

(19)



URZĄD
PATENTOWY
RZECZYPOSPOLITEJ
POLSKIEJ

(10) **PL 247338 B1**

(12)

Opis patentowy

(21) Numer zgłoszenia: **441460**

(22) Data zgłoszenia: **2022.06.13**

(43) Data publikacji o zgłoszeniu: **2023.12.18 BUP 51/2023**

(45) Data publikacji o udzieleniu patentu: **2025.06.16 WUP 24/2025**

(51) MKP:

F02C 6/14 (2006.01)

C25B 1/04 (2021.01)

F25J 1/02 (2006.01)

F25J 5/00 (2006.01)

F17C 9/04 (2006.01)

(73) Uprawniony z patentu:

POLITECHNIKA WARSZAWSKA, Warszawa, PL

(72) Twórca(-y) wynalazku:

KRZYSZTOF BADYDA, Warszawa, PL

PIOTR KRAWCZYK, Nowe Racibory, PL

ALEKSANDRA DZIDO, Warszawa, PL

(74) Pełnomocnik:

rzecz. pat. Małgorzata Trejgis, Warszawa, PL

(54) Tytuł:

Sposób magazynowania energii elektrycznej w skroplonym powietrzu

PL 247338 B1

Opis wynalazku

Przedmiotem wynalazku jest sposób magazynowania energii elektrycznej w skroplonym powietrzu, w układzie typu LAES-H2. W szczególności wynalazek przeznaczony jest do magazynowania energii elektrycznej pochodzącej ze źródeł odnawialnych, takich jak turbiny wiatrowe, panele fotowoltaiczne i inne.

Bieżące zapotrzebowanie na energię elektryczną jest zmienną dynamiczną, zależną od wielu czynników. W przypadku, gdy produkcja energii przeważa nad zużyciem, celowe staje się jej magazynowanie a następnie wykorzystanie w momentach szczytowych. Dzięki temu wytwarzanie energii nie musi być dostosowywane do jej chwilowego zużycia a uzyskane rezerwy zasilać mogą sieć centralną w dowolnym czasie oraz zależnie od jej aktualnych potrzeb i obciążenia.

W stanie techniki znane są różne sposoby i instalacje do magazynowania energii. Przykładowo, w patencie nr PL233789 B1 ujawniony jest sposób magazynowania energii w skroplonym powietrzu, w którym to powietrze jest pobierane z otoczenia i sprężane kosztem energii elektrycznej a następnie chłodzone z wykorzystaniem czynników chłodniczych, które oddają ciepło w fazie rozładowania magazynu. Powietrze w fazie skroplonej jest magazynowane a w okresach zapotrzebowania na energię elektryczną jest pompowane a następnie regazyfikowane i przegrzewane. Następnie powietrze rozpręża się na ekspanderze, który zasila docelowy generator.

Ponadto, znane są sposoby elektrolizy wody z wykorzystaniem energii elektrycznej w celu jej magazynowania. Dokument WO 2003/076689 A3 ujawnia w tym zakresie sposób przekształcania energii elektrycznej polegający na magazynowaniu nadwyżek energii w okresach pozaszczytowych, co realizowane jest przez elektrolizę wody oraz magazynowanie uzyskanych przez to wodoru oraz tlenu. Następnie, wodór i tlen stosowane są razem do produkcji energii elektrycznej w okresach szczytowych, poprzez spalanie wodoru w czystym tlenie. Powstająca w trakcie procesu woda jest następnie magazynowana, a w odpowiednim czasie zasila ona ponownie elektrolizer.

Obecnie, polityka energetyczna w Polsce jak również i w wielu innych krajach nastawiona jest na pozyskiwanie energii elektrycznej ze źródeł odnawialnych, takich jak na przykład elektrownie wiatrowe, panele fotowoltaiczne i inne. Źródła takie – ze względu na istotne uzależnienie ich pracy od warunków pogodowych – cechują się jednak dużą niestabilnością i nieprzewidywalnością, co niejednokrotnie przekłada się na trudności z kontrolowaniem i sterowaniem bieżącej produkcji. Efektywne na skalę systemową magazynowanie energii, zwłaszcza odnawialnej i przeznaczonej dla celów wysokosprawnych, wielkoskalowych magazynów centralnych stanowi zatem w dalszym ciągu wyzwanie techniczne oraz przedmiot nieustannego zainteresowania i prac w sektorze energetycznym.

W świetle powyższego, u podstaw przedmiotowego wynalazku leży zadanie opracowania nowego sposobu magazynowania energii elektrycznej z wykorzystaniem źródeł odnawialnych. Dodatkowo, jako cel wynalazku postawiono możliwość realizacji magazynowania energii z zastosowaniem magazynów energii w skroplonym powietrzu, tj. w układach LAES (ang. *Liquid Air Energy Storage*).

W zgodnym z wynalazkiem sposobie magazynowania energii elektrycznej w skroplonym powietrzu, energią elektryczną pochodzącą ze źródła energii, w szczególności źródła energii odnawialnej, zasila się proces sprężania powietrza pochodzącego z atmosfery. W linii obiegu czynnika chłodniczego strumień sprężonego powietrza jest schładzany na wielostrumieniowym wymienniku ciepła i dławiony, w wyniku czego zachodzi jego częściowe skraplanie, a uzyskaną mieszaninę gazu i cieczy wprowadza się do separatora faz, w którym następuje ich rozdzielenie, przy czym rozdzieloną fazę ciekłą powietrza magazynuje się w zbiorniku skroplonego powietrza a w momencie zapotrzebowania na energię elektryczną przeprowadza się proces pompowania za pomocą pompy kriogenicznej ciekłego powietrza, regazyfikowania na wymienniku regazyfikacyjnym i rozprężania na pierwszej turbinie gazowej celem doprowadzenia do docelowego układu odbioru energii elektrycznej. Sposób charakteryzuje się tym, że wejściowa energia elektryczna równolegle zasila elektrolizer niezależnej drugiej linii procesowej, przy czym w elektrolizerze prowadzi się proces elektrolizy doprowadzanego do elektrolizera strumienia wody przez wlot wody, w wyniku czego uzyskuje się wodór H₂ i tlen O₂. Otrzymany w wyniku elektrolizy wodór H₂ magazynuje się w zbiorniku ciśnieniowym wodoru a następnie poddaje się procesowi spalania w komorze spalania w układzie wodorowym do uzyskania wyjściowego strumienia gorących spalin o wysokim ciśnieniu, które doprowadza się do drugiej turbiny gazowej a następnie do wymiennika ciepła powietrze-spaliny, gdzie podgrzewa się zmagazynowane i zregazyfikowane w linii obiegu czynnika chłodniczego powietrze tak, że podgrzane powietrze trafia następnie do pierwszej turbiny gazowej.

Korzystnie, gdy etap magazynowania skroplonego powietrza oraz etap magazynowania wodoru prowadzi się jako procesy odrębne.

Korzystnie także, gdy skroplone powietrze magazynuje się w zbiorniku o ciśnieniu zbliżonym do atmosferycznego.

Korzystne z punktu widzenia wynalazku jest również, gdy otrzymany w wyniku elektrolizy wodór H_2 poddaje się procesowi spalania w powietrzu.

Ponadto korzystnie, gdy otrzymany w wyniku elektrolizy wodór H_2 poddaje się procesowi spalania w powietrzu wzbogaconym o tlen O_2 .

Korzystnie jest również, gdy otrzymany w wyniku elektrolizy wodór H_2 poddaje się procesowi spalania w atmosferze czystego tlenu O_2 .

Korzystnym jest także, gdy otrzymane w wyniku elektrolizy wodór H_2 i tlen O_2 magazynuje się w oddzielnych zbiornikach wodoru i tlenu.

Ponadto korzystnie jest, gdy otrzymana w wyniku rozdzielania faz powietrza na separatorze faz faza gazowa kierowana jest zwrotnie do sprężarki powietrza poprzez wielostrumieniowy wymiennik ciepła, gdzie dodawana jest do wejściowego strumienia powietrza z atmosfery poprzez wlot powietrza.

Również korzystnie, gdy sprężanie wejściowego strumienia powietrza prowadzi się w trybie wielostopniowym z międzystopniowym chłodzeniem.

Ponadto korzystnie, gdy rozprężanie wyjściowego strumienia powietrza prowadzi się w trybie wielostopniowym z przegrzewem wtórnym.

Proponowany wynalazek bazuje na efekcie synergii pomiędzy napędzanymi energią elektryczną procesami magazynowania energii w skroplonym powietrzu z zastosowaniem układu LAES a procesem magazynowania wodoru. Rozwiązanie zapewnia bowiem wykorzystanie ciepła spalin, które standardowo stanowią stratę układu, wpływając tym samym na obniżenie ogólnej sprawności magazynowania energii. Tymczasem, podgrzane kosztem ich ciepła powietrze cechuje wyższa entalpia, przez co możliwe jest uzyskanie większej ilości energii elektrycznej z układu ze skroplonym powietrzem, aniżeli byłoby to możliwe bez wykorzystania ciepła spalin z turbiny gazowej. Inaczej, połączenie tych dwóch procesów (tj. magazynowania skroplonego powietrza w układzie LAES i magazynowania ze spalaniem wodoru) we wspólny układ przyczynia się do istotnego zwiększenia sprawności magazynowania energii na skalę systemową oraz stanowi rozwiązanie techniczne dla problemu wysokosprawnych, wielkoskalowych magazynów energii, zwłaszcza w przypadku odnawialnych źródeł energii.

Przedmiot wynalazku uwidocznił się na rysunku, na którym fig. 1 przedstawia schemat przebiegu zgodnego z wynalazkiem sposobu magazynowania energii elektrycznej według pierwszego przykładu realizacji, fig. 2 przedstawia drugi możliwy przykład realizacji tego sposobu, fig. 3 przedstawia trzeci możliwy przykład realizacji, natomiast fig. 4 – czwarty możliwy przykład realizacji sposobu według wynalazku.

Ogólnie, przebieg sposobu magazynowania energii według przedmiotowego wynalazku podzielić można na trzy etapy:

- ładowania magazynu nadwyżką energetyczną w dwóch odrębnych liniach procesowych
 - równoległego magazynowania skroplonego powietrza w zbiorniku o ciśnieniu zbliżonym do atmosferycznego i magazynowania wodoru w zbiorniku ciśnieniowym,
- oraz
- rozładowania magazynu, w którym to etapie realizowana jest jednocześnie praca dwóch współpracujących linii – pierwszej zasilanej skroplonym powietrzem i drugiej zasilanej wodorem.

Jak pokazano na fig. 1 w fazie ładowania w I linii procesowej (tj. linii obiegu powietrza) powietrze pobierane jest z atmosfery przez wlot powietrza (1) a następnie sprężane w sprężarce powietrza (3), co następuje kosztem energii elektrycznej pochodzącej korzystnie z odnawialnych źródeł energii, tj. zasilania energii elektrycznej (2). W celu poprawy sprawności układu skraplania proponuje się zastosowanie sprężania wielostopniowego, np. trój- lub czterostopniowego z chłodzeniem między stopniowym powietrza poprzez wymiennik powietrze – olej wysokowrzący lub powietrze woda pod podwyższonym ciśnieniem (nie pokazano na rysunku). Następnie sprężone powietrze przepływa przez wielostrumieniowy wymiennik ciepła (4), gdzie jest chłodzone i trafia na zawór dławiący (5), w którym w wyniku efektu Joule'a-Thomsona ochładza się i częściowo skrapla. Następnie mieszanina cieczy i gazu trafia na separator faz (6). Uzyskany w wyniku podziału faz, strumień powietrza w fazie gazowej zimny (7) jest zawracany poprzez wielostrumieniowy wymiennik ciepła (4) i łączy się przez zawracany strumień po-

wietrza w fazie gazowej ciepły (8) ze strumieniem powietrza wlotowego (1) przed sprężarką (3) powietrza. Faza ciekła powietrza jest natomiast magazynowana, preferencyjnie w zbiorniku skroplonego powietrza (9) o ciśnieniu zbliżonym do atmosferycznego (jest to etap magazynowania medium). Oczywistym dla znawcy dziedziny wynalazku jest fakt, że w procesie regazyfikacji powietrze ochładza czynnik chłodniczy, który jest następnie magazynowany i służy do schładzania powietrza w fazie skraplania w wielostrumieniowym wymienniku ciepła (4). Czynnik ten jest następnie magazynowany i wykorzystywany ponownie w fazie regazyfikacji – procesy te realizowane są w obiegu czynnika chłodniczego (12).

Jak widać na fig. 1 równoległe z etapem ładowania w I linii procesowej realizowany jest etap ładowania w linii II. Etap ten polega na zasilaniu elektrolizera (16) energią elektryczną – tą samą, która stosowana jest do zasilania sprężarki (3) wejściowego strumienia powietrza w linii I, w wyniku czego przeprowadzana jest reakcja elektrolizy wejściowego strumienia wody H_2O (15), czego produktami są wodór H_2 i tlen O_2 . Wodór H_2 jest następnie magazynowany w ciśnieniowym zbiorniku wodoru (17) (etap magazynowania medium). Zgodnie z prezentowanym przykładem realizacji oprócz wodoru H_2 w oddzielnym ciśnieniowym zbiorniku tlenu (18) magazynowany jest również tlen O_2 .

W momencie zapotrzebowania na energię elektryczną uruchamiana jest faza rozładowania magazynu, która polega na współpracy i połączeniu linii technologicznych I i II, co realizowane jest przez wymianę ciepła. Magazynowane w linii I skroplone powietrze trafia do sekcji regazyfikacji układu LAES, gdzie jest pompowane pompą kriogeniczną ciekłego powietrza (10), regazyfikowane w wymienniku regazyfikacyjnym (11) i rozprężane w pierwszej turbinie gazowej (14). W tym czasie zmagazynowany w II linii procesowej wodór H_2 jest spalany w instalacji z turbiną gazową (w komorze spalania (19) w układzie wodorowym i rozprężany na drugiej turbinie gazowej (20)). Spalanie wodoru H_2 prowadzi się w czystym tlenie O_2 który zmagazynowany został w ramach linii procesowej II. Spalanie z zastosowaniem tlenu O_2 zapewnia wyższe temperatury spalania, co jest korzystne dla zwiększenia sprawności układu. Dla znawcy dziedziny wynalazku oczywistym będzie, że w ramach przykładu realizacji zgodnie z fig. 1 spalanie wodoru H_2 prowadzone może być również w powietrzu z dodatkiem zmagazynowanego w procesie tlenu O_2 lub w czystym powietrzu (co przedstawione jest w ramach kolejnego przykładu realizacji).

Dla znawcy dziedziny wynalazku oczywistym będzie, że produktem spalania wodoru H_2 (oprócz gorących spalin) jest również woda H_2O , która w ramach sposobu może zostać skroplona i ponownie użyta celem zasilania elektrolizera w fazie ładowania.

Uzyskane w wyniku spalania wodoru H_2 w turbinie gazowej spaliny cechują się znaczną temperaturą i wysokim ciśnieniem. Spaliny te, zgodnie z wynalazkiem, kierowane są najpierw na turbinę gazową wodorową (20), gdzie rozprężają się do ciśnienia atmosferycznego, zasilając generator energii elektrycznej, a następnie kierowane są do wymiennika ciepła powietrze-spaliny (13) celem podgrzania zregazyfikowanego powietrza przed kolejnymi stopniami rozprężania, realizowanego najczęściej jako proces trój- lub czterostopniowy w przegrzewem wtórnym, kosztem ciepła dostarczanego przez spaliny z układu z drugą turbiną gazową (20). Podgrzane powietrze kierowane jest do pierwszej turbiny gazowej (14), która zasila generator energii elektrycznej. Powietrze rozpręża się do ciśnienia atmosferycznego i jest uwalniane do atmosfery.

Na fig. 2 przedstawiony jest kolejny możliwy przykład realizacji sposobu według wynalazku. W sposobie tym etap ładowania i magazynowania skroplonego powietrza w I linii procesowej przebiega w pełni analogicznie jak w przypadku omówionego powyżej pierwszego przykładu realizacji sposobu magazynowania energii według fig. 1. Różnicę procesową w tym przypadku stanowi brak wydzielonego magazynowania tlenu O_2 w linii II. Jako produkt elektrolizy magazynowany jest wyłącznie wodór H_2 , który podlega spalaniu w powietrzu. Proces podgrzewania powietrza zmagazynowanego w linii I z użyciem uzyskanych w wyniku spalania wodoru H_2 w linii II gorących spalin prowadzony jest analogicznie jak w omówionym powyżej pierwszym przykładzie realizacji sposobu, z zachowaniem wskazanych wcześniej korzyści wynikających z wynalazku.

Zgodnie z trzecim przykładem realizacji – jak pokazano na fig. 3 – etap ładowania i magazynowania skroplonego powietrza w I linii procesowej przebiega analogicznie jak w poprzednich przykładach pierwszym i drugim. Również i w tym przypadku w II linii procesowej nie jest prowadzone magazynowanie tlenu O_2 , natomiast wodór H_2 spalany jest w turbinie gazowej znajdującej się za wymiennikiem ciepła powietrze-spaliny (13), do którego następnie zwracane są gorące spaliny o niskim ciśnieniu. Podgrzane w ten sposób zregazyfikowane powietrze (gaz pod ciśnieniem) kierowane jest do drugiej turbiny gazowej (20) sprzęgniętej z generatorem, skąd energia elektryczna trafia do systemu elektroenergetycznego.

W przypadku czwartego prezentowanego przykładu realizacji (zgodnie z fig. 4) etap ładowania i magazynowania skroplonego powietrza w I linii procesowej przebiega analogicznie jak w przykładach pierwszym, drugim i trzecim. Zmagazynowany wodór H_2 , w momencie zapotrzebowania na energię elektryczną, jest spalany w II linii procesowej w komorze spalania (19) w układzie wodorowym układu drugiej turbiny gazowej (20) w powietrzu (tj. bez dodatku tlenu O_2 który nie jest magazynowany na wyjściu z elektrolizera), w wyniku czego uzyskiwane są gorące spaliny o wysokim ciśnieniu, które zasilają drugą turbinę gazową (20), a następnie jako spaliny o niskim ciśnieniu, kierowane są do wymiennika ciepła (13) celem podgrzania zregazyfikowanego powietrza w I linii procesowej, a stąd do wyjściowej pierwszej turbiny gazowej (14), zasilanej innym paliwem np. paliwem gazowym lub płynnym. Zgodnie z prezentowanym przykładem realizacji uzyskuje się dalszy wzrost sprawności sposobu, w którym energia elektryczna uzyskiwana jest zarówno z pierwszej turbiny gazowej w I linii jak również drugiej turbiny gazowej (20) za wymiennikiem ciepła (13). W układzie tym komora spalania (23) stanowi komponent turbiny gazowej (14), co jest oczywiste dla znawcy.

Przedmiotowy wynalazek nie ogranicza się tylko do przedstawionych powyżej przykładów realizacji. Możliwe są różne jego modyfikacje i rozwinięcia w ramach załączonych zastrzeżeń patentowych, bez odejścia od istoty wynalazku.

Lista oznaczeń odsyłających:

1. Wlot powietrza
2. Zasilanie energią elektryczną
3. Sprężarka powietrza
4. Wielostrumieniowy wymiennik ciepła
5. Zawór dławiący
6. Separator faz
7. Strumień powietrza w fazie gazowej zimny
8. Strumień powietrza w fazie gazowej ciepły
9. Zbiornik skroplonego powietrza
10. Pompa kriogeniczna ciekłego powietrza
11. Wymiennik regazyfikacyjny (powietrze – czynnik chłodniczy)
12. Obieg chłodniczy
13. Wymiennik ciepła powietrze-spaliny
14. Pierwsza turbina gazowa
15. Wlot wody
16. Elektrolizer
17. Zbiornik wodoru
18. Zbiornik tlenu
19. Komora spalania w układzie wodorowym
20. Druga turbina gazowa
21. Strumień powietrza sprężonego
22. Strumień paliwa gazowego sprężonego (np. węglowodoru)
23. Komora spalania w układzie powietrznym

Zastrzeżenia patentowe

1. Sposób magazynowania energii elektrycznej w skroplonym powietrzu, w którym energią elektryczną (2) pochodzącą ze źródła energii, w szczególności źródła energii odnawialnej, zasila się proces sprężania (3) powietrza pochodzącego z atmosfery (1), po czym w linii obiegu czynnika chłodniczego (1) strumień sprężonego powietrza jest schładzany na wielostrumieniowym wymienniku ciepła (4) i dławiony, w wyniku czego zachodzi jego częściowe skraplanie, a uzyskaną mieszaninę gazu i cieczy wprowadza się do separatora faz (6), w którym następuje ich rozdzielenie, przy czym rozdzieloną fazę ciekłą powietrza magazynuje się w zbiorniku skroplonego powietrza (9) a w momencie zapotrzebowania na energię elektryczną przeprowadza się proces pompowania za pomocą pompy kriogenicznej (9) ciekłego powietrza, regazyfikowania na wymienniku regazyfikacyjnym (10) i rozprężania na pierwszej turbinie gazowej (14) celem doprowadzenia do docelowego układu odbioru energii elektrycznej, **znamienny tym**,

że wejściowa energia elektryczna równolegle zasila elektrolizer (16) niezależnej drugiej linii procesowej (II), przy czym w elektrolizerze (16) prowadzi się proces elektrolizy doprowadzającego do elektrolizera strumienia wody przez wlot wody (15), w wyniku czego uzyskuje się wodór H_2 i tlen O_2 , przy czym otrzymany w wyniku elektrolizy wodór H_2 magazynuje się w zbiorniku ciśnieniowym wodoru (17) a następnie poddaje się procesowi spalania w komorze spalania (19) w układzie wodorowym do uzyskania wyjściowego strumienia gorących spalin o wysokim ciśnieniu, które doprowadza się do drugiej turbiny gazowej (20) a następnie do wymiennika ciepła (13) powietrze-spaliny, gdzie podgrzewa się zmagazynowane i zregazyfikowane w linii obiegu czynnika chłodniczego (I) powietrze tak, że podgrzane powietrze trafia następnie do pierwszej turbiny gazowej (14).

2. Sposób według zastrz. 1, **znamienny tym**, że etap magazynowania skroplonego powietrza oraz etap magazynowania wodoru prowadzi się jako procesy odrębne.
3. Sposób według zastrz. 1 albo 2, **znamienny tym**, że skroplone powietrze magazynuje się w zbiorniku (18) o ciśnieniu zbliżonym do atmosferycznego.
4. Sposób według zastrz. 1 albo 2, **znamienny tym**, że otrzymany w wyniku elektrolizy wodór H_2 poddaje się procesowi spalania w powietrzu.
5. Sposób według zastrz. 1 albo 2, **znamienny tym**, że otrzymany w wyniku elektrolizy wodór H_2 poddaje się procesowi spalania w powietrzu wzbogaconym o tlen O_2 .
6. Sposób według zastrz. 1 albo 2, **znamienny tym**, że otrzymany w wyniku elektrolizy wodór H_2 poddaje się procesowi spalania w atmosferze czystego tlenu O_2 .
7. Sposób według zastrz. 6 albo 7, **znamienny tym**, że otrzymane w wyniku elektrolizy wodór H_2 i tlen O_2 magazynuje się w oddzielnych zbiornikach wodoru (17) i tlenu (18).
8. Sposób według któregokolwiek z zastrzeżeń 1 do 7, **znamienny tym**, że otrzymana w wyniku rozdzielania faz powietrza na separatorze faz (6) faza gazowa kierowana jest zwrotnie do sprężarki powietrza (3) poprzez wielostrumieniowy wymiennik ciepła (4), gdzie dodawana jest do wejściowego strumienia powietrza z atmosfery poprzez wlot powietrza (1).
9. Sposób według któregokolwiek z zastrzeżeń 1 do 8, **znamienny tym**, że sprężanie wejściowego strumienia powietrza (1) prowadzi się w trybie wielostopniowym z między stopniowym chłodzeniem.
10. Sposób według któregokolwiek z zastrzeżeń 1 do 9, **znamienny tym**, że rozprężanie wyjściowego strumienia powietrza prowadzi się w trybie wielostopniowym z przegrzewem wtórnym.

Rysunki

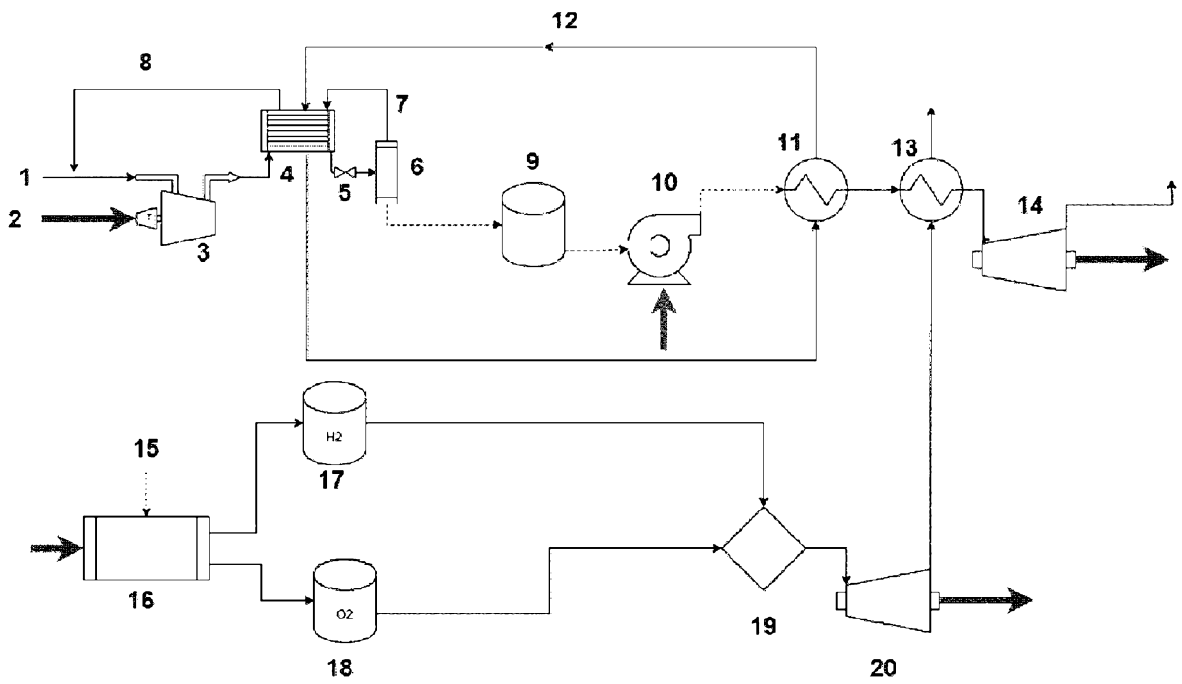


Fig. 1

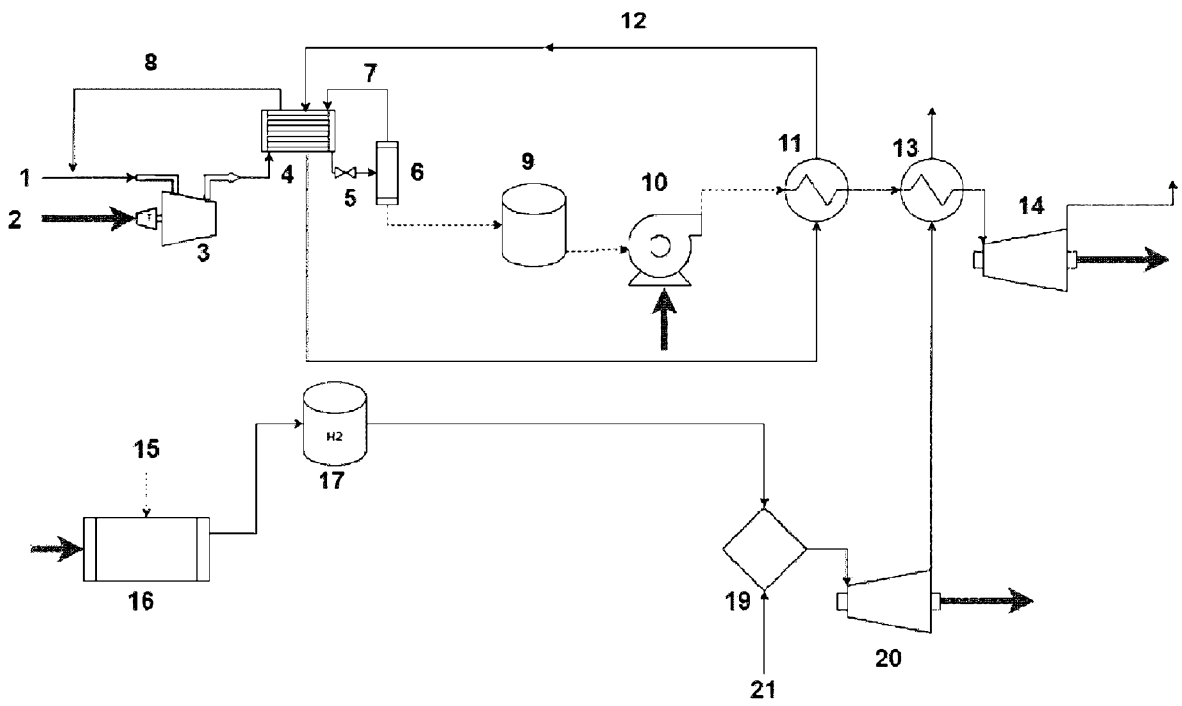


Fig. 2

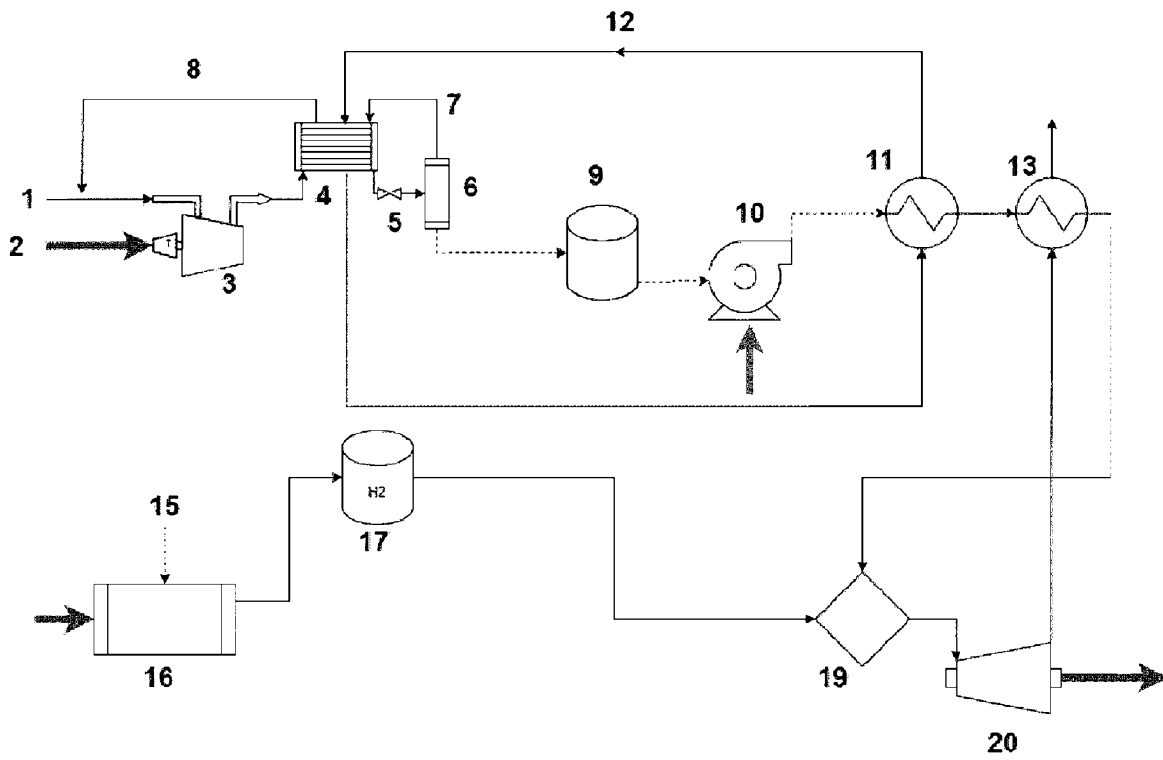


Fig. 3

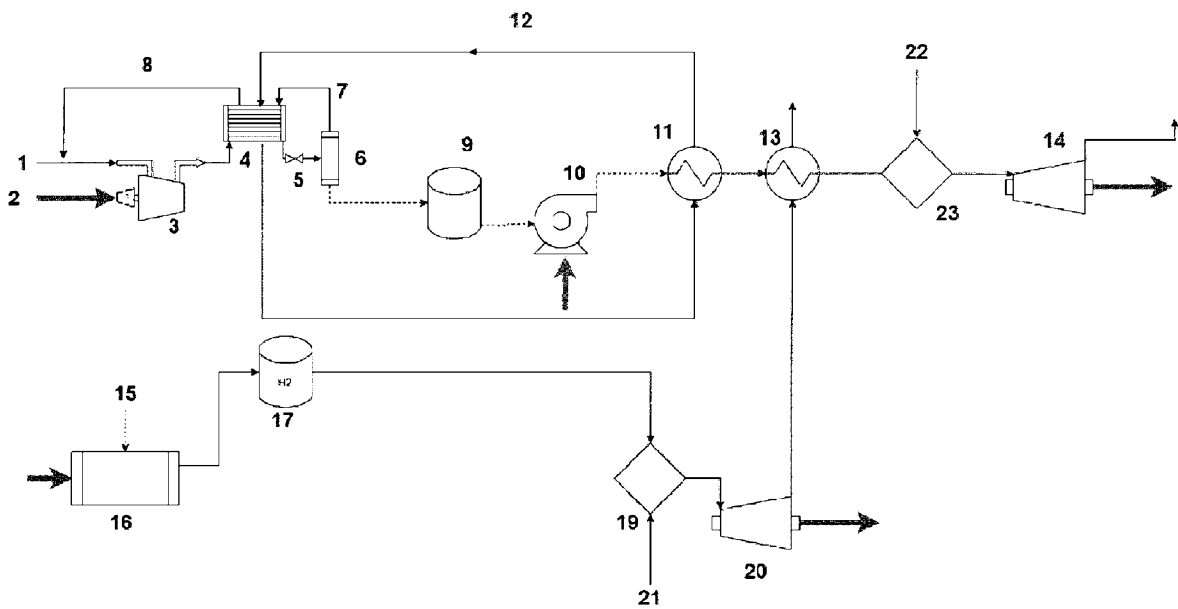


Fig. 4