

Układy poligeneracyjne do skojarzonej produkcji energii elektrycznej, ciepła i chłodu

Abstrakt: Najpopularniejszym rozwiązaniem trójgeneracyjnym jest skojarzenie generatora energii elektrycznej, najczęściej silnika gazowego, z węzłem odbioru ciepła oraz z absorpcyjnym agregatem chłodniczym wykorzystującym do produkcji wody lodowej wodę gorącą. Rozwiązania tego typu odznaczają się wysoką efektywnością energetyczną, jak również doskonałą elastycznością pracy, bowiem w okresie letnim nadwyżka produkowanego ciepła wykorzystywana jest przez agregat absorpcyjny do produkcji chłodu, przez co znacznej redukcji ulega zapotrzebowanie na energię elektryczną na cele chłodnicze. W pracy zaprezentowano system do skojarzonej produkcji energii elektrycznej, ciepła i chłodu z dodatkową funkcją odsalania wody oraz oczyszczania ścieków. System pozwala na osiągnięcie bardzo wysokiej efektywności energetycznej dzięki racjonalnemu wykorzystaniu ciepła odpadowego generowanego przez silniki Diesla.

Słowa kluczowe: poligeneracja, sorpcja, produkcja chłodu i wody pitnej

W ostatnim czasie coraz większym zainteresowaniem cieszą się rozwiązania trójgeneracyjne, będące skojarzeniem produkcji trzech źródeł energii, są to kolejno: energia elektryczna, ciepło oraz chłód w postaci wody lodowej. Najpopularniejszym rozwiązaniem trójgeneracyjnym jest skojarzenie generatora energii elektrycznej, najczęściej silnika gazowego, z węzłem odbioru ciepła oraz z absorpcyjnym agregatem chłodniczym wykorzystującym do produkcji wody lodowej wodę gorącą. Rozwiązania tego typu odznaczają się wysoką efektywnością energetyczną, jak również doskonałą elastycznością pracy, bowiem w okresie letnim nadwyżka produkowanego ciepła wykorzystywana jest przez agregat absorpcyjny do produkcji chłodu, przez co znacznej redukcji ulega zapotrzebowanie energii elektrycznej na cele chłodnicze. W okresie zimowym, gdy spada zapotrzebowanie na chłód, całość produkowanego strumienia wody gorącej wykorzystywana jest na cele ciepłownicze. Obszar wiedzy z zakresu silników wykorzystywanych do produkcji energii elektrycznej i ciepła użytecznego jest dość wysoki, w związku

z czym warto poświęcić uwagę urządzeniom sorpcyjnym wykorzystywanym do efektywnej produkcji chłodu przy wykorzystaniu ciepła jako źródła „zasilania” w zastępstwie energii elektrycznej.

Sorpcyjne agregaty chłodnicze

Najpopularniejszymi urządzeniami wykorzystywanymi do produkcji energii elektrycznej są sprężarkowe agregaty chłodnicze wykorzystujące lewobieżny obieg chłodniczy i bazujące na energii elektrycznej jako głównym źródle zasilania. Energia elektryczna w tym przypadku wykorzystywana jest do napędu sprężarki zasilającej pary powstałe w parowniku i transportującej je po uprzednim sprężeniu do skraplacza, w którym pary ulegają kondensacji w wyniku doprowadzenia chłodu i odbierają ciepło skraplania par czynnika chłodniczego.

W przypadku zastosowania urządzeń sorpcyjnych zasada działania jest podobna do tej, którą reprezentują sprężarkowe agregaty chłodnicze bazujące na lewobieżnym obiegu chłodniczym, z tą jednak różnicą, że w zastępstwie sprężarki mechanicznej wykorzystywane są właściwości sorpcyjne, które w przypadku urządzeń chłodniczych możemy scharakteryzować jako „sprężarkę chemiczną”. Urządzenia te 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°C. 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 do 7°C. Powstałe w ten sposób pary zostają pochłonięte na skutek następujących procesów:

- absorpcji (w przypadku wykorzystania absorpcyjnych agregatów chłodniczych),
- adsorpcji (w przypadku wykorzystania adsorpcyjnych agregatów chłodniczych).

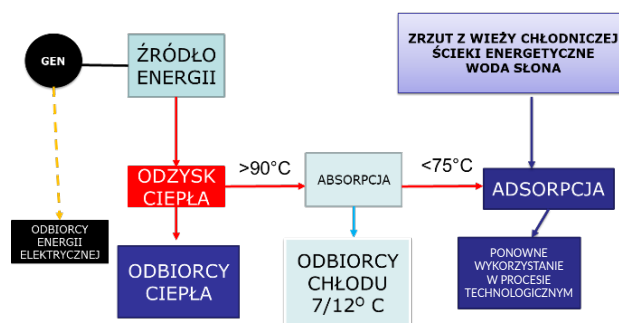
Adsorpcja to proces wiązania się cząsteczek, atomów lub jonów na powierzchni lub granicy faz fizycznych, powodujący lokalne zmiany stężenia. Adsorpcji nie należy mylić z **absorpcją**, która jest procesem wnikania do wnętrza fazy. W wyniku działania sił van der Waalsa (o dużym zasięgu oddziaływania) dochodzi do nagromadzenia się cząsteczek lub atomów jednej substancji na powierzchni ciała silnie higroskopijnego. Substancja adsorbowana zwana jest adsorbentem, natomiast ciało, na którym zachodzi proces, to adsorbent. Uwalniana podczas przemiany energia jest na poziomie entalpii kondensacji.

Układów kogeneracyjnych – oprócz wykorzystania do skojarzonej produkcji energii elektrycznej, ciepła i chłodu – można używać do produkcji wody odsolonej lub termicznego oczyszczania ścieków energetycznych. Mianem **poligeneracji** określa się produkcję w jednym procesie technologicznym kilku nośników w postaci:

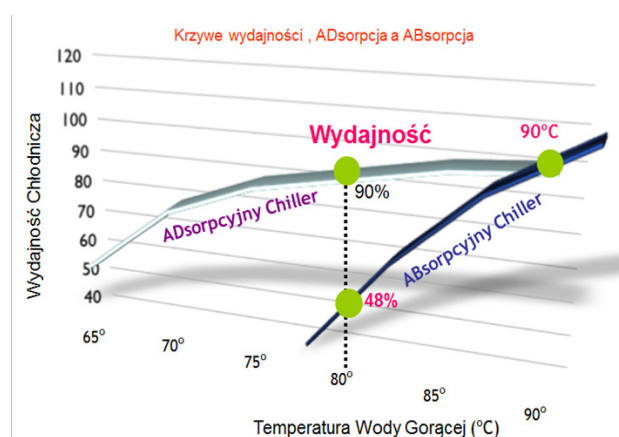
- ciepła,
- chłodu,
- energii elektrycznej,
- wody pitnej lub oczyszczania ścieków,
- nowych produktów (SNG, metanol, etanol, wódór, sprężone powietrze itd.).

Schemat poligeneracji sorpcyjnej przedstawia Rys. 1.

W przypadku gdy temperatura ciepła odpadowego/napędowego/solarnego jest niższa niż 90°C, efektywność przemawia na korzyść urządzeń adsorpcyjnych, podczas gdy dla temperatur powyżej tego poziomu znacznie wyższą efektywnością odznaczają się agregaty absorpcyjne, co widać na Rys. 2 (Zechik 2020).



Rys. 1. Poligeneracja sorpcyjna



Rys. 2. Krzywe wydajności chłodziarek adsorpcyjnych i absorpcyjnych

Jak widać, wskazanym przedziałem temperaturowym dla układów adsorpcyjnych jest 80–90°C. Powyżej tej temperatury należy używać układów absorpcyjnych. Natomiast jedynym rozwiązaniem sorpcyjnym poniżej 80°C jest adsorpcja.

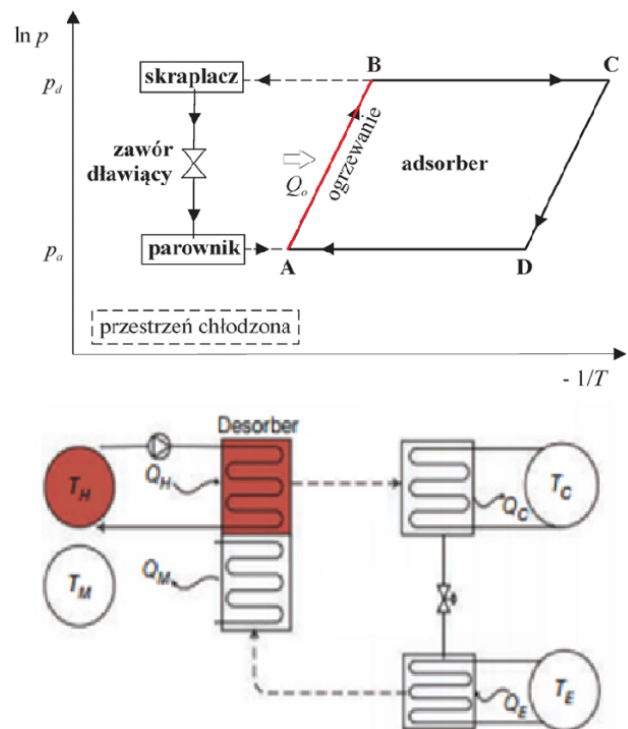
Absorpcyjne agregaty wody lodowej

Urządzenia te wykorzystują roztwór soli bromo-litowej, jako substancji charakteryzującej się bardzo silnym powinowactwem, do pochłaniania pary wodnej – roztwór ten jest w stanie pochłoniąć nawet 0,72 g pary wodnej na 1 g substancji. Pary powstałe w komorze parownika w wyniku odbioru ciepła z obiegu powrotnego wody lodowej zostają zaadsorbowane przez roztwór bromku litu, którego pierwotne stężenie wynosi do 62%. W wyniku pochłaniania par przez roztwór w komorze zwanej „absorberem” stężenie roztworu maleje do

zastąpiona adsorpcją pary wodnej na powierzchni sorbentu (najczęściej jest to *silica gel* – żel krzemionkowy). O ile w przypadku agregatów absorpcyjnych mamy do czynienia z ciągłym procesem, o tyle w przypadku agregatów adsorpcyjnych tryb pracy jest cykliczny. Kolejną istotną różnicą jest fakt, iż woda gorąca wykorzystywana do regeneracji sorbentu może mieć temperaturę poniżej 90°C i zejść nawet do poziomu 65°C . Pary powstałe w parowniku zostają pochłonięte przez ciało stałe w postaci sorbentu, do momentu osiągnięcia stanu nasycenia będącego najczęściej na poziomie $0,15\text{ g}$ pochłoniętej pary wodnej na 1 g sorbentu. Po pełnym nasyceniu konieczna jest regeneracja sorbentu i przygotowanie go do następnego cyklu adsorpcji, co odbywa się po odseparowaniu złoża (komory wypełnionej sorbentem pochłaniającą parę wodną z parownika) od komory parownika. Następnie do złoża zostaje doprowadzona woda gorąca (o temperaturze $65\text{--}85^{\circ}\text{C}$) w celu osiągnięcia warunków nasycenia zaadsorbowanej pary wodnej oraz jej desorpcji (odparowaniu z powierzchni sorbentu) w kierunku skraplacza, w którym para zostaje schłodzona do warunków nasycenia, a następnie skroplona. Ponieważ agregaty adsorpcyjne wykorzystują całkowicie bezpieczny dla zdrowia człowieka żel krzemionkowy, podczas gdy agregaty absorpcyjne wykorzystują toksyczny roztwór bromku litu, te pierwsze mogą z powodzeniem zostać wykorzystane do produkcji wody odsolonej. Sprawia to, że zyskują one dualną funkcję, tj. następuje jednoczesna produkcja chłodu i wody odsolonej. Jest to możliwe w sytuacji, gdy czynnik chłodniczy nie krąży w obiegu zamkniętym, ale jest doprowadzany do parownika i wyprowadzany ze skraplacza poza urządzenie – innymi słowy, para generowana w komorze parownika może powstawać w wyniku doprowadzenia wody słonej lub zanieczyszczonej. Tak doprowadzony czynnik ulega odparowaniu (czysty destylat w postaci pary jest pochłaniany przez sorbent, nieodparowane sole/zanieczyszczenia gromadzą się na dnie parownika w postaci zagęszczonej solanki), zaadsorbowaniu i w ostatniej fazie – skropleniu. Skroplona para to wysokiej jakości woda destylowana o zawartości cząstek stałych na poziomie poniżej 15 mg/l . W ten sposób

mamy do czynienia z możliwością jednoczesnej produkcji wody lodowej i wody odsolonej, ponieważ ciepło dostarczone w obiegu powrotnym wody lodowej wykorzystywane jest do odparowania czystego destylatu z powierzchni zraszanej na powierzchnię wymiany cieplnej parownika wody słonej.

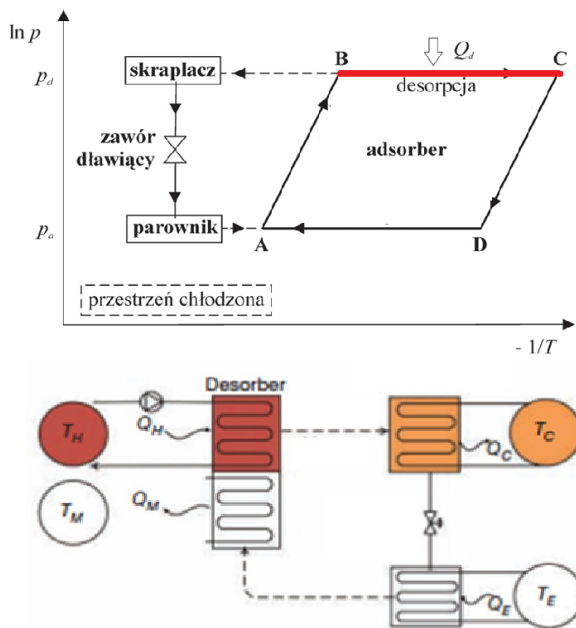
Pierwszym etapem procesu, pokazanym na Rys. 4, jest dostarczanie ciepła i sprężanie (Wang, Vineyard 2011). W tym odcinku złoże adsorpcyjne, po osiągnięciu równowagi adsorpcyjnej, zostaje odizolowane, by następnie pobrać ciepło potrzebne do procesu desorpcji. W wyniku dostarczenia do adsorbera ciepła (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 osiągniata jest poprzez dostarczanie ciepła, a nie pracy mechanicznej.



Rys. 4. Dostarczanie ciepła i sprężanie

Kolejny etap pokazany na Rys. 5 to desorpcja i kondensacja. 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.

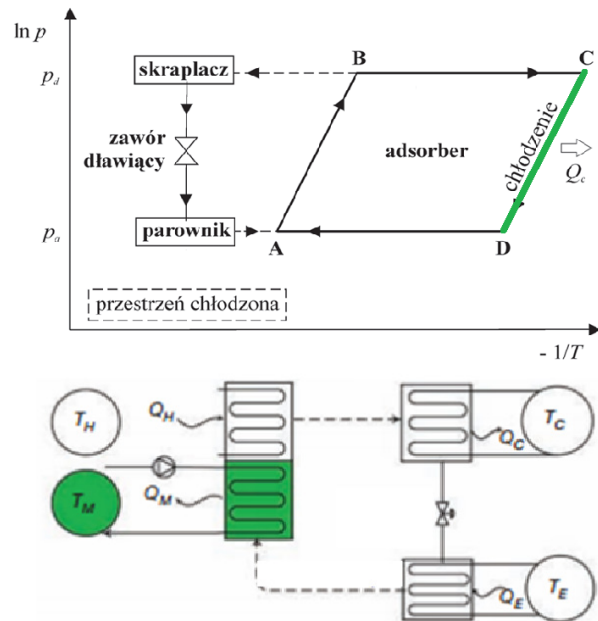


Rys. 5. Desorpcja, kondensacja

Desorpcja może być realizowana następująco:

- podgrzanie za pomocą doprowadzenia strumienia gorącego płynu (*thermal swing*);
- zmniejszanie ciśnienia przy stałej temperaturze, a następnie oczyszczanie w niskim ciśnieniu (*pressure swing*);
- oczyszczanie złoża nieadsorbującym, 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 i oczyszczające adsorbent (*displacement desorption*).

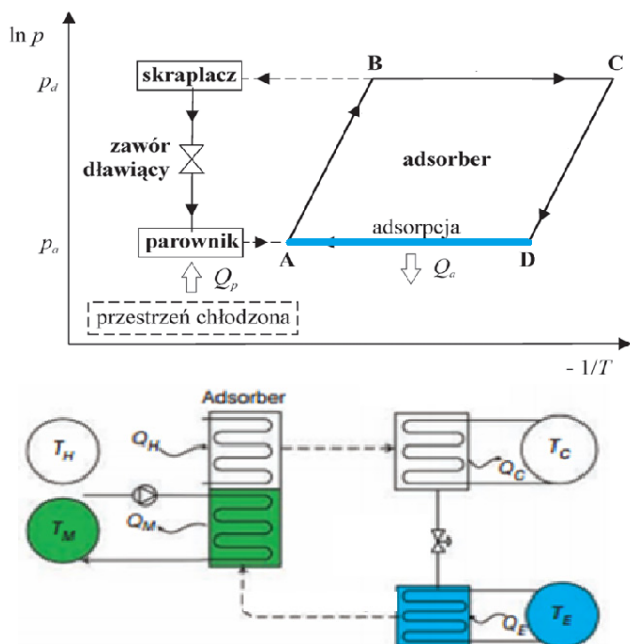
Schładzanie i rozprężanie to kolejny etap procesu, pokazany na Rys. 6. Po zregenerowaniu złoża adsorpcyjne jest ponownie izolowane i chłodzone obiegiem chłodzącym adsorber, celem przygotowania złoża do procesu adsorpcji. Schładzanie skutkuje spadkiem ciśnienia do wartości ciśnienia panującego w skraplaczu. Jest to proces ekspansji, analogiczny do rozprężania realizowanego w ramach chłodziarek sprężarkowych.



Rys. 6. Schładzanie i rozprężanie

W kolejnym etapie (Rys. 7) 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 pobierane z obiegu wodnego kierowane jest do parownika celem produkcji wody lodowej wykorzystywanej w dalszym etapie do klimatyzacji/chłodzenia. W wyniku poboru ciepła parowania zachodzi przemiana fazowa wody do postaci gazowej (para wodna). Powstała para adsorbowana jest przez złożo do momentu osiągnięcia równowagi adsorpcyjnej.

W ośrodku badawczym Solar Village nieopodal Rijadu (Arabia Saudyjska) firma New Energy Transfer wraz z KACST (King Abdulaziz City for Science and Technology) zainstalowała i uruchomiła największy na świecie system do sorpcyjnej produkcji wody lodowej z jednoczesną produkcją wody destylowanej.



Rys. 7. Parowanie, produkcja chłodu, adsorpcja

System bazuje na odzysku ciepła odpadowego oraz na pozyskiwaniu wody gorącej z ciepła solarne- go jako opcji pokazującej elastyczność funkcjonowania instalacji. Urządzenie jest w eksploatacji ponad 3 lata, w czasie których udowodniona została jego wysoka efektywność i możliwość pracy z ciepłem o temperatu- rze w przedziale 65–85°C, dzięki czemu układ może współpracować z konwencjonalnym polem solarnym oraz niskotemperaturowym ciepłem odpadowym po- przez niespotykany dotąd odzysk ciepła o temperatu- rze poniżej 90°C. Pomiar jakości produkowanej wody destylowanej potwierdziły zgodność z restrykcyjnymi limitami zawartości cząstek stałych, dzięki czemu pro- dukowany destylat po uzdatnieniu spełnia rolę wody pitnej. Jednocześnie system jest w stanie produkować chłód użyteczny w ilości ponad 1 MW. Dzięki temu in- stalacja potwierdza możliwość swojej implementacji do systemów trójgeneracyjnych, rozszerzając ich funkcję o dodatkowy produkt w postaci wody odsolonej.

Chłodziarka adsorpcyjna z funkcją odsalania

W Centrum Energetyki AGH pracuje unikalna w ska- li świata chłodziarka adsorpcyjna z funkcją odsalania

wody morskiej, wód kopalnianych oraz oczyszczania osadów ściekowych. Zdjęcia tej instalacji są przedsta- wione na Rys. 8.



Rys. 8. Chłodziarka adsorpcyjna z funkcją odsalania w Centrum Energetyki AGH

Chłodziarka adsorpcyjna AGH z funkcją odsala- nia pracuje w dwóch trybach:

- tryb chłodzenia, produkcja wody lodowej – 7/12°C,
- tryb odsalania – wydajność 40 kg/dobę.

Charakterystyka chłodziarki adsorpcyjnej:

- praca w próżni, ok. < 2 kPa,
- brak elementów ruchomych,
- małe zapotrzebowanie na energię elektryczną.

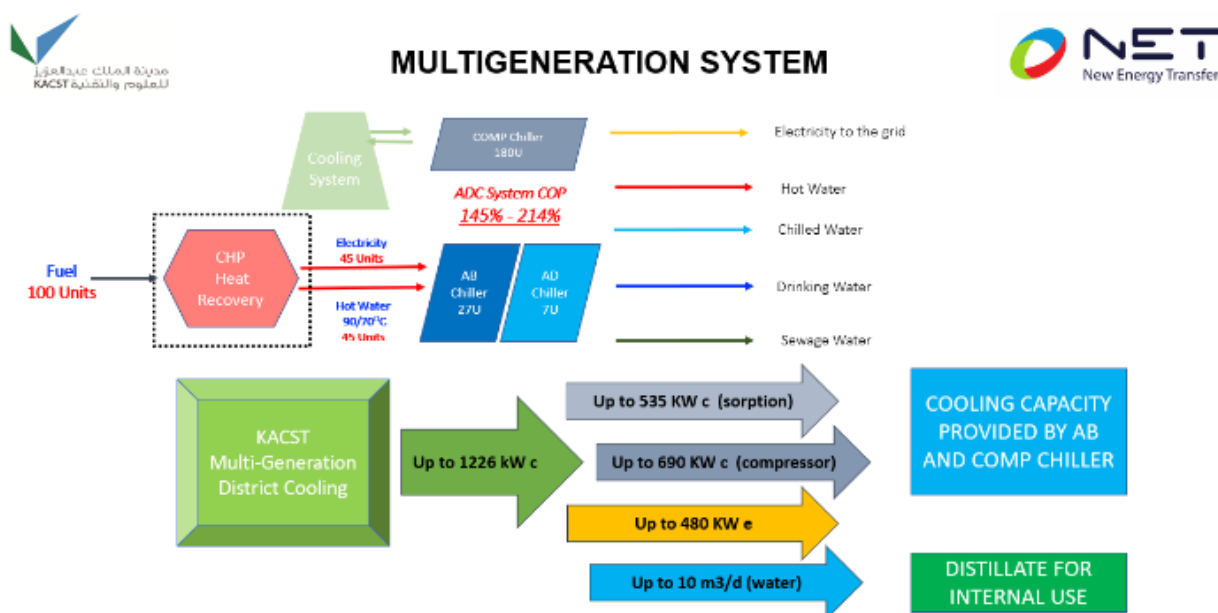
Do regeneracji złoża wypełnionego silikażelem może być zastosowana woda o temperaturze od 45 do 85°C. Możliwy jest proces odsalania wody i przy- gotowanie wody pitnej.

Układy poligeneracyjne

W świetle wyzwań związanych z koniecznością poprawy efektywności energetycznej układów funkcjonujących w skojarzeniu, powstała koncepcja układu poligeneracyjnego do skojarzonej produkcji energii elektrycznej, ciepła, chłodu, z dodatkową funkcją odsalania wody morskiej/słonej/ścieków, która jest produkowana jednocześnie. Oznacza to rozszerzenie układu trójgeneracyjnego o dodatkową funkcję odsalania dzięki wykorzystaniu właściwości adsorpcyjnych agregatów chłodniczych. Poniżej zaprezentowany układ jest rozwiązaniem opatentowanym przez firmę New Energy Transfer oraz KACST (King Abdulaziz City for Science and Technology, Riyadh, Saudi Arabia), które zostało zamodelowane i zrealizowane na terenie Arabii Saudyjskiej.

Rys. 9 przedstawia w sposób poglądowy zasadę działania opatentowanej technologii skojarzonej produkcji energii elektrycznej, ciepła, chłodu z dodatkową funkcją odsalania. W pierwszej fazie mamy do czynienia z silnikiem Diesla produkującym energię elektryczną, z którego odzyskiwane jest ciepło odpadowe w postaci wody gorącej o temperaturze 90°C. Woda gorąca może zostać wykorzystana do celów bytowych lub technologicznych, lub w pełni do zasilania adsorpcyjnego agregatu wody lodowej,

który w tym przypadku jest głównym źródłem odbioru ciepła. Woda gorąca ulega wstępnemu schłodzeniu w agregacie adsorpcyjnym z 90 do 75°C, następnie zostaje doprowadzona do agregatu adsorpcyjnego, który w tym przypadku jednocześnie produkuje wodę lodową oraz wodę odsoloną (destylat). Temperatura wody gorącej na wylocie z adsorpcyjnego agregatu chłodniczego jest temperaturą korespondującą ze spodziewaną temperaturą powrotu obiegu cieplnego trafiającego do systemu odbioru ciepła z silników Diesla. Energia elektryczna w głównej mierze zostaje wykorzystana do zasilania sprężarkowego agregatu chłodniczego, pozostała jej część służy do zasilania w energię elektryczną budynków w sąsiedztwie instalacji. W ten sposób uzyskany został w pełni zbilansowany układ do produkcji energii elektrycznej, wody gorącej, wody lodowej oraz wody odsolonej, bazujący na oleju lekkim, charakteryzujący się sprawnością na poziomie dochodzącym do 214% – co oznacza, że z 1 kW paliwa (energia chemiczna) uzyskuje się 2,14 kW chłodu (dodatkowo produkując na dobę 10 000 l wody destylowanej), podczas gdy konwencjonalny układ bazujący wyłącznie na agregatach sprężarkowych byłby w stanie osiągnąć maksymalnie 180% sprawności bez możliwości produkcji wody destylowanej (NET 2020).



Rys. 9. System „Multigeneration” – rysunek poglądowy

Zaprezentowany powyżej system do skojarzonej produkcji energii elektrycznej, ciepła i chłodu z dodatkową funkcją odsalania wody oraz oczyszczania ścieków pozwala na osiągnięcie bardzo wysokiej efektywności energetycznej dzięki racjonalnemu wykorzystaniu ciepła odpadowego generowanego przez silniki Diesla zasilające powyższy układ. System został zaprojektowany głównie po to, aby zredukować do minimum zapotrzebowanie na energię elektryczną w ciągu dnia na cele chłodnicze, zaś unikalne połączenie urządzeń sorpcyjnych pozwala na znaczne ograniczenie ilości energii elektrycznej wykorzystywanej do produkcji tak chłodu, jak i wody odsolonej. Urządzenie jest bardzo elastyczne, o czym świadczy możliwość produkcji chłodu bez zapotrzebowania na energię elektryczną – bazując jedynie na ciepłe generowanym przez pole solarne skonfigurowane z systemem – jest ono wystarczające do pokrycia zapotrzebowania energetycznego chłodziarki absorpcyjnej i adsorpcyjnego urządzenia do produkcji chłodu, a także wody odsolonej. Finalna kalkulacja efektywności pokazuje, że z 1 kW energii chemicznej dostarczonej w postaci oleju lekkiego urządzenie jest w stanie wyprodukować ponad 2 kW chłodu (podczas gdy sprawność elektryczna generatora nie przekracza 45%).

Podsumowanie

Istnieje możliwość optymalizacji gospodarki ciepłno-energetycznej poprzez instalację systemu poligeneracyjnego. W każdym wypadku należy zwrócić szczególną uwagę na priorytetowe względem systemu odzysku ciepła zagospodarowanie ciepła produkowanego

przez źródło trójgeneracyjne w celu maksymalnego wykorzystania energii pierwotnej zawartej w paliwie. Zwiększona efektywność energetyczna procesów poligeneracyjnych przekłada się na oszczędności finansowe wynikające z mniejszej ilości dostarczanego do procesu paliwa oraz na możliwość czerpania zysków w postaci uzyskania certyfikatów wspierających wysokosprawną kogenerację.

Bibliografia:

- NET Sp. z o.o. – materiał firmy.
Wang K., Vineyard E.A. (2011), *New Opportunities for Solar Adsorption Refrigeration*, "ASHRAE Journal" 53 (9): 14–24.
Zechik – materiały reklamowe firmy.

Polygeneration systems for cogeneration of electricity, heat and cooling

Abstract: The most popular tri-generation solution is the combination of an electricity generator, most often a gas engine, with a heat collection node and an absorption chiller that uses hot water to produce chilled water. Solutions of this type are characterized by high energy efficiency, as well as excellent flexibility of operation, because during the summer the surplus heat produced is used by the absorption chiller to produce cooling, which significantly reduces the need for electricity for cooling purposes. The paper presents a system for cogeneration of electricity, heat and cooling with an additional function of water desalination and sewage treatment. The system allows to achieve very high energy efficiency through rational use of waste heat generated by diesel engines.

Keywords: polygeneration, sorption, cooling and drinking water production

Prof. dr hab. inż. Wojciech NOWAK
AGH Akademia Górniczo-Hutnicza
Wydział Energetyki i Paliw
Centrum Energetyki AGH
wnowak@agh.edu.pl



Energetyka Rozproszona

Czasopismo redagowane przez zespół projektu Rozwój energetyki rozproszonej w klastrach energii (KlastER) (www.er.agh.edu.pl) w ramach Strategicznego programu badań naukowych i prac rozwojowych „Społeczny i gospodarczy rozwój Polski w warunkach globalizujących się rynków” GOSPOSTRATEG.



KlastER

Redaktor naczelny:
Sławomir Kopec

Sekretarz redakcji:
Katarzyna Faryj

Członkowie redakcji:
Zbigniew Hanzelka
Andrzej Kaźmierski
Marek Kisiel-Dorohinicki
Ryszard Sroka
Wojciech Suwała
Tomasz Szmuc
Karol Wawrzyniak

Redakcja i korekta językowa:
Malwina Mus-Frosik

Skład:
MUNDA Maciej Torz

Projekt okładki i layoutu:
Tomasz Budzyń

Strona internetowa:
Sebastian Medoń
Jakub Mirek

Wydawca:

Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

Kontakt:

Energetyka Rozproszona
Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie
al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
Paw. H-A2, III piętro
tel. 12 888 55 29
e-mail: klaster_er@agh.edu.pl
www.er.agh.edu.pl

© Autor

Creative Commons CC-BY 4.0



Ministerstwo Rozwoju,
Pracy i Technologii

