

UKŁADY POLIGENERACYJNE DO SKOJARZONEJ PRODUKCJI ENERGII ELEKTRYCZNEJ, CIEPŁA I CHŁODU

Wstęp

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 wodę 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 znaczną 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 funkcjonujące w oparciu o lewobieźny obieg chłodniczy i bazujące na energii elektrycznej jako głównym źródle zasilania. Energia elektryczna w tym przypadku wykorzystywana jest do napędu sprężarki zasysającej pary powstałe w parowniku i transportującej je po uprzednim sprężeniu do skraplacza, w którym pary ulegają kondensacji w wyniku doprowadzenia chłodu, za pośrednictwem której odbierane jest ciepło skraplania par czynnika chłodniczego.

W przypadku zastosowania urządzeń sorpcyjnych zasada działania jest podobna do tej, którą reprezentują sprężarkowe agregaty chłodnicze bazujące na lewobieźnym 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 w oparciu o następujące procesy:

- absorpcję (w przypadku wykorzystania absorpcyjnych agregatów chłodniczych),
- adsorpcję (w przypadku wykorzystania adsorpcyjnych agregatów chłodniczych).

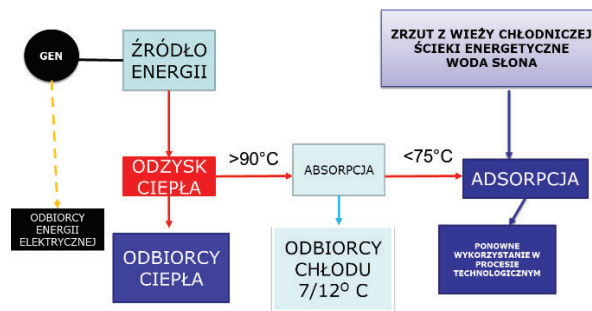
Adsorpcja to proces wiązania się cząsteczek, atomów lub jonów na powierzchni lub granicy faz fizycznych, powodujący lokalne zmiany stężenia. Adsorpcji nie należy mylić z **absorpcją**, która jest procesem wnikania do wnętrza fazy. W wyniku działania sił van der Waalsa (o dużym zasięgu oddziaływania) dochodzi do nagromadzenia się cząsteczek lub atomów jednej substancji na powierzchni ciała silnie higroskopijnego.

Substancja adsorbowana zwana jest adsorbatem, natomiast ciało, na którym zachodzi proces, to adsorbent. Uwalniana podczas przemiany energia jest na poziomie entalpii kondensacji.

Układy kogeneracyjne – 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:

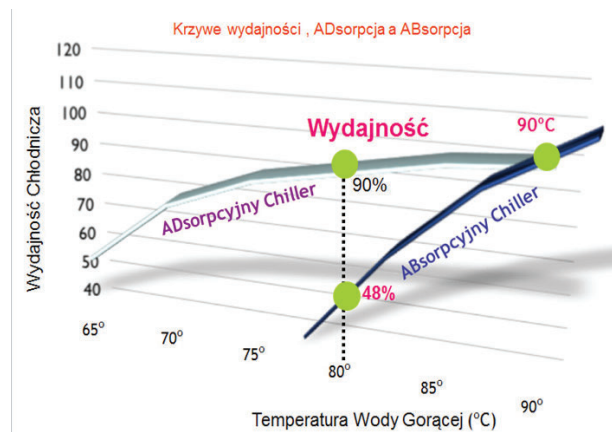
1. ciepła,
2. chłodu,
3. energii elektrycznej,
4. wody pitnej lub oczyszczania ścieków,
5. nowych produktów (SNG, metanol, etanol, wodór, sprężone powietrze itd.).

Rys. 1 przedstawia schemat poligeneracji sorpcyjnej.



Rys. 1. Poligeneracja sorpcyjna

W przypadku, gdy temperatura ciepła odpadowego/napędowego/solarnego ma poniżej 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 [1].



Rys. 2. Krzywe wydajności chłodziarek adsorpcyjnych i absorpcyjnych

nina ta następnie jest pompowana do desorbera (warnika), w którym pod wpływem ciepła dostarczonego z zewnątrz następuje desorpcja czynnika chłodniczego. Absorbent zawracany jest do absorbera natomiast, zaś pary zdesorbowanego czynnika o wysokim ciśnieniu trafiają na drugi wymiennik ciepła – skraplacz. Pod wysokim ciśnieniem następuje odbiór ciepła przez zewnętrzne chłodzenie i pary czynnika są skraplane. Następnie skroplony absorbent przepływa, celem obniżenia ciśnienia, przez zawór rozprężny i trafia na parownik. Cykl się powtarza. Moc chłodnicza transportowana jest za pośrednictwem obiegu wody chłodzonej, która przepływa rurkami wewnątrz parownika. Ciepło dostarczane jest do warnika w procesie desorpcji, dzięki czemu ciśnienie czynnika obiegowego jest podwyższane do poziomu umożliwiającego skroplenie.

Należy zaznaczyć, iż powszechnie stosowane chłodziarki absorpcyjne, w których czynnikiem roboczym jest wodny roztwór bromku litu, działają efektywnie przy temperaturach zasilania znacząco wyższych niż 80°C. Temperatura ta jest także uznawana za temperaturę progową efektywnego ekonomicznie zastosowania agregatów absorpcyjnych.

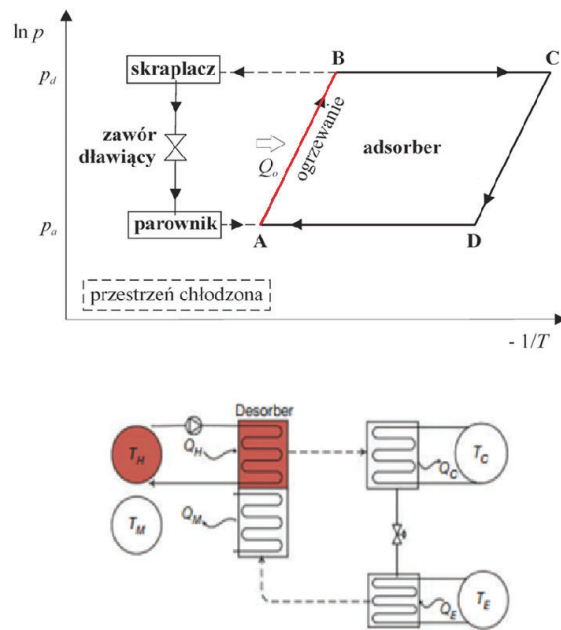
Adsorpcyjne agregaty wody lodowej

Adsorpcyjne agregaty wody lodowej mają zasadę działania podobną do agregatów absorpcyjnych, z tą jednak różnicą, że absorpcja przez bromek litu zostaje 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 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 pochłaniającym parę wodną z parownika) od komory parownika. Następnie do złoża zostaje doprowadzona woda gorąca (o temperaturze 65–85°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 ze zraszanej na powierzchnię wymiany cieplnej parownika wody słonej.

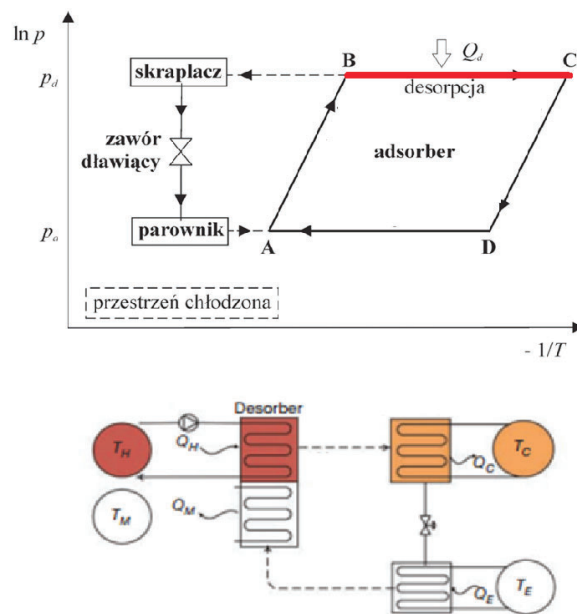
Pierwszym etapem procesu, pokazanym na rys. 4, jest dostarczanie ciepła i sprężanie [2]. W tym dcinku złoże adsorpcyjne, po osiągnięciu równowagi adsorpcyjnej, zostaje odizolowane, by następnie pobrać ciepło potrzebne do procesu desorpcji. W wyniku dostarczenia do adsorbera ciepła (np. ciepła odpadowego), 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

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 łączonego 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. 4. Dostarczanie ciepła i sprężanie

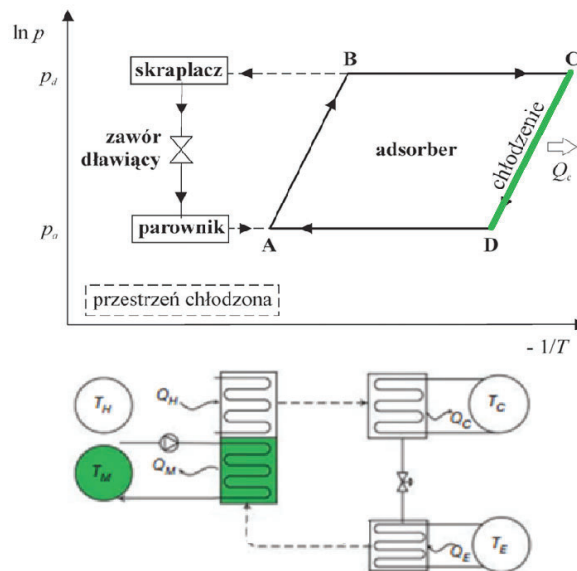


Rys. 5. Desorpcja, kondensacja

Desorpcja może być realizowana następująco:

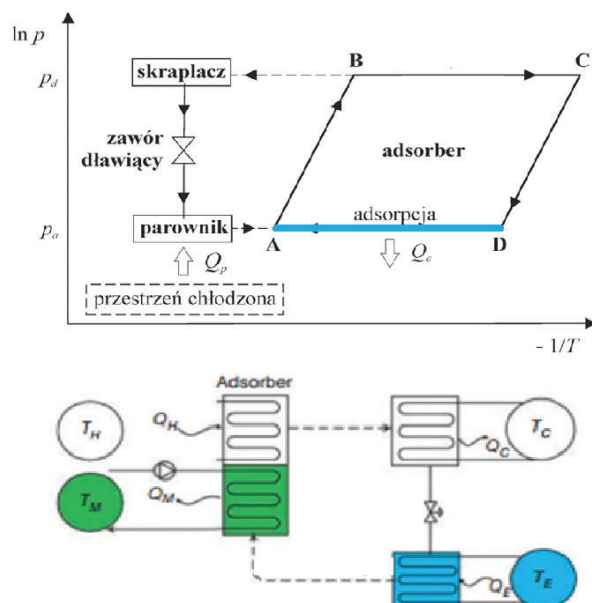
- poprzez podgrzew za pomocą doprowadzenia strumienia gorącego płynu (Thermal swing);
- poprzez zmniejszanie ciśnienia przy stałej temperaturze, a następnie oczyszczanie w niskim ciśnieniu (Pressure swing);
- oczyszczanie złoża nie adsorbującym, inertnym gazem w warunkach stałej temperatury i ciśnienia (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 i oczyszczające adsorbent (Displacement desorption).

Schładzanie i rozprężanie to kolejny etap pokazany na rys. 6. Po zregenerowaniu złoża adsorpcyjnego jest 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.



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 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 złożo do momentu osiągnięcia równowagi adsorpcyjnej.



Rys. 7. Parowanie, produkcja chłodu, adsorpcja

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. System bazuje na odzysku ciepła odpadowego oraz na pozyskiwaniu wody gorącej z ciepła solarne jako opcji pokazującej elastyczność funkcjonowania instalacji. Urządzenie jest w eksploatacji ponad 3 lata, dzięki czemu została udowodniona jego wysoka efektywność i możliwość pracy z ciepłem o temperaturze z zakresu 65–85°C, dzięki czemu układ może współpracować z konwencjonalnym polem solarnym oraz niskotemperaturowym ciepłem odpadowym, poprzez niespotykany dotąd odzysk ciepła o temperaturze poniżej 90°C. Pomiary jakości produkowanej wody destylowanej potwierdziły zgodność z restrykcyjnymi limitami zawartości cząstek stałych, dzięki czemu produkowany destylat po uzdatnieniu spełnia rolę wody pitnej. Jednocześnie system jest w stanie produkować chłód użyteczny, w zmierzonej ilości ponad 1 MW. Dzięki temu opisana instalacja potwierdza możliwość jej implementacji do systemów trójgeneracyjnych, rozszerzając ich funkcję o dodatkowe produkty – w postaci wody odsolonej.

Chłodziarka adsorpcyjna z funkcją odsalania

W Centrum Energetyki AGH pracuje unikalna w skali światowej chłodziarka adsorpcyjna z funkcją odsalania wody morskiej, wód kopalnianych oraz oczyszczania osadów ściekowych. Rys. 8 przedstawia widok tej instalacji.

Chłodziarka adsorpcyjna AGH z funkcją odsalania pracuje w dwóch trybach:

1. Tryb chłodzenia produkcja wody lodowej 7/12oC.
2. Tryb odsalania – wydajność 40 kg/dobę.

Charakterystyka chłodziarki adsorpcyjnej:

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

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



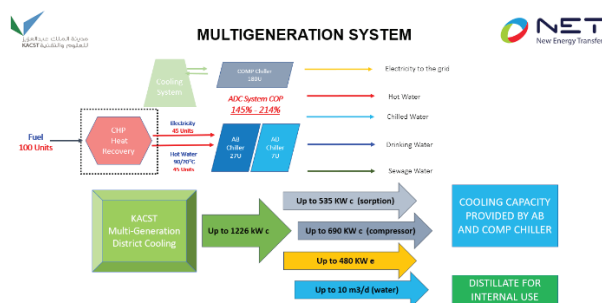
Rys. 8. Chłodziarka adsorpcyjna z funkcją odsalania w Centrum Energetyki AGH

Układy poligeneracyjne

W świetle wyzwań związanych z koniecznością poprawy efektywności energetycznej układów funkcjonujących w skojarzeniu, powstała koncepcja układu poli-generacyjnego do skojarzonej produkcji energii elektrycznej, ciepłej, chłodniczej z dodatkową funkcją odsalania wody morskiej/słonej/ścieków, które są produkowane jednocześnie. Jest 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), który został zamodelowany i zrealizowany 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 na cele bytowe lub technologiczne lub w pełni do zasilania absorpcyjnego agregatu wody lodowej, który w tym przypadku jest głównym źródłem odbioru ciepła. Woda gorąca ulega wstępnemu schłodzeniu w agregacie absorpcyjnym z 90 do 75°C, następnie zostaje ona 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 zostaje wykorzystana 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 [3].



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. Układ jest bardzo elastyczny, 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 chłodzarki absorpcyjnej i adsorpcyjnego urządzenia do produkcji chłodu, a także wody odsolonej. Finalna kalkulacja efektywności pokazuje, że z jednego kW energii chemicznej dostarczonej w postaci oleju lekkiego, system 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 wspierających wysokosprawną kogenerację certyfikatów.

Bibliografia:

- [1] Materiały reklamowe firmy Zechik.
- [2] K. Wang, E.A. Vineyard, *New Opportunities for Solar Adsorption Refrigeration*, "ASHRAE Journal" 2011, nr 53 (9).
- [3] Materiał firmy NET Sp. z o.o.