

Warunki efektywnego działania pomp ciepła

Conditions for efficient operation of heat pumps

KAZIMIERZ ŻARSKI

DOI 10.36119/15.2025.5.2

Istniejące przepisy prawa [4,5,6] wymagają, aby w projekcie budowlanym obiektu budowlanego została zawarta analiza możliwości racjonalnego wykorzystania odnawialnych źródeł energii i ciepła. Prawo budowlane [6] i Rozporządzenie w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki [4] nie zawierają sformułowania tego obowiązku w odniesieniu do inwestora budynku, tylko do autora projektu. Jest to kuriozalne, albowiem decyzja o zastosowaniu odnawialnych źródeł ciepła ma, oprócz aspektu ekologicznego, aspekt finansowy. Podobnie jak w przypadku kolektorów słonecznych [1,2] działanie central z pompami ciepła może być obciążone błędami wynikającymi ze specyfiki ich działania i schematów niedostosowanych do warunków funkcjonowania pomp ciepła, najczęściej „przeniesionych” z układów kotłowni. W artykule wskazano na typowe błędy w schematach ideowych central z pompami ciepła, powodujące obniżenie efektywności działania i zwiększenie kosztu ogrzewania budynków i przygotowania ciepłej wody.

Słowa kluczowe: pompa ciepła, odnawialne źródła energii, efektywność

The existing legal regulation [4,5,6] requires that the construction design of a building should include an analysis of the possibilities of rational use of renewable energy and heat sources. The Construction Law [6] and the Regulation on technical conditions that buildings should meet [4] do not contain a formulation of this obligation in relation to the building investor, but only to the author of the construction design. This is bizarre because the decision to use renewable heat sources has, in addition to the ecological aspect, a financial aspect. Similarly to solar collectors [1,2], the operation of heat pump installation may be subject to error resulting from the specifics of their operation and diagrams not adapted to the conditions of operation of heat pumps, most often “transferred” from boiler systems. The article indicates typical errors in the conceptual layout of heat pump units, resulting in reduced operational efficiency and increased costs of heating the building and preparing domestic hot water.

Keywords: heat pump, renewable energy sources, efficiency

Wstęp

Kwestie prawne związane z obowiązkiem sporządzenia analizy możliwości wykorzystania odnawialnych źródeł ciepła i energii w ogrzewaniu budynków omówiono w [3]. Pompy ciepła stanowią alternatywę dla spalania paliw, o ile ich współczynnik efektywności w połączeniu z efektywnością wytwarzania energii elektrycznej w warunkach krajowych jest korzystniejszy niż efektywność spalania paliwa bezpośrednio w kotłowniach. Nie jest to tematem tego artykułu, ale wyniki analizy nie są oczywiste. Centrale z pompami ciepła to rozwiązania charakteryzujące się kosztem istotnie wyższym od rozwiązań umownie zwanych konwencjonalnymi (kotłownie gazowe, olejowe, węzły ciepłownicze), a więc o ich atrakcyjności z punktu widzenia inwestora decydują w dużej mierze aspekty finansowe. Jednym z czynników obniżających dodatkowo atrakcyjność pomp ciepła jest niewła-

ściwa kompozycja schematu ideowego połączenia pompy ciepła z instalacją ogrzewania budynku i instalacją przygotowania ciepłej wody. Kwestia doboru mocy katalogowej pompy ciepła, znacznie wyższej niż moc osiągnana w warunkach ekstremalnej temperatury powietrza zewnętrznego [3] jest również czynnikiem wrażliwym, albowiem zaoferowanie klientowi pompy ciepła o mocy katalogowej 2÷2.5 krotnie przekraczającej zapotrzebowanie na moc cieplną budynku zwykle jest odbierane jako próba nieuczciwej oferty handlowej (pomijam kwestię kosztu pompy ciepła i bariery finansowej). „Wady” układów kolektorów słonecznych w centralach autonomicznych i w hybrydowych węzłach ciepłowniczych omówiono w [1,2]. Celem obecnego artykułu jest zwrócenie uwagi na błędne rozwiązania, ale również wskazanie rozwiązań prawidłowych, przy których pompa ciepła może działać zgodnie z zasadami termodynamiki i ekonomiki.

Warunki prawidłowego działania pompy ciepła

W warunkach polskich bardziej powszechne zastosowanie mają pompy ciepła powietrzne, rzadziej pompy gruntowe. Czas „eksperymentów” z wodą podziemną lub powierzchniową jako dolnym źródłem ciepła pompy ciepła przeszedł do przeszłości. Powietrzna pompa ciepła musi być dostosowana do warunków klimatu w Polsce, choć jeszcze do niedawna można było spotkać rozwiązania o ograniczonej (z dołu) temperaturze parowania czynnika chłodniczego, wymagające alternatywnego (100% mocy), a nie uzupełniającego źródła ciepła (kotła, węzła ciepłownego) lub energii (grzałki elektrycznej). Norma PN-EN 14825:2014-02 [7] określa warunki porównawcze badania mocy cieplnej pomp ciepła. W odniesieniu do pomp powietrznych jest to np. temperatura powietrza (termometru suchego/termometru mokrego) 7/6 °C oraz temperatura wody

dopływającej do skraplacza 35 °C przy różnicy temperatury 5 K, czyli 35/40 °C. Temperatura powietrza jest zbliżona do temperatury równowagi budynku o niskim zużyciu energii, temperatura wody chłodzącej skraplacza może odpowiadać wyłączenie standardom ogrzewania płaszczynowego. Podany w tych umownych warunkach współczynnik efektywności COP jest znacznie wyższy (około 2÷2.5 krotnie) niż np. przy temperaturze powietrza – 18 °C i parametrach obiegu skraplacza 50/45 °C, czyli typowych parametrach dostosowanych do ogrzewania grzejnikowego. To jest właśnie czynnik „mylący” potencjalnego inwestora, któremu wydaje się, że moc katalogowa pompy ciepła powinna odpowiadać zapotrzebowaniu na moc ciepłą budynku. Zastosowanie wyłącznie odwróconego obiegu chłodniczego do przygotowania ciepłej wody o temperaturze zgodnej z wymaganiami Warunków technicznych [4] wymagałoby parametrów obiegu skraplacza min. 60/55 °C, tzn. temperatury skraplania czynnika chłodniczego 65 °C. Działanie pompy ciepła w tym przedziale temperatury byłoby nieefektywne, stąd znaczący zakres różnicy temperatury ciepłej wody przejmuje grzałka elektryczna. W tab. 1. podano współczynnik efektywności pompy ciepła w przedziale temperatury parowania – 25 °C i temperatury skraplania 65 °C [9]. Ten obszar działania jest prawie technicznie niemożliwy, stąd przy obliczeniu realnego współczynnika efektywności pompy ciepła należy w odniesieniu do ciepłej wody przyjąć działanie grzałki elektrycznej w przedziale temperatury ciepłej wody 45÷55 °C (20% pełnej różnicy temperatury). Grzałka elektryczna w układzie ciepłej wody włącza się jeszcze z innego powodu, co zostanie omówione w dalszej części artykułu.

Jeżeli wziąć pod uwagę konieczność „rozmarzania” parownika pompy ciepła, to efektywność podana w tabeli jest po-

równywalna z efektywnością działania grzałki elektrycznej.

Warunki działania parownika pompy ciepła są stabilne, moc przekazana od powietrza zewnętrznego jest w przybliżeniu wprost proporcjonalna do logarytmicznej różnicy temperatury powietrza i czynnika chłodniczego. Do stabilnego działania pompy ciepła potrzeba spełnienia następujących warunków.

☛ W przypadku pompy ciepła o nieregulowanej mocy cieplnej (mylnie zwaną wydajnością) należy zapewnić:

- stały strumień wody chłodzącej skraplacza,
- stałe parametry obiegu skraplacza, np. 38/33 °C w ogrzewaniu podłogowym i 50/45 °C w ogrzewaniu grzejnikowym i w obiegu ciepłej wody,
- możliwość akumulacji nadwyżki ciepła przy przyjętym minimalnym czasie działania sprężarki.

Jest oczywiste, że układ ten wymaga zbiornika buforowego. Zbiornik buforowy może być zastąpiony pojemnością cieplną budynku, jeżeli instalacja ogrzewania nie jest wyposażona w termostatyczne zawory grzejnikowe, co nie jest w Polsce standardem, chociażby z uwagi na wielość stref w ogrzewanym budynku. Wówczas pompa ciepła jest sterowana czujnikiem temperatury w jednym z ogrzewanych pomieszczeń (reprezentatywnym).

Stałe parametry obiegu skraplacza wymagają odseparowania od obiegu instalacji, o zmiennej temperaturze wody zasilającej i powrotnej i zmiennym strumieniu masy wody płynącej przez grzejniki. Również przy regulacji ilościowej ogrzewania, przy zmiennej temperaturze wody powrotnej i zmiennym strumieniu masy wody instalacyjnej, obiegi muszą być rozdzielone.

Z uwagi na niską temperaturę wody wodociągowej (5÷10 °C) obieg grzew-

czy przygotowania ciepłej wody należy również oddzielić od obiegu chłodzenia skraplacza.

☛ W przypadku pompy ciepła o regulowanej mocy cieplnej należy zapewnić:

- stały strumień wody chłodzącej skraplacza,
- zmiennie parametry obiegu skraplacza przy ogrzewaniu podłogowym (wyłącznie), np. 38/33 °C; regulacja odbywa się za pomocą zaworów ON/OFF w poszczególnych pętach ogrzewania podłogowego,
- zmiennie parametry obiegu skraplacza przy ogrzewaniu grzejnikowym, np. 50/45 °C,
- stałe parametry obiegu skraplacza przy przygotowaniu ciepłej wody, np. 50/45 °C,
- możliwość akumulacji nadwyżki ciepła przy przyjętej minimalnej mocy cieplnej pompy ciepła i przyjętym minimalnym czasie działania sprężarki.

To może nie jest oczywiste, ale układ ten wymaga również zbiornika buforowego (o mniejszej pojemności niż w przypadku nieregulowanej mocy pompy ciepła). Zbiornik buforowy może być zastąpiony pojemnością cieplną budynku, jeżeli instalacja ogrzewania nie jest wyposażona w termostatyczne zawory grzejnikowe.

Również w tym przypadku obieg skraplacza i i obiegi instalacyjne powinny być rozdzielone.

W tab. 2. podano przykładowy zakres regulacyjny obiegu skraplacza w przypadku ogrzewania podłogowego, w tab. 3. w przypadku ogrzewania grzejnikowego.

W przypadku ogrzewania wody użytkowej sprężarka jest przelączana na 100% wydajności i parametry obiegu skraplacza są równe 50/45 °C, co pozwala na uzyskanie wody o temperaturze ok. 40÷45 °C. Zwykle dolną granicą mocy cieplnej pompy ciepła jest 25÷30% mocy nominalnej. W okresie mniejszego

Tab. 1. Współczynnik efektywności pompy ciepła w przedziale temperatury: parowania – 25 °C i skraplania 65 °C [9]

Warunki pracy										
Wymagana wydajność:			Wrzenie:			Skraplanie:				
Wydajność chłodnicza: 10.00 kW			Temperatura punktu rosy: -25.0 °C			Temperatura punktu rosy: 65.0 °C				
<input type="radio"/> Pokaż wszystkie mo <input checked="" type="radio"/> Pokaż: 11 modele			Użyteczne przegrzanie: 8.0 K			Dochłodzenie: 2.0 K				
<input type="radio"/> Pokaż: 11 modele			Dodatkowe przegrzanie: 0 K			Dodatkowe dochłodzenie: 0 K				
Warunki znamionowe: Niestandardowe			<input type="checkbox"/> Temperatura gazu powrotnego: -17.0 °C			Całkowite dochłodzenie: 2.0 K				
						Temperatura cieczy (bez poślizgu): 63.0 °C				
Blokada doboru: <input type="checkbox"/> Wybór: {VZN140AG}, R290 - 6095 rpm										
Model	Technologia	Konfiguracja	Czynnik chłodniczy	Sterowanie wydajnością	Prędkość [rpm]	Chłodzenie [kW]	COP chłodzenie [W/W]	Ogrzewanie [kW]	COP ogrzewanie [W/W]	
PSH039-4F	Hermetyczne spiralne	Pojedyncza	R454B	Stała prędkość	2900	8.443	0.51	23.27	1.41	
{VZN104AG}	Hermetyczne spiralne	Pojedyncza	R290	Zmienna prędkość	8400	9.654	0.59	24.41	1.49	
{VZN140AG}	Hermetyczne spiralne	Pojedyncza	R290	Zmienna prędkość	6095	10.00	0.63	24.36	1.53	
{VZN175AG}	Hermetyczne spiralne	Pojedyncza	R290	Zmienna prędkość	4817	10.00	0.67	23.37	1.57	

Tab. 2. Wykres regulacyjny obiegu skraplacza w przypadku ogrzewania podłogowego o obliczeniowych parametrach 38/35 °C i minimalnej mocy pompy ciepła równej 25% mocy nominalnej (oprac. autora)

t_e [°C]	t_z [°C]	t_p [°C]	-3	31.9	28.9
-18	38.0	33.0	-2	31.5	28.6
-17	37.6	32.7	-1	31.0	28.3
-16	37.2	32.5	0	30.6	28.0
-15	36.8	32.2	1	30.2	27.7
-14	36.4	31.9	2	29.7	27.3
-13	36.0	31.7	3	29.3	27.0
-12	35.6	31.4	4	28.8	26.7
-11	35.2	31.1	5	28.4	26.4
-10	34.8	30.9	6	27.9	26.1
-9	34.4	30.6	7	27.4	25.7
-8	34.0	30.3	8	27.0	25.4
-7	33.6	30.0	9	26.5	25.0
-6	33.2	29.7	10	26.0	24.7
-5	32.7	29.4	11	26.0	24.7
-4	32.3	29.2	12	26.0	24.7

Tab. 3. Wykres regulacyjny obiegu skraplacza w przypadku ogrzewania grzejnikowego o obliczeniowych parametrach 50/40 °C i minimalnej mocy pompy ciepła równej 25% mocy nominalnej (oprac. autora)

t_e [°C]	t_z [°C]	t_p [°C]	-3	39.9	36.9
-18	50.0	45.0	-2	39.2	36.3
-17	49.4	44.5	-1	38.5	35.7
-16	48.7	44.0	0	37.8	35.1
-15	48.1	43.4	1	37.0	34.5
-14	47.4	42.9	2	36.3	33.9
-13	46.7	42.4	3	35.6	33.3
-12	46.1	41.9	4	34.8	32.7
-11	45.4	41.3	5	34.1	32.1
-10	44.7	40.8	6	33.3	31.5
-9	44.1	40.2	7	32.5	30.8
-8	43.4	39.7	8	31.7	30.1
-7	42.7	39.1	9	30.9	29.5
-6	42.0	38.6	10	30.1	28.8
-5	41.3	38.0	11	30.1	28.8
-4	40.6	37.5	12	30.1	28.8

zapotrzebowania na moc ciepłą ogrzewanego budynku powstaje nadmiar ciepła, który nie może być doprowadzony do instalacji. Skutkiem tego jest przegrzanie sprężarki, co może prowadzić do stanu awaryjnego. W tab. 4. podano wielkość zapotrzebowania na moc ciepłą budynku w zależności od temperatury powietrza zewnętrznego bez uwzględnienia wewnętrznych zysków ciepła oraz z uwzględnieniem zysków ciepła.

W tabeli wyróżniono obszar zapotrzebowania na moc ciepłą mniejszej niż 25% wartości obliczeniowej. Liczba godzin o temperaturze wyższej niż 10 °C w roku statystycznie [10] to 1011 (ok. 20% sezonu grzewczego), o temperaturze wyższej niż 7 °C to 1556 czyli ok. 30% czasu trwania sezonu grzewczego. Zyski

Tab. 4. Zapotrzebowanie na moc ciepłą budynku w zależności od temperatury powietrza zewnętrznego bez uwzględnienia wewnętrznych zysków ciepła oraz z uwzględnieniem zysków ciepła [oprac. autora]

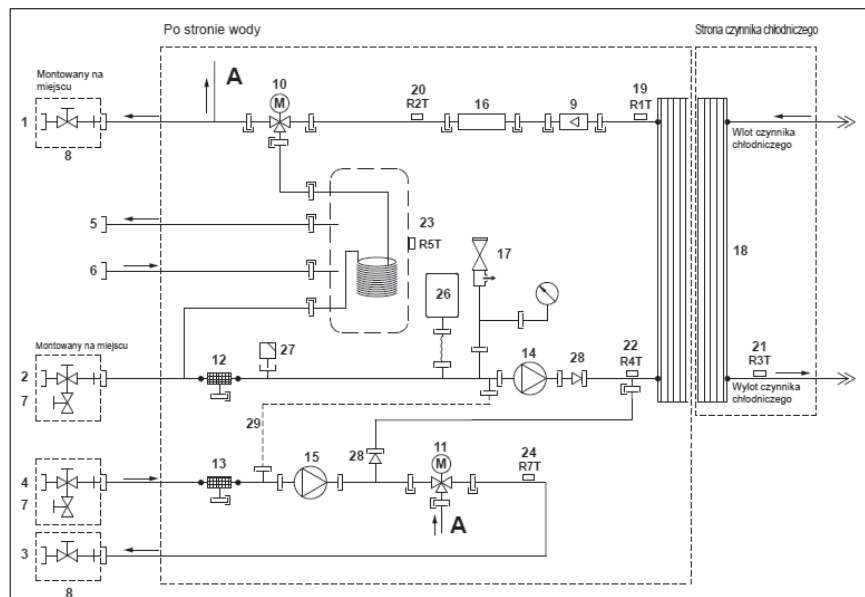
t_e [°C]	moc brutto	zyski ciepła	moc efektywna	t_e [°C]	moc brutto	zyski ciepła	moc efektywna
t_e	Φ	Φ_{z1}	Φ_{ef}	t_e	Φ	Φ_{z1}	Φ_{ef}
-20	6.00	0.6	5.40	-1	3.22	0.6	2.62
-19	5.85	0.6	5.25	0	3.07	0.6	2.47
-18	5.71	0.6	5.11	1	2.93	0.6	2.33
-17	5.56	0.6	4.96	2	2.78	0.6	2.18
-16	5.41	0.6	4.81	3	2.63	0.6	2.03
-15	5.27	0.6	4.67	4	2.49	0.6	1.89
-14	5.12	0.6	4.52	5	2.34	0.6	1.74
-13	4.98	0.6	4.38	6	2.2	0.6	1.6
-12	4.83	0.6	4.23	7	2.05	0.6	1.45
-11	4.68	0.6	4.08	8	1.9	0.6	1.3
-10	4.54	0.6	3.94	9	1.76	0.6	1.16
-9	4.39	0.6	3.79	10	1.61	0.6	1.01
-8	4.24	0.6	3.64	11	1.46	0.6	0.86
-7	4.1	0.6	3.5	12	1.32	0.6	0.72
-6	3.95	0.6	3.35	13	1.17	0.6	0.57
-5	3.8	0.6	3.2	14	1.02	0.6	0.42
-4	3.66	0.6	3.06	15	0.88	0.6	0.28
-3	3.51	0.6	2.91	16	0.73	0.6	0.13
-2	3.37	0.6	2.77				

ciepła w budynku są zjawiskiem oczywistym, a ich występowanie ma miejsce zwłaszcza w początku i końcu sezonu grzewczego.

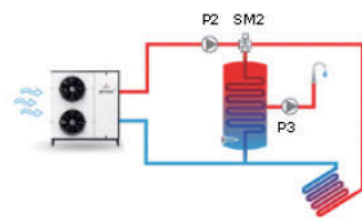
Zatem stosowanie układów bez bufora będzie się charakteryzowało częstym włączaniem i wyłączaniem (awaryjnym z powodu przegrzania) pompy ciepła w cieplejszym okresie roku. Monterzy nazywają to „taktowaniem”.

Błędne rozwiązania w schematach ideowych centrali z pompami ciepła

- Brak bufora i bezpośrednie połączenie obiegów grzewczych (producent znany autorowi)
- Brak bufora, mimo regulacji mocy pompy ciepła, jest przyczyną nadwyżki mocy cieplnej w cieplejszym okresie sezonu



Rys. 1. Przykładowe schematy pomp ciepła (producent znany autorowi) [11]



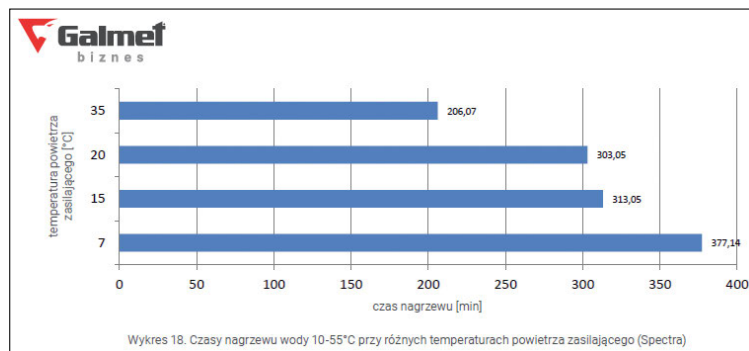
grzewczego, której nie może przejąć instalacja ogrzewania.

- W obwodzie ogrzewania do pompy ciepła może dopływać woda o niskiej temperaturze, zbliżonej do temperatury pomieszczeń ogrzewanych. Pompy obydwu obiegów: ogrzewania grzejnikami i ogrzewania podłogowego są dobrane na obliczeniową różnicę temperatury $\Delta t=5K$ (ew. 10 K, ale nie więcej). Ale to **zawory termostatyczne i zawory odcięcia pętli ogrzewania podłogowego wyznaczają przepływ w instalacji**, a nie pompy. Przy tym schemacie nie należały stosować zaworów termostatycznych w budynku, co jest sprzeczne z obowiązującymi w Polsce przepisami. Przy zaniżonym przepływie w obiegu wtórnym wymiennika ciepła (skraplacza) następuje istotne zmniejszenie współczynnika przenoszenia ciepła od strony wody instalacyjnej, przez co wymiennik może **nie uzyskać wymaganej mocy**, jeżeli w układzie będzie regulowane ciśnienie skraplania w funkcji kompensacji pogodowej (wykres regulacyjny jako zmienna regulacyjna prędkości obrotowej sprężarki). Deficyt mocy może również wystąpić w warunkach **obliczeniowych**, jeżeli grzejniki będą dobrane z pewnym nadmiarem powierzchni ogrzewalnej i do skraplacza dopłynie woda o temperaturze niższej niż obliczeniowa i przy mniejszym strumieniu objętości. Np. jeżeli w warunkach zbliżonych do obliczeniowych do skraplacza dopłynie woda o temperaturze 25 °C zamiast 45 °C, to wówczas woda wypływająca ze skraplacza będzie miała temperaturę nie wyższą niż 30 °C.

- Przy działaniu obwodu przygotowania ciepłej wody jest wyłączona instalacja ogrzewania. Prawdopodobnie działa jedna z pomp, np. pompa obiegu ogrzewania grzejnikowego (lub podłogowego). Jej wydajność jest kształtowana przez charakterystykę hydrauliczną obiegu przygotowania ciepłej wody, przez co przy niewielkiej stracie ciśnienia w obiegu istotnie wzrasta przepływ w obwodzie. W dolnej części zbiornika (wymiennika pojemnościowego) woda obiegu grzejnego ma temperaturę praktycznie równą temperaturze wody zimnej dopływającej z instalacji, czyli 5÷10 °C. Jest to skutkiem znacznej długości węzownicy w wymienniku pojemnościowym. Nawet jeśli zbiornik jest „wygrzany”, dopływ nowej ilości wody zimnej spowoduje spadek temperatury w końcowej części węzownicy wymiennika. Zatem woda o temperaturze np. 10 °C, przy bardzo dużym strumieniu objętości i danej mocy skraplacza, może zostać podgrzana najwyżej o 5÷10 K, zatem z punktu widze-

nia użytkownika ma temperaturę **zbyt niską do bezpośredniego zużycia**, nawet bez mieszania z wodą zimną. Jeśli nie będziemy korzystać z wody, wówczas stopniowo będzie wzrastać temperatura wody kierowanej do skraplacza, ale tempo zmiany będzie liczone w godzinach (ekspertyzy autora w kilku instalacjach to potwierdziły). Tak jest w istocie. W materiałach [8] jest zamieszczony wykres pokazujący czas przygotowania ciepłej wody w zależności od temperatury powietrza zewnętrznego (rys. 2).

Rys. 2. Czas przygotowania ciepłej wody w zależności od temperatury powietrza zewnętrznego [xxxgalmet]



Nie ma na tym wykresie czasu przygotowania ciepłej wody w temperaturze np. – 18 °C, co sugeruje, że w niskiej temperaturze powietrza głównym źródłem ciepła będzie grzałka elektryczna (COP=1). W okresie nocy, jeżeli użytkownik nie będzie korzystał z ciepłej wody, woda się podgrzeje, ale włączenie dowolnego punktu poboru wody spowoduje, że do skraplacza dopłynie woda o bardzo

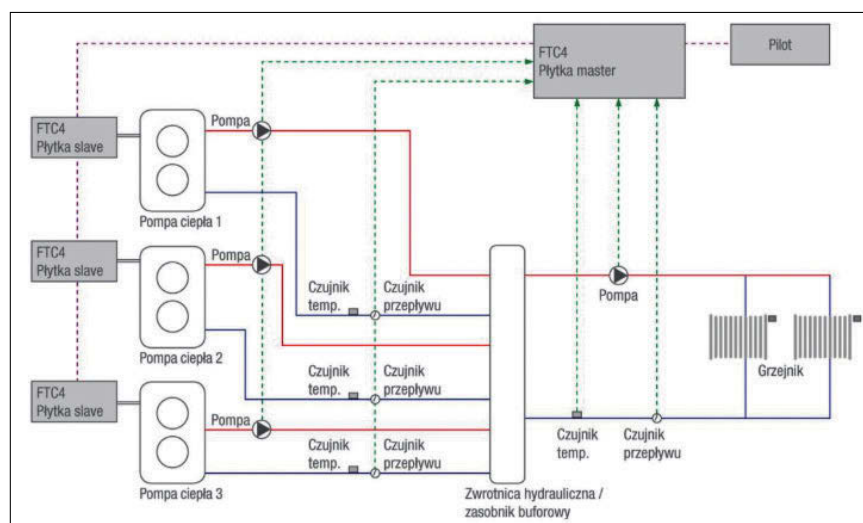
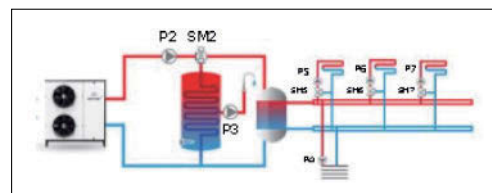
niskiej temperaturze, zbliżonej do temperatury wody wodociągowej. Wówczas temperatura wody wypływającej ze skraplacza będzie niska (ok. 15÷20 °C), a więc woda ze skraplacza będzie **chłodzić** wodę w wymienniku pojemnościowym. Należy podkreślić, że wymiennik pojemnościowy do przygotowania ciepłej wody **nie jest dobrym rozwiązaniem**. Podobne zjawiska występują w układach słonecznych źle funkcjonujących z powodu niewłaściwego umieszczenia czujnika temperatury w wymienniku pojemności-

wym, dobrze znany autorowi z szeregu ekspertyz [1,2].

- Brak rozdzielenia obiegu ciepłej wody i obiegu skraplacza

- Układ, pomijając zastosowanie bufora, wykazuje w pewnej mierze te same właściwości co omówiony poprzednio. Charakteryzuje się długim okresem oczekiwania na ciepłą wodę, zjawiskiem chłodzenia wypełnionego zbiornika, a także

Rys. 3. Przykładowe schematy pomp ciepła (producent znany autorowi)



Rys. 4. Uproszczony schemat układu kaskadowego pomp ciepła [12]

przekroczeniem minimalnej temperatury (w dół) wody kierowanej do skraplacza, która nie powinna być niższa niż 20 °C (może to wywoływać stan awaryjny).

Zasady projektowania układu „kaskady” pomp ciepła

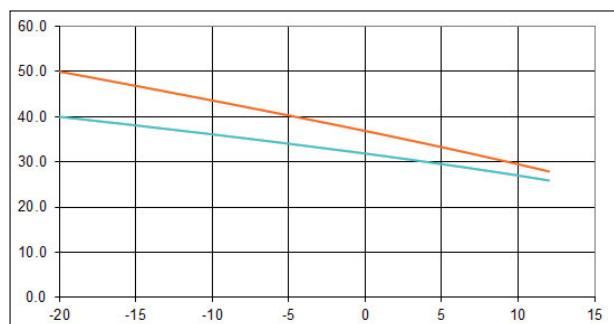
Przykładowy schemat „kaskady” pomp ciepła pokazano na poniższym rysunku.

● Układ zwany „kaskadą” nie jest układem działającym właściwie, jeżeli nie zostanie zachowany kierunek przepływu wody w sprzęgle hydraulicznym zapewniający podwyższenie temperatury wody kierowanej do skraplacza. Przy większym strumieniu objętości wody w obiegu instalacji niż w obiegu skraplacza wystąpi odwrotny przepływ przez sprzęgło, co spowoduje obniżenie temperatury wody kierowanej do instalacji i dopływ do skraplacza wody o temperaturze zbliżonej do temperatury pomieszczenia. Wykres regulacyjny przy tych parametrach pokazano na rys. 5.

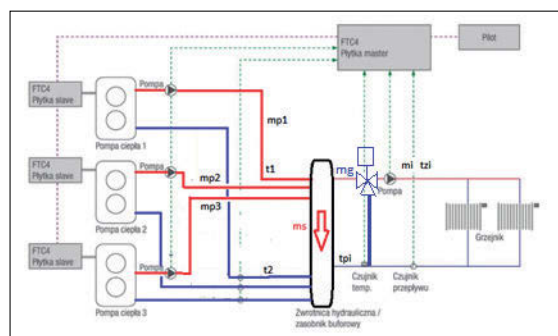
Pompy ciepła nie są „przygotowane” na tak niską temperaturę, a stały przepływ generowany przez pompę obiegu spowoduje nieuzyskanie temperatury na wyjściu z pompy ciepła. W tab. 5. przedstawiono wyniki symulacji przepływu na schemacie pokazanym na rys. 6. Układ pokazany na rys. 4. jest błędny, ponieważ układ regulacji instalacji działa w modelu ilościowym, co nie zapewnia odpowiedniej składowej w sprzęgle hydraulicznym. Do prawidłowego działania potrzebny jest zawór mieszający, kształtujący temperaturę wody zasilającej w instalacji ogrzewania. Schemat taki prezentuje rys. 6. Schemat ten jednak, mimo pewnej elastyczności, w przy-

Tab. 5. Układ przepływu i temperatury w „kaskadzie” pomp ciepła (założono stałą temperaturę skraplania)

t _e	moc cieplna Φ[kW]	liczba PC n	°C				kg/s				
			t ₁	t ₂	t _{zi}	t _{oi}	m _{p1}	m _{p2}	m _{p3}	m _i	m _g
-20	72.00	3	50.00	45.0	50.0	40.0	1.15	1.15	1.15	1.72	1.72
-19	70.20	3	50.00	45.1	49.4	39.6	1.15	1.15	1.15	1.72	1.62
-18	68.40	3	50.00	45.3	48.7	39.2	1.15	1.15	1.15	1.72	1.52
-17	66.60	3	50.00	45.4	48.1	38.9	1.15	1.15	1.15	1.72	1.43
-16	64.80	3	50.00	45.5	47.5	38.5	1.15	1.15	1.15	1.72	1.34
-15	63.00	3	50.00	45.6	46.8	38.1	1.15	1.15	1.15	1.72	1.26
-14	61.20	3	50.00	45.8	46.2	37.7	1.15	1.15	1.15	1.72	1.19
-13	59.40	3	50.00	45.9	45.6	37.3	1.15	1.15	1.15	1.72	1.12
-12	57.60	3	50.00	46.0	44.9	36.9	1.15	1.15	1.15	1.72	1.05
-11	55.80	3	50.00	46.1	44.3	36.5	1.15	1.15	1.15	1.72	0.99
-10	54.00	3	50.00	46.3	43.6	36.1	1.15	1.15	1.15	1.72	0.93
-9	52.20	3	50.00	46.4	43.0	35.7	1.15	1.15	1.15	1.72	0.87
-8	50.40	3	50.00	46.5	42.3	35.3	1.15	1.15	1.15	1.72	0.82
-7	48.60	3	50.00	46.6	41.6	34.9	1.15	1.15	1.15	1.72	0.77
-6	46.80	2	50.00	45.1	41.0	34.5	1.15	1.15		1.72	0.72
-5	45.00	2	50.00	45.3	40.3	34.0	1.15	1.15		1.72	0.67
-4	43.20	2	50.00	45.5	39.6	33.6	1.15	1.15		1.72	0.63
-3	41.40	2	50.00	45.7	38.9	33.2	1.15	1.15		1.72	0.59
-2	39.60	2	50.00	45.9	38.2	32.7	1.15	1.15		1.72	0.55
-1	37.80	2	50.00	46.1	37.6	32.3	1.15	1.15		1.72	0.51
0	36.00	2	50.00	46.3	36.9	31.9	1.15	1.15		1.72	0.47
1	34.20	2	50.00	46.4	36.2	31.4	1.15	1.15		1.72	0.44
2	32.40	2	50.00	46.6	35.4	30.9	1.15	1.15		1.72	0.41
3	30.60	2	50.00	46.8	34.7	30.5	1.15	1.15		1.72	0.37
4	28.80	2	50.00	47.0	34.0	30.0	1.15	1.15		1.72	0.34
5	27.00	2	50.00	47.2	33.3	29.5	1.15	1.15		1.72	0.32
6	25.20	2	50.00	47.4	32.5	29.0	1.15	1.15		1.72	0.29
7	23.40	1	50.00	45.1	31.8	28.5	1.15			1.72	0.26
8	21.60	1	50.00	45.5	31.0	28.0	1.15			1.72	0.24
9	19.80	1	50.00	45.9	30.3	27.5	1.15			1.72	0.21
10	18.00	1	50.00	46.3	29.5	27.0	1.15			1.72	0.19
11	16.20	1	50.00	46.6	28.7	26.5	1.15			1.72	0.16
12	14.40	1	50.00	47.0	27.9	25.9	1.15			1.72	0.14
13	12.60	1	50.00	47.4	27.1	25.3	1.15			1.72	0.12
14	10.80	1	50.00	47.8	26.2	24.7	1.15			1.72	0.10
15	9.00	1	50.00	48.1	25.4	24.1	1.15			1.72	0.08
16	7.20	1	50.00	48.5	24.5	23.5	1.15			1.72	0.06



Rys. 5. Wykres regulacyjny instalacji ogrzewania przy połączeniu równoległym 3 pomp ciepła [oprac. autora]



Rys. 6. Poprawiony schemat przepływu i temperatury w „kaskadzie” pomp ciepła

padku stałej temperatury skraplania nie powinien funkcjonować bez zbiornika buforowego. W obiegu skraplacza powstanie nadmiar ciepła prowadzący do częstego wyłączania sprężarki. W miejscu sprzęgła hydraulicznego należy zastosować bufor, który również pełni rolę sprzęgła.

Warunek utrzymania właściwego kierunku (w sensie fizycznym zwrotu) przepływu w sprzęgle hydraulicznym jest spełniony przy różnicy temperatury wody instalacyjnej 10 K.

Proponowane rozwiązania w schematach ideowych centrali z pompami ciepła

Kwestią bezsporną jest zastosowanie bufora (zasobnika) ciepła, a także rozdzielanie obiegów skraplacza i obiegów grzewczych ogrzewania i przygotowania ciepłej wody.

Optymalne funkcje regulacyjne to:

- W układzie ze stałą temperaturą skraplania:

- Regulacja (stałego) przepływu nośnika ciepła,
- Regulacja (stałej) różnicy temperatury nośnika ciepła.

Układ taki wymaga elementu akumulacyjnego w postaci zbiornika wody lub bezwładności ogrzewanego budynku.

Schemat a. pokazano na rys. 7.

nych uprzednio powodów zasilania pompy ciepła wodą o niskiej temperaturze). Układ taki ilustruje rysunek 8.

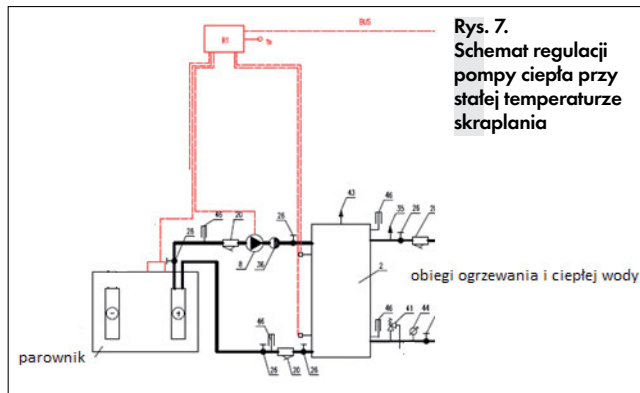
Układ przygotowania ciepłej wody działa następująco:

Gdy czujnik „c” wskaże niską temperaturę, np. 38 °C, wówczas otwiera się zawór regulacyjny w sekcji ciepłej wody w stopniu zapewniającym temperaturę powrotu do pompy ciepła 40÷45 °C. Włącza się pompa ładująca obiegu za-

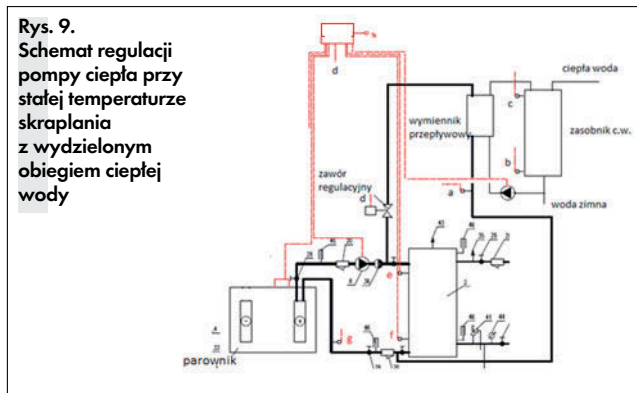
- W układzie ze zmienną temperaturą skraplania występują funkcje regulacyjne:

- Regulacja (stałego) przepływu nośnika ciepła przez skraplacz,
- Regulacja temperatury skraplania,
- Regulacja (zmiennej) różnicy temperatury nośnika ciepła.

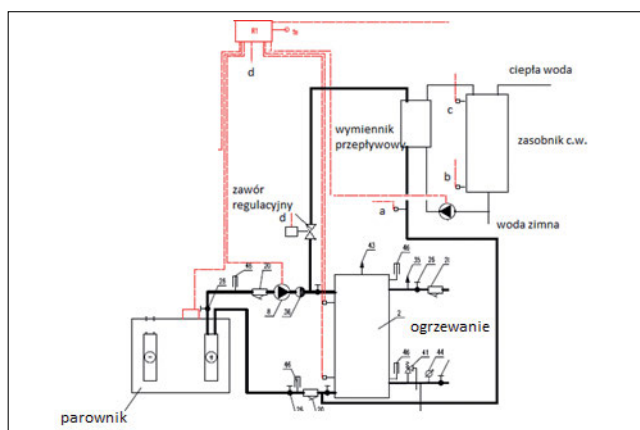
Schemat nie różni się istotnie od schematu pokazanego na rys. 8. Ma dodatkowe czujniki temperatury. Pokazano go na



Rys. 7. Schemat regulacji pompy ciepła przy stałej temperaturze skraplania



Rys. 9. Schemat regulacji pompy ciepła przy stałej temperaturze skraplania z wydzielonym obiegiem ciepłej wody

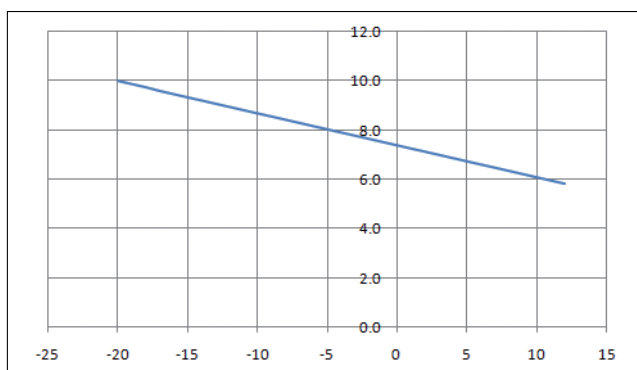
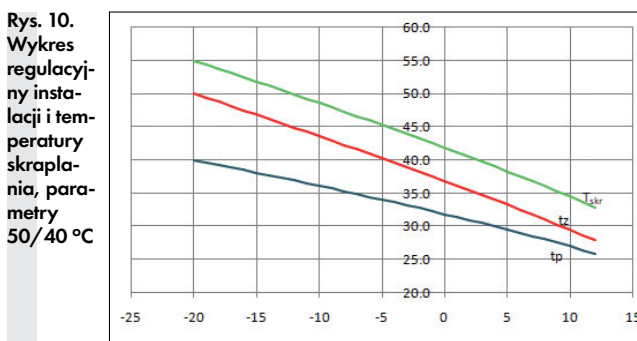


Rys. 8. Schemat regulacji pompy ciepła przy stałej temperaturze skraplania z wydzielonym obiegiem ciepłej wody

Pompa obiegu skraplacza ma stałą wydajność, górny czujnik temperatury jest nastawiony na 50 °C, dolny na 40°C±2 K (z praktyki wynika, że nie ma potrzeby przyjmowania obliczeniowej różnicy temperatury 5 K). Ze zbiornika buforowego odpływa woda zasilająca obiegi ogrzewania, wentylacji i przygotowania ciepłej wody. Pojemność zbiornika powinna być określona przy założeniu minimalnego dopuszczalnego czasu pracy sprężarki. Pompy obiegu grzewczego są poza pokazanym fragmentem schematu. Jeżeli stosujemy obieg przygotowania ciepłej wody zasilany bezpośrednio z pompy ciepła, to należy zastosować układ zasobnikowy z wymiennikiem przepływowym. **Wymienniki pojemnościowe nie mogą być stosowane w układzie bezpośrednio zasilanym z pomp ciepła** (z wymienio-

Rys. 11. Różnica temperatury w obiegu skraplacza w funkcji temperatury powietrza zewnętrznego przy regulowanym ciśnieniu skraplania

sobnika c.w. Układ działa do stanu uzyskania w czujniku „b” temperatury 43 °C (wartości przykładowe), po czym się wyłącza. Czujnik „c” ma ponadto funkcję kontrolną, ewentualnego przekroczenia temperatury ciepłej wody 55 °C. To nie powinno nastąpić. W dużych obiektach układ przełączania trybu ogrzewania na przygotowanie ciepłej wody nie musi być dwupołożeniowy. Właściwy rozptył nośnika ciepła należy uzyskać przez zastosowanie zaworów równoważących w obiegach bufora i przygotowania c.w.



rys. 9. Układ ciepłej wody musi być wydzielony.

Działanie układu jest następujące:

Wystąpienie potrzeb ciepłej wody oznacza przejście pompy ciepła w tryb maksymalnej temperatury skraplania. Jeżeli nie działa układ przygotowania ciepłej wody, wówczas temperatura skraplania jest ustalana w funkcji temperatury powietrza zewnętrznego. Funkcją regulacyjną może być również bezpośrednio temperatura wody zasilającej w instalacji ogrzewania. Funkcję należy wpisać do

układu regulacyjnego. Na rys. 10. pokazano przykładowy wykres regulacyjny instalacji i temperatury skraplania.

Czujnik „e” ma funkcję kontrolną; ładowanie bufora (czujnik „f”) odbywa się przy temperaturze wody powrotnej ± 2 K. Z uwagi na nieliniowe zmniejszenie mocy cieplnej przekazanej do układu grzewczego różnica temperatury wody w obiegu skraplacza może być wyższa niż różnica temperatury wody zasilającej i powrotnej (obliczeniowa) w instalacji. Czujnik temperatury „g” reguluje prędkość obrotową pompy obiegu skraplacza, utrzymując zadaną różnicę temperatury zgodnie ze zmianą mocy cieplnej pompy ciepła. Na rysunku pokazano przykładową funkcję różnicy temperatury w obiegu skraplacza w zależności od temperatury zewnętrznej. Czujnik „f” działa z histerezą ± 2 K.

Odpowiednie funkcje wpisuje się do algorytmu regulacji.

Podsumowanie

Najistotniejszą kwestią przy projektowaniu central z pompą ciepła jest wyznaczenie odpowiednich wartości bilansowych, zgodnie z charakterystyką pompy ciepła [3], rozbieżną w odniesieniu do charakterystyki cieplnej budynku. Zastosowanie pompy ciepła w warunkach zmien-

nego klimatu i zmiennego zapotrzebowania na ciepłą wodę wymaga spełnienia zespołu warunków technicznych, które mają charakter specyficzny i nie zawsze są oczywiste dla projektanta lub inwestora. Podstawowym warunkiem, także w przypadku pomp ciepła o regulowanej mocy cieplnej, jest wyposażenie instalacji w bufor przejmujący nadwyżkę wytworzonego ciepła. Kolejnym warunkiem jest odseparowanie obiegów grzewczych od obiegu skraplacza tak, aby uniknąć dopływu do skraplacza wody o niskiej temperaturze i strumieniu masy niedostosowanym do wielkości aktualnej mocy cieplnej uzyskanej w skraplaczu. Centrale z pompami ciepła wykonane z pominięciem specyfiki projektowania i eksploatacji pomp ciepła, będąc rozgoryczeniem inwestorów i klientów i przyczyniając się do złej opinii o odnawialnych źródłach ciepła. Pompa ciepła to nie jest gotowy wyrób, który można postawić w budynku i podłączyć do kilku przewodów, spodziewając się korzystnych efektów technicznych i ekonomicznych. Jej zastosowanie wymaga uzasadnienia ekonomicznego i przemyślanych schematów technicznych.

BIBLIOGRAFIA

[1] Żarski K.: *Efektywność przygotowania ciepłej wody w węzle cieplnym współpracującym*

z instalacją kolektorów słonecznych, Instal Nr 6/2024, s. 5-8; DOI 10.36119/15.2024.6.2

[2] Żarski K., Kryża M.: *Warunki efektywnego działania słonecznych układów przygotowania ciepłej wody*, Instal Nr 7-8/2024, s. 10-13; DOI 10.36119/15.2024.7-8.1

[3] Żarski K.: *Hybrydowe węzły cieplne – współpraca węzła cieplnego z pompą ciepła*, Budownictwo i Prawo, w druku

[4] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz. U. 2022.1225).

[5] Rozporządzenie Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej (obecnie Ministra Infrastruktury i Rozwoju) z dnia 21 czerwca 2013 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie szczegółowego zakresu i formy projektu budowlanego. Dz. U. 2013.762.

[6] Obwieszczenie Marszałka Sejmu Rzeczypospolitej Polskiej z dnia 21 marca 2024 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu ustawy – Prawo budowlane. Dz. U. 2024.725.

[7] PN-EN 14825:2014-02 Klimatyzatory, ziębiarki cieczy i pompy ciepła ze sprężarkami o napędzie elektrycznym, do grzania i ziębienia. Badanie i ocena w warunkach niepełnego obciążenia oraz obliczanie wydajności sezonowej

[8] Galmet: ABC pomp ciepła dla projektanta, 2020

[9] Coolselector – program doboru sprężarek chłodniczych

[10] Dane meteorologiczne dla Warszawy

[11] Katalogi firm

[12] www.instalacjebudowlane.pl/9585-23-84-schemat-instalacji-pompy-ciepła, dostęp 03.2025