

TERMICZNE TECHNOLOGIE POZYSKIWANIA CHŁODU

B. Gradoń, S. Gil, W. Bialik

Zespół Energetyki Procesowej, Katedra Metalurgii, Wydział Inżynierii Materiałowej i Metalurgii, Politechnika Śląska, Katowice, Polska

STRESZCZENIE

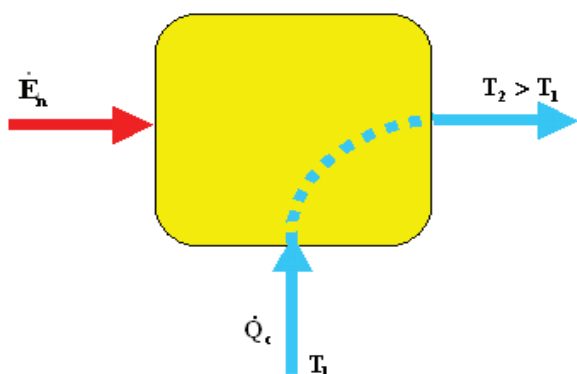
Rosnące wymagania odnośnie jakości życia oraz prognozowane efekty globalnego ocieplenia powodują, że wzrasta zainteresowanie pozyskiwaniem chłodu dla kształtowania środowiska wewnętrznego w budynkach nie tylko w krajach tropikalnych, ale również na obszarach o klimacie określanym obecnie jako umiarkowany. W artykule dokonano krótkiego przeglądu termicznych technologii pozyskiwania chłodu z wykorzystaniem energii promieniowania słonecznego. Wskazano na ich znaczenie dla racjonalnego gospodarowania energią i ochrony środowiska.

TERMICZNE TECHNOLOGIE

Zgodnie z drugą zasadą termodynamiki, niezbędny dla pozyskania chłodu transport ciepła w kierunku wzrostu temperatury wymaga dostarczenia energii, którą można określić jako energię napędową procesu (rys.1). Efektywność procesu wyraża stosunek strumienia ciepła odprowadzonego z przestrzeni chłodzonej do strumienia energii napędowej.

$$\varepsilon = \dot{Q}_c / \dot{E}_n \quad (1)$$

W literaturze anglojęzycznej wielkość ta jest określana jako *thermal coefficient of performance* i oznaczana skrótem COP.



Rys. 1. Przepływ ciepła w kierunku spadku temperatury

Najczęściej stosowane, tradycyjne systemy chłodzenia wykorzystują do napędu procesu głównie energię elektryczną. Szacuje się, że w zależności od warunków klimatycznych, od 30 do 50% światowej

produkcji energii elektrycznej jest używana na potrzeby kondycjonowania powietrza i chłodnictwa (Balaras C.A., Grossman G., Henning H.M., Infante Ferreira C.A., Podesser E., Wang L., Wiemken E., 2007). W Europie ok. 8% rocznej produkcji energii elektrycznej zużywa się dla pozyskiwania chłodu, przy czym zużycie to gwałtownie rośnie. Wzrasta bowiem zapotrzebowanie na chłód. Przypuszcza się, że w 2020 roku zapotrzebowanie to będzie w Europie wynosić ok. 2,4 EJ przy stopniu nasycenia ok. 60% w sektorze budynków biurowo-usługowych i ok. 40% w budynkach mieszkalnych (Froning S., 2008).

Względne potrzeby chłodnicze budynków w różnych częściach Europy określa tzw. europejski wskaźnik chłodu ECI (*European Cooling Index*). Obszarom o średnich na kontynencie warunkach klimatycznych, charakteryzujących się roczną temperaturą zewnętrzną na poziomie 10°C, przypisano wartość ECI równą 100. Jednostkowe potrzeby chłodnicze w skali roku na tych obszarach są szacowane na poziomie 295,2 MJ/m² dla budynków usługowo-biurowych oraz ok. 133,2 MJ/m² dla budynków mieszkalnych (Ecoheatcool, Workpackage, 2005-2006). Na pozostałych obszarach wartości te są odpowiednio większe lub mniejsze proporcjonalnie do przypisanej im wartości wskaźnika ECI. W Polsce warunki określające zapotrzebowanie na chłód są zbliżone do średnich warunków europejskich. Wskaźnik ECI waha się w granicach od 70 na północy kraju do 100 na krańcach południowych, przyjmując w większości regionów średnią wartość ok. 90.

Przewidywany w najbliższych latach wzrost zapotrzebowania na chłód może skutkować znacznym zwiększeniem zużycia energii elektrycznej i w konsekwencji również wzrostem negatywnych oddziaływań na środowisko. Szacunkowe obliczenia przeprowadzone dla Polski pokazują, że roczne zużycie energii elektrycznej może z tego powodu potencjalnie wzrosnąć w perspektywie roku 2020 do ok. 2,5·10⁶ GJ. Biorąc pod uwagę fakt, że w Polsce energia elektryczna jest pozyskiwana głównie w wyniku spalania węgla, może to prowadzić do wzrostu rocznych emisji CO₂ o ok. 6,5·10⁶ Mg. Oszacowania dokonano w oparciu o następujące zależności:

- zużycie energii elektrycznej

$$\dot{E}_{el} = \frac{N \cdot (q_{cm} \cdot a_m \cdot y_m + q_{cb} \cdot a_b \cdot y_b)}{\varepsilon} \cdot \frac{ECI}{100}, \quad (2)$$

- zużycie paliwa

$$\dot{m}_f = \frac{\dot{E}_{el}}{\eta_{el} \cdot W_{df}}, \quad (3)$$

- emisja CO₂ (Tomeczek J., Gradoń B., Rozpondek M., 2009)

$$\dot{m}_{CO_2} = \dot{m}_f \cdot 44 \cdot \frac{C}{12} \cdot x_u. \quad (4)$$

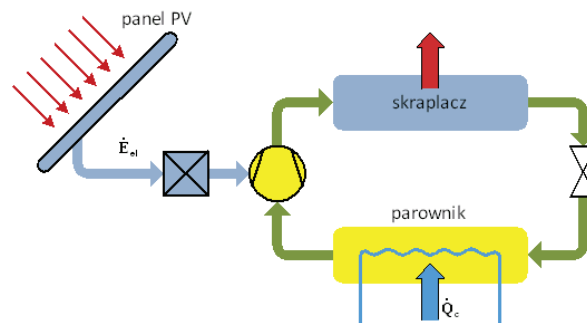
W obliczeniach założono, zgodnie z prognozami europejskimi, że w roku 2020 60% (y_b) budynków biurowo-usługowych i 40% (y_m) budynków mieszkalnych będzie wyposażonych w instalacje do pozyskiwania chłodu [1]. Ponadto przyjęto: liczbę mieszkańców $N = 38,501$ mln (Mały rocznik statystyczny Polski 2012), jednostkowe roczne zapotrzebowanie na chłód w średnich na kontynencie europejskim warunkach klimatycznych (ECI = 100): $q_{cm} = 133,2$ MJ/m² w budynkach mieszkalnych oraz $q_{cb} = 295,2$ MJ/m² w budynkach o charakterze biurowo-usługowym (Balaras C.A., Grossman G., Henning H.M., Infante Ferreira C.A., Podesser E., Wang L., Wiemken E, 2007), współczynnik efektywności dla agregatów sprężarkowych $\varepsilon = 4,5$ (Southern California Gas Company, 1998), przeciętny na obszarze Polski wskaźnik ECI = 95. Założono, że energia elektryczna jest pozyskiwana w wyniku spalania paliwa węglowego o zawartości pierwiastka węgla w paliwie w stanie surowym $C = 0,56$ i przeciętnej wartości opałowej $W_{df} = 21000$ kJ/kg. Sprawność η_{el} bloków energetycznych przyjęto równą 0,37 (Rataj Z., Walewski A., Zabłocki W., 2002), a współczynnik utleniania paliwa $x_u = 0,99$ (Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 12 stycznia 2006 r. w sprawie sposobu monitorowania wielkości emisji substancji objętych wspólnotowym systemem handlu uprawnieniami do emisji, 2006).

Ze względu na prognozowane ocieplenie klimatu, zapotrzebowanie na chłód i niezbędną do jego pozyskiwania energię będzie prawdopodobnie w przyszłości wzrastać w znacznie większym stopniu, niż to wynika z oszacowań dokonywanych na podstawie aktualnych warunków klimatycznych. Ponadto zwiększone emisje CO₂ mogą sprzyjać dalszemu pogłębianiu się efektu cieplarnianego i w konsekwencji przyczyniać się do dalszego wzrostu zapotrzebowania na chłód. Warto również zauważyć, że w warunkach klimatu umiarkowanego potrzeba chłodzenia pomieszczeń ogranicza się do stosunkowo krótkiego okresu czasu w ciągu roku, praktycznie do około trzech, czterech miesięcy. Co więcej zapotrzebowanie na energię napędową nie jest równomiernie rozłożone w czasie i może ulegać znacznym wahaniom ze względu na trudne do przewidzenia, stochastyczne zmiany warunków pogodowych. Znane są z doniesień medialnych przypadki występowania znacznych, krótkotrwałych przeciążeń sieci energetycznych w okresie upałów obserwowane na przykład w Stanach Zjednoczonych Ameryki.

Złagodzenie wymienionych wyżej negatywnych skutków zwiększonego zapotrzebowania na chłód może być osiągnięte między innymi przez wykorzystanie alternatywnych, proekologicznych źródeł energii, zwłaszcza energii promieniowania słonecznego. Jednym z rozwiązań zmierzających w tym kierunku jest skojarzenie tradycyjnych sprężarkowych agregatów chłodniczych z panelami fotowoltaicznymi (rys.2). Do odmiennych rozwiązań należą instalacje działające w oparciu o technologie termiczne, w których do napędu procesu wykorzystuje się strumień ciepła \dot{Q}_h . Efektywność pozyskiwania chłodu wyraża wówczas stosunek:

$$\varepsilon = \dot{Q}_c / \dot{Q}_h. \quad (5)$$

Możliwe jest wykorzystanie różnych rodzajów źródeł ciepła: kolektorów słonecznych, kotłów opalanych paliwami konwencjonalnymi oraz źródeł ciepła odpadowego. W przypadku korzystania z kolektorów słonecznych, umieszczenie w instalacji dodatkowego źródła ciepła innego rodzaju umożliwia skuteczne jej działanie w warunkach, w których strumień energii promieniowania słonecznego jest ze względów klimatycznych lub pogodowych niewystarczający do spełnienia wymaganych efektów.



Rys. 2. Tradycyjny mechaniczny układ pozyskiwania chłodu z wykorzystaniem paneli fotowoltaicznych

W rozwiązaniach praktycznych wyróżniają się szczególnie dwa typy instalacji termicznych (Balaras C.A., Grossman G., Henning H.M., Infante Ferreira C.A., Podesser E., Wang L., Wiemken E, 2007; Desideri U., Proietti S., Stringola P., 2009; Murphy P., 2010; Eicker U., 2003; Henning H.M., 2007; Qu M., Yin H., Archer D.A., 2010; Venegas M., Rodriguez-Hidalgo M.C., Salgado R., Lecuona A., Rodriguez P., Gutiérrez G., 2011):

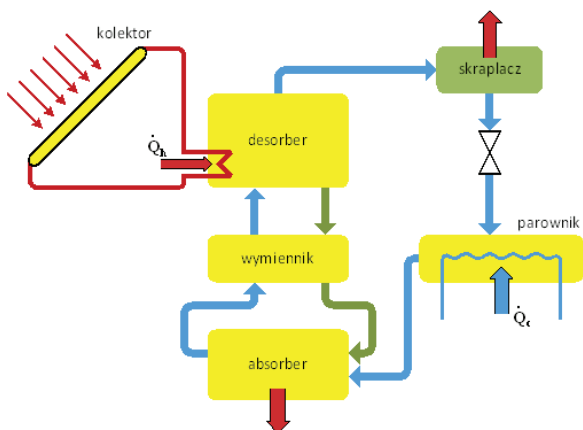
- instalacje z obiegiem zamkniętym,
- instalacje z obiegiem otwartym.

W instalacjach z obiegiem zamkniętym najczęściej bezpośrednio schładzana jest woda, którą w dalszej części instalacji wykorzystuje się do chłodzenia powietrza wentylacyjnego. Stosowane są dwa rodzaje agregatów chłodniczych:

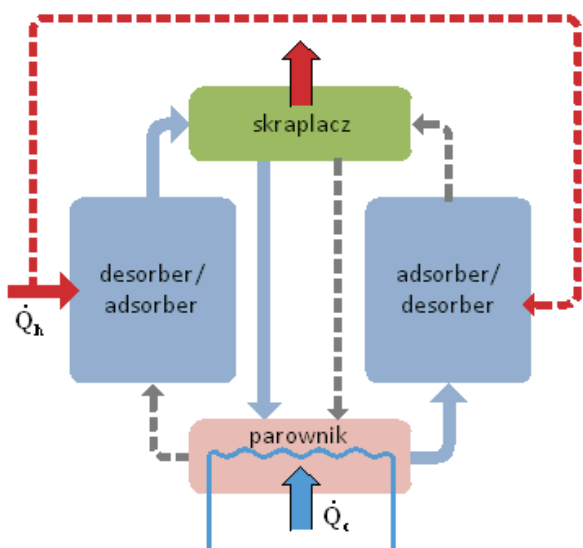
- agregaty absorpcyjne wykorzystujące zjawiska rozpuszczania i absorpcji czynnika obiegowego (roboczego) przez sorbenty w fazie ciekłej,

- agregaty adsorpcyjne wykorzystujące zjawiska adsorpcji na powierzchni ciała stałego.

Na rys. 3 przedstawiono schemat ideowy systemu zamkniętego z agregatem absorpcyjnym, a na rys. 4 przykład rozwiązania agregatu adsorpcyjnego. W obydwu przypadkach elementem chłodzącym w obiegu jest parownik. Energia napędowa w postaci strumienia ciepła \dot{Q}_h jest doprowadzana do desorbera.



Rys. 3. System zamknięty z absorpcyjnym agregatem chłodniczym



Rys. 4. System zamknięty z adsorpcyjnym agregatem chłodniczym

W agregatach absorpcyjnych najczęściej stosowanym czynnikiem roboczym jest amoniak (NH_3), a sorbentem H_2O . Ostatnio coraz większe zainteresowanie wzbudza bromek litu (LiBr) jako sorbent stosowany z wodą jako czynnikiem roboczym. Współczynnik efektywności procesu zależy od temperatury źródła ciepła

„napędowego” i osiąga wartości do ok. 0,7 w przypadku obiegów jednostopniowych (z jednym desorberem) i do ok. 1,3 w przypadku obiegów dwustopniowych (z dwoma desorberami) (Henning H.M., 2007). Prezentowany na rys. 4 agregat adsorpcyjny działa na zasadzie rewersji. Czynnik roboczy zmienia okresowo kierunek przepływu. Każda z dwóch kolumn wypełnionych sorbentem pełni na przemian rolę desorbera i adsorbera. Najczęściej stosowanym sorbentem jest silica gel.

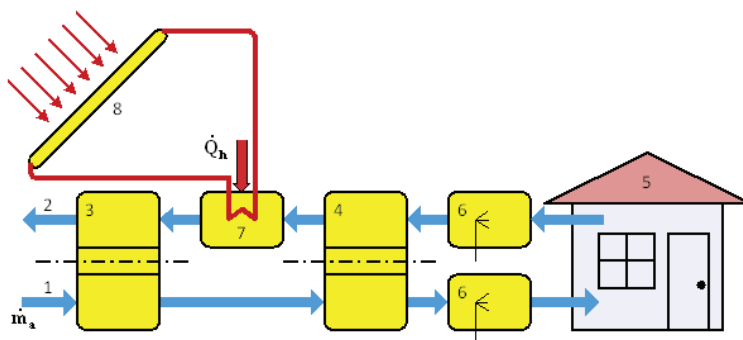
Szacuje się, iż w instalacji pozyskiwania chłodu z obiegiem absorpcyjnym o efektywności $\varepsilon \approx 0,52$ i kolektorem słonecznym o temperaturze ok. 87°C moc urządzeń elektrycznych nie przekracza 1% mocy chłodniczej. Stanowi to zapotrzebowanie na energię elektryczną trzydzieści razy mniejsze w porównaniu z analogicznymi urządzeniami sprężarkowymi (Eicker U., Pietruschka D., 2009).

Obiegi otwarte bywają określane również jako osuszające systemy chłodzące (*desiccant cooling systems*). Stanowią one kombinację procesu chłodzenia, zachodzącego podczas parowania wilgoci z osuszaniem powietrza w kontakcie z materiałem higroskopijnym (desykantem). Najczęściej jako desykanty stosuje się materiały w stałym stanie skupienia (silica gel, chlorek litu) umieszczone w bębnie obrotowym. Desykant jest regenerowany w wyniku kontaktu z powietrzem wentylacyjnym wydmuchiwanym z instalacji i ogrzewanym dodatkowo strumieniem ciepła z kolektora słonecznego lub innego źródła ciepła napędowego (rys.5). Współczynnik efektywności instalacji określa zależność

$$\varepsilon = \frac{\dot{m}_a \cdot (T_z - T_w)}{\dot{Q}_h}, \quad (6)$$

a jego wartości wahają się w granicach od 0,6 do 1,2 (Núñez T., 2010). Prowadzone są również prace z desykantami ciekłymi. Brane są pod uwagę następujące związki: chlorek litu (LiCl), chlorek wapnia (CaCl_2), bromek litu (LiBr) oraz glikol trójetylenowy (IEA, Solar Heating and Cooling Programme, 2010). Wskazuje się na niektóre korzyści płynące z ich zastosowania. Do najważniejszych z nich zalicza się: możliwość głębszego osuszania powietrza przy niższej temperaturze regeneracji oraz wykorzystanie materiału sorpcyjnego do magazynowania ciepła (Henning H.M., 2007).

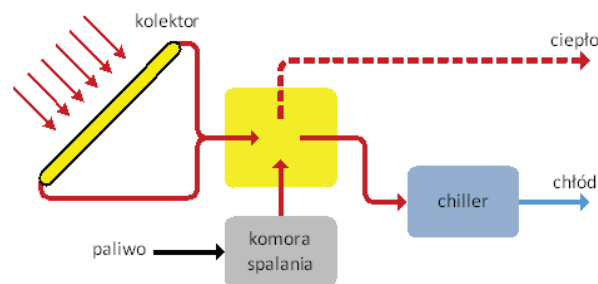
Efektywność pozyskiwania chłodu w instalacjach termicznych zależy głównie od rodzaju instalacji, zastosowanego sorbentu i czynnika roboczego oraz znacząco również od temperatury źródła ciepła napędowego. W tabelicy 1 zamieszczono zestawienie najczęściej stosowanych technologii oraz wartości wybranych parametrów.



Rys. 5. Otwarty system chłodzenia powietrza wentylacyjnego z desykantem i odzyskiem ciepła:
 1-powietrze z atmosfery, 2-powietrze wydmuchiwane z układu, 3,4-bębny obrotowe wypełnione desykantem,
 5-budynek, 6-nawilzacze powietrza, 7-podgrzewacz powietrza, 8-kolektory słoneczne

Tab. 1. Wybrane parametry najczęściej stosowanych technologii (Eicker U., 2003; Henning H.M., 2007; Núñez T., 2010)

System	Czynnik roboczy	Sorbent	Temperatura źródła ciepła „napędowego”	Temperatur a czynnika chłodzonego	Współczynnik efektywności procesu
Zamknięty, jednostopniowy, absorpcyjny	NH ₃	H ₂ O	(100-140) °C	(-60 do +20) °C	0,6-0,7
Zamknięty, jednostopniowy, absorpcyjny	H ₂ O	LiBr	(80-110) °C	(5-20) °C	0,6-0,7
Zamknięty, dwustopniowy, absorpcyjny	H ₂ O	LiBr	(140-160) °C	(5-20) °C	1,0-1,3
Zamknięty, adsorpcyjny	H ₂ O	silica gel	(55-100) °C	(5-20) °C	0,3-0,6
Otwarty z desykantem		silica gel	(60-90) °C	(15-20) °C	0,6-1,2



Rys. 6. Ogólny schemat układu hybrydowego pozyskiwania ciepła i chłodu

Według danych z roku 2006 w połowie ubiegłego dziesięciolecia w Europie zainstalowanych było ok. 70 systemów z zastosowaniem kolektorów słonecznych, najwięcej w Niemczech (ok. 27) i Hiszpanii (ok. 19) (Desideri U., Proietti S., Stringola P., 2009; Henning H.M., 2007). Całkowita moc chłodzenia wynosiła 6,3 MW, a całkowita powierzchnia kolektorów ok. 17500 m².

Najwięcej, ok. 59% instalacji działa w oparciu o zamknięte obiegi adsorpcyjne, a ponadto (Henning H.M., 2007):

- 11% w oparciu o zamknięte obiegi adsorpcyjne,
- 23% w oparciu o otwarte obiegi z osuszaczem w fazie stałej,
- 7% w oparciu o obiegi z zastosowaniem desykantów ciekłych.

W większości są to niewielkie, często produkowane seryjnie instalacje przeznaczone dla małych budynków mieszkalnych lub wybranych pomieszczeń w budynkach komercyjnych. Znacznie mniej jest natomiast dużych instalacji wymagających specyficznego opracowania indywidualnego projektu (Henning H.M., 2007; Henning H.M., 2011).

Kompleksowa instalacja pozyskiwania ciepła i chłodu powinna zapewniać odpowiednie ilości ciepła dla celów przygotowania ciepłej wody użytkowej przez cały rok, ogrzewania w zimne dni oraz pozyskiwania chłodu w najbardziej gorące dni w roku. Spełnienie tych wymogów w oparciu wyłącznie o energię promieniowania słonecznego przy sensownych rozmiarach kolektorów słonecznych jest zwykle bardzo trudne, a na terenach klimacie umiarkowanym, charakterystycznym dla Polski, wręcz niemożliwe. Wynika to ze zbyt małych wartości strumieni energii promieniowania słonecznego w okresie jesieni, zimy i wiosny. Rozwiązaniem jest układ hybrydowy (rys. 6), w którym ciepło pozyskiwane jest częściowo z energii promieniowania słonecznego, a częściowo z tradycyjnego źródła ciepła, na przykład z procesu spalania paliw kopalnych lub biomasy. Jak już wspomniano dodatkowe źródło ciepła umożliwia również efektywne działanie instalacji niezależnie od zmian warunków klimatycznych i pogodowych.

W krajach wspólnoty europejskiej kładzie się szczególny nacisk na oszczędność energii i działania proekologiczne. Dyrektywa 2005/32/WE Parlamentu Europejskiego i Rady Europy z dnia 6 lipca 2005 roku określa ogólne zasady ustalania wymogów dotyczących eko-projektów dla produktów wykorzystujących energię. W tym świetle termiczne technologie pozyskiwania chłodu z wykorzystaniem energii promieniowania słonecznego mogą stanowić interesującą alternatywę dla tradycyjnych obiegów sprężarkowych.

LITERATURA CYTOWANA

- Balaras C.A., Grossman G., Henning H.M., Infante Ferreira C.A., Podesser E., Wang L., Wiemken E., 2007, *Solar air conditioning in Europe – an overview*. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 11, (2007), 299-314
- Froning S., 2008, *Low energy communities with district heating and cooling*. PLEA 2008 – 25-th Conference on Passive and Low Energy Architecture, Dublin
- Ecoheatcool, Workpackage 2, 2005-2006, *The European Cold Market*, Final report 2005-2006, www.euroheat.org/files/filer/eoheatcool/document/s/Ecoheatcool_WP2_Web.pdf
- Tomeczek J., Gradoń B., 2009, Rozpondek M.: *Redukcja emisji zanieczyszczeń z procesów konwersji paliw i odpadów*. Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice
- Mały rocznik statystyczny Polski 2012, 2012, GUS, Warszawa
- Absorption Chillers Guideline*, 1998, Southern California Gas Company, New Buildings Institute, Advanced Design Guideline Series
- Rataj Z., Walewski A., Zabłocki W., 2002, *Przydatność kotłów na nadkrytyczne parametry pary dla rekonstrukcji elektrowni systemowych w Polsce*. IX Konferencja Kotłowa 2002 „Aktualne problemy budowy i eksploatacji kotłów”
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 12 stycznia 2006 r. w sprawie sposobu monitorowania wielkości emisji substancji objętych wspólnotowym systemem handlu uprawnieniami do emisji, DzU Nr 16. poz. 123 i 124
- Desideri U., Proietti S., Stringola P., 2009, *Solar-powered cooling systems: Technical and economic analysis on industrial refrigeration and air-conditioning applications*. Applied Energy, 86, (2009), 1376-1386
- Murphy P. (editor), 2011, *IEA Solar Heating and Cooling Programme*, 2010 Annual Report
- Eicker U., 2003, *Solar Technologies for Buildings*. Wiley
- Henning H.M., 2007, *Solar assisted air conditioning of buildings – an overview*. Applied Thermal Engineering, 27, (2007), 1734-1749
- Qu M., Yin H., Archer D.A., 2010, *A solar thermal cooling and heating system for a building: Experimental and model based performance analysis and design*. Solar Energy, 84, (2010), 166-182
- Venegas M., Rodriguez-Hidalgo M.C., Salgado R., Lecuona A., Rodriguez P., Gutiérrez G., 2011, *Experimental diagnosis of the influence of operational variables on the performance of a solar absorption cooling system*. Applied Energy, 88, (2011), 1447-1454
- Eicker U., Pietruschka D., 2009, *Design and performance of solar powered absorption cooling systems in office buildings*. Energy and Buildings, 41, (2009), 81-91
- Núñez T., 2010, *Technology and Literature Review*. PolySMART Project, Work Package 1, final report 2010
- IEA, *Solar Heating and Cooling Programme*, 2010, Task 38: Solar Air-Conditioning and Refrigeration, C1: *State of the art – Survey on new solar cooling developments*, technical report
- Henning H.M., 2011, *Solar Air-Conditioning and Refrigeration*. Feature Article in: Murphy P. (editor): *IEA Solar Heating and Cooling Programme*, 2010 Annual Report