliczyć równania błędów pomiaru temperatury i różnicy temperatury, w całym zakresie temperatur i różnicy temperatur, określonych dla danego ciepłomierza. Dla wartości temperatury niższej t_2 większej od 80 °C uwzględniane są tylko różnice temperatur Δt większe od 10 °C. Praktycznie wykonanie wszystkich niezbędnych operacji matematycznych w rozsądnym czasie, przy zagwarantowaniu odpowiedniej dokładności, wymaga zastosowania systemu komputerowego sterującego pomiarami, automatycznie odczytującego wyniki i realizującego wymagane obliczenia i porównania.

Podczas pomiarów rezystancji czujników głębokość ich zanurzenia nie powinna być mniejsza od minimalnej, a wartość prądu pomiarowego powinna być taka, aby rozpraszanie ciepła nie przekraczało 0.1 mW.

Wartości rezystancji czujnika Pt 500 wyliczone na podstawie wzoru (7), w zakresie temperatur przydatnym podczas realizacji ćwiczenia, zawiera Tabela 4.

4.3. Sprawdzenie przetwornika przepływu

Sprawdzenie przetwornika przepływu do ciepłomierza odbywa się według tej samej zasady, co sprawdzenie zwykłego wodomierza. Zasadnicza różnica polega na tym, że przetwornik przepływu do ciepłomierza, jeżeli nie jest inaczej postanowione w decyzji o zatwierdzeniu typu, powinien być sprawdzany ciepłą wodą o temperaturze (50 ± 5) °C, przy następujących wartościach strumienia masy lub objętości q :

$$\begin{aligned} q_{\min} &\leq q \leq 1,1 q_{\min} \\ 0,1 q_n &\leq q \leq 0,11 q_n \\ 0,9 q_{\max} &< q < q_{\max} \end{aligned}$$

Jeżeli tak ustalono w decyzji o zatwierdzeniu typu, to legalizacja może być przeprowadzona wodą zimną zgodnie z inną opisaną tam procedurą. W czasie sprawdzenia należy przestrzegać specjalnych wymagań określonych w decyzji o zatwierdzeniu typu, np. przewodności właściwej wody, temperatury wody, długości prostych odcinków rurociągu przed i za urządzeniem badanym. Stanowisko pomiarowe do sprawdzania przetworników przepływu powinno spełniać ogólne wymagania określone w przepisach o sprawdzaniu wodomierzy. Składa się ono z odpowiedniej instalacji hydraulicznej wraz z układem zasilania

wodą o stałym ciśnieniu i odpowiednim systemem mocowania badanych wodomierzy. Do sprawdzania błędów przetwornika przepływu stosowana może być metoda wagowa lub objętościowa w jednej ze swych odmian.

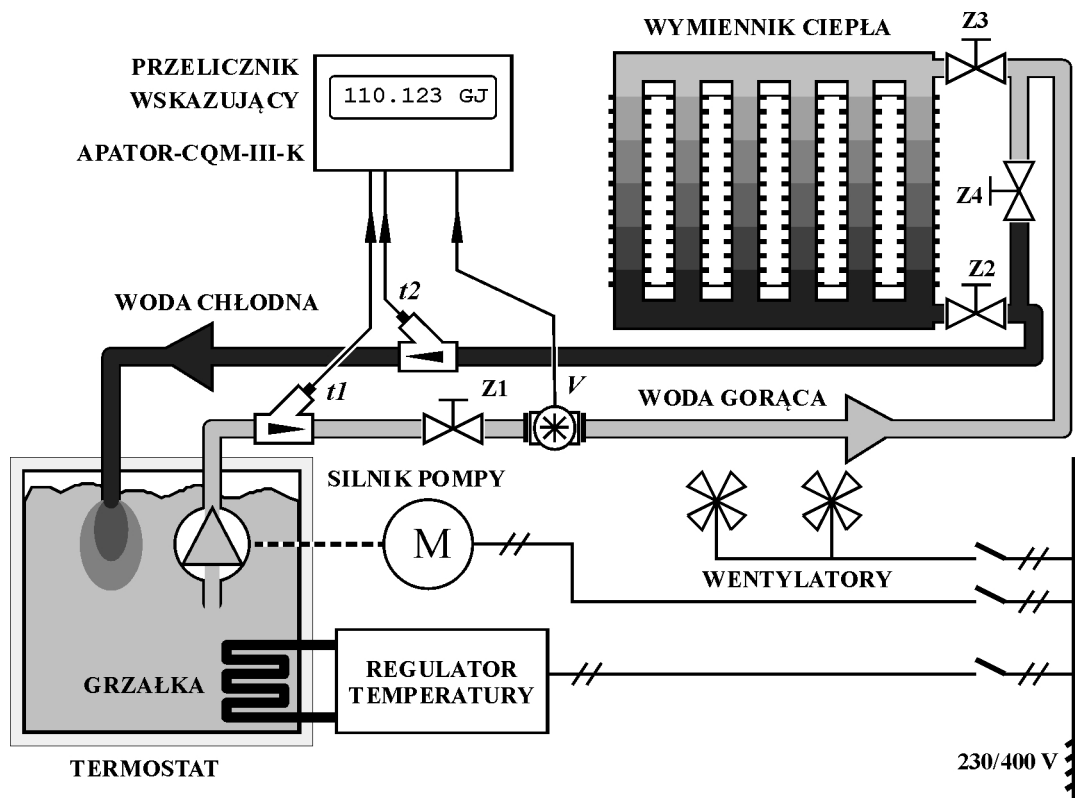
Wszystkie stanowiska pomiarowe powinny działać poprawnie i niezawodnie w zakresie określonych przez producenta warunków użytkowania ciepłomierza i powinny umożliwiać wyznaczenie błędów sprawdzanych przyrządów pomiarowych z niepewnością rozszerzoną przy poziomie ufności 95% i współczynniku rozszerzenia $k=2$ oraz nieprzekraczającą $1/5$ wartości odpowiedniego granicznego błędu dopuszczalnego [6].

5. OPIS STANOWISKA POMIAROWEGO

Pomiarowe stanowisko dydaktyczne umożliwia praktyczne zapoznanie się z zasadą pomiaru ilości ciepła za pomocą ciepłomierza zespolonego oraz ze sposobem sprawdzania przelicznika wskazującego. Ilustruje ono sposób realizacji algorytmu wyznaczania ilości ciepła wg wzoru (5), na podstawie zmierzonego przepływu czynnika grzewczego i różnicy temperatur w odpowiednich punktach instalacji oraz pozwala na symulacyjne sprawdzenie przelicznika wskazującego. Stanowisko składa się z dwóch niezależnych części: układu do pomiaru ilości ciepła w instalacji grzewczej oraz układu do symulacyjnego sprawdzania przelicznika wskazującego ciepłomierza. Każdy z układów stanowiska wyposażony jest we własny ciepłomierz.

5.1. Układ do pomiaru ciepła w instalacji grzewczej

Układ do pomiaru ilości ciepła, przedstawiony na rys.4, jest modelem instalacji grzewczej c.o. umożliwiającym wykonywanie pomiarów w rzeczywistym układzie pracy ciepłomierza. Składa się on z odpowiedniej instalacji wodnej zawierającej źródło ciepła, odbiornik o regulowanej intensywności oddawania ciepła oraz ciepłomierz.



Rys 4. Dydaktyczne stanowisko do pomiarów ilości ciepła.

Źródłem ciepła na stanowisku jest termostat wodny wyposażony w grzałkę zasilaną energią elektryczną oraz w pompę wodną napędzaną silnikiem **M**. Temperaturę wody w termostacie można zmierzyć termometrem cieczowym. Termostat wyposażony jest również w naczynie ciśnieniowe z elastyczną membraną pozwalającą na bezpieczne zwiększanie się objętości wody podczas nagrzewania termostatu. Dodatkowo kontrolowane jest ciśnienie wody w instalacji manometrem z regulowanym stykiem wyłączającym zasilanie grzałki po przekroczeniu ciśnienia 1.2 atmosfery. Zawory regulacyjne **Z1** ... **Z4** umożliwiają zmianę rozpyływu gorącej wody i tym samym ilości ciepła przekazywanego do wymiennika. Wymiennik ciepła wykonano z aluminiowego grzejnika wodnego w kolorze czarnym, z wymuszonym wentylatorem przepływem powietrza. Zainstalowany na stanowisku kompletny zestaw ciepłomierza produkcji APATOR zawiera mikroprocesorowy przelicznik wskazujący, parę czujników temperatury Pt 500 oraz przetwornik przepływu z optoelektronicznym nadajnikiem impulsów.

5.2. Kompletny zestaw ciepłomierza APATOR CQM-III-K

Na stanowisku do pomiaru ilości ciepła zainstalowany jest kompletny zestaw ciepłomierza APATOR CQM-III-K w wersji kompaktowej, tzn. wszystkie jego części składowe (przelicznik wskazujący, para czujników temperatury i przetwornik przepływu) stanowią trwale połączony zestaw. Składa się on z mikroprocesorowego przelicznika wskazującego typu LQM-III-K-2 zasilanego baterią o trwałości 6 lat, pary termorezystancyjnych czujników platynowych Pt 500 typu TOPE42-Pt500 oraz wirnikowego przetwornika przepływu z optoelektronicznym nadajnikiem impulsów typu JS90-1,0-NE produkcji Powogaz.

Podstawowe parametry ciepłomierza CQM-III-K są następujące :

-	Zakres temperatur	t	= 1 ... 180 °C
-	Zakres różnicy temperatur	Δt	= 3 ... 160 °C
-	Przepływ minimalny	q_{min}	= 0,02 m ³ /h
-	Przepływ nominalny	q_n	= 1,0 m ³ /h
-	Przepływ maksymalny	q_{max}	= 2,0 m ³ /h
-	Stała przetwornika przepływu	1/w	= 85,334 imp./dm ³
-	klasa		= 3 wg [6]
-	miejsce pomiaru przepływu		rurociąg zasilający

Zasada działania ciepłomierza jest zgodna ze wzorem (5). Przelicznik wskazujący uwzględnia zmienną wartość współczynnika cieplnego **k**. Obliczane na bieżąco wartości ilości ciepła są sumowane i zapamiętywane w nieulotnej pamięci RAM. Wynik pomiaru jest pokazywany na wyświetlaczu ciekłokrystalicznym LCD w kilowatogodzinach. Na tym samym wyświetlaczu, poprzez kolejne naciskanie przycisku sterującego, można wywołać wszystkie charakterystyczne dane mierzonego systemu ciepłowniczego. Przelicznik samoczynnie wykrywa i sygnalizuje niektóre z możliwych uszkodzeń.

Podczas projektowania instalacji i montażu ciepłomierza zalecane jest przestrzeganie następujących zaleceń, gwarantujących optymalne warunki pomiaru ilości ciepła :

- czujnik temperatury powrotu należy montować w zasięgu dobrego wymieszania wody bezpośrednio za wodomierzem,

- czujnik temperatury zasilania należy montować w zasięgu dobrego wymieszania wody bezpośrednio za pompą obiegową,
- czujniki temperatury należy montować w specjalnych tulejach zanurzeniowych w pozycji pod prąd, przestrzegając wymaganej głębokości zanurzenia,
- czujniki temperatury na powrocie i zasilaniu są oznaczone (za pomocą kolorowych koszulek) i nie należy ich zamieniać między sobą,
- przed i za wodomierzem należy zastosować wymagane odcinki proste rurociągów oraz zawory odcinające umożliwiające jego wymianę,
- wodomierz należy montować w odpowiednim rurociągu, w tym przypadku w zasilającym gorącą wodą,
- w razie potrzeby należy zastosować zawór bocznikujący wymiennik ciepła, gwarantujący uzyskanie przepływu większego od wymaganej wartości minimalnej,
- należy zastosować zawór dławiący umożliwiający nastawienie wymaganej różnicy temperatur na zasilaniu i powrocie wymiennika ciepła
- obwody ciepłomierza należy montować w odległości co najmniej 1 m od odbiorników energii elektrycznej i przewodów zasilających sieci 220 V

W zrealizowanym dydaktycznym stanowisku pomiarowym ze względów praktycznych nie było niestety możliwe uwzględnienie wszystkich tych zaleceń.

Podczas normalnej pracy ciepłomierza, bez zakłóceń i awarii, na wyświetlaczu pokazywana jest wartość zmierzonej dotychczas energii w GJ, z rozdzielczością 0,001GJ. Poprzez kolejne krótkotrwałe naciśnięcie przycisku otrzymuje się kolejne dane: objętość nośnika ciepła [m^3], wielkość energii nadprogowej [GJ], temperatura zasilania t_1 [$^{\circ}C$], temperatura powrotu t_2 [$^{\circ}C$], różnica temperatur Δt [$^{\circ}C$], przepływ chwilowy [m^3/h], moc chwilowa [kW], symbol kodu błędu, test metrologiczny. Długie przytrzymanie przycisku (4 sekundy) umożliwia wyświetlenie dalszych danych, co jest szczegółowo wyjaśnione w dostępnej na stanowisku instrukcji obsługi ciepłomierza. W szczególności możliwe jest odczytanie 4 kolejnych młodszych cyfr wyniku pomiaru ilości ciepła z rozdzielczością 0,1J oraz napięcie baterii zasilającej, numer fabryczny ciepłomierza i inne dane.

Przelicznik sygnalizuje następujące kody wykrytych błędów :

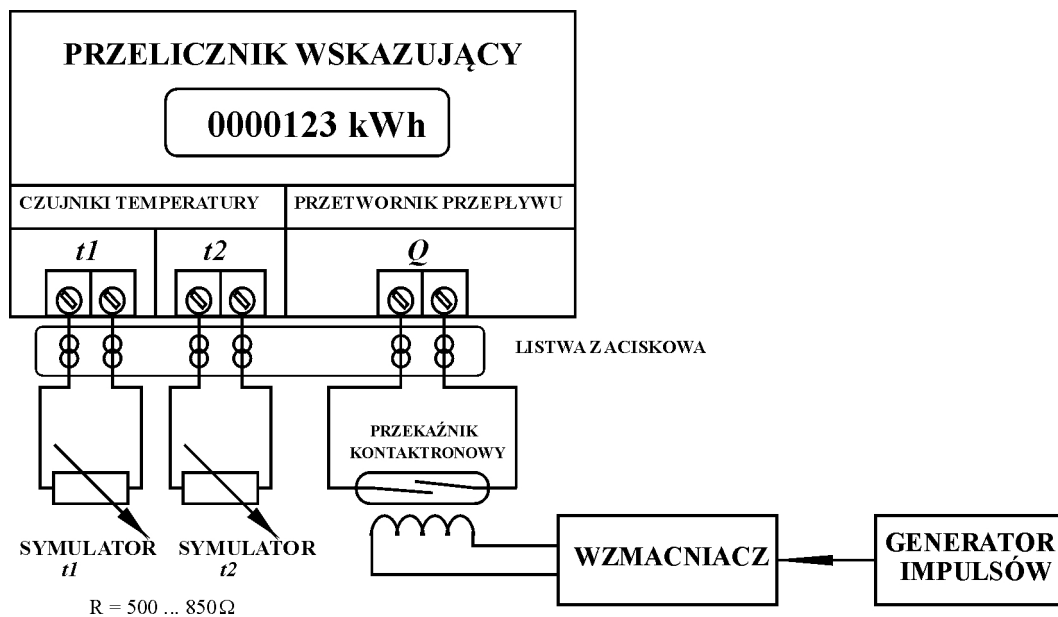
- 0** – praca poprawna, brak błędów
- 2** – brak impulsów z wodomierza przy $\Delta t > 10$ $^{\circ}C$
- 4** – błąd czujnika temperatury powrotu
- 8** – błąd czujnika temperatury zasilania
- 16** – zamienione czujniki
- 128** – rozładowana bateria
- 256** – za duży przepływ

W przypadku wystąpienia kilku błędów jednocześnie kody ich błędów sumują się.

Test metrologiczny pokazuje na wyświetlaczu przelicznika ilość ciepła Q_i [kJ] przypadającego na $1m^3$ wody przy danej różnicy temperatur Δt zmierzonej przez ciepłomierz. Można ją wykorzystać do sprawdzenia poprawności działania przelicznika. W tym celu należy odczytać temperaturę zasilania t_1 i powrotu t_2 oraz różnicę temperatur Δt a następnie wywołać wskazanie testu metrologicznego. Korzystając ze wzoru (5) należy obliczyć ilość ciepła Q_c [GJ] dla $V=1m^3$ i współczynnika cieplnego wody k odczytanego z Tabeli 2 dla zmierzonych wartości temperatur. Następnie uwzględniając jednostki ($1GJ=1000kJ$) obliczamy błąd (6) i porównujemy z wymaganiami na błąd graniczny dopuszczalny przelicznika. Szczegółowo sposób przeprowadzania obliczeń dla testu metrologicznego opisano w instrukcji obsługi ciepłomierza CQM-III-K dostępnej w laboratorium i w Internecie.

5.3. Układ do symulacyjnego sprawdzania przelicznika ciepłomierza

Stanowisko umożliwia również przeprowadzenie symulacyjnego sprawdzenia przelicznika wskazującego. Schemat odpowiedniego układu pomiarowego przedstawia rys.5, w którym zastosowano dodatkową listwę połączeniową, pozwalającą na szybkie odłączenie oryginalnych czujników temperatury i przetwornika przepływu oraz pewne przyłączenie w ich miejsce odpowiednich układów symulacyjnych. Na stanowisku zainstalowany jest kompletny zestaw ciepłomierza składanego firmy ISTA, przeznaczony głównie do rozliczania kosztów ogrzewania z dostawcą ciepła, z zarządami domów i z właścicielami budynków lub lokali mieszkalnych. Składa się on z mikroprocesorowego przelicznika wskazującego zasilanego baterią o trwałości 6 lat, pary termorezystancyjnych czujników platynowych Pt 500 oraz wirnikowego przetwornika przepływu z kontaktronowym nadajnikiem impulsów.



Rys 5. Dydaktyczne stanowisko pomiarowe do sprawdzania przelicznika wskazującego.

Do symulowania czujników temperatury stosowane są dwa rezystory dekadowe, umożliwiające zadanie rezystancji z zakresu 500 ... 850 Ω rozdzielczością 0.01 Ω . Wartości rezystancji odpowiadające wymaganym wartościom temperatury można wyliczyć ze wzoru (7) lub odczytać z Tabeli 4. Przetwornik przepływu jest symulowany za pomocą przekaźnika kontaktronowego, sterowanego z generatora sygnału prostokątnego niskiej częstotliwości poprzez wzmacniacz zapewniający uzyskanie odpowiedniej mocy. Praktycznie przydatny jest zakres częstotliwości od 0.1 do 1 Hz. Wymaganą częstotliwość impulsów można wyliczyć na podstawie stałej przetwarzania przetwornika przepływu w oraz wymaganej wartości symulowanego przepływu q .

5.4. Kompletny zestaw ciepłomierza ISTA SEXTAN3

Zasada działania ciepłomierza jest zgodna ze wzorem (5). Przelicznik wskazujący uwzględnia zmienną wartość współczynnika cieplnego k . Obliczane na bieżąco wartości ilości ciepła są sumowane i zapamiętywane w nieulotnej pamięci RAM. Wynik pomiaru jest pokazywany na wyświetlaczu ciekłokrystalicznym LCD w kilowatogodzinach. Na tym samym wyświetlaczu, poprzez kolejne naciśnięcie przycisku sterującego, można wywołać wszystkie

charakterystyczne dane mierzonego systemu ciepłowniczego. Przelicznik samoczynnie wykrywa i sygnalizuje niektóre z możliwych uszkodzeń, np. przerwę obwodu czujnika temperatury, rozładowaną baterię itp. Wyposażony jest on również w optoelektroniczny interfejs w zakresie podczerwieni, umożliwiający automatyczne odczytywanie wskazań za pomocą przenośnego urządzenia odczytowego.

Podstawowe parametry zainstalowanego na stanowisku zestawu ciepłomierza składanego firmy ISTA SEXTAN3 są następujące :

Zakres temperatur	$t = 5 \dots 120 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Zakres różnicy temperatur	$\Delta t = 2 \dots 100 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Przepływ minimalny	$q_{\min} = 0,03 \text{ m}^3/\text{h}$
Przepływ maksymalny	$q_{\max} = 1,5 \text{ m}^3/\text{h}$
Stała przetwornika przepływu	$w = 1 \text{ l/impuls}$
klasa	$= 1$
miejsce pomiaru przepływu	rurociąg powrotny

Podczas normalnej pracy ciepłomierza, bez zakłóceń i awarii, na wyświetlaczu pokazywana jest wartość zmierzonej dotychczas energii w kWh. Poprzez kolejne krótkotrwałe naciśnięcie przycisku otrzymuje się kolejne dane (tzw. odczyty użytkownika), kolejno : test wyświetlacza, ilość ciepła w dniu wyznaczonym, ilość ciepła w przedostatnim dniu wyznaczonym do odczytu, ilość ciepła w chwili ostatniego zdalnego odczytu, data ostatniego zdalnego odczytu, dni postoju, data, wyznaczony dzień odczytu, objętość, awaria. Przelicznik sygnalizuje następujące kody wykrytych awarii :

- F 1** ^ ^ ^ - awaria czujnika na zasilaniu
- F ^ 2** ^ ^ - awaria czujnika na powrocie
- F ^ ^ 3** ^ - awaria elektroniki
- F ^ ^ ^ 4** - awaria baterii lub zasilacza sieciowego

Przez dłuższe naciśnięcie przycisku (ok. 4 sekundy) otrzymujemy dodatkowe wskazania (tzw. wskazania dla obsługi). Kolejne krótkotrwałe naciśnięcia wyprowadzają na wyświetlacz kolejno : strumień objętości w [m^3/h], temperatury na zasilaniu i powrocie w [$^{\circ}\text{C}$], różnicę temperatur w [$^{\circ}\text{C}$], moc cieplną w [W], dni pracy oraz numer seryjny. Jeśli w ciągu 3 minut nie zostanie podane żadne następne polecenie, to wyświetlacz powraca do normalnego trybu wskazywania ilości ciepła.

Podczas realizacji ćwiczenia przelicznik może sygnalizować awarię czujników temperatury w chwili gdy są one zastępowane rezystorami dekadowymi. Pomiary ciepłomierzem można kontynuować dopiero wtedy, gdy przelicznik przestanie sygnalizować awarię po dokonaniu przełączeń w obwodach czujników temperatury !!!

6. EKSPERYMENTY POMIAROWE

6.1. Opis eksperymentów

W ramach ćwiczenia laboratoryjnego realizowane są dwa eksperymenty pomiarowe:

- pomiar ilości ciepła w rzeczywistym układzie pracy ciepłomierza,
- sprawdzenie symulacyjne przelicznika wskazującego ciepłomierza.

Pomiar ilości ciepła jest przeprowadzany w układzie zgodnym z przedstawionym na rys.4. Polega on na wstępnym nagrzaniu termostatu przy wyłączonym obiegu wody do maksymalnej temperatury, tzn. bliskiej 100 °C. Następnie, po wyłączeniu grzałki i załączeniu pompy, następuje przekazanie zgromadzonej w wodzie energii do wymiennika i dalej do otoczenia. Ilość przekazanego ciepła jest mierzona zainstalowanym na stanowisku ciepłomierzem CQM-III-K APATOR i następnie porównywana z ilością ciepła oddanego przez wodę, obliczoną na podstawie bilansu cieplnego. Ze względu na długi czas nagrzewania się termostatu, bezpośrednio po załączeniu jego grzałek realizowane jest w drugim, niezależnym układzie, symulacyjne sprawdzanie przelicznika ISTA SEXTAN3. Właściwy pomiar ilości ciepła jest wykonywany w dalszej kolejności, co pozwala na rozgrzanie termostatu bez straty czasu w laboratorium.

Należy zwrócić uwagę, że ilość ciepła, którą podczas trwania ćwiczenia laboratoryjnego można praktycznie wytworzyć w źródle i następnie rozproszyć w wymienniku, jest niewielka, praktycznie nie przekracza wartości 10 GJ. Z tego powodu pomiar ten ma znaczenie głównie demonstracyjne i nie może być podstawą do oceny błędów ciepłomierza. Porównanie wskazań ciepłomierza z poprawną ilością ciepła przekazanego w układzie umożliwia więc tylko przybliżone stwierdzenie dokładności zrealizowanego pomiaru.

Sprawdzenie przelicznika wskazującego realizowane jest metodą symulacyjną, polegającą na zastąpieniu przetwornika przepływu przez ciąg specjalnie wygenerowanych impulsów o żądanej częstotliwości. Różnica temperatur nośnika ciepła w rurociągu zasilającym i powrotnym jest symulowana przez zespół rezystorów o wartościach odpowiadających żądanym punktom charakterystyki termometrycznej czujników temperatury. Schemat zestawianego do tego celu układu pomiarowego przedstawia rys.5. Zadaniem ćwiczących jest wyznaczenie wartości temperatur i przepływu zgodnych z punktami pomiarowymi określonymi w przepisach przedstawionych w instrukcji, zasymulowanie ich za pomocą odpowiednich układów i porównanie wskazań przelicznika z wartościami poprawnymi ilości ciepła. Ostatecznym celem jest porównanie rzeczywistych parametrów badanego ciepłomierza z wymaganiami odpowiednich przepisów.

6.2. Wykonanie pomiarów

6.2.1 Przygotowanie instalacji do pomiarów ilości ciepła

Ze względu na długi czas nagrzewania się termostatu należy załączyć go jak najszybciej po rozpoczęciu zajęć, na cały czas wykonywania pomiarów realizowanych wg punktu 6.2.2. Zanotować w Tabeli 5 średnicę D komory termostatu oraz jej wysokość H . Obliczyć objętość wody V . Uruchomić instalację wykonując kolejno następujące czynności:

- zamknąć zawory Z1 i Z4, otworzyć zawory Z2 i Z3,
- wyłączyć zasilanie pompy i wentylatorów,
- ustawić regulator temperatury termostatu na 95 °C,
- sprawdzić nastawę styku manometru na wartość 1,2 atm.

- załączyć grzałkę termostatu,
- zanotować w Tabeli 5 czas rozpoczęcia eksperymentu, temperaturę początkową wody t w termostacie zmierzoną termometrem cieczowym i ciśnienie p wskazywane na manometrze,
- kolejne wyniki pomiarów notować w tabeli 5 co około 10 minut, aż do osiągnięcia w termostacie ustawionej wartości temperatury.
- Po uruchomieniu nagrzewania termostatu należy przystąpić do wykonywania pomiarów według punktu 6.2.2. Podczas realizacji punktu 6.2.2 odczytywać temperaturę wody w termostacie i ciśnienie w odstępach czasu ok. 10 minut i notować wyniki w Tabeli 5. Temperaturę wody w termostacie kontrolować termometrem. Pomiary ilości ciepła w rzeczywistym układzie pracy ciepłomierza, z wykorzystaniem rozgrzanego termostatu, będą kontynuowane po wykonaniu w całości punktu 6.2.2.

W sprawozdaniu wykonać wykres temperatury t i ciśnienia p w funkcji czasu τ .

Tabela 5. Proces nagrzewania termostatu wodnego

$D =$	m	$H =$	m	$V =$	m^3
lp.	Czas	Czas	Temperatura	Ciśnienie	
		τ	t	p	
	godz. : min.	s	$^{\circ}C$	bar	
1		0			
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					

6.2.2 Sprawdzenia przelicznika wskazującego

Przelicznik wskazujący należy sprawdzić w trzech punktach pomiarowych wykorzystując układ przedstawiony na rys.5. Wartości symulowanych temperatur i przepływu trzeba ustalić samodzielnie zgodnie z zaleceniami (wg punktu 4.1), na podstawie parametrów ciepłomierza ISTA SEXTAN3 (wg punktu 5.4) i zestawić w Tabeli 6. W tym celu należy:

- odłączyć od przelicznika ISTA czujniki temperatury i przetwornik przepływu i w ich miejsce dołączyć układy je symulujące,
- uwzględniając przedstawione zasady sprawdzania przeliczników ciepłomierzy oraz na podstawie danych ciepłomierza ISTA zaproponować trzy wartości temperatur t_1 i t_2 oraz różnicy temperatur Δt spełniające przedstawione wcześniej wymagania i zanotować je w

Tabeli 6. Obliczyć wg wzoru (10) lub odczytać z Tabeli 4 i zanotować do Tabeli 6 wartości rezystancji R_t symulujące czujniki temperatury dla przyjętych temperatur,

- analogicznie zaproponować wartość symulowanego przepływu q (najlepiej wartość maksymalną q_{max}) i na jego podstawie obliczyć ze wzoru (11) częstotliwość f_{gen} impulsów symulujących przyjętą wartość przepływu. Dla wszystkich trzech punktów pomiarowych przyjmując tę samą wartość symulowanego przepływu q . Dla ułatwienia dalszych pomiarów należy częstotliwość f_{gen} przeliczyć na okres T_{gen} i zapisać w Tabeli 7.

Wartości rezystancji odpowiadające wybranym temperaturom należy nastawiać na rezystorach dekadowych. Częstotliwość impulsów symulujących należy ustawić na generatorze fali prostokątnej, z wypełnieniem 1/2, bez składowej stałej, amplituda 5V. Dioda LED powinna sygnalizować zamykanie styków przekaźnika kontaktronowego. Częstościomierz - czasomierz cyfrowy ustawić do pomiaru okresu. Ze względu na małą częstotliwość sygnału f_{gen} niezbędne jest ręczne ustawienie pokrętki poziomej, gdyż w pozycji AUTO wyniki pomiarów nie będą prawidłowe.

Uwaga ! Ze względu na długi czas realizacji pomiarów, odpowiednie wartości rezystancji i częstotliwości należy wyznaczyć i zanotować w Tabeli 6 wcześniej, przed rozpoczęciem zajęć !

Dla każdego z trzech przyjętych i zapisanych w Tabeli 6 punktów pomiarowych należy wyznaczyć doświadczalnie wartość błęd E_Q przelicznika. W tym celu należy:

- nastawić na rezystorach dekadowych symulowane wartości rezystancji czujników temperatury dla pierwszego punktu pomiarowego wg Tabeli 6,
- nastawić na generatorze przyjętą w Tabeli 6 wartość częstotliwości f_{gen} symulującej przepływ q . Dokładną wartość należy ustawić wg wskazań cyfrowego miernika okresu T_{gen} .
- Obserwować wyświetlacz ciepłomierza i odczekać do chwili, w której nastąpi zmiana jego wskazań. Rozpocząć pomiar czasu τ i zapisać do Tabeli 7 wartość początkową energii Q_p .
- odmierzyć czas około 20 minut i w chwili kolejnej zmiany wskazania na wyświetlaczu ciepłomierza zakończyć pomiar czasu τ i zapisać do Tabeli 7 wartość końcową Q_k . Czas pomiaru τ nie powinien być krótszy od 20 minut. Dla ułatwienia warto pamiętać, że wskazania przelicznika zmieniają się co 40 impulsów z przetwornika przepływu.
- powtórzyć pomiary dla pozostałych punktów pomiarowych ustalonych w Tabeli 6.

Każdorazowo po ustawieniu nowych parametrów dla kolejnego punktu pomiarowego należy odczekać do zmiany wskazań przelicznika. Czas trwania pomiaru τ należy wyznaczyć od chwili pokazania się na wyświetlaczu przelicznika nowej wartości początkowej Q_p , do chwili pokazania się wartości końcowej Q_k . Okres T_{gen} impulsów symulujących przepływ zmierzyć czasomierzem cyfrowym i wykorzystać do wyznaczenia zasymulowanej objętości V . Wartość współczynnika cieplnego k dla odpowiednich temperatur odczytać z Tabeli 1 lub Tabeli 2, odpowiednio do badanego ciepłomierza. W razie potrzeby wartości pośrednie k wyznaczyć stosując ekstrapolację liniową. Poprawną wartość ilości ciepła Q_c należy wyznaczyć w jednostce wskazywanej przez ciepłomierz, tzn. w kWh. Błąd E_Q przelicznika wyrazić w procentach. Wyniki pomiarów i obliczeń zanotować w Tabeli 7. Po uwzględnieniu jednostek, odpowiednie wzory niezbędne do wykonania wymaganych obliczeń przyjmują następującą postać :

$$f_{gen} [Hz] = \frac{10^3 q [m^3/h]}{3600 w [l]} \quad (11)$$

$$V[m^3] = \frac{\tau[s] \cdot w[l]}{10^3 T_{gen}[s]} \quad (12)$$

$$Q_i = Q_k - Q_p \quad (13)$$

$$Q_c[kWh] = \frac{10^3}{3600} k[MJm^{-3}K^{-1}] \cdot V[m^3] \cdot \Delta t[K] \quad (14)$$

$$E_Q = \frac{Q_i - Q_c}{Q_c} \cdot 100\% \quad (15)$$

Tabela 6. Punkty pomiarowe przyjęte do sprawdzenia przelicznika ISTA SEXTAN3

lp.	Symulacja czujników temperatury					Symulacja przetwornika przepływu		
	t_1	t_2	Δt	R_{t1}	R_{t2}	q	f_{gen}	T_{gen}
	°C	°C	K	Ω	Ω	m ³ /h	Hz	s
1						1.5		
2						1.5		
3						1.5		

Tabela 7. Wyniki sprawdzenia przelicznika metodą symulacyjną

lp.	Q_p	Q_k	τ	T_{gen}	V	t_1	t_2	Δt	k	Q_i	Q_c	E_Q
	kWh	kWh	s	s	m ³	°C	°C	K	MJm ⁻³ K ⁻¹	kWh	kWh	%
1												
2												
3												
Pomiar objętości wody w temperaturze : (ustalić na podstawie schematu instalacji)												

6.2.3 Pomiar ilości ciepła w układzie rzeczywistym

Po wykonaniu punktu 6.2.2 należy powrócić do pomiarów ilości ciepła wykonywanych w rzeczywistym układzie pracy ciepłomierza. Do przelicznika APATOR powinny być dołączone czujniki temperatury i przetwornik przepływu. Należy wykonać kolejno czynności:

- wyłączyć grzałkę,
- zanotować w Tabeli 8 godzinę i minutę rozpoczęcia eksperymentu, temperaturę wody t w termostacie i wskazanie ciepłomierza z uwzględnieniem starszych i młodszych cyfr wyniku pomiaru (odczyt w pętli FL2 w sposób opisany w instrukcji obsługi ciepłomierza),
- otworzyć zawór Z1, włączyć wentylatory, włączyć pompę wody na III biegu,

- powtarzać odczyty co 10 minut notując je w Tabeli 8, aż do osiągnięcia w układzie stanu ustalonego lub do zakończenia zajęć, zależnie co nastąpi wcześniej.

Na podstawie zgromadzonych w Tabeli 8 wyników obliczyć ilość ciepła Q_c (korzystając ze wzoru 5) oddaną do wymiennika przez wodę o objętości V , nagrzaną wstępnie w termostacie i następnie schłodzoną podczas eksperymentu od temperatury t_p do temperatury t_k i porównać ją ze wskazaniem ciepłomierza Q_i . Wyniki obliczeń zanotować w Tabeli 9. W sprawozdaniu wykonać wykres temperatury t i ciśnienia p w funkcji czasu τ .

Po kilku minutach od rozpoczęcia pomiarów, korzystając z instrukcji obsługi ciepłomierza, wywołać na wyświetlaczu oraz zanotować w Tabeli 10 dodatkowe wskazania:

- temperatury t_1 i t_2 (pętla podstawowa),
- różnicę temperatur Δt (pętla podstawowa),
- wartość przepływu chwilowego wody q w instalacji (pętla podstawowa),
- chwilowej mocy cieplnej P (pętla podstawowa),
- symbol kodu błędu (pętla podstawowa),
- wartość testu metrologicznego
- napięcie baterii (pętla FLo - dane konfiguracyjne)
- numer seryjny (pętla FLo - dane konfiguracyjne)
- czas pracy (pętla FLo - dane konfiguracyjne)

Porównać odczytane dane z odpowiednimi parametrami ciepłomierza. Zapoznać się ze sposobem wykonywania obliczeń do testu metrologicznego przedstawionym w instrukcji obsługi ciepłomierza APATOR. Na podstawie odczytanej wartości testu metrologicznego wykonać odpowiednie obliczenia i sprawdzić poprawność działania przelicznika.

Tabela 8. Pomiar ilości ciepła w układzie rzeczywistym

lp.	Czas	Czas	Temperatura	Ciśnienie	Wskazanie ciepłomierza	
		τ	t	p	bardziej znaczące cyfry	mniej znaczące cyfry
	godz. : min.	s	°C	bar	GJ	GJ $\times 10^{-7}$
1		0				
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						

Tabela. 9. Obliczenie błędu pomiaru ilości ciepła w układzie rzeczywistym

Q_p	Q_k	t_p	t_k	Δt	k	V	Q_i	Q_c	E_Q
GJ	GJ	°C	°C	K	MJm ⁻³ K ⁻¹	m ³	GJ	GJ	%
Pomiar objętości wody w temperaturze : (ustalić na podstawie schematu instalacji)									

Tabela 10. Parametry ciepłomierza w układzie rzeczywistym

lp	Parametr ciepłomierza lub instalacji			wartość odczytana	dane ciepłomierza	
					min	max
1	przepływ	q	m³/h			
2	temperatura na zasilaniu	t₁	°C			
3	temperatura na powrocie	t₂	°C			
4	różnica temperatur	Δt	°C			
5	moc cieplna	P	W			
6	dni pracy	-	-		wartość obliczona testu	błąd testu
7	Symbol kodu błędu	-	-			
8	Test metrologiczny	-	kJ		kJ	%
9	Napięcie baterii	-	V			
10	numer seryjny	-	-			

6.3. Opracowanie wyników, wnioski końcowe

W sprawozdaniu należy zamieścić schematy wykorzystywanych układów pomiarowych oraz parametry używanej aparatury, a w szczególności badanych ciepłomierzy.

Wyjaśnić sposób wyboru parametrów punktów pomiarowych (temperatur i przepływu) do symulacyjnego sprawdzenia przelicznika wskazującego (Tabela 6). Porównać wyznaczone błędy z wymaganiami przepisów, ocenić klasę ciepłomierza.

Ocenić minimalny czas trwania każdego z pomiarów, który zapewniłby utrzymanie błędów pomiaru stanowiska pomiarowego (przede wszystkim błędów odczytu przelicznika) na wymaganym poziomie, tzn. nie większym od 1/5 dopuszczalnych błędów badanego ciepłomierza.

Przedstawić na wspólnym wykresie proces nagrzewania i schładzania termostatu wykonując wykresy temperatury t i ciśnienia p w funkcji czasu τ .

Porównać sposób zamontowania ciepłomierza na stanowisku z przedstawionymi zaleceniami instalatorskimi i ocenić poprawność wykonanej instalacji.

Porównać parametry ciepłomierza z rzeczywistymi parametrami wykorzystywanego w ćwiczeniu modelu instalacji ciepłowniczej. Przedstawić sposób i wynik obliczania błędu ciepłomierza na podstawie odczytanego testu metrologicznego.

7. PYTANIA KONTROLNE

- Gdzie znajdują zastosowanie liczniki ciepła ?
- Wyjaśnić zasadę pomiaru ilości ciepła.
- Jakie są wymagania prawne w stosunku do ciepłomierzy ?
- W jaki sposób określone są dopuszczalne błędy ciepłomierza ?
- Wyjaśnić budowę i zasadę działania licznika ciepła.
- Jakie są zalecenia montażowe dla licznika ciepła ?
- Jak sprawdza się ciepłomierz ?
- Na czym polega sprawdzenie przelicznika wskazującego ?
- W jaki sposób sprawdza się parę czujników temperatury ?
- Jak można sprawdzić przetwornik przepływu ?
- Na czym polega symulacja czujników temperatury i przetwornika przepływu ?

8. DODATKI

Aby ułatwić studentom Wydziału Elektrotechniki i Informatyki zrozumienie zagadnień związanych z problematyką pomiaru ciepła, w Dodatkach zamieszczono bardzo skondensowany zasób podstawowych informacji z zakresu termodynamiki i techniki ciepłowniczej. Zainteresowanych bliżej tymi zagadnieniami odsyłam do literatury [12], [13], [14].

8.1. Podstawowe wielkości i jednostki

Ciepło Q, według obecnych poglądów, jest jedną z form przekazywania energii pomiędzy dwoma układami, inną niż praca [12], [13]. W międzynarodowym układzie SI jednostką ciepła jest dżul (*joule*) [**J**]. Ponieważ dżul jest jednostką bardzo małą, w ciepłownictwie praktycznie stosuje się jego wielokrotności: kilodżule [**kJ**] i megadżule [**MJ**]. Jednostka ciepła ma z oczywistych względów swoje bezpośrednie odpowiedniki w jednostkach energii elektrycznej i mechanicznej:

$$1J \equiv 1W \cdot s \equiv 1N \cdot m \quad (16)$$

Z powodu zależności (16) **ciepło często niesłusznie jest nazywane energią**, podczas gdy ciepło jest jedynie jednym ze sposobów wymiany (przekazywania) energii i dlatego ma jednostkę zgodną z jednostkami energii i pracy, nie powinno być jednak z energią utożsamiane. Energia jest bowiem właściwością materii, jest funkcją stanu układu i zgodnie z zasadą zachowania energii jej sumaryczna wartość jest stała. Natomiast ciepło i praca występują tylko podczas wymiany energii między układami, z chwilą zakończenia się tego procesu (np. po wyrównaniu się temperatur) **przestają istnieć** [13]. Z tego samego powodu popularne **sformułowanie energia cieplna jest formalnie niesłuszne i pozbawione sensu**. Należy jednocześnie jednak pamiętać, że dokonując pomiaru ilości ciepła wyznaczamy równocześnie ilość energii przekazanej w układzie.

Często obecnie jeszcze stosowaną jednostką ciepła jest również kilowatogodzina [**kWh**].

$$1kWh = 10^3 \cdot 3600s \cdot 1W = 3,6 \cdot 10^6 J = 3,6MJ \quad (17)$$

Historycznie najstarszą, obecnie rzadko stosowaną jednostką, jest kaloria [cal]. Jedna kaloria jest zdefiniowana jako ilość ciepła potrzebna do ogrzania 1g wody o 1 °C. Ponieważ jednak właściwości wody zależą od temperatury, praktycznie stosowano kalorię piętnastostopniową [cal₁₅] lub dwudziestostopniową [cal₂₀]. Dla przykładu, jedna kaloria piętnastostopniowa jest to ilość ciepła potrzebna do ogrzania 1g wody od temperatury 14.5 °C do 15.5 °C. Używana była również kaloria średnia, zdefiniowana dla przyrostu temperatury wody od 0 °C do 100 °C. Z praktycznych względów obecnie do przeliczeń stosuje się kalorię międzynarodową [cal], powiązaną liczbowo z dżulem wg zależności (18), określającej tzw. cieplny równoważnik pracy mechanicznej.

$$1cal = 4,1868J \quad (18)$$

W krajach anglosaskich stosuje się jednostkę [Btu] (*British Thermal Unit*), zdefiniowaną jako ilość ciepła potrzebną do ogrzania jednego funta [lb] wody o jeden stopień Farenheita, od temperatury 60 °F do 61 °F.

$$1Btu = 1055,06J = 252cal \quad (19)$$

Strumień ciepła Φ jest ilością ciepła wymienianą w układzie w jednostce czasu:

$$\Phi = \frac{\Delta Q}{\Delta \tau} [J \cdot s^{-1}] \quad (20)$$

Jednostka strumienia ciepła Φ jest zgodna z jednostką mocy:

$$1J \cdot s^{-1} \equiv 1W \equiv 1N \cdot m \cdot s^{-1} \quad (21)$$

Gęstość strumienia ciepła q przenikającego przez powierzchnię S definiuje wzór (22):

$$q = \frac{1}{S} \cdot \frac{\Delta Q}{\Delta \tau} [J \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}] \quad (22)$$

Pojemność cieplna ciała C jest to stosunek ilości dostarczonego (oddanego) ciepła do przyrostu (spadku) temperatury ciała:

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta t} [J \cdot K^{-1}] \quad (23)$$

Ciepło właściwe materiału c jest pojemnością cieplną ciała o jednostkowej masie:

$$c = \frac{1}{m} \frac{\Delta Q}{\Delta t} [J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}] \quad (24)$$

Współczynnik przewodzenia ciepła λ materiału jest to strumień ciepła przepływający przez przekrój jednostkowy 1 m² materiału o grubości jednostkowej 1 m, przy różnicy temperatur 1 K; jego jednostką jest [W m⁻¹K⁻¹]. Wartości współczynnika λ wynoszą od 0.025 [W m⁻¹K⁻¹] dla nowoczesnych materiałów izolacyjnych, do ponad 400 [W m⁻¹K⁻¹] dla metali. Współczynnik przewodzenia ciepła materiałów izolacyjnych jest zależny od ich temperatury i wilgotności, porównując więc różne materiały należy zwrócić na to uwagę.

Współczynnik wnikania ciepła α jest to strumień ciepła wpływający z otaczającego ośrodka do przekroju jednostkowego 1 m² materiału, przy różnicy temperatur pomiędzy ośrodkiem i materiałem równej 1 K; jego jednostką jest [W m⁻²K⁻¹]. Wartości współczynnika α zależą od rodzaju ośrodka i materiału, prędkości przepływu ośrodka, charakteru przepływu (laminarny, turbulentny), ukształtowania materiału. Praktycznie

spotykane wartości α wynoszą 0.1-500 [$\text{W m}^{-2}\text{K}^{-1}$] dla gazów, 500-7000 [$\text{W m}^{-2}\text{K}^{-1}$] dla cieczy niewrzących i 2000-10000 [$\text{W m}^{-2}\text{K}^{-1}$] dla cieczy wrzących. Obliczenie współczynnika wnikania dla konkretnego przypadku jest dość skomplikowane [14].

Tabela 11. Właściwości cieplne niektórych materiałów [13].

materiał	temperatura	gęstość masy	pojemność cieplna	współczynnik przewodzenia ciepła	emisyjność w kierunku normalnym
	K	ρ kg m^{-3}	c $\text{kJ kg}^{-1}\text{K}^{-1}$	λ $\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$	ϵ -
złoto	293	19290	0.1294	311	-
srebro	293	10500	0.2340	418	0.025
aluminium	293	2700	0.896	229	0.040
miedź czysta	293	8930	0.3831	384	0.030
stal	293-773	7800-9000	0.477-0.628	14.5-45	0.61-0.93
żelazo	293	7850	0.452	73	-
beton	293	1700-2300	0.88	0.8-1.4	-
mur ceglany	293	1300-1800	0.84	0.38-0.52	0.93
szamot	373-1273	1700-2000	0.84-1.13	0.5-1.7	0.60
szkło	293	2700	0.8	0.75	0.90
guma	293	1100	1.42	0.13-0.21	0.95
papier	293	700-1300	1.34	0.14-0.21	0.80
lód	273	917	2.135	2.2	0.966
woda	300-500	996.6-831.5	4.178-4.721	0.612-0.640	0.8
para wodna	400-800	0.547-0.271	2.01-2.15	0.027-0.074	-
powietrze	300-1300	1.161-0.268	1.005-1.188	0.027-0.082	-
olej transformator.	300-350	861-832	1.927-2.129	0.124-0.120	-
świerk osiowo	293	410-420	2.72	0.14	0.935
świerk promieniowo	293			0.26	
wełna mineralna	293	65-85	-	0.043	-
wełna szklana	293	36	-	0.035	-
pianka poliuretanowa	293	58.8	-	0.0246	-

Zdolność emisyjna (emisyjność) ϵ jest to stosunek ilości ciepła pochłanianego do ilości ciepła padającego na ciało. Dla ciała doskonale czarnego $\epsilon=1$, dla innych materiałów jego wartość wynosi od 0,025 (polerowane srebro) do ponad 0,9 dla różnych ciemnych i chropowatych materiałów (np. guma, grafit)

Właściwości cieplne niektórych materiałów zgromadzono w Tabeli 11. Warto zwrócić uwagę na stosunkowo dużą pojemność cieplną wody, małą przewodność cieplną wody i powietrza oraz porównać przewodności cieplne materiałów budowlanych (beton, cegła) z przewodnością cieplną materiałów izolacyjnych (wełna mineralna i szklana, pianka poliuretanowa).

8.2. Zasady termodynamiki

Zasady termodynamiki, w odróżnieniu od innych praw fizycznych, nie formułują ścisłych zależności matematycznych, a jedynie opisują w dość nieformalny sposób pewne ogólne zależności. Z tego też względu zasady termodynamiki nie mają jednoznacznego brzmienia i wielu badaczy sformułowało te same zasady w odmienny, własny sposób. Obecnie znane są cztery zasady termodynamiki, przy czym tylko dwie pierwsze mają znaczenie dla omawianych zagadnień. Zasada trzecia (dotycząca reakcji chemicznych) i czwarta (o procesach nierównowagowych) nie będą więc omawiane.

Pierwsza zasada termodynamiki rozszerza zasadę zachowania energii na ciepło i została sformułowana przez Mayera w roku 1842 (później niż druga zasada!). Zasada ta mówi, że w układzie odosobnionym, bez możliwości wymiany energii z otoczeniem, całkowita energia (wszystkich postaci) w nim zawarta jest wielkością niezmienną. W układzie takim może zachodzić wzajemna wymiana jednego rodzaju energii w drugi, ale ich suma nie zmienia się. Często pierwsza zasada termodynamiki jest formułowana w następującej postaci:

Jest rzeczą niemożliwą skonstruowanie perpetuum mobile pierwszego rodzaju (**PM I**), tj. silnika pracującego bez zasilania energią z zewnątrz.

Druga zasada termodynamiki została sformułowana w roku 1824 przez Carnota, a Clausius poprzez wprowadzenie pojęcia entropii (1865 r.) nadał jej dzisiejszą postać. Zasada ta wynika z obserwacji, że wszystkie zjawiska w przyrodzie są nieodwracalne. Oznacza to, że ciepło nie może samorzutnie przejść od ciała o temperaturze niższej do ciała o temperaturze wyższej (sformułowanie Clausiusa), a układ ciał mających tę samą temperaturę nie jest zdolny do wykonania pracy (sformułowanie Kelvina). Najbardziej znaną postać drugiej zasady termodynamiki sformułował Ostwald:

Jest rzeczą niemożliwą skonstruowanie perpetuum mobile drugiego rodzaju (**PM II**), tj. silnika pracującego kosztem ciepła pobieranego tylko z jednego źródła (miałby on sprawność równą 1).

8.3. Prawa rządzące procesami wymiany ciepła

W technice ciepłowniczej w niektórych miejscach instalacji grzewczych dąży się do maksymalizacji wymiany ciepła celem zwiększenia sprawności pieców, wymienników ciepła i grzejników, a w innych miejscach wymianę ciepła minimalizuje się, poprzez zastosowanie izolacji termicznych, celem ograniczenia strat w rurociągach i na zewnętrznych ścianach budynków. Z tych względów ważne jest poznawanie praw rządzących procesami wymiany ciepła. Pewnym ułatwieniem w zrozumieniu zjawisk wymiany ciepła jest ich duże podobieństwo do praw obowiązujących w elektrotechnice. Dla konstruktorów sprzętu elektronicznego przedstawione prawa są również przydatne przy projektowaniu i konstruowaniu radiatorów odprowadzających ciepło z elementów mocy.

Prawo przewodzenia ciepła opracowane przez Fouriera mówi, że strumień ciepła Φ przepływający przez przegrodę o powierzchni S jest proporcjonalny do iloczynu tej powierzchni, współczynnika przewodzenia ciepła λ dla materiału przegrody oraz różnicy temperatur Δt z obu stron przegrody i odwrotnie proporcjonalny do grubości przegrody d , zgodnie z zależnością (25).

$$\Phi = -S\lambda \frac{\Delta t}{d} [W] \quad (25)$$

Minus we wzorze oznacza, że kierunek przepływu ciepła jest przeciwny kierunkowi wzrostu temperatury, co wynika z drugiej zasady termodynamiki. Porównując w Tabeli 10 wartości współczynnika λ dla różnych materiałów można stwierdzić, że pokrycie betonowych ścian budynku kilkunastocentymetrową warstwą izolacji termicznej pozwala na ponad dziesięciokrotne zmniejszenie strat ciepła !

Przez analogię do elektrotechniki, wprowadza się pojęcie oporu przewodzenia ciepła R_λ :

$$R_\lambda = \frac{d}{S\lambda} [K \cdot W^{-1}] \quad (26)$$

Prawo przewodzenia ciepła przyjmuje wtedy postać prawa Ohma, przy czym różnica temperatur odpowiada napięciu, a strumień ciepła reprezentuje prąd.

Prawo wnikania ciepła sformułowane przez Newtona określa wartość strumienia ciepła Φ wnikającego do przegrody o powierzchni S i temperaturze t_2 ze stykającego się z nią płynu o temperaturze t_1 , zgodnie z zależnością (27).

$$\Phi = S\alpha(t_1 - t_2) [W] \quad (27)$$

Analogicznie wprowadza się opór wnikania ciepła R_α . Zdefiniowanie oporu przewodzenia i oporu wnikania pozwala na proste wyznaczenie strumienia ciepła przenikającego przez dowolną przegrodę. Całkowity opór cieplny dowolnej przegrody jest bowiem sumą oporów wnikania na jej przeciwległych powierzchniach oraz oporów przewodzenia wszystkich jej kolejnych warstw. Prawo wnikania ciepła ma oczywiście zastosowanie zarówno do nagrzewania ciała jak również do stygnięcia (ważne przy projektowaniu radiatorów w sprzęcie elektronicznym).

Prawo Stefana-Boltzmana określa całkowity strumień ciepła Φ wypromieniowany we wszystkich kierunkach przez powierzchnię S ciała szarego o współczynniku emisyjności ϵ i posiadającego temperaturę T [K], zgodnie z zależnością (28).

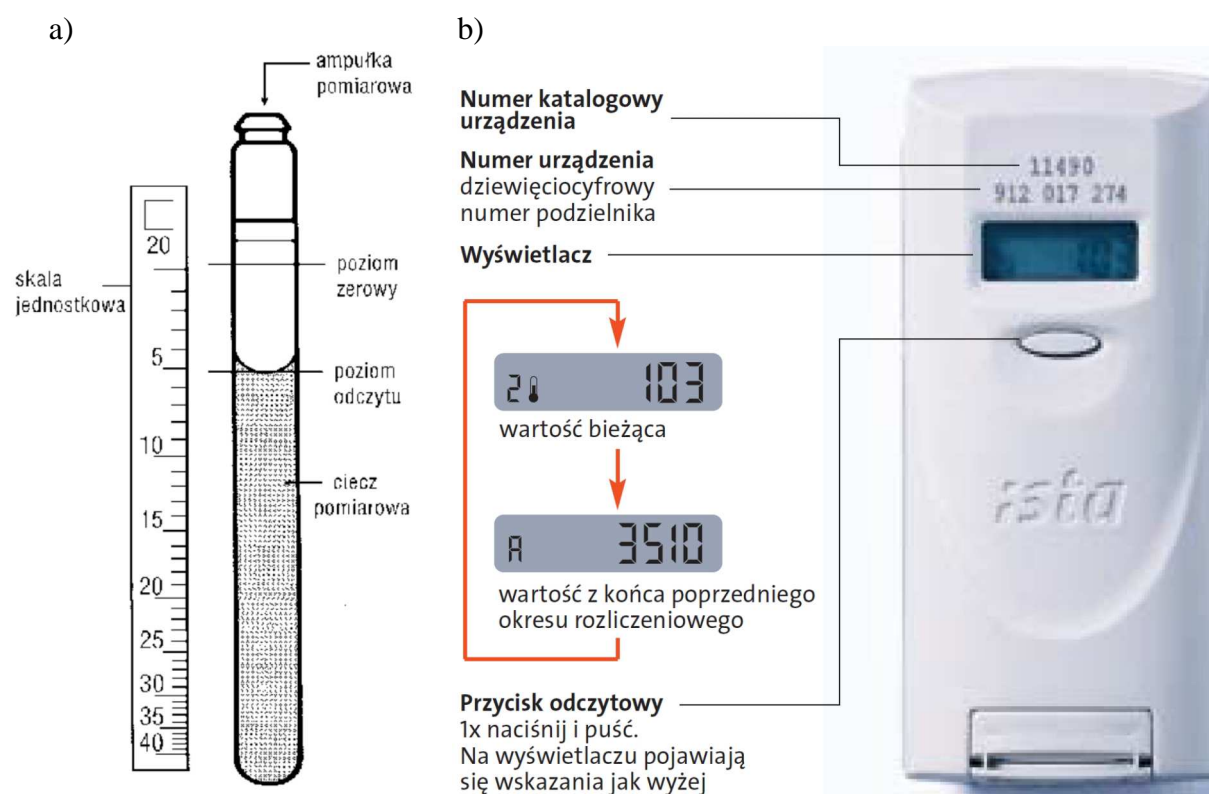
$$\Phi = \epsilon S C_c \left(\frac{T}{100} \right)^4 \quad (28)$$

Stała promieniowania ciała doskonale czarnego C_c wynosi $5.67 [W m^{-2} K^{-4}]$. Z prawa Stefana-Boltzmana wynika sens malowania grzejników na kolor czarny i konieczność otulania rurociągów polerowaną blachą aluminiową.

8.4. Rozliczanie kosztów centralnego ogrzewania

Gospodarstwa domowe zużywają około 40 % energii w skali kraju. Z tego 84 % zużywa się na ogrzewanie, 15 % w łazience i kuchni i 1 % na oświetlenie. Rozliczanie kosztów ogrzewania mieszkań jest więc zagadnieniem bardzo ważnym. Ciepłomierz umożliwia co prawda dokładny pomiar ilości ciepła, nie rozwiązuje jednak problemu wyznaczenia kosztów ogrzewania indywidualnych mieszkań w budownictwie wielorodzinnym, ponieważ ze

względów ekonomicznych nie jest praktycznie możliwe zainstalowanie ciepłomierza przy każdym odbiorniku ciepła (grzejniku). W tym celu stosuje się podzielniki kosztów ogrzewania, którego przykładową konstrukcję przedstawia Rys. 6a. Jest to tzw. podzielnik wyparkowy, którego działanie oparte jest na odparowywaniu z wyskalowanego zbiorniczka specjalnej cieczy. **Wyparkowy podzielnik kosztów** składa się z ampułki pomiarowej i odpowiedniej, zazwyczaj nieliniowej skali. Ampułka pomiarowa jest to precyzyjnie wykonana rurka kapilarna, otwarta od góry i napełniona specjalną cieczą pomiarową. Skala jest umieszczona w sposób pozwalający odczytać w dowolnej chwili ubytek cieczy w umownych jednostkach. Podzielnik z napełnioną ampułką mocowany jest na grzejniku na początku sezonu grzewczego i plombowany. Zasada działania podzielnika polega na odparowywaniu cieczy z rurki pod wpływem wysokiej temperatury grzejnika. Ilość odparowanej cieczy jest zależna od temperatury grzejnika, czasu grzania oraz od jego rodzaju konstrukcji i wymiarów. Odpowiedni nadmiar ilości cieczy uwzględnia tzw. zimne odparowanie, przy całkowicie wyłączonym grzejniku. Odczytana ze skali po sezonie grzewczym ilość odparowanej cieczy w umownych jednostkach i po uwzględnieniu indywidualnych parametrów grzejnika, jest proporcjonalna do ilości ciepła oddanego przez grzejnik. Wynik odczytu nie stanowi co prawda bezpośrednio miary zużycia ciepła, pozwala jednak sprawiedliwie (proporcjonalnie) podzielić całkowitą ilość zużytego ciepła pomiędzy poszczególne grzejniki zainstalowane w budynku. Dokładniejsze i coraz częściej stosowane są elektroniczne podzielniki kosztów ogrzewania. Przykładowy wygląd takiego podzielnika przedstawia Rys. 6b. Posiada on wyświetlacz LCD i przycisk do odczytywani wskazania. Często podzielniki elektroniczne są wyposażone w moduł radiowy do odczytu zdalnego.



Rys. 6. Podzielniki kosztów ogrzewania: a) wyparkowy, b) elektroniczny

Podstawę do wyznaczenia kosztów dostarczonego ciepła stanowią wskazania zainstalowanego w budynku ciepłomierza, które po powiększeniu o koszty eksploatacji instalacji **c.o.**, serwisu i obsługi stanowią razem **całkowite koszty ogrzewania** budynku.

Całkowite koszty ogrzewania są następnie dzielone na **koszty ogrzewania i koszty ciepłej wody użytkowej**. Koszty ciepłej wody są rozliczane według wskazań wodomierzy do ciepłej wody, natomiast koszty ogrzewania dzielone są na koszty podstawowe i koszty zużycia. **Koszty podstawowe**, które mogą stanowić do 50 % kosztów ogrzewania, obejmują wspólne dla wszystkich mieszkańców koszty dostarczenia ciepła i strat powstałych na ogrzanie ścian budynku, piwnic itp. Ponieważ koszty te nie są zależne od indywidualnego zużycia, dzieli się je proporcjonalnie do powierzchni lokali. Natomiast **koszty zużycia** dzieli się proporcjonalnie do wskazań podzielników kosztów. Suma tak obliczonych odpowiednich części kosztów podstawowych i kosztów zużycia stanowi **indywidualne koszty ogrzewania**.

9. LITERATURA

- [1] Ustawa z dnia 11 maja 2001 r. Prawo o miarach, tekst jednolity Dz.U. 2004 nr 243 poz. 2441.
- [2] Ustawa z dnia 30 sierpnia 2002 r. O systemie zgodności, tekst jednolity Dz.U. 2010 nr 138, poz. 395.
- [3] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 18 grudnia 2006 r. w sprawie zasadniczych wymagań dla przyrządów pomiarowych, Dz.U. 2007 nr 3, poz. 27 (tzw. dyrektywa MID).
- [4] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 27 grudnia 2007 r. w sprawie rodzajów przyrządów pomiarowych podlegających prawnej kontroli metrologicznej oraz zakresu tej kontroli, Dz.U. 2008 nr 3, poz. 13.
- [5] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 7 stycznia 2008 r. w sprawie prawnej kontroli metrologicznej przyrządów pomiarowych, Dz.U. 2008 nr 5, poz. 29.
- [6] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 21 grudnia 2007 r. w sprawie wymagań, którym powinny odpowiadać ciepłomierze i ich podzespoły, oraz szczegółowego zakresu sprawdzeń wykonywanych podczas prawnej kontroli metrologicznej tych przyrządów pomiarowych, Dz.U. 2008 nr 2 poz. 2.
- [7] PN-EN 1434-1:2009, Ciepłomierze – Części od 1 do 6.
- [8] PN-EN 60751:2009, Czujniki platynowe przemysłowych termometrów rezystancyjnych i platynowe czujniki temperatury.
- [9] Heat meters. International Recommendation OIML R 75, Organisation Internationale de Metrologie Legale, Paris, Edition 1988 (E).
- [10] Heat coefficients for water. D. Stuck Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven, 1986.
- [11] Ciepłomierze LQM-III ..., CQM-III-K, LEC5, Katalog APATOR-KFAP sp. z o. o. <http://www.kfap.pl>
- [12] Stanisław Ochęduszko: Termodynamika stosowana, WNT, Warszawa 1974.
- [13] Jan Szargut: Termodynamika, PWN, Warszawa 1980.
- [14] Poradnik termoenergetyka, WNT, Warszawa 1974.

Uwaga!

- Aktualność obowiązujących w Polsce aktów prawnych można sprawdzić w Internetowym Systemie Aktów Prawnych Sejmu RP: <http://isip.sejm.gov.pl/>
- Aktualność Polskich Norm można sprawdzić na stronach Polskiego Komitetu Normalizacyjnego: <http://www.pkn.pl/>