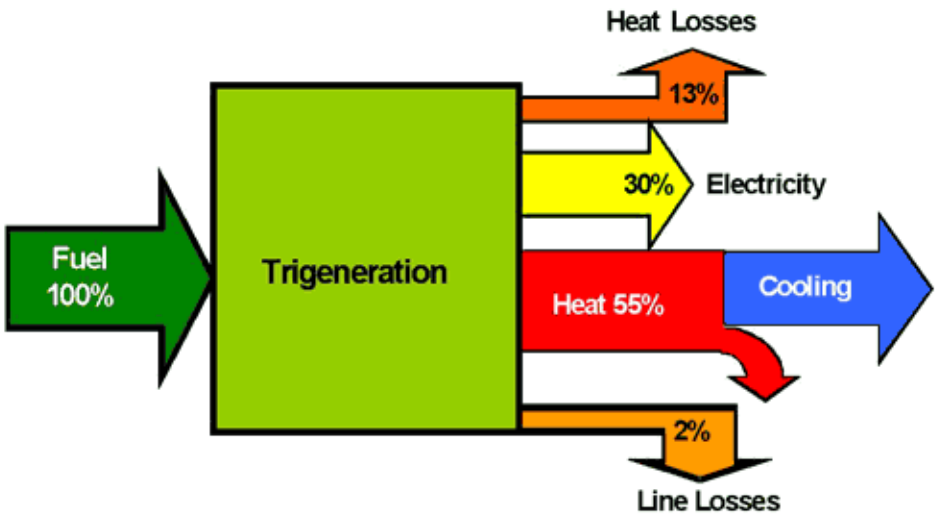
AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

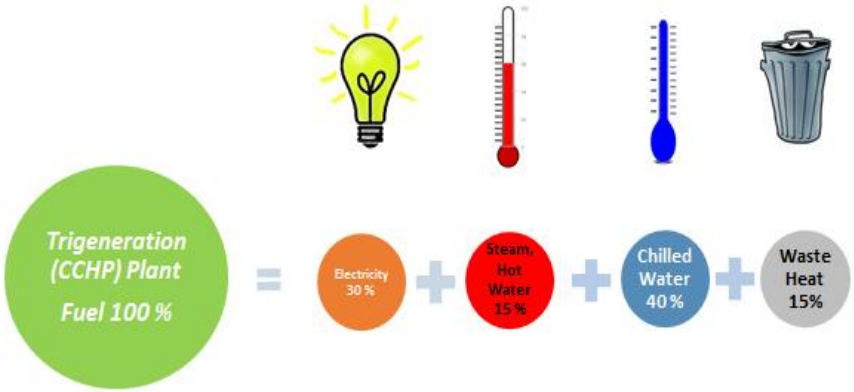
Układy poligeneracyjne do skojarzonej produkcji energii elektrycznej, ciepła i chłodu

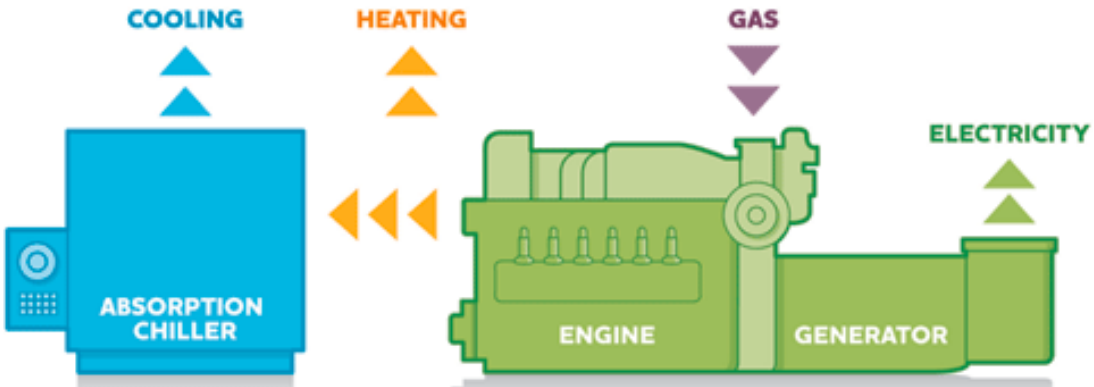
Prof. dr hab. inż. Wojciech Nowak

Centrum Energetyki AGH

Co to jest Trigeneracja ?





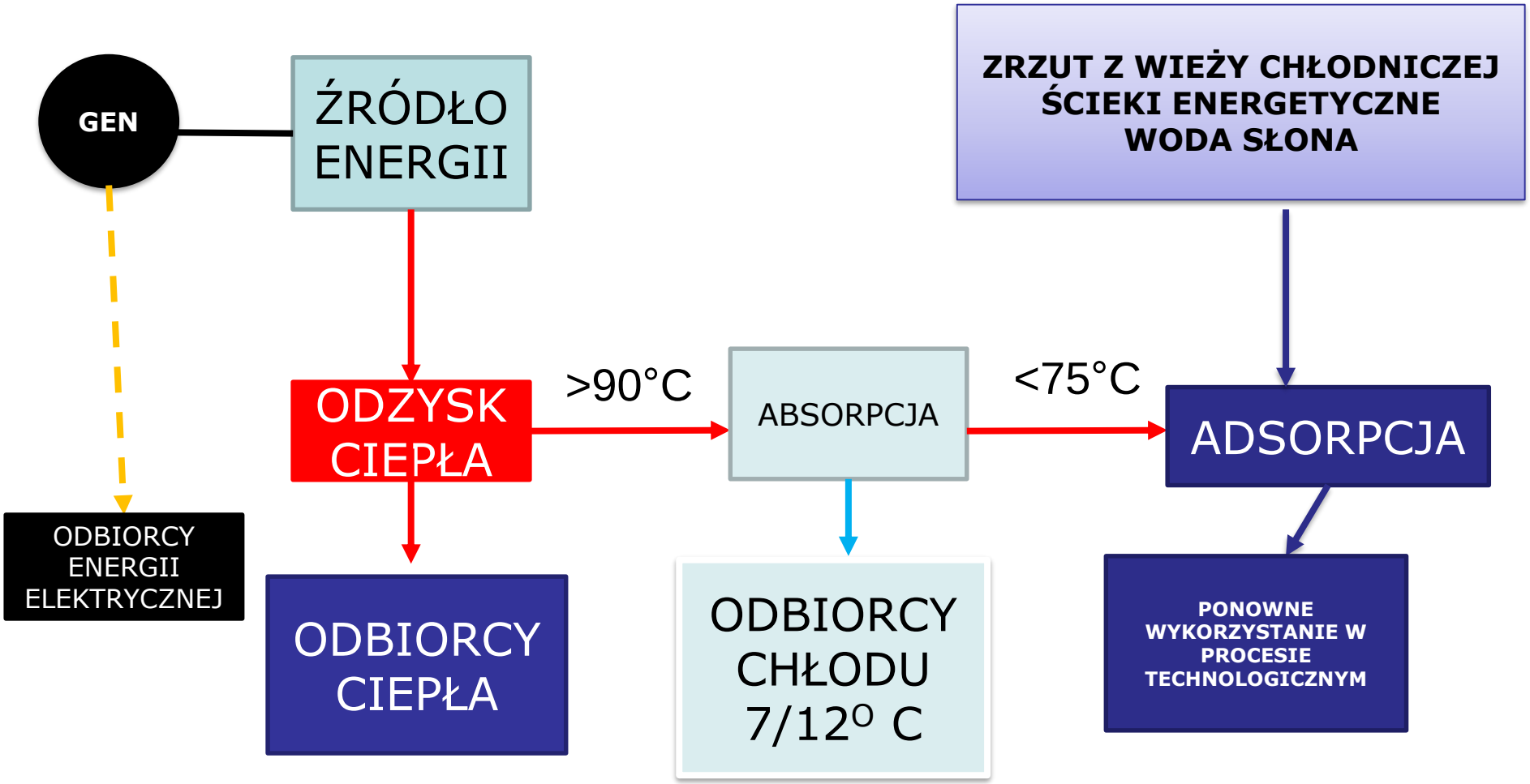


A poligeneracja ?

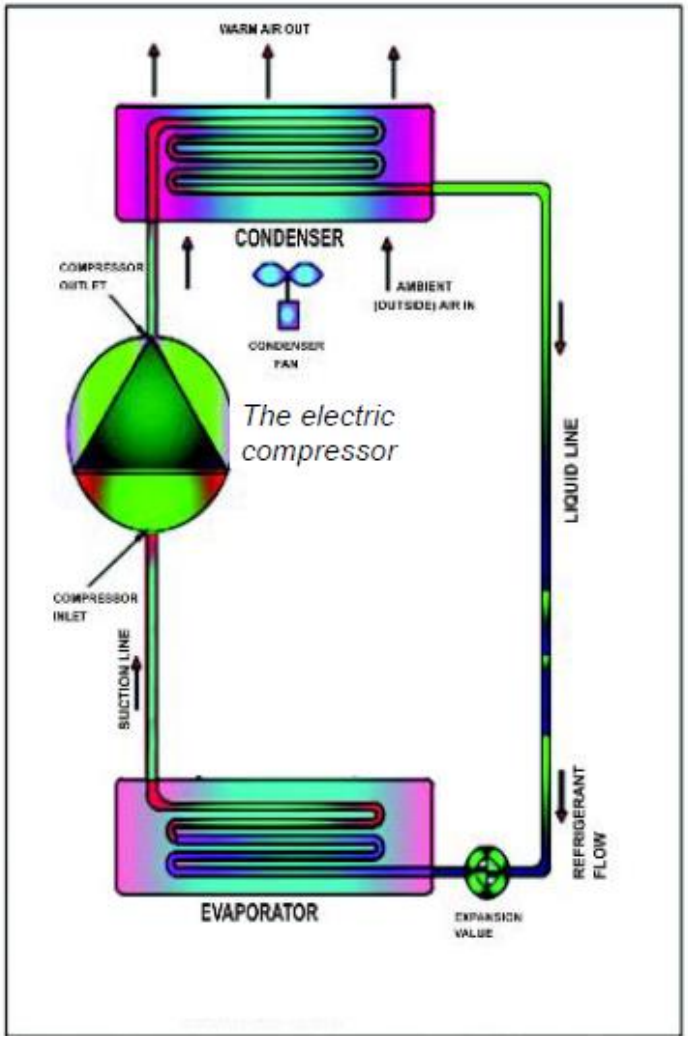
Mianem **poligeneracji** określa się produkcję w jednym procesie technologicznym kilku nośników w postaci:

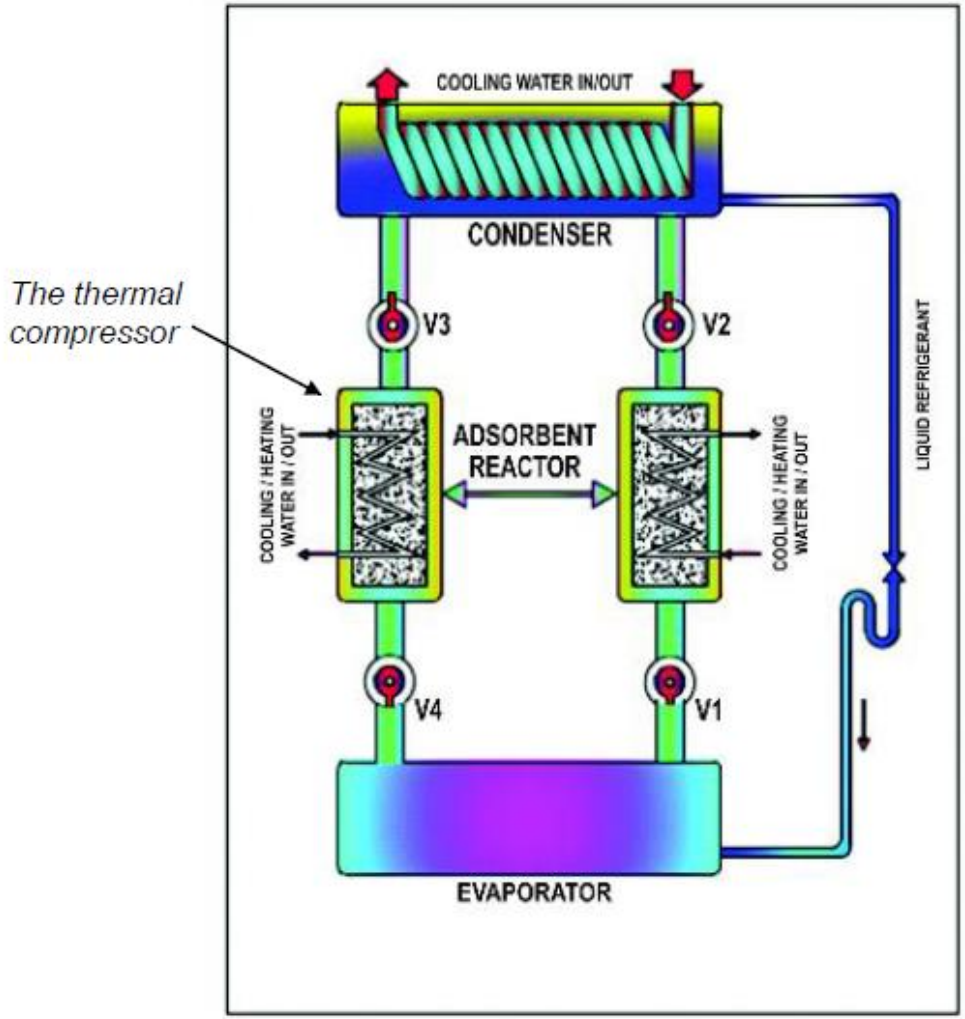
1. ciepła
2. chłodu
3. energii elektrycznej
4. wody pitnej lub oczyszczania ścieków
5. nowych produktów (SNG, metanol, etanol, wodór, tlen, sprężone powietrze itd.)

Poligeneracja sorpcyjna

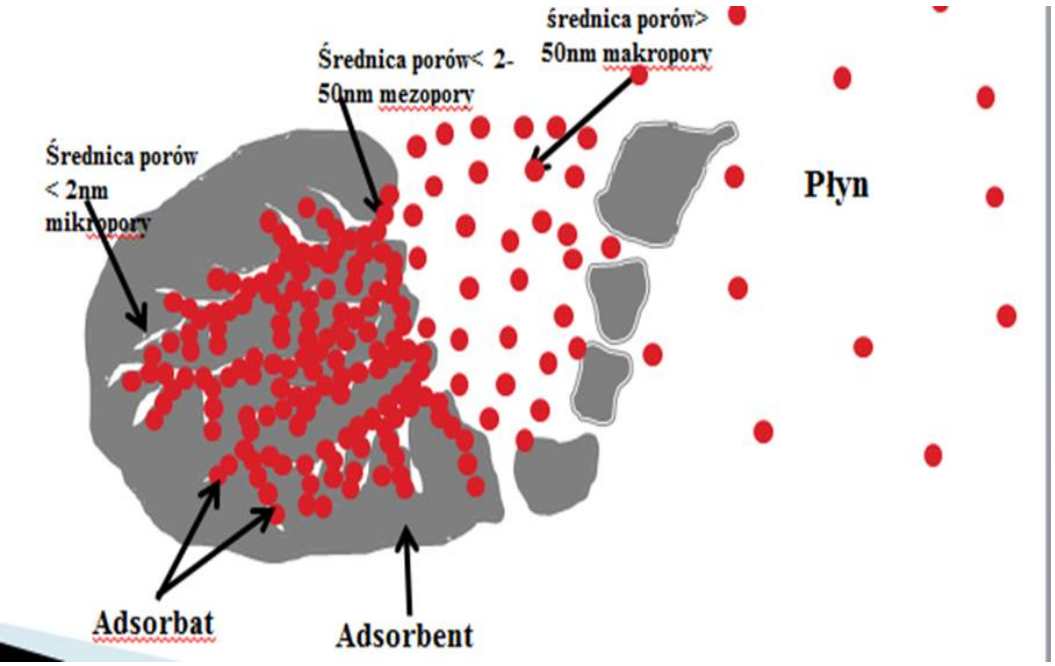


Chłodziarka sprężarkowa vs termiczna





Adsorpcja fizyczna



Adsorpcja – proces wiązania się cząsteczek, atomów lub jonów na powierzchni lub granicy faz fizycznych, powodujący lokalne zmiany stężenia.

Adsorpcji nie należy mylić z **absorpcją**, która jest procesem wnikania do wnętrza fazy.

W wyniku działania sił van der Waalsa (o dużym zasięgu oddziaływania), dochodzi do nagromadzenia się cząsteczek lub atomów jednej substancji na powierzchni ciała silnie higroskopijnego. Substancja adsorbowana zwana jest **adsorbatem**, natomiast ciało, na którym zachodzi proces to **adsorbent**.
Energia uwalniana podczas przemiany jest na poziomie entalpii kondensacji.

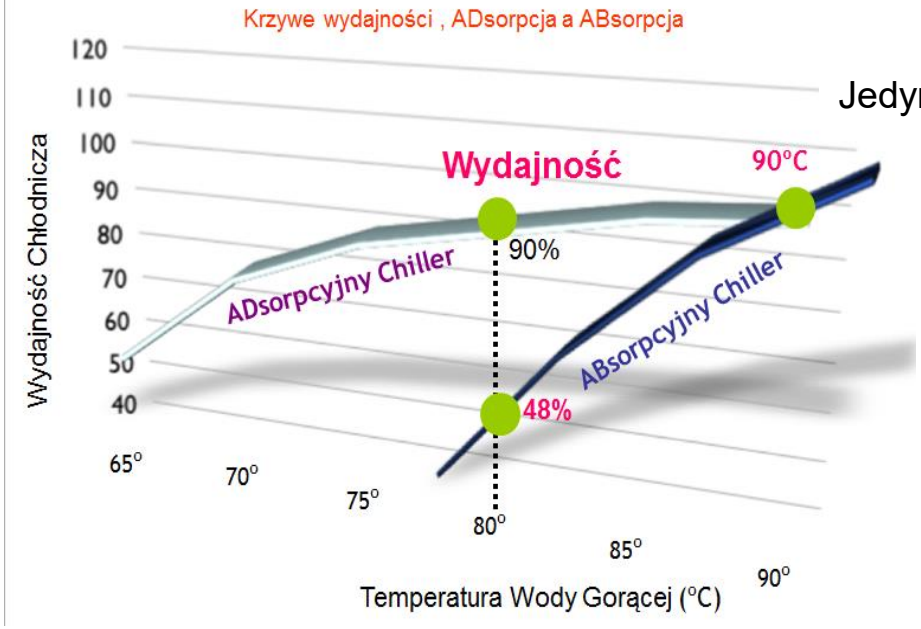
Absorpcja vs Adsorpcja

Zjawiska objętościowe

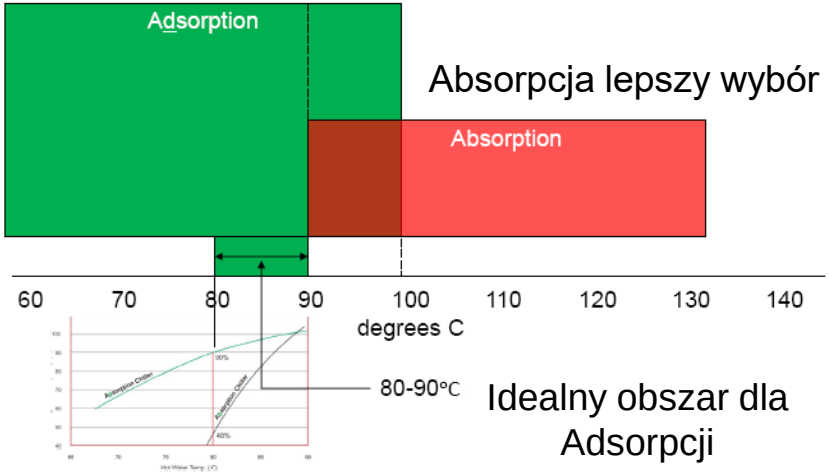
Zjawiska powierzchniowe

Technologie sorpcyjne
Adsorpcja vs Absorpcja

W przypadku, gdy temperatura ciepła odpadowego/napędowego/solarnego ma poniżej 90°C, efektywność przemawia na korzyść urządzeń ADsorpcyjnych, gdy dla temperatur powyżej, znacznie wyższą efektywnością odznaczają się agregaty ABsorpcyjne.



Jedyne rozwiązanie to Adsorpcja

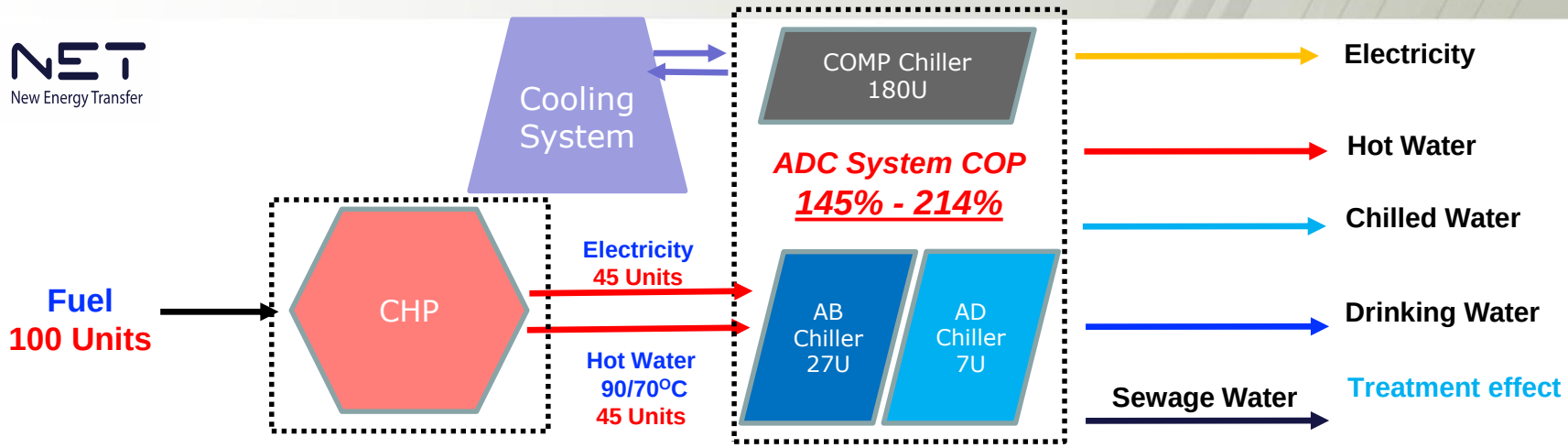


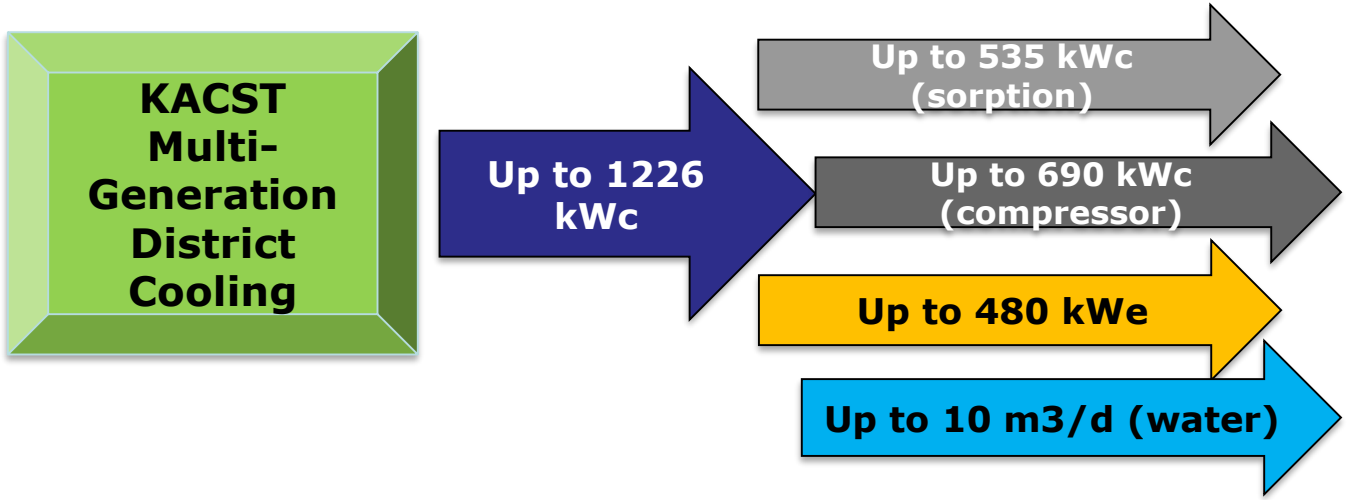
Absorpcja lepszy wybór

Idealny obszar dla Adsorpcji

Źródło: materiały reklamowe firmy Zechik

Sorpcyjny system poligeneracyjny KACST NET

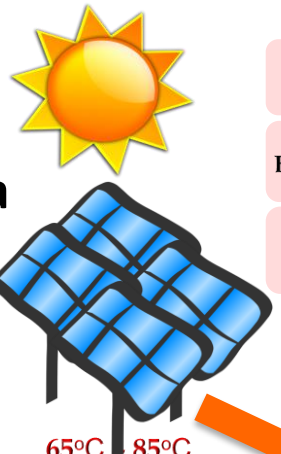




Example: Sorption chiller produces 1000 kW of chilled water using 1500 kW of hot water COP = 1000 kW / 1500 kW = 0,67 or 67%.

Produkcja chłodu i wody pitnej

Energia słoneczna



65°C – 85°C

Źródło wody gorącej

Ciepło odpadowe

Ciepło odpadowe lub Ciepło Solarne

Bardzo niskie zużycie energii elektrycznej

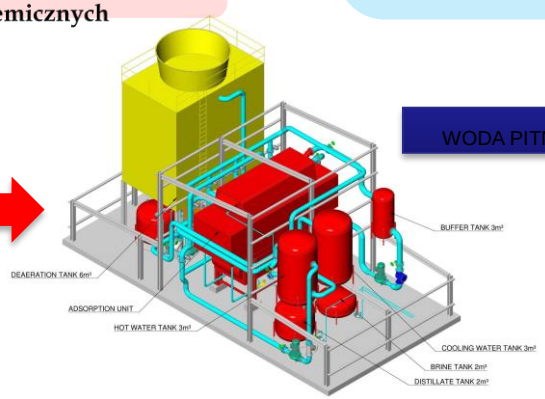
Brak konieczności stosowania dodatków chemicznych

Wysokiej jakości woda destylowana

(TDS = 0 - 5 ppm)

Woda Lodowa o temperaturze 7 °C

Przy zużyciu energii elektrycznej poniżej 1,2 kWh/m³



WODA PITNA

CHŁÓD

NET New Energy Transfer

1.2 MW_c chłodziarka adsorpcyjna KACST NET

Solar Village ADC Plant produces distillate water

KACST Lab Results from September, 2016:

Saline water treatment results:

PH = 6,85

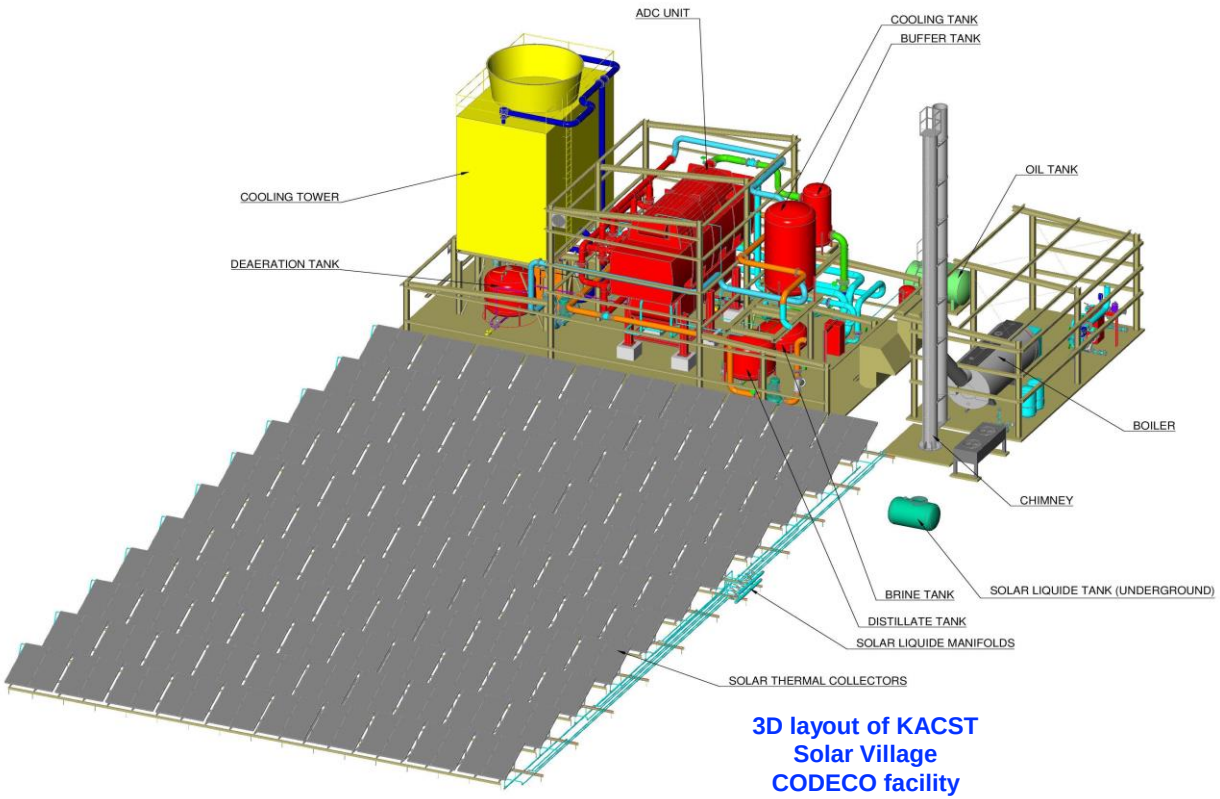
TDS = 3 ppm

Silica = 0,3 ppm

CaCo3 = 25 ppm

CODECO Plant produces Cooling effect !

Measured Chilled water 7 ^{o}C



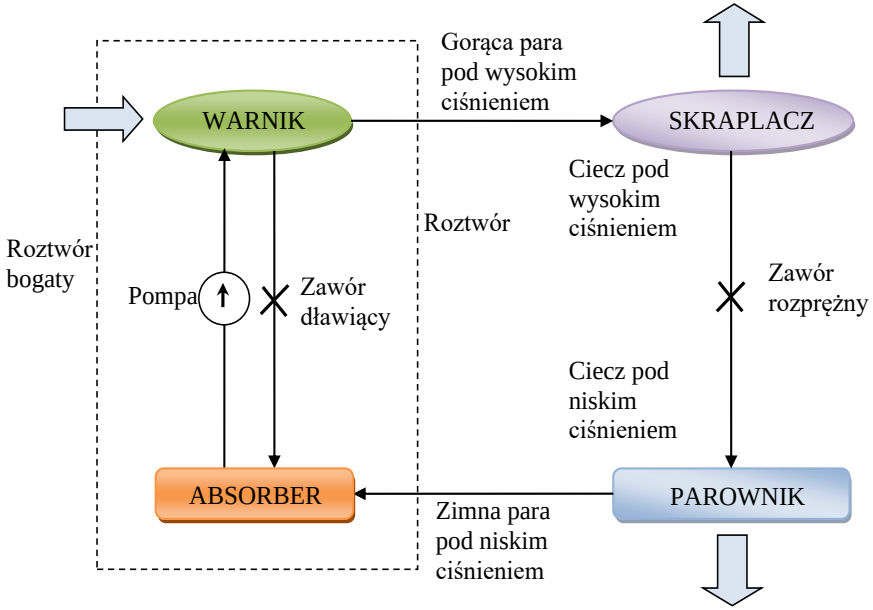
3D layout of KACST Solar Village CODECO facility

مدينة الملك عبدالعزيز للعلوم والتقنية KACST

New Energy Transfer

ADSORPTION Chiller Unit for KACST Solar Village is currently the world largest existing and most advanced adsorption technology with maximum cooling capacity of 1,2 MW

Urządzenia absorpcyjne



- Urządzenia pracują w warunkach głębokiej próżni, osiągającej ciśnienie absolutne na poziomie 0.8 kPa – w wyniku obniżonego ciśnienia, woda odparowuje już w temperaturze 5°C, co pozwala na efektywną produkcję wody lodowej o parametrze 12/7.
- W wyniku zraszania rur wymiennika wodą destylowaną (czynnik chłodniczy) dochodzi do odbioru ciepła doprowadzonego obiegiem powrotnym wody lodowej, które zostaje wykorzystane do odparowania zraszanego czynnika chłodniczego, w wyniku czego dochodzi do schłodzenia obiegu powrotnego wody lodowej z 12°C do 7°C.

Absorpcyjne pompy ciepła

Doprowadzenie →

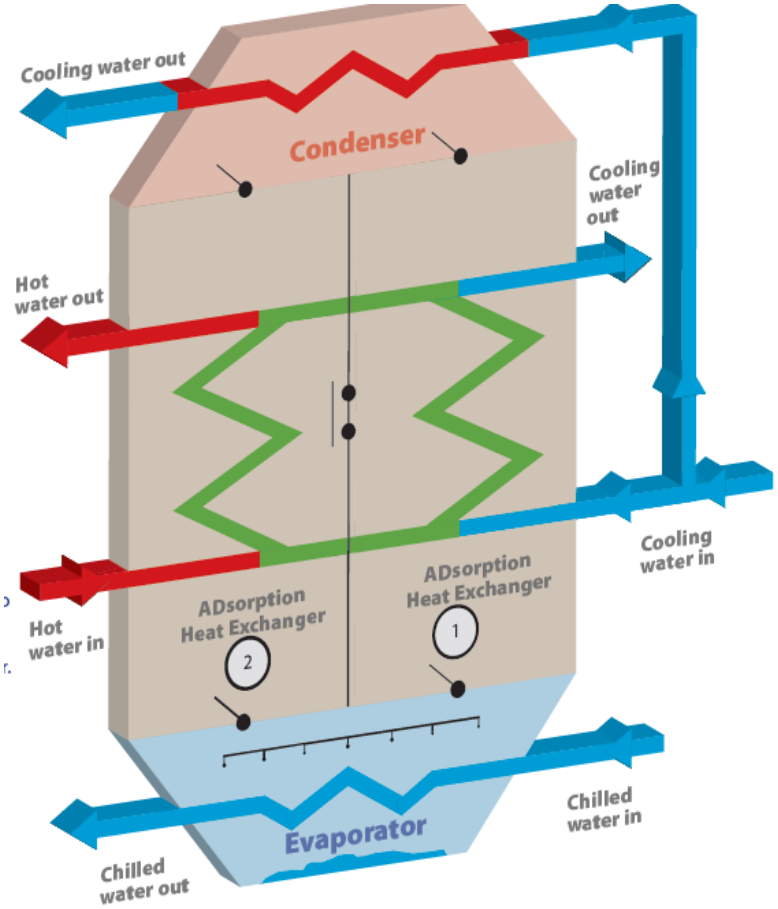
Ciepło użyteczne
Para 1 – 8 Bar
60% ciepła →

Ciepło odpadowe
Woda 40°C/30°C
40% ciepła →

Uzyskujemy →

Ciepło użyteczne
gorąca woda 90°C
→ 100% ciepła użytecznego

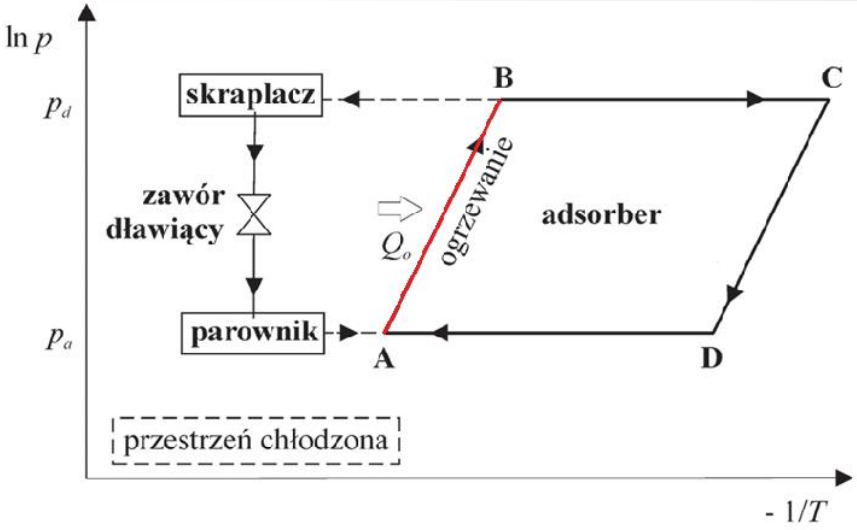
Agregat Adsorpcyjny - Idea

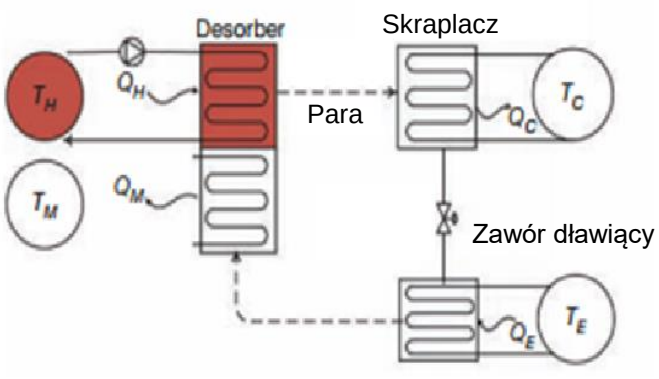


- adsorpcyjne agregaty chłodnicze są urządzeniami, w których proces sprężania czynnika roboczego odbywa się bez wykonania pracy mechanicznej wymaganej do kompresji w urządzeniach zasilanych elektrycznie. W zastępstwie energii mechanicznej, urządzenia te wykorzystują ciepło, dzięki któremu kompresja czynnika odbywa się na zasadzie **„sprężarki termicznej”**.
- urządzenia mogą działać w oparciu o ciepło odpadowe, czyniąc je bardzo ekologicznymi i energooszczędnymi układami chłodniczymi.
- urządzenie bazuje na procesie adsorpcji, w którym to adsorbentem jest ciało stałe silnie higroskopijne, rolę adsorbatu spełnia para wodna

Źródło: Weatherite Manufacturing

Dostarczanie ciepła, sprężanie





W tym etapie złoże adsorpcyjne, po osiągnięciu równowagi adsorpcyjnej zostaje odizolowane, by następnie pobrać ciepło potrzebne do procesu desorpcji

W wyniku dostarczenia do adsorbera ciepła (np. ciepła odpadowego) za pośrednictwem obiegu wody ciepłej, wzrasta temperatura, a co za tym idzie – wzrasta ciśnienie

Jest to zjawisko analogiczne do tego, które zachodzi w chłodniczych urządzeniach sprężarkowych, z tą różnicą, że **kompresja czynnika osiągana jest poprzez dostarczanie ciepła,** a nie pracy mechanicznej

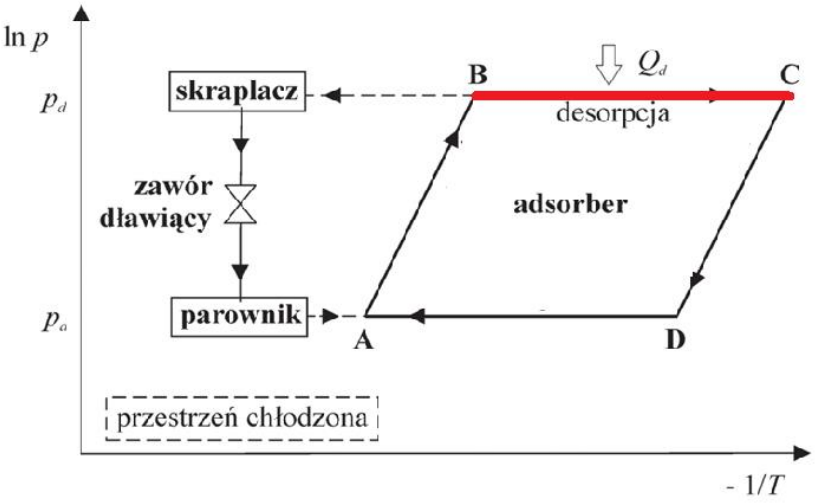
Źródło:K. Wang. *„New Opportunities for Solar Adsorption Refrigeration"* . ASHRAE Journal, September 2011

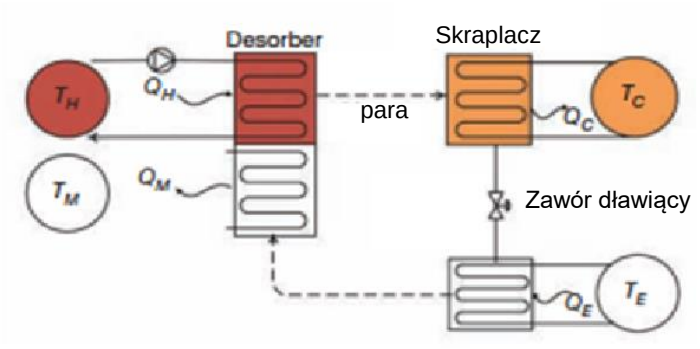
Desorpcja, kondensacja

W kolejnym kroku, ciepło nadal jest doprowadzane do złoża adsorpcyjnego, które zostaje połączone ze skraplaczem za sprawą otwarcia zaworu łączącego oba układy.

W wyniku dostarczania ciepła do adsorbera, zachodzi proces desorpcji, czyli regeneracji złoża. Woda związana na powierzchni adsorbentu paruje i w wyniku różnicy ciśnień pomiędzy układami, kierowana jest do skraplacza.

Para trafiająca do skraplacza kondensuje w wyniku przekazania ciepła skraplania do obiegu wody chłodzącej, połączonej ze skraplaczem. Skroplone pary, w wyniku sił grawitacji oraz różnicy ciśnień pomiędzy skraplaczem, a parownikiem, trafiają do parownika.





Źródło:K. Wang. *„New Opportunities for Solar Adsorption Refrigeration"* . ASHRAE Journal, September 2011

Desorpcja – sposoby realizacji procesu

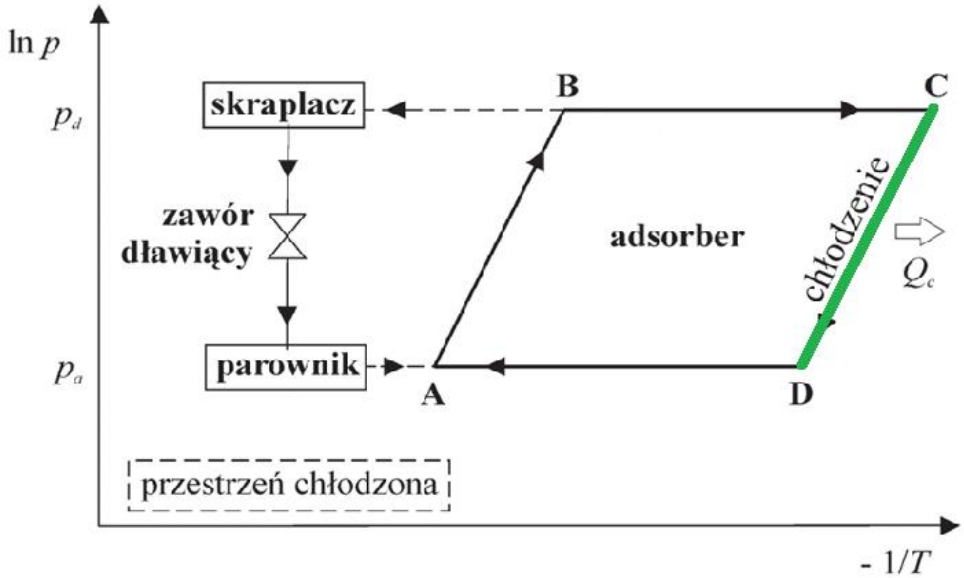
- Poprzez podgrzew za pomocą doprowadzenia strumienia gorącego płynu (**Thermal swing**);

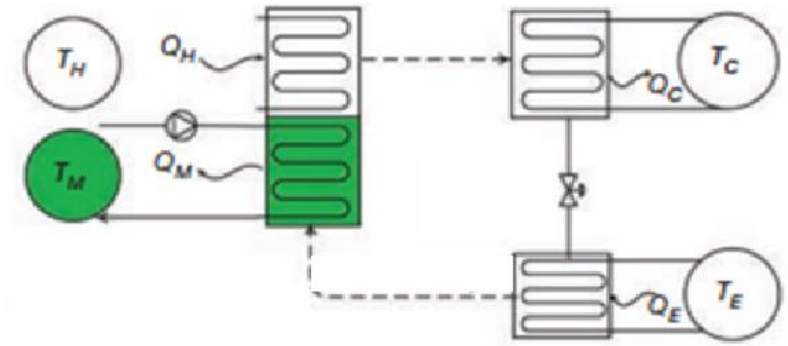
- Poprzez zmniejszanie ciśnienia przy stałej temperaturze, a następnie oczyszczanie w niskim ciśnieniu (**Pressure swing**);

- Oczyszczanie złoża nie adsorbującym, inertnym gazem w warunkach stałej temperatury i ciśnienia (przedmuchiwanie), przy czym ta metoda ma zastosowanie, gdy zaadsorbowane cząstki są słabo związane z adsorbentem;

- Kolejna z metod jest analogiczna do powyższej, z tą różnicą, że podawany strumień gazu nie jest inertny. Zawiera cząstki pochłaniające zaadsorbowaną wcześniej substancję oczyszczając adsorbent (**Displacement desorption**).

Schładzanie, rozprężanie





Po zregenerowaniu złoża adsorpcyjnego, jest ono ponownie izolowane i chłodzone obiegiem chłodzącym adsorber, celem przygotowania go do procesu adsorpcji.

Schładzanie niesie za sobą spadek ciśnienia do wartości ciśnienia panującego w skraplaczu.

Jest to proces ekspansji, analogiczny do rozprężania realizowanego w ramach chłodziarek sprężarkowych.

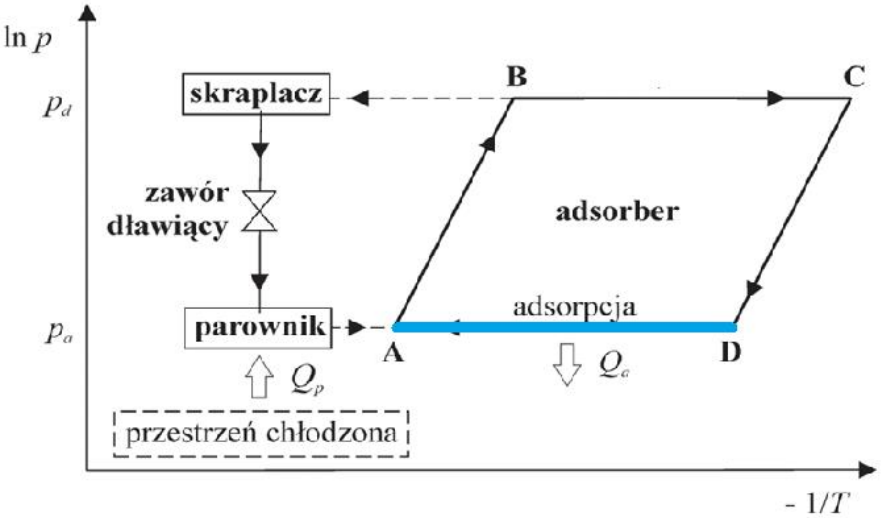
Źródło:K. Wang. *„New Opportunities for Solar Adsorption Refrigeration"* . ASHRAE Journal, September 2011

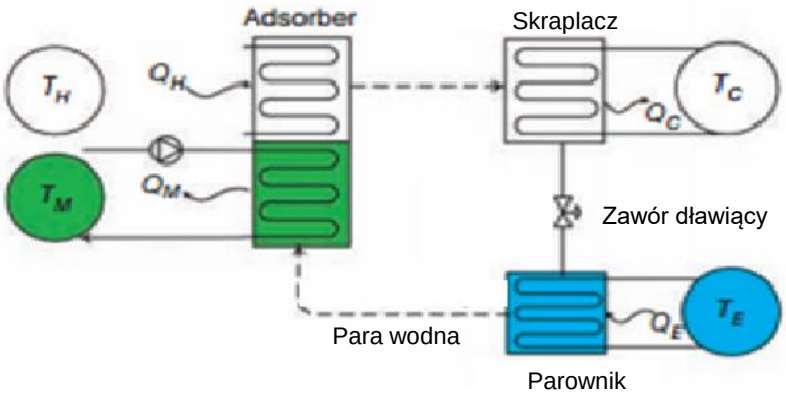
Parowanie, produkcja chłodu, adsorpcja

W kolejnym etapie, schładzany adsorber zostaje połączony z parownikiem, w którym panuje bardzo niskie ciśnienie. Ten fakt sprawia, że możliwe jest odebranie ciepła parowania w niskiej temperaturze.

Ciepło to pobierane jest z obiegu wodnego doprowadzonego do parownika, celem produkcji wody lodowej, wykorzystywanej w dalszym etapie na potrzeby klimatyzacji/chłodzenia. W wyniku poboru ciepła parowania, zachodzi przemiana fazowa wody do postaci gazowej (para wodna).

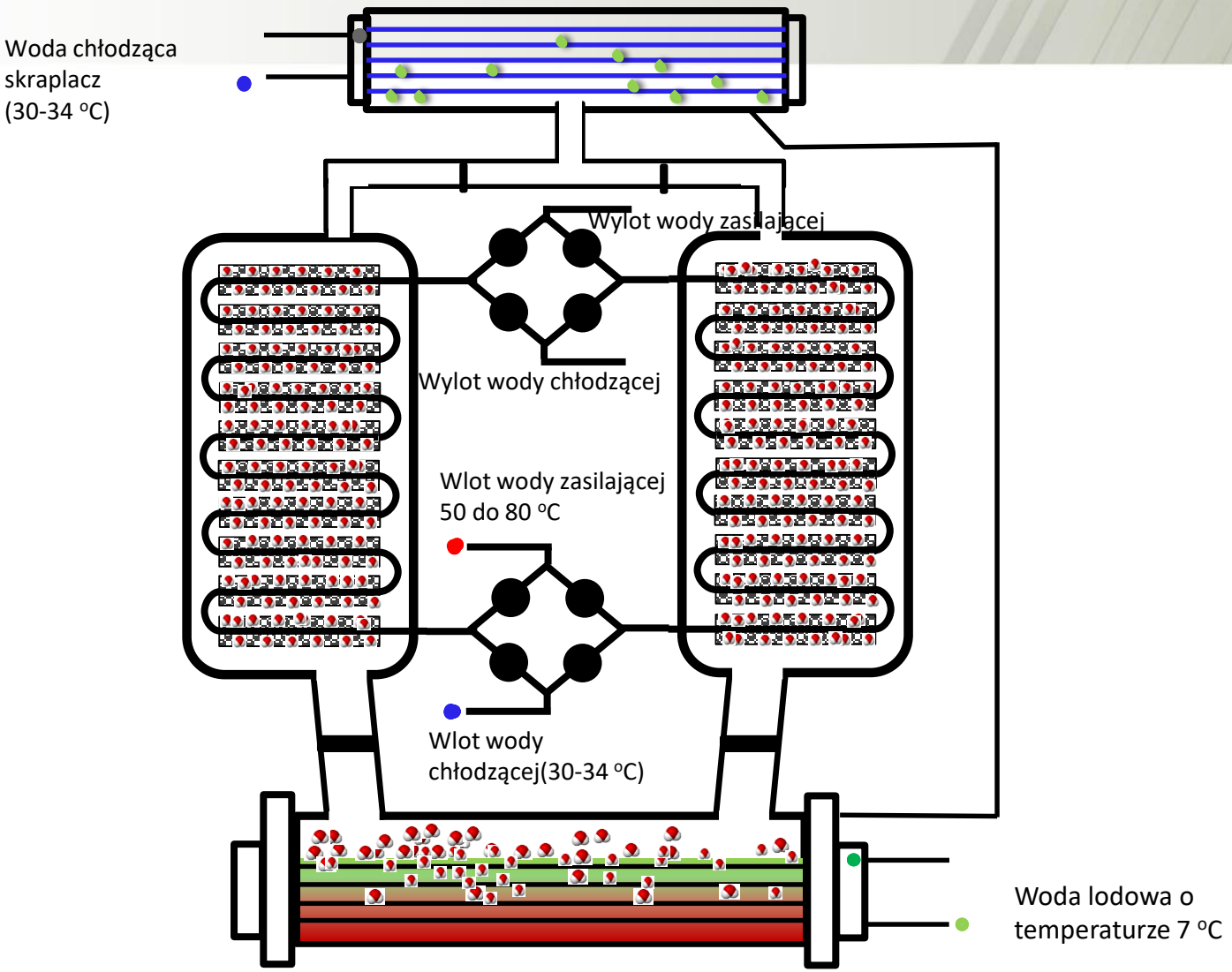
Powstała para adsorbowana jest przez złoże do momentu osiągnięcia równowagi adsorpcyjnej.





Źródło:K. Wang. *„New Opportunities for Solar Adsorption Refrigeration"* . ASHRAE Journal, September 2011

Zasada działania



Przykładowe układy adsorbat - adsorbent

Tabel

Para adsorbent–adsorbat	Temperatura regeneracji	Zastosowanie
Węgiel aktywny –metanol	80–100 °C	Produkcja lodu(–10°C)
Chlorek wapnia –amoniak	120–150°C	Produkcja lodu (–10 do –20°C)
Zeolit–woda	< 90°C	Woda lodowa do klimatyzacji
SWS*– woda	80–100 °C	Urządzenia chłodnicze i pompy ciepła
Silikażel–woda	< 90°C	Woda lodowa do klimatyzacji

*Selective Water Sorbents – podłoża t.j. silikażel, tlenek glinu impregnowane nieorganicznymi solami ($CaCl_2$, LiBr, $MgCl_2$, $MgSO_4$, $Ca(NO_3)_2$)

Źródło:

[1]Wang R.Z., Xia Z.Z., Wang L.W., Lu Z.S., Li S.L., Li T.X., Wu J.Y., He S.: Heat transfer design in adsorption refrigeration systems for efficient use of low-grade thermal energy. Energy, Vol. 36, pp. 5425–5439, 2011.
[2]Myat A., Ng K.C., Thu K., Young-Deuk K.,. Experimental investigation on the optimal performance of Zeolite–water adsorption chiller., *Applied Energy*,102,582-590, 2013
[3]Akisawa A, Miyazaki T : Multi-bed adsorption heat pump cycles and their optimal operation. In: Advances in Adsorption Technology,Editors: Saha B.B., Ng K.C. Nova Science Publishers,2010,str.36

Parametry wydajności agregatów adsorpcyjnych

- Współczynnik efektywności chłodniczej **COP (Coefficent of Performance)**

$$COP = \frac{CC}{HP} = \frac{\dot{m}_{ch} \cdot cp_{ch} \cdot \Delta T_{ch}}{\dot{m}_{h} \cdot cp_{h} \cdot \Delta T_{h}}$$

Gdzie: CC – wydajność chłodnicza; HP – moc grzewcza; $m_{ch/h}$ – strumień masy wody zasilającej/chłodzącej ; $cp_{ch/h}$ – ciepło właściwe wody zasilającej/chłodzącej w temp. wejścia;

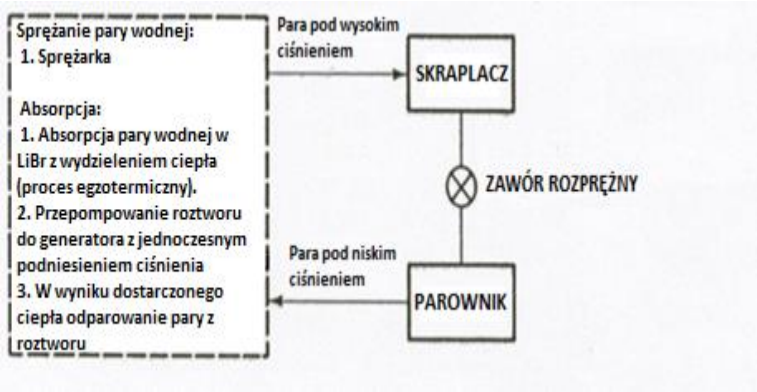
$\Delta T_{ch/h}$ – różnica temperatury zasilającej/chłodzącej na wejściu i wyjściu

- **SCP (Specific Cooling Power)** – przedstawia zdolność agregatu do uzyskania efektu chłodzenia w odniesieniu do masy użytego adsorbentu.

$$SCP = \frac{Q_{chill}}{M_{total}}$$

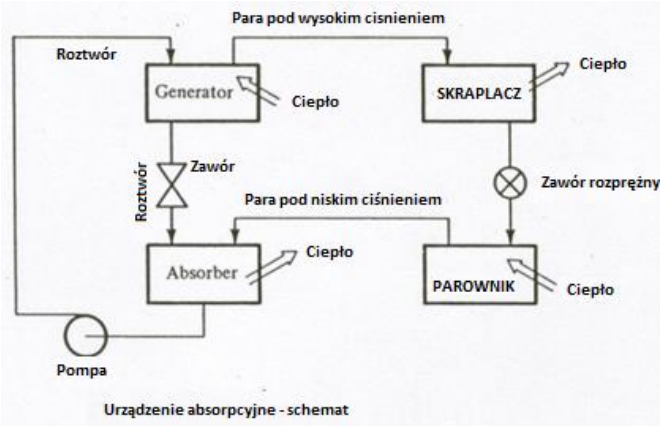
gdzie: Q_{chill} – wydajność chłodnicza; M_{total} – masa adsorbentu

Współczynnik efektywności chłodniczej – podstawy termodynamiczne

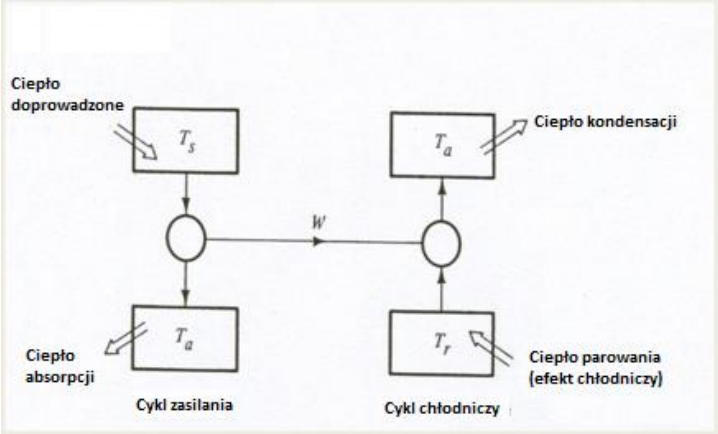


$$COP = \frac{q_e}{q_g} = \frac{WT_r}{T_a - T_r}\,\frac{T_s - T_a}{WT_s} = \frac{T_r(T_s - T_a)}{T_s(T_a - T_r)}$$

T_r – temperatura wody lodowej
T_s – temperatura źródła ciepła
T_a – temperatura otoczenia
q_e – ciepło odebrane przez parownik
q_g – ciepło dostarczone do generatora



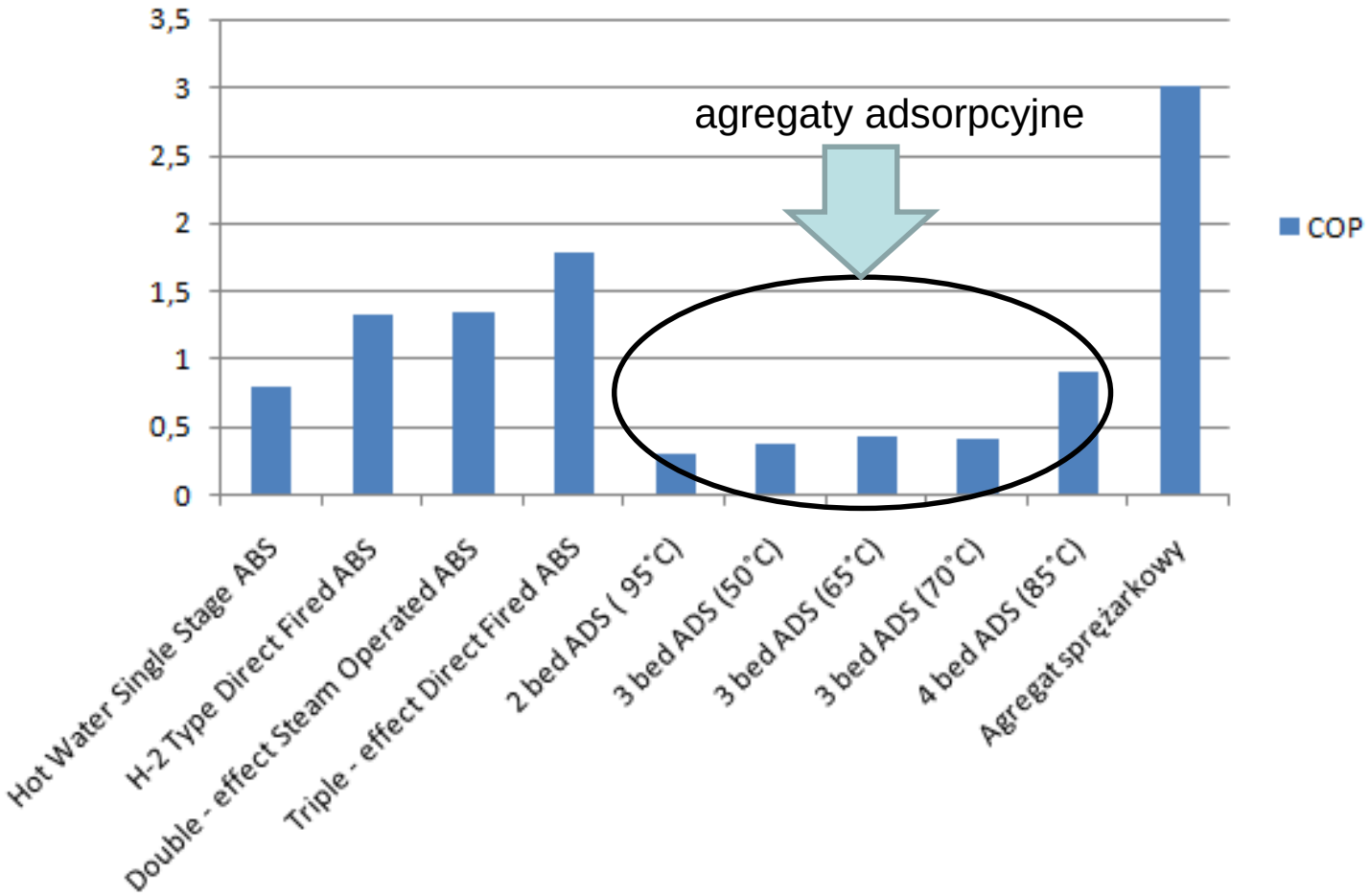
Urządzenie absorpcyjne - schemat



Obliczyć COP idealnego układu chłodniczego, który posiada źródło ciepła o temperaturze 100 ° C, temperatura chłodzenia 5 ° C i 30 °C otoczenia

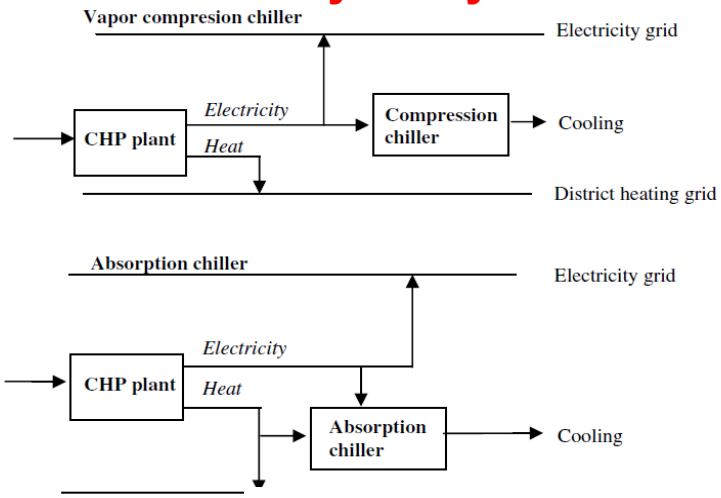
$$COP = \frac{(5+273.15)(100-30)}{(100+273.15)(30-5)} = 2.09$$

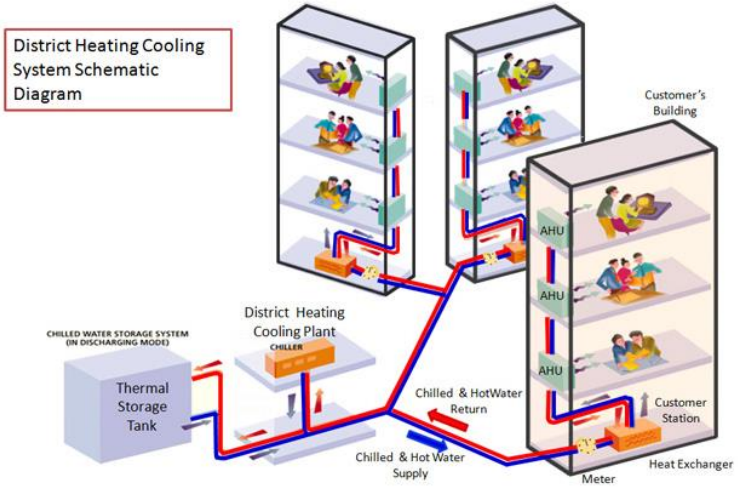
Zestawienie COP dla agregatów chłodniczych



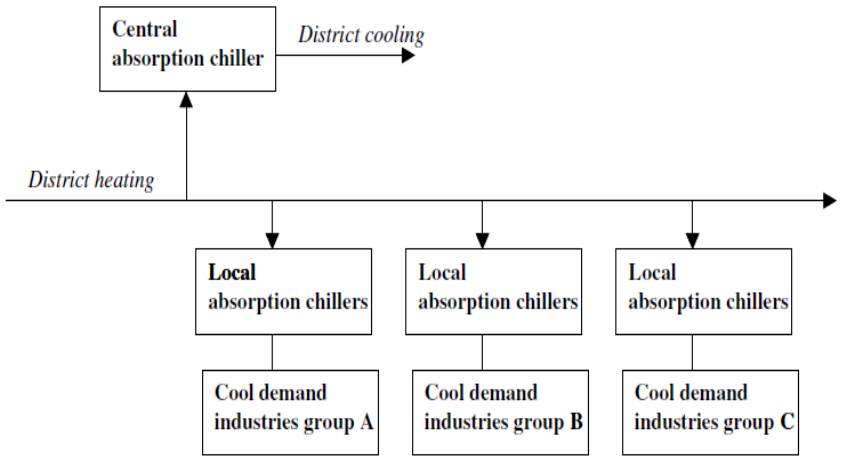
System dystrybucji chłodu

Centralne systemy chłodzenia





Lokalne systemy chłodzenia



Źródło: http://www.keppeldhcs.com.sg/

Adsorpcyjny agregat chłodniczy ze złożami zorientowanymi poziomo

Specyfikacja techniczna urządzenia:

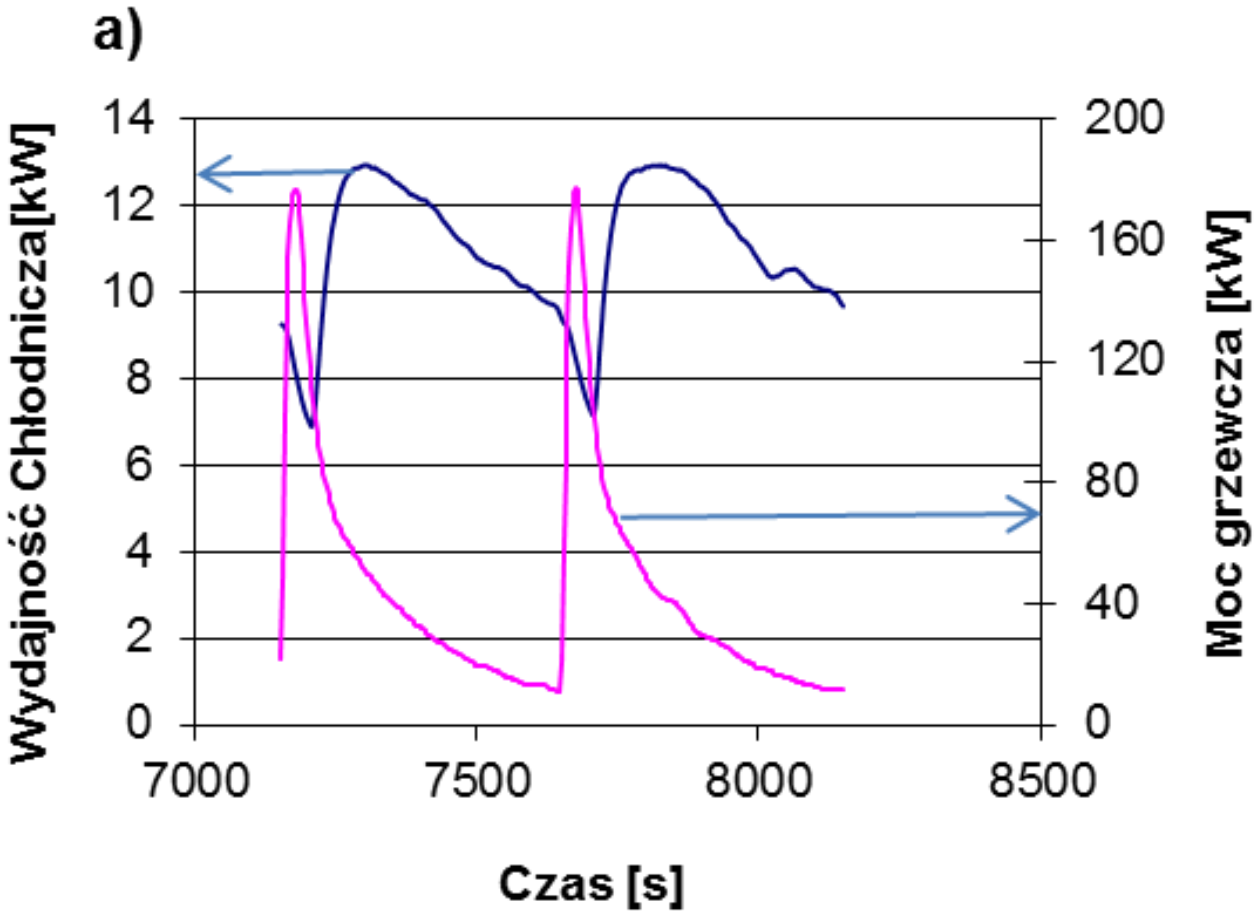
Moc chłodnicza nominalna (dla temp. wody grzewczej 70 st. C):	90 kW
Przedział roboczy temperatury wody grzewczej:	60 – 90 st. C
Równoczesna produkcja wody schładzanej (lodowej) w dwóch przedziałach temperatur:	
Woda schładzana (lodowa) I :	7 – 12 st. C
Woda schładzana (lodowa) II :	15 – 20 st. C
Nominalna produkcja słodkiej wody:	>5 ton/dobę
Orientacyjne gabaryty sekcji sorpcyjnej i hydraulicznej (D/S/W):	12/5/5 m
Masa całkowita sekcji hydraulicznej i sorpcyjnej:	<8000 kg

Agregaty adsorpcyjne

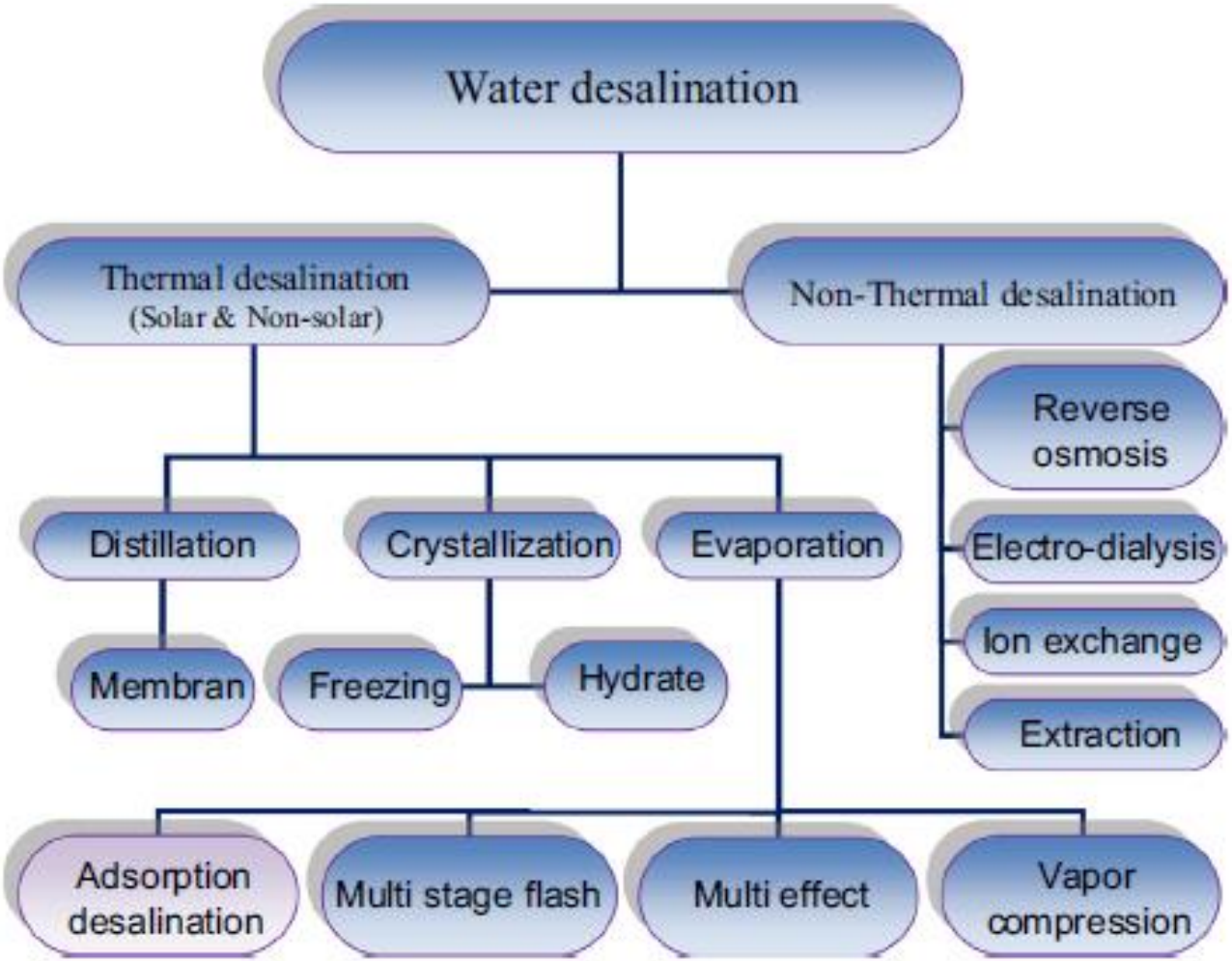
Trójzłożowy agregat adsorpcyjny 90kW złoża pionowe Wrocław

Elektrociepłownia ”Zielona Góra” S.A

Zmienność mocy chłodniczej i grzewczej w funkcji czasu

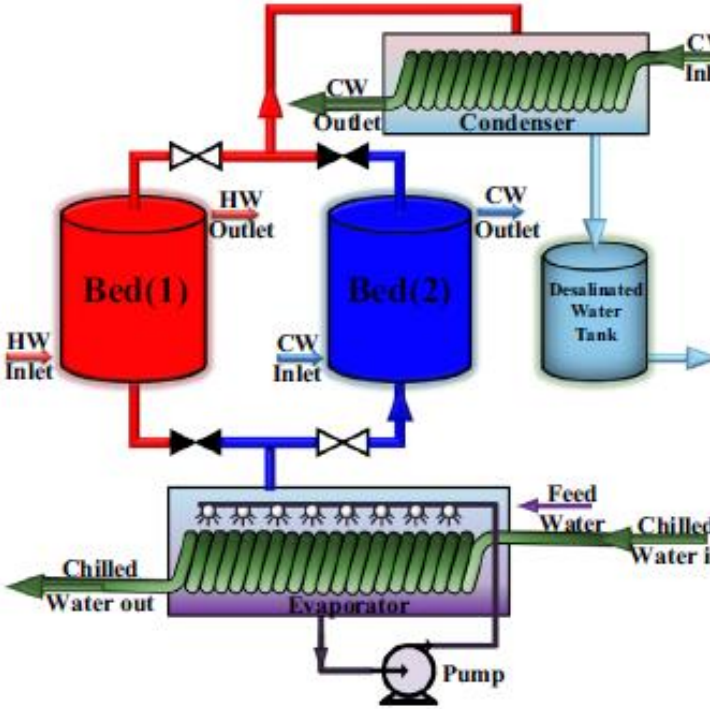


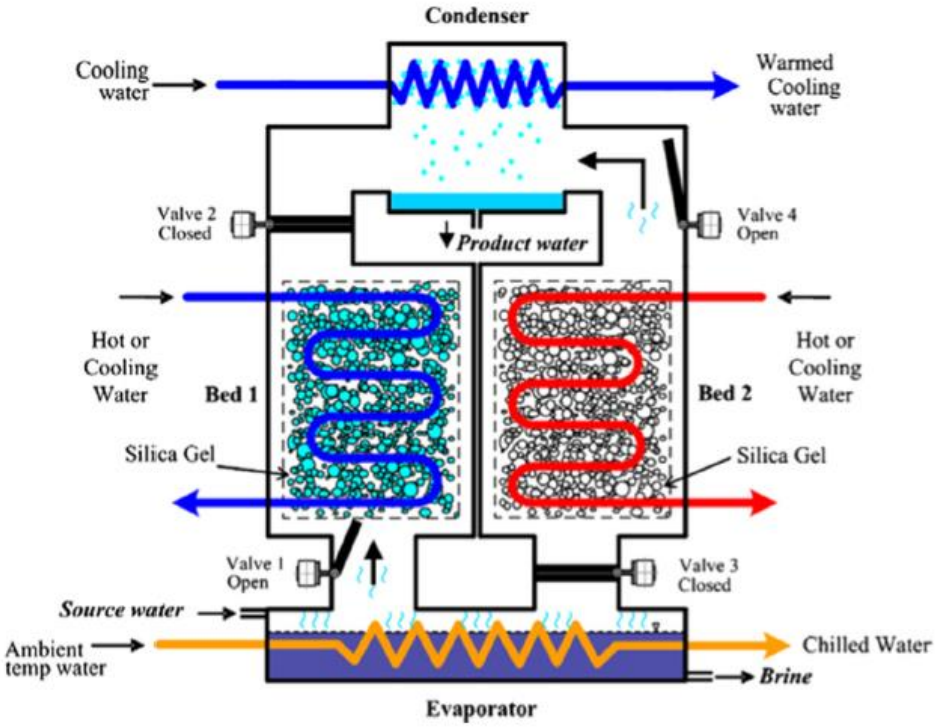
Metody odsalania wody



Alsaman A.S. et al. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 58, 2016

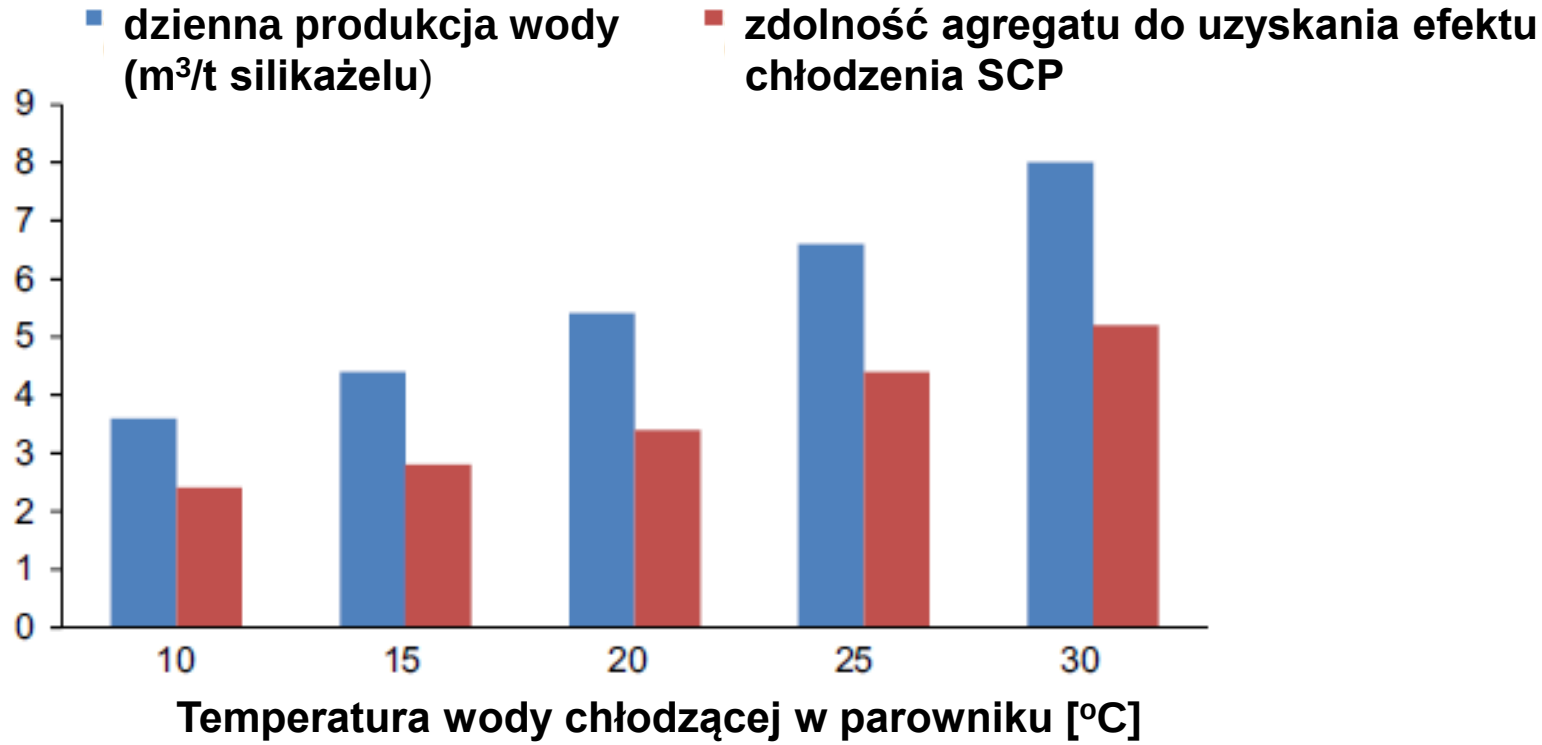
Agregat Adsorpcyjny z funkcją odsalania





Alsaman A.S. et al. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 58, 2016

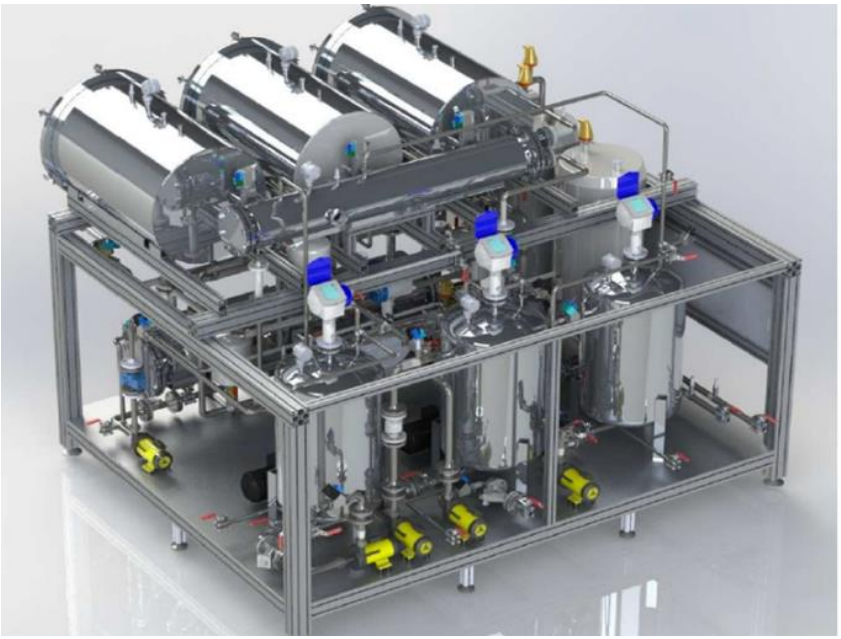
Produkcja woda i chłodu dla gorącej wody na wlocie (50-85 °C) i różnych temperatur wody chłodzącej



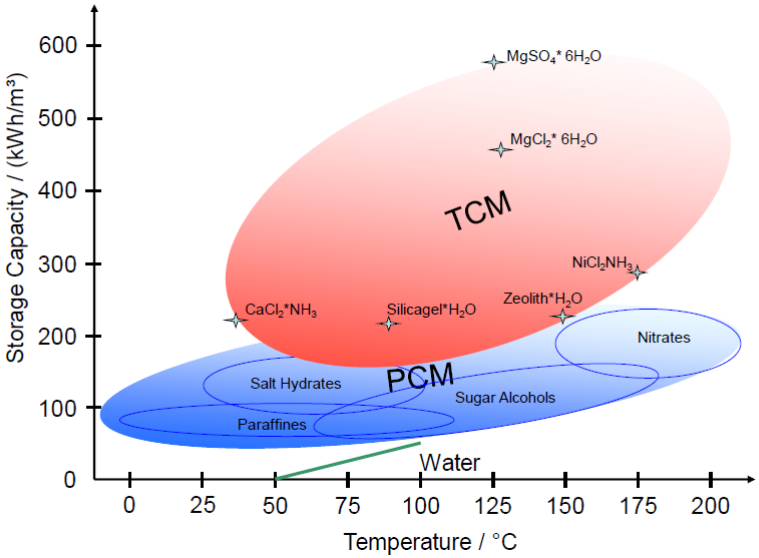
Dzienna produkcja wody wynosi 8.1 m^3 do 26 m^3 dla temperatury wody gorącej na wlocie odpowiednio 50 °C do 85 °C
Zapotrzebowanie na energię elektryczną – 1.38 kWh/m^3

Alsaman A.S. et al. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 58, 2016

Chłodziarka adsorpcyjna z funkcją odsalania w Centrum Energetyki AGH



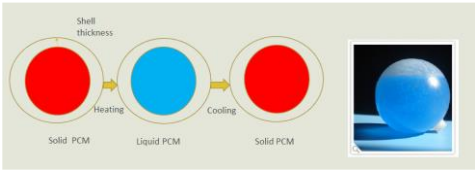
Magazyny ciepła - TCM,PCM



Magazyn termochemiczny TCM

Termochemiczne magazyny ciepła pracują w oparciu o odwracalną reakcję chemiczną wykorzystywaną dla przechowywania i uwalniania zawartej w określonych substancjach energii.
Zasada chemicznej akumulacji ciepła wykorzystuje ciepło endotermicznych reakcji.

PCM



- Dla różnicy temperatur 20°C, 1 GJ ciepła jest magazynowany w objętości 1,6 m^3 PCM – to sześciokrotnie mniej, niż gdybyśmy magazynowali ciepło w wodzie
- W jednym zbiorniku (ok. 24 ton) możemy magazynować do ok. 7 GJ ciepła
- Ciepło może być przechowywane przez okres ok. 2 tygodni (straty cieplne nie przekraczają 2%/dobę)

AGH

KlastER

AGH

NARODOWE CENTRUM BADAŃ JĄDROWYCH

MINISTERSTWO AKTYWÓW PAŃSTWOWYCH

Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Projekt współfinansowany ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju w ramach programu badań naukowych i prac rozwojowych „Społeczny i gospodarczy rozwój Polski w warunkach globalizujących się rynków” GOSPOSTRATEG