

- **Jakub Kupecki, Michał Wierzbicki, Marek Skrzypkiewicz,**
Centrum Technologii Wodorowych, Instytut Energetyki
- **Jędrzej Chmielewski, Marek Laskowski,**
Centrum Badawczo-Rozwojowe im. Faradaya, Grupa Energa, ORLEN
- **Tomasz Kowalczyk, Tomasz Ochrymiuk, Marcin Lackowski,**
Instytut Maszyn Przepływowych PAN

Zwiększenie elastyczności pracy bloku biomasowego

poprzez integrację z instalacją wysokotemperaturowych ogniw stałotlenkowych

Bezprecedensowy wzrost mocy zainstalowanej w odnawialnych źródłach energii nieuchronnie prowadzi do zwiększania wymaganej elastyczności pracy elektrowni i elektrociepłowni oraz intensywnego rozwoju metod magazynowania energii. Z końcem czerwca br. dobiegł końca projekt pt. Modułowa instalacja odwracalnych ogniw stałotlenkowych przewidziana do integracji z elektrownią przemysłową w celu poprawy elastyczności jej pracy i zwiększenia wykorzystania odnawialnych źródeł energii w sektorze elektroenergetycznym dofinansowany w ramach programu Operacyjny Inteligentny Rozwój 2014-2020 prowadzonego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

W ramach projektu powstała małoskalowa pilotażowa instalacja odwracalnych stałotlenkowych ogniw elektrochemicznych (*reversible solid oxide cell* - rSOC), których dostawcą, jak również twórcą koncepcji i wykonawcą instalacji jest Instytut Energetyki. Ogniwa te mogą pracować w trybie ogniwa paliwowego (*solid oxide fuel cell* - SOFC) oraz elektrolizera (*solid oxide electrolyzer cell* - SOEC). Ta unikalna technologia

pozwała produkować wodór w okresach nadpodaży energii elektrycznej w Krajowym Systemie Elektroenergetycznym (KSE), dociągając bloki cieplne chroniąc je przed przymusowymi odstawieniami do gorącej rezerwy mocy. Wyprodukowany wodór może być zużywany w przemyśle i transporcie lub magazynowany i wykorzystywany do produkcji energii elektrycznej w okresach zwiększonego zapotrzebowania odbiorców.

Nowatorska na skalę światową integracja instalacji rSOC z blokiem ciepłowniczym oznacza zwiększenie zarówno szczytowej mocy elektrycznej, jak i ciepłowniczej.

W grudniu 2022 r. Centrum Badawczo-Rozwojowe im. M. Faradaya z Grupy ORLEN, we współpracy z Instytutem Maszyn Przepływowych Polskiej Akademii Nauk (IMP PAN) oraz Instytutem Energetyki (IE), uruchomiły w Elblągu

pierwszą na świecie instalację magazynowania energii opartą na stałotlenkowym elektrolizerze przewidzianym do pracy dwukierunkowej, zintegrowanym z elektrociepłownią bazującą na bloku biomasowym, o mocy 20 MWe (dalej: instalacja rSOC lub HYDROGIN). Para i energia elektryczna wykorzystywana w procesie elektrolizy pochodzi z odnawialnego źródła, dzięki czemu wytworzony wodór jest bezemisyjny. To rozwiązanie, finansowane z Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój Narodowego Centrum Badań i Rozwoju, pozwala produkować wodór, a w przypadku, gdy jest taka potrzeba - odwrócić proces i wytwarzać energię elektryczną. Może więc służyć nie tylko jako elektrolizer, ale też jako dodatkowe źródło energii elektrycznej. To pozwala na stabilizację pracy elektrociepłowni i zwiększa jej elastyczność oraz zakres modulacji. Wysokotemperaturowe ogniwa elektrochemiczne są urządzeniami o wysokiej sprawności, ale i bardzo wymagającymi od strony eksploatacyjnej. Instalacja osiąga nominalnie w trybie pracy elektrolizy pary wodnej pobieranej z upustu technologicznego 81% sprawności i pobiera 10 kW mocy elektrycznej. W trybie pracy ogniwa paliwowego osiąga 55% sprawności i generuje 5 kW mocy elektrycznej. Instalacje tej klasy były wcześniej eksploatowane jedynie w warunkach laboratoryjnych. Integracja z blokiem biomasowym elektrociepłowni jest wydarzeniem na skalę światową i potwierdza możliwość długotrwałej pracy w zmiennych warunkach ruchowych i atmosferycznych (instalacja jest wykonana w wersji kontenerowej i była eksploatowana m. in. w okresie zimowym). Doświadczenia eksploatacyjne, zdobyte podczas ruchu instalacji, potwierdziły założone parametry techniczne i wskaźniki sprawnościowe.

Wyzwania eksploatacyjne obiektów konwencjonalnej energetyki

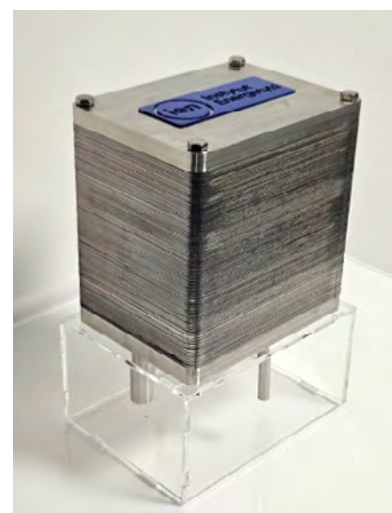
Ze względu na dużą dynamikę i zmienność zapotrzebowania na energię elektryczną, zarówno w ujęciu go-

dzinowym, jak i dobowym - elektrownie zawodowe będące jednostkami wytwórczymi centralnie dysponowanymi, pracują w szerokim zakresie mocy. Obiekty te są wielokrotnie eksploatowane w warunkach bliskich minimum technicznego lub wręcz są zatrzymywane. Największe problemy, w okresach zmniejszonego zapotrzebowania na energię w systemie elektroenergetycznym, dotyczą zatrzymań bloków konwencjonalnej energetyki, które pierwotnie nie były projektowane jako jednostki o istotnej zdolności do eksploatacji w warunkach częstej zmiany obciążeń oraz częstych zatrzymań i rozruchów. W podstawowym ujęciu, w przypadku odstawienia do gorącej rezerwy, blok nadal zużywa paliwo do utrzymania podstawowych parametrów, które umożliwią zwiększenie mocy, a jednocześnie nie generuje w tym czasie energii elektrycznej. Jeśli blok został odstawiiony do zimnej rezerwy, paliwo jest zużywane do na potrzeby rozruchu. Każdy rozruch jest zarazem stratą w postaci nieuzyskanego przychodu (elektrownia nie sprzedaje energii) oraz w postaci kosztów operacyjnych. Maleje również średnioroczna sprawność, czas pracy z mocą znamionową oraz rosną wskaźniki emisyjne. Te zagadnienia były tematem wstępnych analiz, prowadzonych w latach 2016-2018 przez zespoły Politechniki Śląskiej, Instytutu Energetyki i Politechniki Warszawskiej.

Niezależnie od uwarunkowań technicznych istniejących bloków węglowych i biomasowych, rosnący poziom mocy zainstalowanej w odnawialnych źródłach energii, sprawia, iż elektrownie muszą być w ciągłej gotowości do szybkiej interwencji w celu zapewnienia stabilnej i bezpiecznej pracy systemu elektroenergetycznego. Istniejące w Polsce obiekty są wielokrotnie nieprzystosowane do takiej eksploatacji. Perspektywicznym rozwiązaniem, które może być z powodzeniem stosowane do współpracy z konwencjonalnymi obiektami energetyki są magazyny energii oparte na stałotlenkowych ogniwach elektrochemicznych (ang. *Solid Oxide Electrochemical*

Cell, SOC). Instalacja HYDROGIN, która była przedmiotem wspólnego przedsięwzięcia Grupy ORLEN, IMP PAN i IEn pozwala na zagospodarowanie ciepła i energii elektrycznej (w okresach zmniejszonego zapotrzebowania) na potrzeby produkcji wodoru i jego magazynowania. Koncepcja ta jest realizowana poprzez połączenie obiegu parowego elektrociepłowni z instalacją SOC o zdolności pracy dwukierunkowej - jako elektrolizera (ang. *Solid Oxide Electrolysis, SOE*) lub jako ogniwa paliwowego (ang. *Solid Oxide Fuel Cell, SOFC*). Wodór wytworzony podczas pracy w trybie SOE może zostać wykorzystany do produkcji energii elektrycznej w tym samym układzie, podczas jego pracy w trybie SOFC lub posłużyć jako substrat do produkcji innych paliw gazowych czy ciekłych, takich jak syntetyczny gaz ziemny (SNG), czy amoniak. Unikalna funkcjonalność ogniwa stałotlenkowego, umożliwiająca szybkie przełączanie pomiędzy oboma trybami często nazywana jest pracą odwracalną lub rewersyjną. Stąd wywodzi się skrótowa nazwa rSOC (ang. *reversible Solid Oxide Electrochemical Cell*), stosowana dla rozwiązań tego typu.

Dalszą perspektywą stosowania układów rSOC jest ich integracja z obiegami parowymi i gazowo-parowymi, jak



Rys. 1. Stos 90 ogniw SOC (5 kW SOE) produkcji Instytutu Energetyki
Źródło: CTH2 IEn

również z obiegami siłowni jądrowych, niezależnie od technologii reaktora. Taka hybrydyzacja pozwala ograniczyć modulację pracy instalacji bazowej, umożliwia eksploatację obiektu w warunkach optymalnych oraz stwarza możliwość wytwarzania wodoru w oparciu o różne źródła energii. Dodatkowo, wyposażenie elektrowni przemysłowych i zawodowych w elektrolizer SOE lub instalację rSOC pozwala integrować rozwiązania dedykowane dla energetyki z produkcją paliw odnawialnych (syntetycznych), jak i tworzy możliwości magazynowania energii w ramach koncepcji integracji sektorów (ang. *sector coupling*). Z punktu widzenia operatora obiektu przemysłowego, zdolność wytwarzania wodoru, magazynowania energii lub wytwarzania paliw wodoronośnych, umożliwi optymalizację strategii eksploatacji pod kątem wytwarzania produktów lub mediów o najwyższych marżach.

Konstrukcja instalacji z ogniwami stałotlenkowymi

Wykorzystanie ogniw SOC w rzeczywistej instalacji jest w praktyce realizowane przez integrację serii pojedynczych ogniw w postaci stosu lub modułu lub matrycy modułów, która zawiera liczne stosy połączone ze sobą zarówno elektrycznie, jak i kanałami gazowymi. Moduł ogniw składa się zazwyczaj z kilku niezależnych stosów ogniw, które dobierane są pod kątem parametrów eksploatacyjnych i geometrii układu. Brane są tutaj pod uwagę parametry elektryczne wymagane dla trybów SOFC i SOE, jednorodność rozpyłu gazów, wyprowadzenia napięciowe, połączenia prądowe między stosami, dopuszczalna wysokość, czy ograniczenia geometryczne dla instalacji z SOC. Same stosy zbudowane są na bazie szeregu pojedynczych powtarzalnych pakietów procesowych (ang. *Single Repeating Unit, SRU*), składających się z interkonektora, ogniwa SOC, zestawu uszczelki oraz separatora. Te komponenty wytwarzane

są w Instytucie Energetyki i stosowane w konstrukcji stosów wg technologii i patentów IEn.

W przygotowanych stosach wykorzystane zostały ogniwa SOC o wymiarach 110 mm x 110 mm na podłożu wytworzonym z NiO. Każde z ogniw umieszczone jest przekładce integrującej z interkonektorem, zwanej pakietem procesowym. Pakiety procesowe są następnie łączone w pionowe stosy, które składają się typowo z kilkadziesiąt ogniw, połączonych w jednej zintegrowanej strukturze. Taki sposób łączenia pojedynczych ogniw zapewnia dużą kompaktowość i modularność technologii, która pozwala na teoretycznie nieograniczone skalowanie instalacji z SOC.

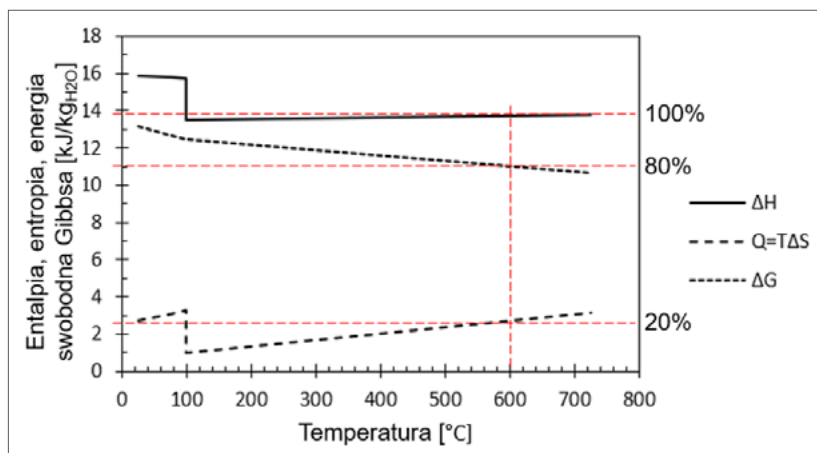
Dodatkowo, integralną częścią modułu są elementy końcowe w postaci płyt zamykających, bądź funkcyjnych zapewniających m. in.: odpowiedni rozpył gazów pomiędzy stosami i połączenia prądowe między stosami. Funkcją płyt zamykających jest w pierwszej kolejności zapewnienie wytrzymałości mechanicznej i stabilizację konstrukcji, a także umożliwienie poprawnego rozkładu siły dociskowej z układu dociskowego, co jest niezbędne do uzyskania wymaganej szczelności i kontaktu elektrycznego na poszczególnych ogniwach w stosach oraz modułu jako

całości. Stosy te pracują w temperaturze powyżej 650°C.

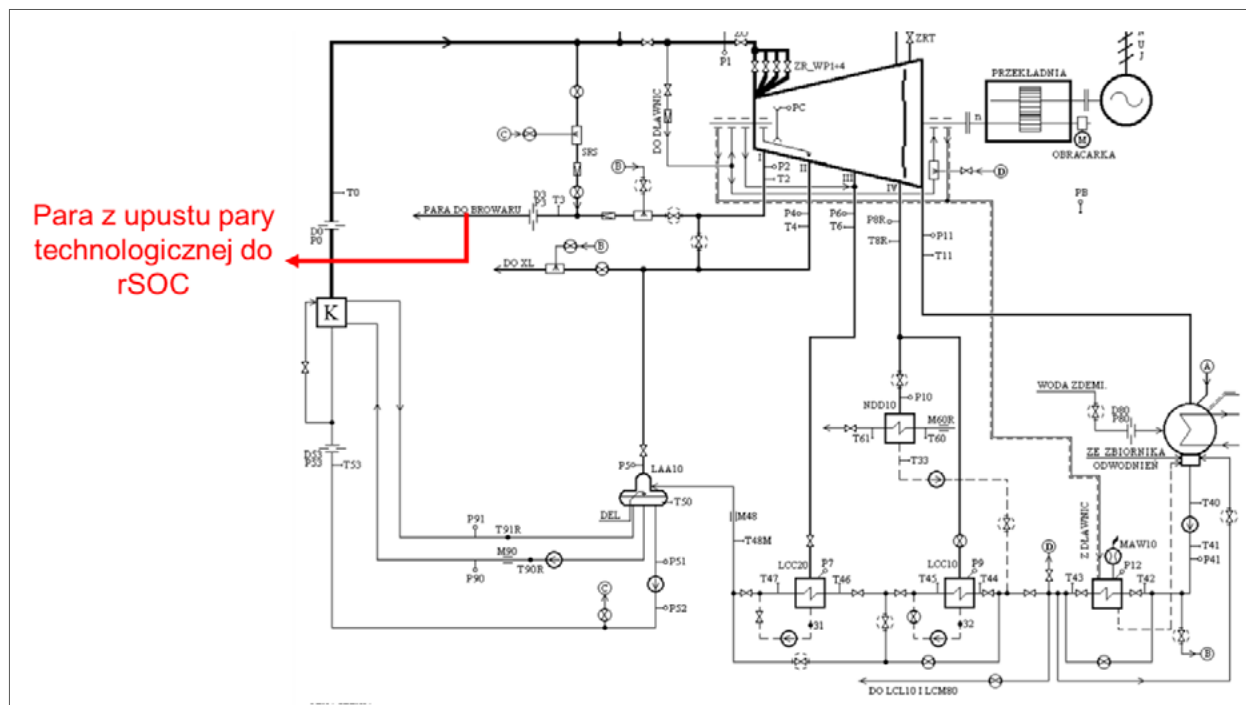
Należy zaznaczyć, iż najważniejszą korzyścią z prowadzenia elektrolizy pary wodnej względem ciekłej wody jest obniżenie energochłonności procesu.

Korzyścią z prowadzenia elektrolizy pary wodnej względem ciekłej wody jest obniżenie energochłonności procesu. Wpływ temperatury prowadzenia elektrolizy przy ciśnieniu atmosferycznym dla 1 kg wody/pary na zapotrzebowanie energetyczne z podziałem na entalpię, entropię i energię swobodną Gibbsa przedstawiono na rys. 2.

Entalpia właściwa odpowiada całkowitemu zapotrzebowaniu energetycznemu procesu elektrolizy na 1 kg wody/pary wodnej. Jak widać dla temperatury wrzenia występuje skokowy spadek zapotrzebowania procesu elektrolizy na energię. Wynika to z tego, że produktami procesu elektrolizy są gazy (tlen i wodór). Jeśli do elektrolizera doprowadzona jest ciekła woda wymagany jest strumień ciepła potrzebny do zmiany stanu skupienia gazów w ogólnym bilansie energetycznym procesu. Strumień ten w elektrolizerach kwasowych i alkalicznych pochodzi od strat mocy elektrycznej spowodowanej rezystancją wewnętrzną ogniw elektrolizera. W elektrolizerach wysokotemperaturowych energia ta jest dostarczana w formie



Rys. 2. Zapotrzebowanie procesu elektrolizy na entalpię właściwą, entropię właściwą i właściwą energię swobodną Gibbsa w funkcji temperatury



Rys. 3. Schemat technologiczny obiegu parowego z zaznaczonym poborem pary do instalacji pilotażowej.

Wpływ na obciążalność obiektu:

1. Ciepło spalania (HHV): 39,4 kWh/kg; 141,7 MJ/kg
2. Skład masowy wody: $1,00 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}} = 0,11 \text{ kg}_{\text{H}_2} + 0,89 \text{ kg}_{\text{O}_2}$
3. Bilans elektrolizy wody: $1,00 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}} + 15,74 \text{ MJ} \rightarrow 0,11 \text{ kg}_{\text{H}_2} + 0,89 \text{ kg}_{\text{O}_2}$
 $[1,00 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}} (540^\circ\text{C}, 180 \text{ bar}_{\text{abs}}) \rightarrow 1,00 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}} (30^\circ\text{C}, 0,04 \text{ bar}_{\text{abs}}) + 1,05 \text{ MJ}]$

entalpii pary. Wielkość zapotrzebowania procesu na ciepło jest opisane ilorazem temperatury absolutnej prowadzenia procesu i zmiany entropii pary ($Q=T\Delta S$). Entalpia swobodna Gibbsa natomiast odpowiada zapotrzebowaniu procesu elektrolizy na energię elektryczną. W efekcie dla temperatury instalacji z elbląskiej elektrociepłowni wynoszącej ok. 600°C udział zapotrzebowania na energię elektryczną spada do 80% całkowitego zapotrzebowania procesu elektrolizy na energię kosztem wzrostu, z reguły tańszej, energii termicznej. Wysoka temperatura procesu elektrolizy wynika również z właściwości fizycznych elektrolitu stosowanego w ogniwach, który zaczyna przewodzić prąd elektryczny powyżej ok. 550°C .

Zabudowane w instalacji HYDROGIN stałotlenkowe ogniwa elektrochemiczne pracują przy niewielkim nadciśnieniu, nieprzekraczającym zazwyczaj

1 bar. Zwiększanie ciśnienia nie ma znaczącego wpływu na energochłonność procesu elektrolizy, na co wskazuje zależność entalpii ΔH od temperatury na rysunku 1. Jest natomiast perspektywiczne w aspekcie obniżania zapotrzebowania na moc sprężarek wodoru względem pomp wody zasilających obieg parowy, skąd pobierana może być wysokoprężna para do procesu elektrolizy. W przypadku instalacji, ciśnieniowanie elektrolizera daje znacznie większe efekty niż w przypadku samego stosu, co wynika z korzyści po stronie wspomnianych wcześniej układów urządzeń i maszyn peryferyjnych. Ciśnienie pracy ogniw determinuje również optymalny punkt poboru pary. Kluczowe jest bowiem zapewnienie wystarczająco wysokiego ciśnienia pary do prawidłowej pracy instalacji rSOC zarówno przy nominalnym, jak i minimalnym obciążeniu turbiny parowej. Zbyt niskie ciśnienie nie

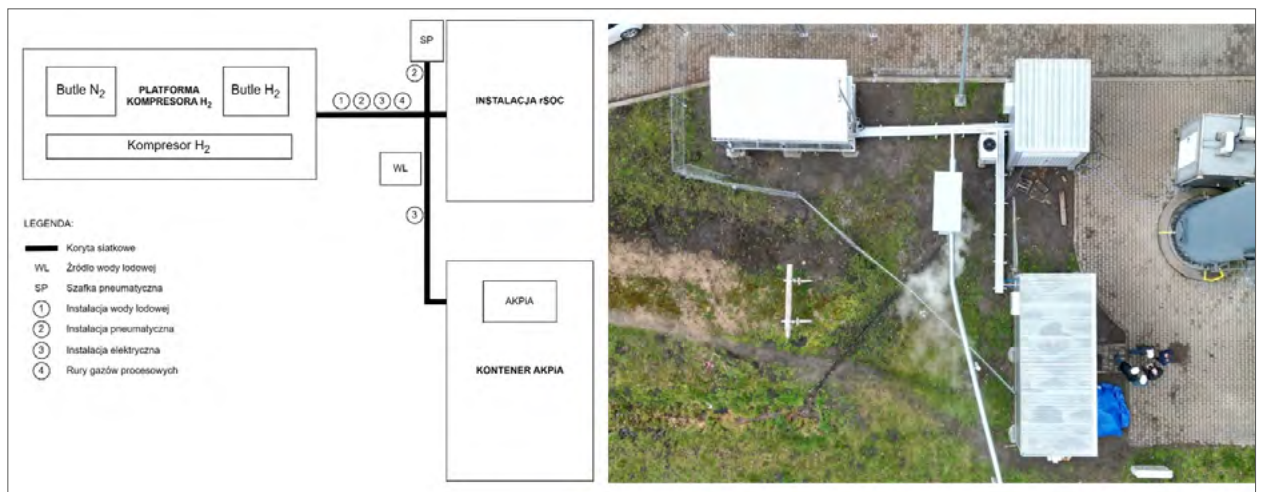
zapewni przepływu pary przez instalację rSOC, a zbyt wysokie ciśnienie wymaga zdławienia, co jest nie ekonomiczne. Z drugiej strony temperatura pobieranej pary powinna być możliwie niska. Wynika to z zastosowania regeneracyjnych wymienników ciepła w obrębie instalacji rSOC. Gorące gazy wylotowe z ogniw ogrzewają gazy dolotowe, tj. parę i powietrze w przypadku elektrolizy oraz wodór i powietrze w przypadku pracy jako ogniwo paliwowe. O ile zapewnienie dopływu powietrza w trybie pracy ogniwa paliwowego jest zrozumiałe, wraz z powietrzem dostarczany jest tlen do utlenienia wodoru, o tyle dopływ powietrza do elektrod tlenowych w trybie pracy elektrolizera jest konieczne w celu odbioru powstałego tlenu. Zbyt duża koncentracja tlenu prowadzi do wzmożonej korozji elementów konstrukcyjnych. Z tego względu przepływ powietrza jest na tyle duży, że udział tlenu

we wzbogaconym powietrzu wzrasta o 1-2 pp. Dostarczenie do instalacji pary o wysokich parametrach wymagałoby więc zdławienia ciśnienia i schłodzenia produktów elektrolizy w dodatkowych chłodnicach, co byłoby nieefektywne termodynamicznie. Pomimo ww. argumentów punktem poboru pary do instalacji pilotażowej jest obecnie upust pary technologicznej (rys. 3), co wynika z ograniczenia kosztów inwestycyjnych dla instalacji małoskalowej.

W zakresie wykorzystania potencjału jaki niesie technologia SOC, kluczowe jest zapewnienie wystarczająco



Rys. 4. Zdjęcie Instalacji rSOC w trakcie realizacji prac badawczych
Źródło: CTH₂ IEn



Rys. 5. Rysunek poglądowy finalnego rozmieszczenia kontenerów i tras kablowych oraz zdjęcie lotnicze wykonane w trakcie pracy instalacji
Źródło: CTH₂ IEn

wysokiego ciśnienia pary do prawidłowej pracy instalacji rSOC zarówno przy nominalnym, jak i minimalnym obciążeniu turbiny parowej, która pracuje w obiegu instalacji bazowej. Zbyt niskie ciśnienie nie zapewni przepływu pary przez instalację rSOC, a zbyt wysokie ciśnienie wymaga zdławienia, co jest nieekonomiczne. Z drugiej strony temperatura pobieranej pary powinna być możliwie niska. Wynika to z zastosowania regeneracyjnych wymienników ciepła w obrębie instalacji rSOC. Gorące gazy wylotowe z ogniw ogrzewają gazy dolotowe, tj. parę i powietrze w przypadku elektrolizy oraz wodór i powietrze w przypadku pracy jako



Rys. 6. Stacja rozprężania pary w trakcie pracy. Doprowadzenie pary technologicznej z bloku biomasowego do instalacji rSOC
Źródło: CTH₂ IEn

ogniwo paliwowe. O ile zapewnienie dopływu powietrza w trybie pracy ogniwa paliwowego jest zrozumiałe, wraz

z powietrzem dostarczany jest tlen do utlenienia wodoru, o tyle dopływ powietrza do elektrod tlenowych w trybie

pracy elektrolizera jest konieczny w celu odbioru powstałego tlenu. Zbyt duża koncentracja tlenu prowadzi do wzmożonej korozji elementów konstrukcyjnych. Z tego względu przepływ powietrza jest na tyle duży, że udział tlenu we wzbogaconym powietrzu wzrasta o 1-2 pp. Dostarczenie do instalacji pary o wysokich parametrach wymagałoby więc zdławienia ciśnienia i schłodzenia produktów elektrolizy w dodatkowych chłodnicach, co byłoby nieefektywne termodynamicznie. Pomimo ww. argumentów punktem poboru pary do instalacji pilotażowej jest obecnie upust pary technologicznej, co wynika z ograniczenia kosztów inwestycyjnych dla instalacji w małej skali.

Eksploatacja instalacji HYDROGIN prowadzona była na terenie Elektrociepłowni Elbląg zarządzanej przez Energa Kogeneracja, spółkę zależną Energi z Grupy ORLEN. Instalacja rSOC zintegrowana została obiektem poprzez przyłącza mediów takich jak: zasilanie elektryczne, sprężone powietrze, czy para technologiczna, które doprowadzane były bezpośrednio z infrastruktury bloku biomasowego BB20p. Dzięki temu produkowany w instalacji wodór pochodził w pełni ze źródeł odnawialnych. W skład zintegrowanej z obiegiem elektrociepłowni biomasowej bloku BB20p, instalacji HYDROGIN wchodzi: (i) kontener rSOC, (ii) rama z kompresorem wodoru oraz magazynem wodoru, (iii) kontener biurowy ze sterownią oraz (iv) stacja rozprężania pary. Rys. 4 przedstawia fotografię kompletnej instalacji rSOC przygotowanej do realizacji prac badawczych, posadowionej na terenie Elektrociepłowni Elbląg w pobliżu instalacji elektrofiltrów bloku BB20p. Teren instalacji rSOC był zagrodzony i zabezpieczony przed dostępem osób postronnych.

Integracja z obiektem polegała na przygotowaniu i zabezpieczeniu terenu oraz przyłączeniu niezbędnych mediów, aby zapewnić nieprzerwaną pracę instalacji kontenerowej. Rozkład instalacji został dostosowany do wymagań za-

rządcy terenu. Finalne rozmieszczenie kontenerów i położenie tras kablowych oraz instalacji pneumatycznej i rurociągów gazowych przedstawione zostało na rysunku 5, zaś widok stacji rozprężania pary z bloku na wejściu do instalacji HYDROGIN przedstawia rys. 6.

Eksploatacja instalacji HYDROGIN

Zespół Centrum Technologii Wodorowych Instytutu Energetyki, jako dostawca ogniwi i stosów SOC, przygotował 6 stosów przy czym każdy składający się z 30 ogniwi zintegrowanych w pojedynczym module rSOC. Podstawowe parametry instalacji podczas pracy w trybie elektrolizera zostały zestawione w tabeli 1, zaś parametry w trybie ogniwa paliwowego w tabeli 2.

Wyzwaniem w eksploatacji instalacji z ogniwami stałotlenkowymi jest zapewnienie stabilności parametrów, które odpowiadają za produkcję wodoru lub energii elektrycznej, zależnie od trybu pracy. Szczególnie istotne jest minimalizowanie wahań temperatury w kluczowych punktach procesowych. Zagadnienie znacząco się komplikuje w sytuacji, w której układ z SOC prowadzony jest z uwzględnieniem celowo wprowadzanych zmian parametrów operacyjnych,

co ma charakter jego pracy w punkcie znamionowym (ang. *design point*) oraz poza nim (ang. *off-design*). W ramach realizowanego projektu, instalacja była eksploatowana w kilku trybach, w tym w ruchu długotrwałym, który był cyklem badawczym przewidzianym na co najmniej 1 000 godzin pracy. Przykładowy przebieg temperatury podczas ruchu tego typu został przedstawiony na rysunku 5. W czasie ruchu, kolejno zrealizowano prace (w nawiasach numeracja naniesiona na wykres):

- rozruch instalacji i badania wstępne (1-5),
- stabilna praca w SOE (6),
- odstawienie i rozruch instalacji (7-8),
- stabilna praca w SOE z 3 zmianami mocy (9),
- przejście z trybu SOE na SOFC, stabilizacja pracy przy częściowym obciążeniu w trybie ogniwa paliwowego, przejście SOFC - SOE (10),
- stabilna praca w trybie elektrolizera (11),
- schłodzenie instalacji (12).

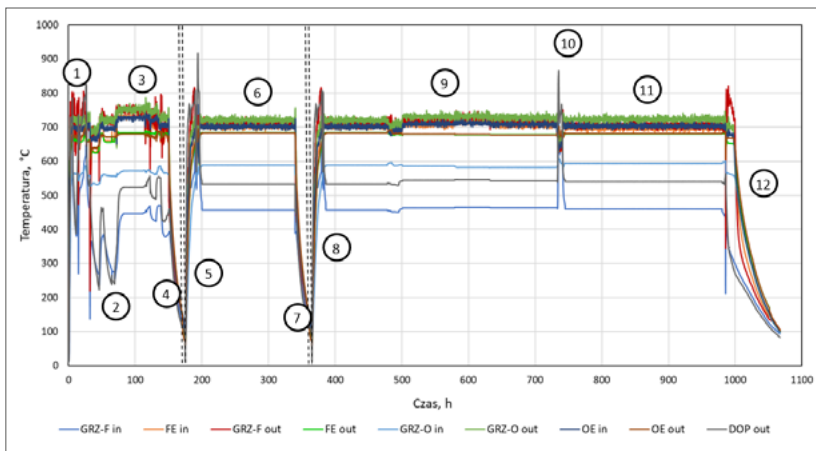
Szczególną cechą instalacji zabudowanej w EC Elbląg jest możliwość jej przełączania pomiędzy trybami SOFC i SOE oraz odwrotnie. W takich warunkach stos SOC jest naprzemienne zasilany parą wodną lub wodorem.

Parametr	Oznaczenie	Wartość
Temperatura wylotowa powietrza ze stosu	$T_{O\text{Eout}}$	668-679°C
Temperatura wylotowa strony paliwowej	$T_{F\text{Eout}}$	677-680°C
Maksymalna moc elektrolizera	P_{max}	10,11 kW
Prąd maksymalny	I_{max}	42 A
Napięcie stosu rSOC w I_{max}	V_{max}	240,64 V
Produkcja wodoru	$\dot{m}_{\text{H}_2\text{max}}$	0,282 kg H ₂ /h

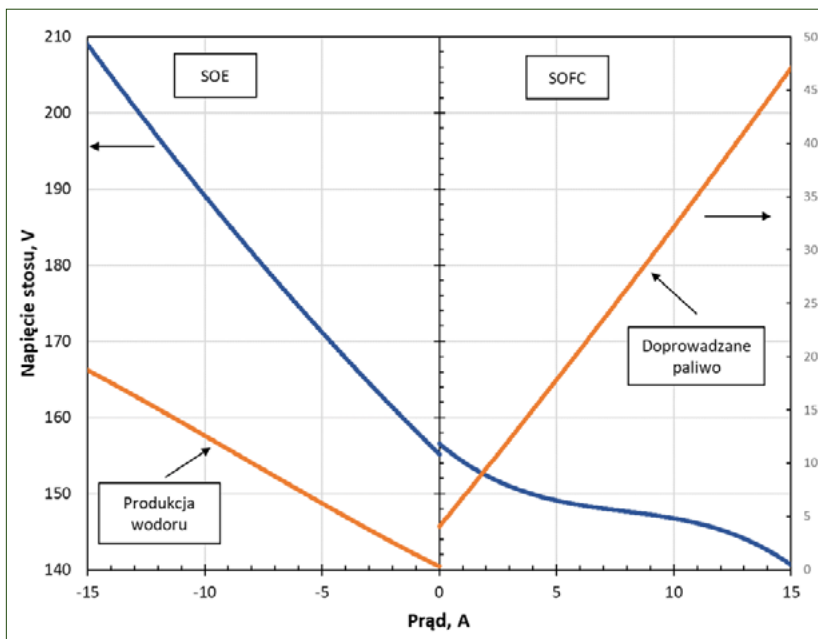
Tab. 1. Zestawienie parametrów pracy rejestrowanych w trybie elektrolizera

Parametr	Oznaczenie	Wartość
Temperatura wylotowa powietrza ze stosu	$T_{O\text{Eout}}$	665-700°C
Temperatura wylotowa strony paliwowej	$T_{F\text{Eout}}$	637-655°C
Maksymalna moc elektryczna	P_{max}	5,55 kW
Prąd maksymalny	I_{max}	36 A
Napięcie stosu rSOC w I_{max}	V_{min}	154 V
Przepływ wodoru	$\dot{V}_{\text{H}_2\text{max}}$	2,3-3,3 Nm ³ /h

Tab. 2. Zestawienie parametrów pracy rejestrowanych w trybie ogniwa paliwowego



Rys. 7. Przebieg poszczególnych temperatur w trakcie ruchu długoczasowego, z zaznaczeniem wartości parametru na linii paliwowej (FE) oraz powietrznej (EO), na wejściu i wyjściu z grzałek na tych liniach (GRZ-F, GRZ-O) oraz za dopalaczem gazów resztkowych (DOP)



Rys. 8. Przebieg zmian napięcia stosu rSOC w czasie procedury przejścia między trybem elektrolizy do trybu ogniwa paliwowego

Zmianę charakterystycznych wartości napięcia i strumienia wodoru podczas zmian tego typu przedstawia wykres na rys. 6.

Podsumowanie

Omawiamy projekt i instalacja był pierwszą w skali świata demonstracją

działania instalacji rSOC zintegrowanej z obiegiem parowym rzeczywistego obiektu energetyki. Instalacja, która powstała w Elektrociepłowni Elbląg jest obiektem w małej skali, który umożliwił potwierdzenie szczególnie wysokiej sprawności SOC zarówno podczas ich pracy w trybie SOE, jak i SOFC. Uzyskana sprawność elektrolizera powyżej

80%, pomimo małej mocy instalacji (klasa 10 kW) jest wyróżnikiem technologii. Dalszy rozwój technologii prowadzony jest w ramach już trwających projektów, dotyczących instalacji z SOE klasy 30, 400, 5 000 i 6 000 kW, przewidzianych do integracji z różnymi procesami. Co istotne, w każdym z tych przedsięwzięć, prace zorientowane są na wprowadzanie udoskonaleń konstrukcyjnych zarówno w konstrukcji samego ogniwa, jak również stosu i ciągu procesowego instalacji z SOE.

Z punktu widzenia pozyskanych doświadczeń, projekt HYDROGIN jest przełomowy i kluczowy dla rozwoju polskich technologii produkcji wodoru. W ciągu trzech lat udało się osiągnąć wszystkie założone cele. Na podkreślenie zasługuje fakt, iż integracja elektrolizera stałotłokowego z obiektami przemysłowymi niesie ze sobą wiele wyzwań, jednak udało się je przewyżnić. To niewątpliwie zasługa skutecznej współpracy zespołów projektowych CBRF z Grupy ORLEN, IMP PAN i IEn oraz efekt wielomiesięcznych prac prowadzonych bezpośrednio na obiekcie, podczas strojenia instalacji i wprowadzania działań zaradczych, gdy tylko te były potrzebne. Prace projektowe przypadły na trudny okres - najpierw pandemii, później sytuacji w Ukrainie spowodowały wiele utrudnień, pomimo to udało się je z sukcesem zrealizować. □

Podziękowania

Praca powstała w ramach projektu nr POIR.01.01.01-00-0335/19 współfinansowanego w latach 2020-2023 ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój 2014-2020, Priorytet I: Wsparcie prowadzenia prac B+R przez przedsiębiorstwa, Działanie 1.1 Projekty B+R przedsiębiorstw, Poddziałanie 1.1.1 Badania przemysłowe i prace rozwojowe realizowane przez przedsiębiorstwa.