

Sławomir RABCZAK<sup>1</sup>

## METODY AKUMULACJI CHŁODU W INSTALACJACH KLIMATYZACYJNYCH

Kwestie zmniejszenia zużycia energii stanowią obecnie obszar, wokół którego skupia się większość prac badawczych i ich technicznych aplikacji. W pracy przedstawiono możliwości magazynowania energii chłodniczej w postaci jawnej bazującej na pojemności cieplnej materiału akumulacyjnego, którym najczęściej jest woda, oraz w postaci utajonej, która umożliwia magazynowanie energii chłodniczej w przemianach fazowych zachodzących podczas procesu ładowania i rozładowywania materiału akumulacyjnego, często określanego jako materiał PCM (ang: *Phase Change Material* – materiał zmieniający stan skupienia). Ponieważ ciepło związane ze zmianą stanu skupienia jest kilkanaście razy większe w porównaniu z ciepłem właściwym danego materiału, uzyskuje się mniejsze pojemności zasobników chłodu. W artykule zestawiono objętości akumulatorów energii chłodniczej dla wybranych systemów produkcji chłodu oraz związane z tym wymagane moce urządzeń ładujących zasobniki. Opracowano autorską metodę obliczeniową (w chwili publikacji bez weryfikacji eksperymentalnej), umożliwiającą określenie mocy agregatu chłodniczego w poszczególnych systemach akumulacji z uwzględnieniem dobowej zmienności w zapotrzebowaniu na energię chłodniczą lub przy założeniu procentowego stopnia wykorzystania mocy chłodniczej pochodzącej z zasobnika chłodu. Umożliwia ona obliczenia systemu produkcji chłodu dla układów w postaci akumulacji pełnej, częściowej i z limitem wydajności chłodniczej. Przedstawiono porównanie wymaganej pojemności całkowitej zasobników w systemie akumulacji pełnej dla wybranych metod akumulacji z wykorzystaniem różnych materiałów akumulacyjnych, zaczynając od wody, lodu binarnego, przez lód w kapsułkach oraz systemy z bezpośredniego i pośredniego wytwarzania wody lodowej.

**Słowa kluczowe:** zasobnik chłodu, akumulacja chłodu, metody akumulacji dobowej

### 1. Wprowadzenie

W systemach akumulacji energii ciepło jest odbierane lub dostarczane do medium magazynującego w celu późniejszego wykorzystania. Magazynowanie energii dla systemów klimatyzacji może odbywać się w dużym przedziale tem-

---

<sup>1</sup> Autor do korespondencji: Sławomir Rabczak, Politechnika Rzeszowska, al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów, tel. +48 17 8651699, rabczak@prz.edu.pl.

peratury, zarówno na potrzeby grzewcze, jak i chłodnicze. Energia ta jest akumulowana w cyklach: dobowych, tygodniowych, rocznych lub sezonowych. W procesach składowania energii wykorzystuje się zjawiska fizyczne i chemiczne. Podstawowym znaczeniem akumulacji jest umożliwienie przechowywania energii chłodniczej dla najwyższych, szczytowych okresów zapotrzebowania na chłód, a zasobnik chłodu pozwala na rozłożenie czasu ładowania chłodu i znaczące obniżenie mocy agregatów chłodniczych obsługujących instalację klimatyzacyjną.

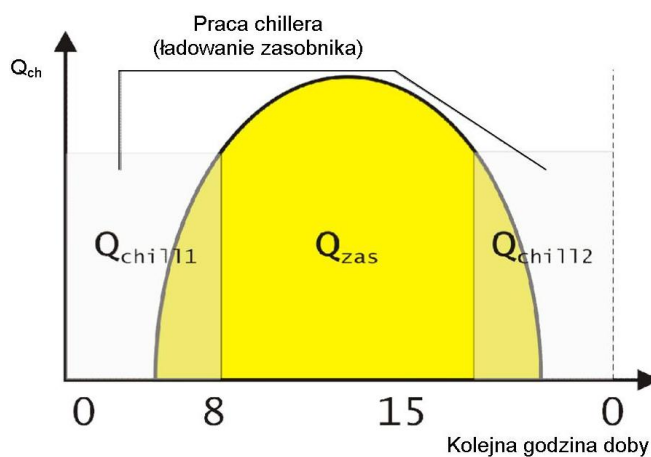
## 2. Porównanie systemów akumulacji chłodu

Akumulacja chłodu odbywająca się w cyklu dobowym może być realizowana jako pełna, częściowa lub z limitem wydajności. Podczas magazynowania pełnego chłód jest wytwarzany tylko poza godzinami szczytowymi (agregat chłodniczy pracuje w czasie obowiązywania taryfy nocnej). Podczas magazynowania częściowego chłód w okresie jego największego zapotrzebowania jest dostarczany zarówno z zasobnika, jak i agregatu chłodniczego. Magazynowanie z limitem wydajności łączy cechy obu tych systemów akumulacji, pozwalając racjonalnie wykorzystać taryfę nocną i obniżając wydajność w okresie obowiązywania taryfy dziennej na energię elektryczną.

System pełnego magazynowania chłodu ma pokrywać zapotrzebowanie chłodu podczas jego szczytowego zapotrzebowania wyłącznie za pomocą energii chłodniczej zmagazynowanej w zasobniku. Zasobnik jest ładowany podczas małego zapotrzebowania na chłód lub gdy zapotrzebowanie takie nie występuje. Sytuacja taka ma miejsce w godzinach nocnych, w których energia elektryczna jest tańsza (przy systemie dwutaryfowym). Jak zilustrowano na rys. 1., agregat chłodniczy – chiller pracuje wyłącznie w godzinach nocnych, wytwarzając chłód wykorzystywany później do pokrycia zapotrzebowania w okresie szczytowym.

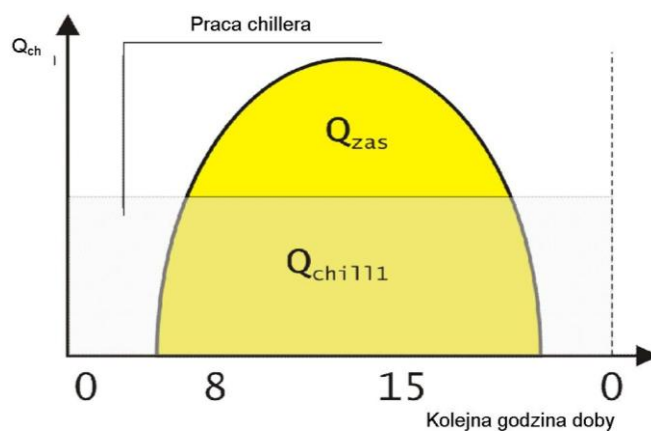
System taki przynosi korzyści, jeżeli klimatyzowany obiekt charakteryzuje się wysokim szczytowym zapotrzebowaniem na chłód lub gdy okresy szczytowego zapotrzebowania są krótkie [1]. Praca agregatu chłodniczego w czasie taryfy nocnej pozwala na duże oszczędności kosztów eksploatacyjnych, jednakże konieczność stosowania większego agregatu chłodniczego i zasobnika podnosi koszty inwestycyjne. Akumulacja częściowa umożliwia zmniejszenie kosztów inwestycyjnych przez zastosowanie agregatu chłodniczego o mniejszej mocy w porównaniu z akumulacją pełną. W systemie magazynowania częściowego chłód w okresie szczytowym pochodzi zarówno z agregatu chłodniczego, jak i zasobnika chłodu. Agregat chłodniczy działa z taką samą wydajnością przez całą dobę. W godzinach małego zapotrzebowania część wytwarzanego chłodu jest dostarczana do instalacji klimatyzacyjnej, a jego nadwyżka magazynowana w zasobniku. Gdy w godzinach szczytowych zapotrzebowanie na chłód przekracza moc agregatu chłodniczego ( $Q_{ch} > Q_{chill}$ ), brakujący chłód jest dostarczany

z zasobnika [2]. Pracę agregatu chłodniczego w układzie akumulacji częściowej przedstawiono na rys. 2.



Rys. 1. Rozkład zapotrzebowania na chłód z magazynowaniem pełnym:  $Q_{chill1}$ ,  $Q_{chill2}$  – chłód wytwarzany przez agregat chłodniczy,  $Q_{zas}$  – chłód zmagazynowany w zasobniku

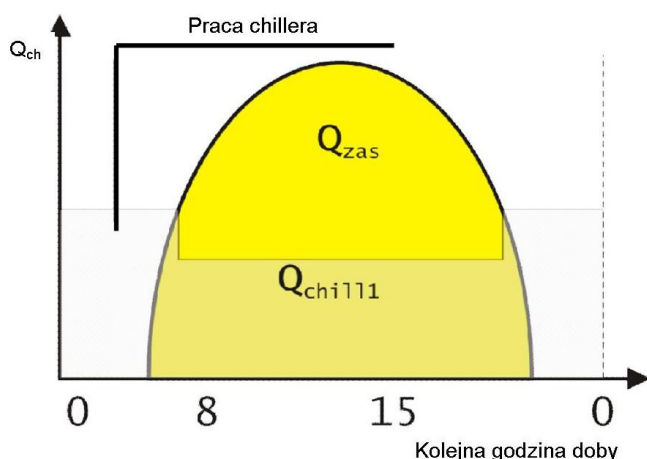
Fig. 1. Cold distribution at full accumulation:  $Q_{chill1}$ ,  $Q_{chill2}$  – cold produced by chiller,  $Q_{zas}$  – cold accumulated in storage



Rys. 2. Rozkład zapotrzebowania na chłód z magazynowaniem częściowym:  $Q_{chill1}$  – chłód wytwarzany przez agregat chłodniczy – chiller,  $Q_{zas}$  – chłód zmagazynowany w zasobniku

Fig. 2. Cold distribution at partly accumulation:  $Q_{chill1}$ ,  $Q_{chill2}$  – cold produced by chiller,  $Q_{zas}$  – cold accumulated in storage

Najbardziej efektywny w magazynowaniu chłodu jest system z limitem wydajności. Agregat chłodniczy pracuje w cyklu ciągłym, podobnie jak podczas akumulacji częściowej, lecz jego wydajność się zmienia. W nocy wydajność agregatu chłodniczego jest największa ze względu na mniejsze koszty energii elektrycznej niezbędnej do napędu sprężarki w agregacie chłodniczym. Podobnie jak podczas akumulacji pełnej, w okresie tym zasobnik jest ładowany chłodem wykorzystywanym w godzinach szczytowych. W czasie największego zapotrzebowania na energię chłodniczą zasobnik jest rozładowywany, a chiller pracuje ze zmniejszoną wydajnością w porównaniu z pracą w godzinach nocnych. Koszty inwestycyjne akumulacji z limitem wydajności są niższe niż koszty akumulacji pełnej i nieznacznie wyższe od kosztów akumulacji częściowej. Natomiast w czasie eksploatacji zapewnia on większe oszczędności niż eksploatacja układu z magazynowaniem częściowym i porównywalne z eksploatacją systemu magazynowania pełnego. Pracę agregatu chłodniczego w układzie akumulacji z limitem wydajności przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Rozkład zapotrzebowania na chłód z magazynowaniem z limitem wydajności:  $Q_{chill1}$  – chłód wytwarzany przez agregat chłodniczy-chiller,  $Q_{zas}$  – chłód zmagazynowany w zasobniku

Fig. 3. Cold distribution at limited accumulation:  $Q_{chill1}$ ,  $Q_{chill2}$  – cold produced by chiller,  $Q_{zas}$  – cold accumulated in storage

### 3. Moc agregatów chłodniczych

Moc agregatów pracujących w systemach z akumulacją wyznacza się na podstawie wykresu dobowego zapotrzebowania na chłód dla dnia z największymi zyskami ciepła w ciągu roku. Najłatwiej określić moc agregatu dla systemu z akumulacją częściową [3]. Nieco bardziej skomplikowane obliczenia stosuje się dla akumulacji pełnej i akumulacji z limitem wydajności. Zasada obliczania

mocy agregatów opiera się na zrównoważeniu dobowego zapotrzebowania na chłód z ilością chłodu wytwarzaną przez agregat chłodniczy.

### Moc agregatu chłodniczego w systemie akumulacji częściowej

Moc agregatu chłodniczego w systemie akumulacji częściowej można obliczyć, stosując zależność:

$$\sum[(Q_{\text{chill}} - Q_i) \cdot t_i] = 0 \quad (1)$$

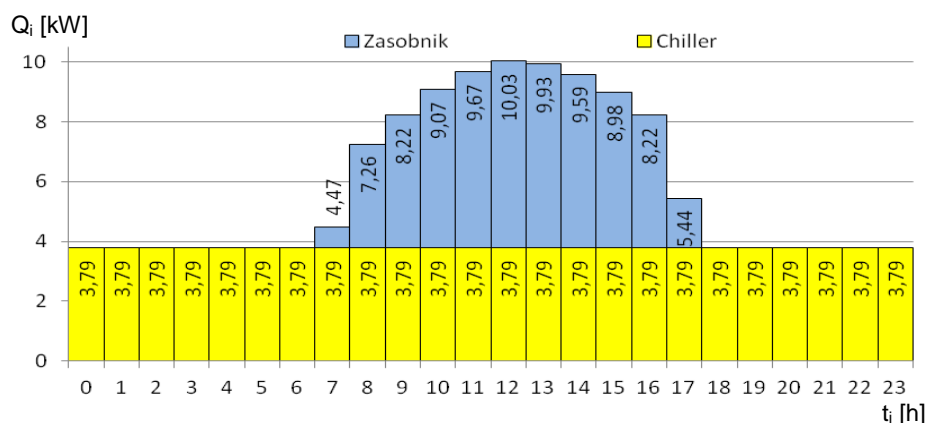
Zakładając 24-godzinną pracę agregatu chłodniczego i przedział czasu  $t_i = 1$  h, wzór (1) można zapisać jako:

$$24 \cdot Q_{\text{chill}} - \sum Q_i \cdot t_i = 0 \quad (2)$$

Wyznaczając z równania (2) moc agregatu chłodniczego  $Q_{\text{chill}}$ , ostatecznie otrzymuje się:

$$Q_{\text{chill}} = \frac{\sum Q_i \cdot t_i}{24} \text{ [kW]} \quad (3)$$

Do obliczenia mocy agregatu chłodu potrzebny jest dobowy wykres zapotrzebowania na moc chłodniczą. Przykładowy wykres łącznie z pracą agregatu chłodniczego w systemie akumulacji częściowej przedstawiono na rys. 4. Jest to wykres zapotrzebowania na chłód dla budynku biurowego, w którym pracuje 20 osób. Budynek jest wyposażony w system klimatyzacji centralnej obsługującej siedem pomieszczeń biurowych i salę konferencyjną.



Rys. 4. Przykładowy wykres godzinowego zapotrzebowania na chłód przez system klimatyzacji z akumulacją częściową

Fig. 4. Example diagram hourly cold distribution in air-conditioned system with partly accumulation

### Moc agregatu chłodniczego w systemie akumulacji pełnej

W tym przypadku moc agregatu chłodniczego pracującego poza okresem szczytowym powinna się równoważyć mocy koniecznej do zapewnienia chłodzenia w systemie szczytowym, w którym system magazynowania chłodu nie działa. Moc agregatu chłodniczego w akumulacji pełnej określa zależność:

$$\sum(Q_{\text{chill}} - Q_i) \cdot t_i - \sum Q_{\text{max}i} \cdot t_i = 0 \quad (4)$$

Wprowadzając czas pracy agregatu chłodniczego  $t_{\text{chill}}$ , równanie (4) przekształca się do postaci:

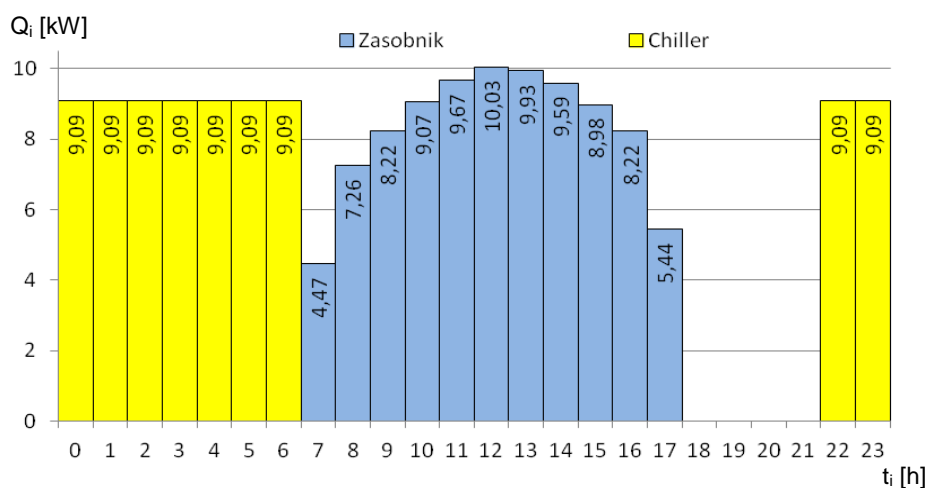
$$Q_{\text{chill}} \cdot t_{\text{chill}} - \sum Q_i \cdot t_i - \sum Q_{\text{max}i} \cdot t_i = 0 \quad (5)$$

Wyznaczając z równania (5) moc agregatu chłodniczego  $Q_{\text{chill}}$ , ostatecznie otrzymuje się:

$$Q_{\text{chill}} = \frac{\sum Q_{\text{max}i} \cdot t_i + \sum Q_i \cdot t_i}{t_{\text{chill}}} \quad [\text{kW}] \quad (6)$$

Korzystając z rys. 5., przy założeniu, że agregat chłodniczy pracuje w godzinach od 22 do 6 (co daje czas pracy agregatu chłodniczego  $t_{\text{chill}} = 10$  h), wyznacza się sumy zapotrzebowania na chłód w okresie szczytu, tj. od 7 do 21:

$$\begin{aligned} \sum Q_{\text{max}i} \cdot t_i &= 4,47 \cdot 1 + 7,26 \cdot 1 + 8,22 \cdot 1 + 9,07 \cdot 1 + 9,67 \cdot 1 + 10,03 \cdot 1 + \\ &+ 9,93 \cdot 1 + 9,59 \cdot 1 + 8,98 \cdot 1 + 8,22 \cdot 1 + 5,44 \cdot 1 = 90,88 \text{ kWh.} \end{aligned}$$



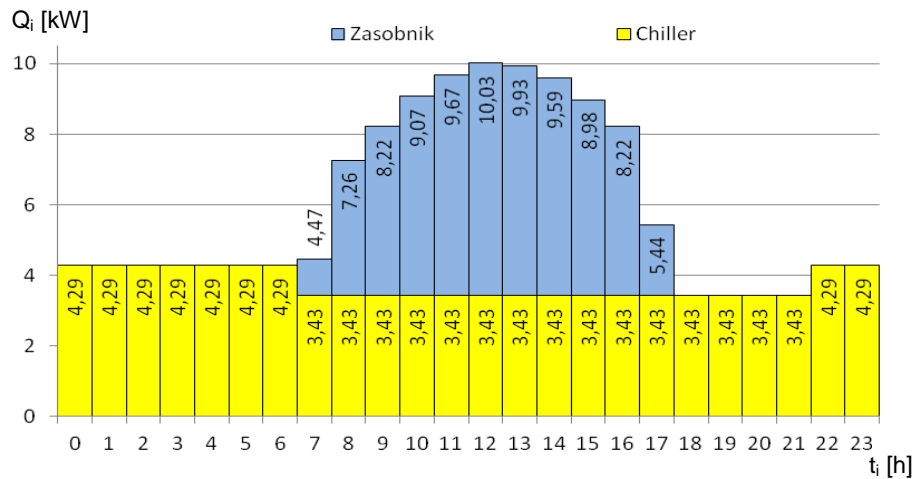
Rys. 5. Godzinowy harmonogram pracy agregatu chłodniczego w systemie akumulacji pełnej

Fig. 5. Example diagram hourly cold distribution in air-conditioned system with full accumulation

Ponieważ między 22 a 6, czyli w godzinach pracy agregatu chłodniczego, nie występuje zapotrzebowanie na chłód, suma ta równa się zero:  $\sum Q_i \cdot t_i = 0$  kW. Stąd moc agregatu chłodniczego dla akumulacji pełnej:  $Q_{\text{chill}} = 9,09$  kW.

### Moc agregatu chłodniczego w systemie akumulacji z limitem wydajności

W przypadku akumulacji z limitem wydajności (rys. 6.) należy ustalić, o ile należy obniżyć moc agregatu pracującego z limitem w okresie dziennym, dzięki czemu można regulować maksymalną moc agregatu niezbędnego do pracy w tym systemie akumulacji. Na ogół określa się stosunek obniżenia mocy agregatu pracującego w szczycie chłodniczym w stosunku do całkowitej mocy agregatu  $Q_{\text{chill}}$  na poziomie  $a = 0,1$  do  $0,3$  [3].



Rys. 6. Godzinowy harmonogram pracy agregatu chłodniczego w systemie akumulacji z limitem wydajności

Fig. 6. Example diagram hourly cold distribution in air-conditioned system with limited accumulation

Wzór na bilans energetyczny agregatu chłodniczego i zasobnika w okresie dobowym można więc zapisać w postaci:

$$\sum (Q_{\text{chill}} - Q_i) \cdot t_i + \sum [Q_{\text{chill}} \cdot (1-a) - Q_{\text{max}i}] \cdot t_i = 0 \quad (7)$$

Wprowadzając do zależności (7) czas pracy agregatu chłodniczego z wykorzystaniem pełnej mocy ( $t_{\text{chill1}}$ ) i czas pracy agregatu chłodniczego z limitem wydajności ( $t_{\text{chill2}}$ ), otrzymuje się:

$$Q_{\text{chill}} \cdot t_{\text{chill1}} - \sum Q_i \cdot t_i + Q_{\text{chill}} \cdot (1-a) \cdot t_{\text{chill2}} - \sum Q_{\text{max}i} \cdot t_i = 0 \quad (8)$$

Z równania (8) wyznacza się moc agregatu  $Q_{\text{chill}}$ :

$$Q_{\text{chill}} = \frac{\sum Q_{\text{max}i} \cdot t_i + \sum Q_i \cdot t_i}{t_{\text{chill1}} + (1-a) \cdot t_{\text{chill2}}} \quad [\text{kW}] \quad (9)$$

Korzystając z rys. 6. i zakładając, że agregat chłodniczy pracuje z pełną mocą od 22 do 6, a w pozostałych godzinach jego moc jest o 20% mniejsza (co daje czas pracy agregatu  $t_{\text{chill1}} = 10$  h,  $t_{\text{chill2}} = 14$  h oraz współczynnik  $a = 0,2$ ), można wyznaczyć sumę zapotrzebowania na chłód w okresie szczytowym:

$$\begin{aligned} \sum Q_{\text{max}i} \cdot t_i &= 4,47 \cdot 1 + 7,26 \cdot 1 + 8,22 \cdot 1 + 9,07 \cdot 1 + 9,67 \cdot 1 + 10,03 \cdot 1 + \\ &+ 9,93 \cdot 1 + 9,59 \cdot 1 + 8,98 \cdot 1 + 8,22 \cdot 1 + 5,44 \cdot 1 = 90,88 \text{ kWh.} \end{aligned}$$

Ponieważ między 22 a 6, czyli w godzinach pracy agregatu chłodniczego, nie występuje zapotrzebowanie na chłód, suma ta równa się zeru:  $\sum Q_i \cdot t_i = 0$  kW. Podstawiając otrzymane wartości do równania (9), wymagana moc agregatu:  $Q_{\text{chill}} = 4,29$  kW.

#### 4. Objętości zasobnika chłodu

Objętość zasobnika chłodu zależy głównie od materiału magazynującego chłód oraz rodzaju systemu akumulacji. Najistotniejszy jest jednak sposób magazynowania energii. Energia chłodnicza może być magazynowana w postaci jawnej (SHS) bądź utajonej (LHS) [4-6]. Szczególną uwagę należy zwrócić na systemy magazynowania LHS, które wykorzystując ciepło przemian fazowych, są w stanie zakumulować znacznie większe ilości energii przypadające na 1 kg masy akumulacyjnej. Istotnym parametrem jest wskaźnik opisujący gęstość magazynowanej energii, umożliwiający określenie wydajności chłodniczej z  $\text{m}^3$  materiału zmieniającego fazę – PCM [7]. Gęstość magazynowania energii DLHS nie jest stała, zmienia się w zależności od zakładanej temperatury czynnika na wlocie i wylocie z zasobnika chłodu. DLHS uwzględnia zarówno ciepło utajone, jak również ilości ciepła jawnego powstającego z dochłodzenia czy przegrzania materiału akumulacyjnego.

$$\text{DLHS} = Q_L + Q_{\text{SL}} \cdot (T_z - T_{\text{st}}) + Q_{\text{DD}} (T_p - T_{\text{st}}) \quad (10)$$

Gęstość magazynowania energii dla wody lodowej o parametrach zasilania i powrotu odpowiednio 2 i  $8^\circ\text{C}$  oraz wartościach  $Q_L = 81,93$  kW/ $\text{m}^3$ ,  $Q_{\text{SL}} = 1,16$  kW/ $\text{Km}^3$ ,  $Q_{\text{DD}} = 0,53$  kW/ $\text{Km}^3$  przyjmuje wartość DLHS = 88,94 kWh/ $\text{m}^3$ .



Minimalna wielkość zasobnika w zależności od gęstości magazynowanej energii:

$$V = \frac{Q_{dst}}{DLHS} \text{ [m}^3\text{]} \quad (11)$$

Ilość energii odprowadzanej z cyklu rozładowywania zasobnika  $Q_{dst}$  można określić na podstawie histogramów (rys. 4-6.) obrazujących godzinowe zapotrzebowanie na chłód. Jest to różnica sumarycznego zapotrzebowania na chłód w godzinach rozładowywania zasobnika, pomniejszona o ilość chłodu wytwarzaną przez agregat chłodniczy w tym okresie. Objętość zależy od rodzaju stosowanego systemu akumulacji. Objętość zasobników z magazynowaniem pełnym będzie większa niż z magazynowaniem częściowym i z limitem wydajności. Zakładając  $DLHS = 88,94 \text{ kWh/m}^3$  oraz odczytując wartości z wykresów na rys. 4-6., można określić objętość zasobników dla opisanych systemów. W przypadku akumulacji pełnej całość chłodu potrzebnego w okresie szczytowym jest dostarczana z zasobnika. Ilość energii odprowadzanej z zasobnika w cyklu rozładowywania będzie równa sumarycznemu zapotrzebowaniu na chłód w okresie szczytowym. Stąd

$$V = \frac{90,88}{88,94} = 1,02 \text{ m}^3.$$

W przypadku akumulacji częściowej ilość ciepła dostarczanego do instalacji w fazie rozładowywania ( $Q_{dst}$ ) wynosi:

$$Q_{dst} = \sum Q_{max\ i} \cdot t_i - Q_{chill} \cdot t_{max} \text{ [kWh]} \quad (12)$$

Po uwzględnieniu poprzednich obliczeń  $Q_{chill} = 3,79$  i odczytaniu z wykresów wartości  $\sum Q_{max\ i} \cdot t_i = 90,88$  oraz  $t_{max} = 11 \text{ h}$ , otrzymuje się:

$$Q_{dst} = 90,88 - 3,79 \cdot 11 = 49,19 \text{ kWh.}$$

Stąd objętość zbiornika przy akumulacji częściowej:

$$V = \frac{46,19}{88,94} = 0,55 \text{ m}^3.$$

Ilość energii dostarczanej przez zasobnik w akumulacji z limitem wydajności można określić z zależności podobnej do (12). Różnica polega na obniżeniu wartości maksymalnej mocy agregatu chłodniczego w okresie fazy szczytowego zapotrzebowania na chłód – okresu dziennej taryfy elektrycznej:

$$Q_{dst} = \sum Q_{maxi} \cdot t_i - Q_{chill} \cdot (1-a) \cdot t_{max} \quad [kWh] \quad (13)$$

Podstawiając do wzoru (13) wartości wcześniej określone ( $Q_{chill} = 4,29$ ,  $a = 0,2$ ), otrzymuje się:

$$Q_{dst} = 90,88 - 4,29 \cdot (1 - 0,2) \cdot 11 = 53,15 \text{ kWh.}$$

Objętość zasobnika dla akumulacji z limitem wydajności:

$$V = \frac{53,15}{88,94} = 0,60 \text{ m}^3.$$

Obliczone objętości odnoszą się jedynie do materiału magazynującego chłód. Rzeczywiste objętości zasobników powinny być odpowiednio zwiększone ze względu na rozszerzalność zamarzającego materiału oraz charakterystykę procesu produkcji lodu. Ogólny wzór do obliczenia rzeczywistej objętości zasobnika przedstawia się następująco:

$$V_{rz} = (1+c) \cdot V \quad [m^3] \quad (14)$$

Tabela 1. przedstawia sugerowane wartości współczynnika  $c$  w celu określenia rzeczywistej objętości zasobnika. Tabela podaje również uzasadnienie sugerowanych wartości  $c$ .

Tabela 1. Wartości współczynnika zwiększającego objętość zasobników chłodu  $c$

Table 1. Increasing factor value of cold storage volume  $c$

Lp.	Rodzaj systemu wytwarzania lodu	$c$ [-]	Uwagi
1	magazynowanie lodu na węzownicy ze schładzaniem wewnętrznym	0,19	przyrost objętości lodu przy zamarzaniu, obecność węzownicy w zasobniku
2	magazynowanie lodu na węzownicy ze schładzaniem zewnętrznym	1,00	przyrost objętości lodu przy zamarzaniu, konieczność stworzenia warunków do przepływu czynnika pośredniczącego, obecność węzownicy w zasobniku
3	lód w kapsułkach	0,66	konieczność stworzenia warunków do przepływu czynnika pośredniczącego
4	lód binarny*	1,5	niskie stężenie lodu w mieszaninie (max 40%) spowodowane koniecznością jej pompowania

\* inaczej lód zawieszinowy – jest mieszaniną zawierającą kryształki lodu o średnicy 1 mm lub mniejszej, a także substancji obniżającej temperaturę krzepnięcia wody

W tabeli 2. zestawiono wyniki obliczeń rzeczywistych objętości zasobników chłodu dla wybranych systemów chłodzenia oraz magazynowania chłodu pod postacią materiału zmieniającego stan skupienia podczas akumulacji (materiał PCM, ang. *phase change material*) [8, 9]. Nieco prostsza do określenia wydaje się objętość zasobnika magazynującego chłód w postaci jawnej. W zasobnikach ze stratyfikacją zależy ona głównie od różnicy temperatury materiału magazynującego przed i po ochłodzeniu. Wartość ciepła właściwego  $Q_{SL}$  [kWh/m<sup>3</sup>·K] określa się z zależności:

$$Q_{SL} = \frac{c_w}{3600} \cdot \rho \quad [\text{kWh}/\text{m}^3 \cdot \text{K}] \quad (15)$$

Objętość czynną zasobnika można obliczyć, stosując wzór:

$$V = \frac{Q_{dst}}{Q_{sl} \cdot (T_p - T_z)} \quad [\text{m}^3] \quad (16)$$

gdzie:  $V$  – czynna objętość zasobnika [m<sup>3</sup>],  
 $Q_{dst}$  – chłód odprowadzany z zasobnika w fazie rozładowywania [kWh],  
 $Q_{SL}$  – ciepło właściwe materiału [kWh/m<sup>3</sup>·K],  
 $T_p$  – temperatura czynnika na powrocie [°C],  
 $T_z$  – temperatura czynnika na zasilaniu [°C].

Tabela 2. Rzeczywiste objętości zasobników chłodu dla różnych systemów przy tym samym dobowym zapotrzebowaniu na chłód

Table 2. Real volume of cold storage for various systems at the same daily cold demand

Rzeczywiste objętości zasobników chłodu [m <sup>3</sup> ]		Rodzaj akumulacji		
		pełna	częściowa	z limitem wydajności
Rodzaj systemu wytwarzania chłodu	magazynowanie lodu na węzownicy ze schładzaniem wewnętrznym	1,21	0,65	0,71
	magazynowanie lodu na węzownicy ze schładzaniem zewnętrznym	2,04	1,10	1,20
	lód w kapsułkach	1,69	0,91	1,00
	lód binarny	2,55	1,38	1,50

Korzystając z rys. 5-7. oraz wcześniejszych obliczeń  $Q_{dst}$ , przy założeniu temperatury pracy układu na zasilaniu i powrocie odpowiednio na poziomie 2 i 8°C, można wyznaczyć objętości zasobnika wody lodowej ( $Q_{SL} = 1,19$  kWh/m<sup>3</sup>·K):

- dla akumulacji pełnej ( $Q_{dst} = 90,88$  kWh)

$$V = \frac{90,88}{1,19 \cdot (8 - 2)} = 12,73 \text{ m}^3,$$

- dla akumulacji częściowej ( $Q_{dst} = 49,19$  kWh)

$$V = \frac{49,19}{1,19 \cdot (8 - 2)} = 6,89 \text{ m}^3,$$

- dla akumulacji częściowej z limitem ( $Q_{dst} = 53,15$  kWh)

$$V = \frac{53,15}{1,19 \cdot (8 - 2)} = 7,44 \text{ m}^3.$$

Objętości rzeczywiste zasobników różnią się w zależności od sposobu podłączenia zasobnika wody lodowej do instalacji. Objętość zasobnika podłączonego bezpośrednio należy zwiększyć o 5-10%, podczas gdy objętość zasobnika podłączonego pośrednim układem pompowym należy zwiększyć o 30-35% [10-12]. Dodatkowo 25% wynika ze sprawności stosowanych wymienników w układach pośrednich. Podobnie jak w przypadku zasobników ciepła utajonego, do obliczenia rzeczywistej objętości zasobnika zimnej wody można posłużyć się wzorem (14), przyjmując współczynnik  $c$  równy 0,05-0,01 dla systemów bezpośrednich i 0,30-0,35 dla systemów pośrednich. W tabeli 3. zestawiono wyniki obliczeń objętości zasobników dla akumulacji jawnej.

Tabela 3. Rzeczywiste objętości zasobników chłodu w warunkach akumulacji jawnej dla tych samych wartości zapotrzebowania dobowego na chłód

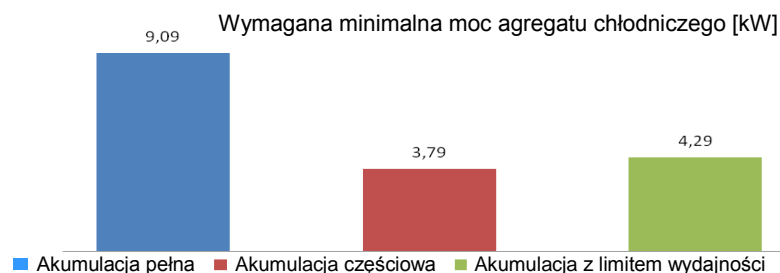
Table 3. Real volume of cold storage for sensible heat storage systems at the same daily cold demand

Rzeczywiste objętości zasobników chłodu [m <sup>3</sup> ]		Rodzaj akumulacji		
		pełna	częściowa	z limitem wydajności
System podłączenia	bezpośredni	13,37	7,23	7,81
	pośredni	16,55	8,96	9,67

## 5. Dyskusja

Wymagane minimalne moce agregatów chłodniczych dla przedstawionych systemów magazynowania chłodu zestawiono na rys. 7. Analizując wykres, można stwierdzić, że największe moce agregatów są wymagane podczas pracy systemu akumulacji pełnej (prawie trzykrotnie większe od akumulacji częściowej).

wej i dwukrotnie większe od akumulacji z limitem wydajności). Należy podkreślić, że czas pracy agregatów chłodniczych podczas akumulacji pełnej jest 15 godzin krótszy niż w przypadku dwóch pozostałych systemów akumulacji (tu czas pracy agregatu wynosi 24 h), co prowadzi do zapotrzebowania na energię elektryczną o wartości ok. 82 kWh.



Rys. 7. Porównanie minimalnych mocy agregatów chłodniczych w zależności od systemu akumulacji chłodu

Fig. 7. Comparison of minimum chiller power according to cold accumulation systems

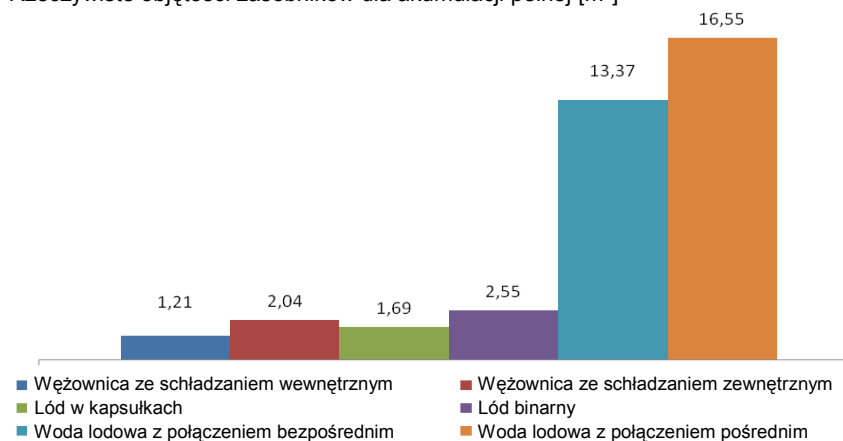
W przypadku akumulacji częściowej jest to zapotrzebowanie rzędu 91 kWh i porównywalne do akumulacji z limitem wydajności. Wynika z tego, że pojemność zbiorników jest znacznie różna, zależnie od systemu akumulacji, co pociąga za sobą konieczność zabezpieczenia odpowiednich środków inwestycyjnych. Niemniej zużycie energii przez sam agregat chłodniczy może przemawiać za rozwiązaniem droższym inwestycyjnie, ale tańszym w późniejszej eksploatacji.

Na rysunku 8. przedstawiono objętości zasobników magazynujących ciepło utajone (LHS) i jawne (SHS). Jak wynika z wykresu, objętości czynne zasobników magazynujące chłód w postaci utajonej są ponad dziesięciokrotnie mniejsze



Rys. 8. Porównanie czynnych objętości zasobników chłodu w postaci jawnej (SHS) i utajonej (LHS)

Fig. 8. Comparison of effective cold storage volume at sensible (SHS) and latent manner

Rzeczywiste objętości zasobników dla akumulacji pełnej [m<sup>3</sup>]

Rys. 9. Porównanie objętości rzeczywistych różnych typów zasobników chłodu

Fig. 9. Comparison of real cold storage volume at various type of storages

od zasobników ciepła jawnego. Daje to duże korzyści w postaci niższych kosztów inwestycyjnych czy mniejszego zapotrzebowania na miejsce. Jednak w przypadku niewielkich systemów zapotrzebowanie na magazynowany chłód może być zbyt małe, aby techniczne wykonanie takiego zasobnika było możliwe [13].

Na rysunku 9. porównano różne typy zasobników chłodu. Zasobniki magazynujące chłód w materiale ciekłym są zdecydowanie największe. Zasobnik z połączeniem pośrednim jest większy o ok. 25% od zasobnika z połączeniem bezpośrednim. Spośród zasobników magazynujących energię utajoną najmniejszą objętością charakteryzuje się zasobnik magazynujący lód na wężownicy ze schładzaniem wewnętrznym [14, 15]. Mimo podobieństwa do systemu ze schładzaniem zewnętrznym, jego objętość rzeczywista jest prawie dwukrotnie mniejsza. Największą objętość ma zasobnik lodu binarnego. Stosunkowo niewielką objętość ma również zasobnik z lodem w kapsułkach.

### Oznaczenia

- a – stosunek obniżenia mocy agregatu chłodniczego w czasie szczytu do mocy całkowitej [-]
- c – współczynnik zwiększający w zależności od systemu wytwarzania lodu [-]
- $c_w$  – ciepło właściwe materiału [kJ/kg·K]
- DLHS – gęstość magazynowania energii [kWh/m<sup>3</sup>]
- LHS – system magazynowania energii w postaci utajonej [-]
- $Q_{chill}$  – moc agregatu chłodniczego [kW]
- $Q_i$  – godzinowe zapotrzebowanie na chłód [kW]

$Q_{\max i}$	– godzinowe zapotrzebowanie na chłód w czasie szczytu [kW]
PCM	– materiał zmieniający stan skupienia [-]
SHS	– system magazynowania energii w postaci jawnej [-]
$t_{\text{chill}}$	– czas pracy agregatu chłodniczego podczas ładowania zasobnika [h]
$t_i$	– długość przedziału czasu $i$ [h]
$t_{\max}$	– czas trwania rozładowywania zasobnika [h]
$T_p$	– temperatura płynu pośredniczącego na wlocie do zasobnika [°C]
$T_{\text{st}}$	– temperatura zmiany fazy [°C]
$T_z$	– temperatura płynu pośredniczącego na wylocie z zasobnika [°C]
$Q_{\text{chill}}$	– moc agregatu chłodniczego [kW]
$Q_{\text{DD}}$	– pojemność cieplna objętościowa materiału PCM w fazie stałej [kWh/m <sup>3</sup> ·K]
$Q_{\text{dst}}$	– ilość energii odprowadzanej z zasobnika w cyklu rozładowywania [kWh]
$Q_L$	– ciepło właściwe utajone zasobnika (ciepło przemiany fazowej) [kWh/m <sup>3</sup> ]
$Q_{\text{SL}}$	– pojemność cieplna objętościowa materiału PCM w fazie ciekłej [kWh/m <sup>3</sup> ·K]
$\Sigma Q_{\max i} \cdot t_i$	– sumaryczne zapotrzebowanie na chłód w okresie szczytowym [kWh]
$V$	– objętość zasobnika chłodu [m <sup>3</sup> ]
$V_{\text{rz}}$	– rzeczywista objętość zasobnika [m <sup>3</sup> ]
$\rho$	– gęstość materiału w granicach temperatury występującej w zasobniku [kg/m <sup>3</sup> ]

## Literatura

1. Rubik M.: Pompy ciepła. Poradnik. Technika cieplna w budownictwie. Warszawa 2006.
2. Mehling H., Cabeza L.F.: Heat and cold storage with PCM. Springer, 2008.
3. Semadeni M.: Energy storage as an essential part of sustainable energy systems. CEPE working paper 24, May 2003.
4. Eckerlin H.: Thermal Energy Storage: Analysis and application. A diploma thesis submitted to the Graduate Faculty of North Carolina State University, Raleigh, North Carolina 2009.
5. Wilson P.: Source energy and environmental impacts of thermal energy storage. California Energy Commission, Governor 1996.
6. ASHRAE Handbook. HVAC systems and equipment. ASHRAE Inc., Atlanta, GA 1996.
7. Dorgan C.E., Elleson J.S.: Design guide for cool thermal storage. ASHRAE Inc., Atlanta 1993.
8. Williams C.D.: Optimizing TES chiller management. ASHRAE Journal, 4, 1996, 43-48.

9. Stamm R.H.: Thermal storage systems. Heating/Piping/Air Conditioning, January 1985, 133-151.
10. Lumpkin R.M.: Thermal storage: A reversible process. HPAC, 1, 1998, 136-142.
11. Shan K. Wang: Handbook of air conditioning and refrigeration, 2<sup>nd</sup> ed. McGraw-Hill, New York 2000.
12. Wang S.K., Lavan Z.: Air-conditioning and refrigeration. Mechanical Engineering Handbook, Frank Kreith (ed.). CRC Press LLC, Boca Raton 1999.
13. Wojtas K.: Systemy akumulacji chłodu sposobem na podniesienie efektywności instalacji klimatyzacyjnej. Geneza i opis systemu. Chłodnictwo i Klimatyzacja, 9/2001.
14. Bonca Z.: Czynniki chłodnicze i nośniki ciepła. IPPU Masta, Gdańsk 1997.
15. ASHRAE Handbook-HVAC Applications. Thermal storage. ASHRAE Inc., Atlanta 2007, 34.1-34.33.

## METHODS OF COLD ACCUMULATION IN THE AIR CONDITIONING SYSTEMS

### Summary

Reduce energy consumption issues becomes currently area around which most of the research and technical applications are made. The paper presents the possibility to store cooling energy in the form of sensible based on the heat capacity of the accumulated material, which is mostly water, and in the form of latent, which allows storage of energy in cooling phase transitions occurring during the loading and unloading of accumulated material, often referred to as a material PCM (Eng: Phase Change Material). As the heat associated with the change of state is several times higher than that of the specific heat of the material, obtained in this way volume of cold storages is much less than in sensible method of cold accumulation. Comparison of the volume of the cooling energy production for selected cooling systems and associated charging chiller power has been obtained as well as cold storage volumes. An original method of calculation developed by author (at the time of publication without experimental verification) allows to determine the chiller capacity in each individual accumulation system taking into account the various in cooling energy demand, or assuming the percentage of utilization of cold storage. It allows the calculation of the cold production system for such systems as full accumulation, partial and limited cooling capacity. A comparison of the total required capacity in the full accumulation systems for selected accumulated materials, starting with water, water ice, binary ice, through ice in capsules and systems of direct and indirect production of cold water.

**Keywords:** cold storage, cold accumulation, method of daily accumulation

DOI: 10.7862/rb.2013.11

*Przesłano do redakcji w styczniu 2013 r.*

*Przyjęto do druku w czerwcu 2013 r.*