



Paweł MIREK\*

## Technika magazynowania energii w ciekłym powietrzu

STRESZCZENIE: Zainteresowanie układami magazynowania energii jest naturalną konsekwencją realizacji polityki „20-20-20”, która zgodnie z zapisami Pakietu Energetyczno-Klimatycznego zakłada stopniowe zwiększenie udziału odnawialnych źródeł energii w technologiach produkcji ciepła i elektryczności. Zgodnie z prognozami udział ten w roku 2050 powinien stanowić 57% globalnego zapotrzebowania na energię, przy czym energia z wiatru i słońca stanowić będzie 26% tej wartości. Niestety, zamiana tradycyjnych źródeł wytwarzania elektryczności na źródła rozproszone charakteryzujące się nierównomierną charakterystyką podaży stanowi ogromne wyzwanie dla całego systemu energetycznego. W tej sytuacji jedynym rozwiązaniem pozwalającym na stabilizację pracy sieci jest magazynowanie energii. Dzięki temu w sposób efektywny można rozdzielić procesy wytwarzania i konsumpcji elektryczności, co pozwala na uelastycznienie pracy źródeł wytwarzania. Wśród licznych rozwijanych obecnie technik magazynowania energii, na szczególną uwagę zasługuje technologia kriogeniczna oparta na ciekłym powietrzu (ang. *Liquid Air Energy Storage – LAES*). W porównaniu z innymi technologiami magazynowania technologia ta wykazuje wiele unikalnych zalet, z których najważniejsze to: niezależność od formacji geologicznych, możliwość zagospodarowania nadprodukcji ciekłego azotu, jak również wykorzystania źródeł o małej egzer-gii. Technologia LAES jest jedyną technologią magazynowania, która nie wykazuje szkodliwego oraz degradacyjnego oddziaływania na środowisko. Kriogeniczne magazyny energii wykazują pełną zdolność do integracji ze wszystkimi źródłami wytwarzania, mają stosunkowo prostą budowę a co najważniejsze nie wymagają projektowania urządzeń prototypowych znacznie zwiększających ryzyko i nakłady inwestycyjne instalacji.

W artykule dokonano wielokryterialnej analizy porównawczej różnych technik magazynowania energii ze szczególnym uwzględnieniem technologii LAES. Opisano podstawowe fazy procesu magazynowania energii w skroplonym powietrzu zwracając uwagę na korzyści wynikające z za-

---

\* Dr hab. inż., Prof. Politechniki Częstochowskiej – Instytut Zaawansowanych Technologii Energetycznych, Wydział Infrastruktury i Środowiska, Politechnika Częstochowska, e-mail: pmirek@neo.pl

stosowania bezpośredniej metody skraplania. Przedstawiono zalety integracji kriogenicznych układów magazynowania z systemem energetycznym oraz możliwości wykorzystania ich w procesie zagospodarowania źródeł energii o niskiej jakości.

SŁOWA KLUCZOWE: magazynowanie energii w skroplonym powietrzu (LAES), kriogeniczne magazynowanie energii (CES), skroplone powietrze

## Wprowadzenie

Jednym z najważniejszych celów polityki energetycznej krajów Wspólnoty Europejskiej jest dekarbonizacja technologii energetycznych. Cel ten planowano pierwotnie osiągnąć poprzez zwiększenie udziału odnawialnych źródeł energii (OZE) oraz opracowanie niskoemisyjnych technologii konwersji paliw kopalnych. Jak się jednak okazało, integracja źródeł odnawialnych z tradycyjnym systemem energetycznym narzuca konieczność poszukiwania bardziej użytecznych form energii, które można nie tylko efektywnie transportować w przestrzeni, ale także wykorzystywać w dowolnym czasie. Zadania te tylko połowicznie spełnia najbardziej rozpowszechniona forma energii, jaką jest elektryczność, którą wprawdzie można efektywnie przesyłać na odległość, ale którą jednocześnie bardzo trudno jest na chwilę obecną ekonomicznie opłacalnie magazynować. Stało się to motywacją do poszukiwania i rozwijania łatwych do deponowania alternatywnych form energii. Wśród nich w fazie demonstracji są obecnie technologie magazynowania energii w kole zamachowym, jak również w ogniwach paliwowych i wodorce (tab. 1). Natomiast w fazie wczesnej komercjalizacji pozostają magnetyczne technologie nadprzewodnikowe SMES.

W zestawieniu zaprezentowanym w tabeli 1 na szczególną uwagę zasługuje technika kriogeniczna magazynowania energii (ang. CES – *Cryogenic Energy Storage*), w której rolę zarówno czynnika roboczego jak i magazynu energii spełnia ciecz kriogeniczna o wysokiej gęstości energii (762 kJ/kg w przypadku N<sub>2</sub>) (Li i in. 2010). Choć idea skraplania powietrza znana jest od przeszło 132 lat, pierwsze próby magazynowania energii z wykorzystaniem tego czynnika datowane są na rok 1900, kiedy to amerykańska firma Tripler Liquid Air Company dokonała przełomowej próby skonstruowania samochodu napędzanego ciekłym powietrzem (The World 1900). Renesans tego typu prac nastąpił dopiero w drugiej połowie XX wieku. Jego zwińczeniem było zbudowanie na Uniwersytecie Północnego Teksasu koncepcyjnego zeroemisyjnego silnika kriogenicznego zdolnego do napędzania samochodów poruszających się z prędkością nieprzekraczającą kilku kilometrów na godzinę (Ordóñez i in. 2001). W 1998 r. firma Mitsubishi zaproponowała innowacyjną metodę wytwarzania elektryczności zwaną Liquid Air Storage Energy (LASE), w której czynnikiem magazynującym energię było skroplone powietrze (Kishimoto i in. 1998). Natomiast w roku 2010, w efekcie czterech lat eksperymentów prowadzonych przez firmę Highview Power Storage na Uniwersytecie Leeds,

TABELA 1. Porównanie różnych technik magazynowania energii (Taylor i in. 2012)

TABLE 1. Comparison of different energy storage technologies (Taylor et al. 2012)

Technologia	Sprawność [%]	Moc nominalna [MW]	Czas rozładowania*	Czas eksploatacji [rok]	Dojrzałość techniczna	Koszt energii, [USD/kWh]	
PSH	70–87	100–5000	1–24+ h	30–60	komercjalizacja	5–100	
CAES	70–89	50–300	1–24+ h	20–40	komercjalizacja	2–120	
LAES, CES	40–90	10–200	1–12+ h	20–40+	wczesna komercjalizacja	260–530	
FES	80–95	0,4–20	1–15 m	15–20	demonstracja/wczesna komercjalizacja	1000–14 000	
H <sub>2</sub> i og. paliwowe	20–85	0–50	s–24+ h	5–20	demonstracja	6–725	
Baterie	płynne	65–85	0,03–3	s–10 h	5–30+	badania/wczesna demonstracja	150–1000
	Li-Ion	75–90	1–100	0,15–1 h	5–15	demonstracja	600–3800
	metal-powietrze	~75	0,01–50	s–5 h	100–10 000 cykli	badania/wczesna demonstracja	10–340
	NaS	75–90	0,05–34	s–8 h	5–15	komercjalizacja	300–500
	niklowe	60–90	0–40	s–h	10–20	wczesna komercjalizacja	800–1500
	kwas.-Pb	63–90	0–40	s–10 h	5–20	komercjalizacja	200–400
SMES	90–97	0,1–10	ms–s	20–30	wczesna komercjalizacja	1000–10 000	
SC	<75–98	0–10	ms–1 h	8–20+	wczesna demonstracja	300–20 000	

PSH – elektrownie szczytowo-pompowe; CAES – magazynowanie energii w sprężonym powietrzu; LAES – magazynowanie energii w ciekłym powietrzu, FES – magazynowanie energii w kole zamachowym; SMES – magazynowanie energii w polu magnetycznym; SC – magazynowanie energii w superkondensatorach

\* s – sekunda, m – minuta, h – godzina.

wybudowano pierwszą instalację pilotową o mocy 350 kW przy elektrowni zlokalizowanej w parku przemysłowym Slough Industrial Estate w Wielkiej Brytanii (Morgan i in. 2015). Rok później z instalacją demonstracyjną zintegrowano urządzenie do skraplania powietrza wykazując pełną zdolność układu do magazynowania energii w skroplonym powietrzu. Obecnie na ukończeniu jest instalacja LAES o mocy 5 MW realizowana w Greater Manchester w Wielkiej Brytanii dla przedsiębiorstwa Viridor. Projekt ma charakter przedkomercyjny, a jego zadaniem jest wykazanie potencjału układu LAES do krótkoterminowego magazynowania energii oraz zapewnienia jej dostaw w sezonie zimowym, zwłaszcza w okresach zwiększonego zapotrzebowania na elektryczność (Highview Power Storage 2015). Doświadczenia zebrane na instalacjach pilotowych zbudowanych w Wielkiej Brytanii mają być podstawą do realizacji magazynu energii GigaPlant o mocy 200 MW/4,32 TWh, w którego projekt zaangażowani są największy dostawcy urządzeń stosowanych w energetyce (Liquid Air Energy Storage 2015). W instalacji

kriogenicznej pracującej w Slough Industrial Estate chłód magazynowany jest przy niskim ciśnieniu, natomiast proces skraplania realizowany jest na podstawie obiegu Claude'a (Morgan i in. 2015). Znane są jednak inne konfiguracje kriogenicznych magazynów energii, w których wykorzystuje się układy hybrydowe obiegów Lindego i Rankine'a (Ameel i in. 2013), pośrednie układy Rankine'a i Braytona (Li i in. 2010) oraz układy, w których integruje się obieg Rankine'a lub Braytona z bezpośrednią metodą rozprężania (Li i in. 2010). Instalacje LAES proponuje się także konsolidować z układami do spalania w atmosferze wzbogaconej tlenem oraz wychwytu ditlenku węgla (Li i in. 2011). Wysokie tempo rozwoju kriogenicznych magazynów energii pozwoliło na to, aby technika ta w ciągu zaledwie kilku lat przeszła z fazy badań do fazy wczesnej komercjalizacji. Zdaniem analityków potencjał technologii LAES do osiągnięcia wysokiej mocy znamionowych pozwala jej konkurować z takimi technologiami jak PSH czy CAES (Taylor i in. 2012). Tym bardziej zaskakujący wydaje się fakt, że technologia ta nie została wymieniona w dokumencie „European energy storage technology development roadmap towards 2030” opracowanym przez European Association for Storage of Energy oraz nie znalazła swojego miejsca w Mapie Drogowej opracowanej do roku 2050 przez International Energy Agency (IEA 2014; European EST development roadmap towards 2030 2014). Jaki jest zatem realny potencjał technologii LAES? Czy technologia ta pozwoli na efektywne rozdzielenie procesu wytwarzania i konsumpcji elektryczności? Czy stanie się brakującym ogniwem pozwalającym na realne uelastycznienie pracy bloków energetycznych oraz bezpieczne magazynowanie energii? Celem artykułu jest znalezienie odpowiedzi na te pytania, jak również przybliżenie idei oraz bieżącego stanu rozwoju technologii LAES.

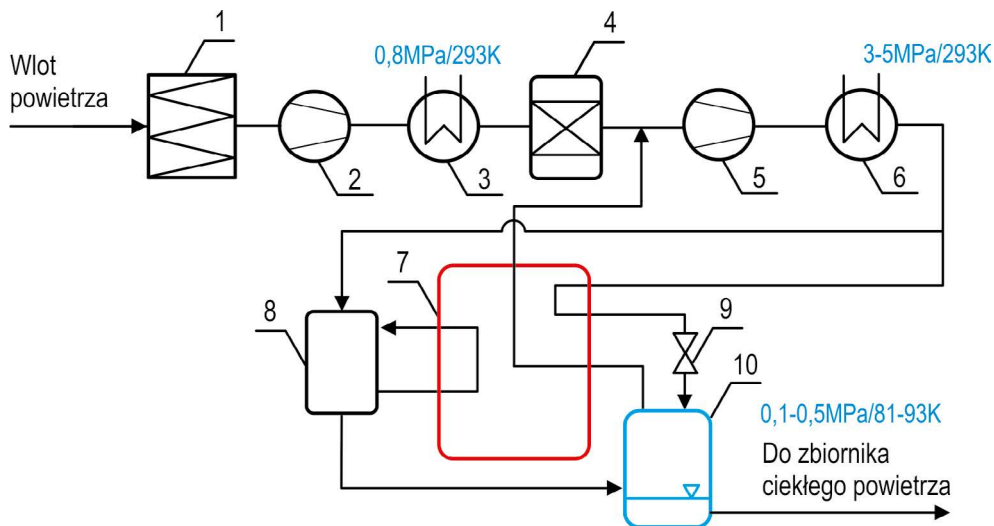
## 1. Idea procesu magazynowania energii w skroplonym powietrzu

Proces magazynowania energii w skroplonym powietrzu obejmuje trzy fazy:

1. Ładowania zbiornika skroplonym powietrzem,
2. Magazynowania ciekłego powietrza,
3. Rozładowania magazynu energii.

### Faza I – Ładowania zbiornika skroplonym powietrzem

W procesie ładowania magazynu energii pierwszym etapem jest wstępne oczyszczenie powietrza na filtrze 1 z zanieczyszczeń stałych (rys. 1). W drugim etapie następuje sprężanie powietrza w sprężarce 2 do ciśnienia nieprzekraczającego 0,8 MPa oraz schłodzenie go w wymienniku 3 do temperatury ok. 293 K. Z uwagi na niebezpieczeństwo zatkania instalacji zestalonym ditlenkiem węgla oraz lodem, istotnym etapem jest adsorpcyjne oddzielenie tych substancji na sitach molekularnych w jednostce 4.



Rys. 1. Schemat procesu przygotowania i ładowanie zbiornika skroplonym powietrzem  
 1 – filtr zanieczyszczeń stałych, 2 – sprężarka wstępna, 3 – wymiennik ciepła, 4 – jednostka oczyszczania powietrza z wilgoci i ditlenku węgla na sitach molekularnych, 5 – sprężarka, 6 – wymiennik ciepła, 7 – układ wymienników ciepła, 8 – turbina, 9 – zawór rozprężny, 10 – skraplacz

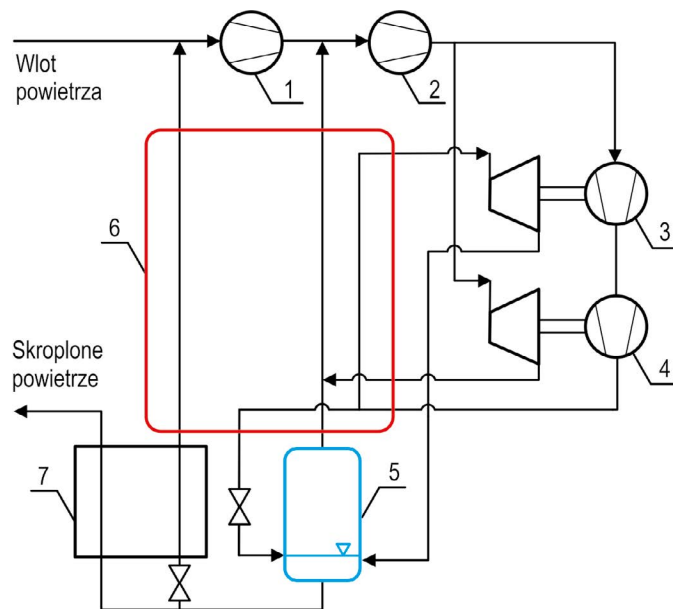
Fig. 1. Schematic diagram of the processes of charging the system and energy storage in the liquid air energy storage technology  
 1 – particulate filter, 2 – preliminary compressor, 3 – heat exchanger, 4 – carbon dioxide and moisture molecular sieve, 5 – compressor, 6 – heat exchanger, 7 – battery of heat exchangers, 8 – turbine, 9 – expansion valve, 10 – liquefier

W kolejnym etapie następuje sprężanie oczyszczonego powietrza w tzw. sprężarce recykulacyjnej 5 do ciśnienia 3–5 MPa oraz schłodzenie go w wymienniku ciepła 6 do temperatury 293 K. Część sprężonego powietrza kierowana jest poprzez układ wymienników 7 na zawór rozprężny 9, gdzie dochodzi do jego gwałtownego ochłodzenia oraz częściowej kondensacji. Pozostała część kierowana jest na turbinę 8, w której następuje rozprężenie i dalsze schłodzenie powietrza. Nieskondensowany strumień powietrza kierowany jest ze skraplacza 10 poprzez układ wymienników 7 na wlot kompresora 5. W tej części instalacji strumień ten pełni rolę czynnika chłodzącego.

Proces skraplania powietrza może być realizowany na dwa sposoby:

- ◆ metodami kaskadowymi, gdzie poszczególne składniki powietrza z uwagi na ich różne temperatury wrzenia oddzielane są stopniowo, począwszy od tlenu (90 K), poprzez argon (87 K) a skończywszy na azocie (77 K),
- ◆ metodami bezpośrednimi, gdzie powietrze schładzane jest do temperatury 77 K.

Skraplanie kaskadowe jest procesem dużo bardziej złożonym, a przy tym znacznie wydajniejszym w porównaniu do skraplania bezpośredniego. Wadą tej metody jest jednak wysoki koszt urządzeń, co w znacznym stopniu ogranicza możliwości jej zastosowania. W układach LAES wykorzystuje się najczęściej metodę bezpośredniego skraplania, której przykładowy schemat technologiczny pokazano na rysunku 2.

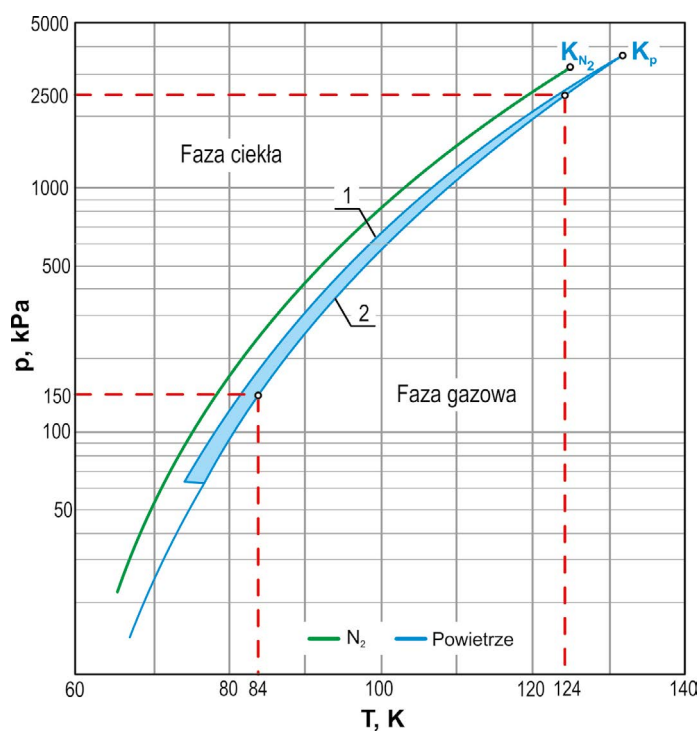


Rys. 2 Schemat ideowy instalacji do bezpośredniego skraplania powietrza  
 1 – sprężarka I-stopnia, 2 – sprężarka II-stopnia, 3 – zespół turbina-sprężarka I-stopnia, 4 – zespół turbina-sprężarka II-stopnia, 5 – skraplacz, 6 – zespół wymienników ciepła, 7 – dochlładzacz

Fig. 2 Schematic diagram of a direct air liquefaction process  
 1 – first stage compressor, 2 – second stage compressor, 3 – first stage compressor-turbine set, 4 – second stage compressor-turbine set, 5 – liquefier, 6 – battery of heat exchangers, 7 – subcooler

W pierwszym etapie powietrze sprężane jest w sprężarce I-stopnia 1, a następnie po ochłodzeniu (na skutek zmieszania z powietrzem ze skraplacza 5) w sprężarce II-stopnia 2. Część powietrza ze sprężarki 2 kierowana jest do zespołu turbina-sprężarka II-stopnia 4, gdzie zostaje rozprężona, schłodzona a następnie zmieszana z powietrzem o niskiej temperaturze ze skraplacza 5 skierowanym na sprężarkę II-stopnia 2. Pozostały strumień powietrza podlega dalszemu sprężaniu w zespole turbosprężarek 3 i 4, by następnie, poprzez zawór izentalpowy ulec gwałtownemu rozprężeniu i skropleniu w skraplaczu 5. Część strumienia powietrza ze sprężarki 4 kierowana jest do rozprężarki zespołu turbina-sprężarka I-stopnia 3, gdzie następuje jego dalsze ochłodzenie do temperatury skraplania. Większość skroplonego powietrza po przejściu przez dochlładzacz 7 magazynowana jest w zasobniku, natomiast niewielka jego część kierowana jest na sekcję wlotową sprężarki I stopnia 1. Z uwagi na fakt, że skraplanie powietrza realizowane jest w układzie, w którym występuje zarówno zawór izentalpowy, jak i rozprężarka, schemat ideowy pokazany na rysunku 2 traktować można jako zmodyfikowany układ Claude'a. Ilość energii potrzebnej do wyprodukowania 1000 kg ciekłego tlenu lub azotu z wykorzystaniem najbardziej efektywnej obecnie technologii wynosi odpowiednio: 2,30 oraz 1,98 MWs (EIGA, [Position Paper PP-33, 2010](#)). Zakładając, że proces separacji pochłania około 20% energii, wyprodukowanie jednej tony ciekłego powietrza wiąże się z koniecznością dostarczenia ok. 1,65 MWs energii.

W procesie skraplania istotną rolę odgrywa sprężarka recyrkulacyjna, której zadaniem jest podniesienie ciśnienia powietrza do wartości od 3 do 5 MPa. Wartości te wynikają z parametrów punktu krytycznego K, które dla powietrza wynoszą  $T_k = 132,5 \text{ K}$  oraz  $p_k = 3,77 \text{ MPa}$  (rys. 3). Powietrze może być więc skroplone wyłącznie w temperaturach niższych od temperatury krytycznej, przy czym jak wynika z wykresu pokazanego na rysunku 3, przy ciśnieniu 2500 kPa proces kondensacji rozpoczyna się w temperaturze około 124 K, natomiast przy ciśnieniu 150 kPa w temperaturze 84 K.



Rys. 3. Wykres przemiany fazowej powietrza w funkcji temperatury i ciśnienia  
 1 – krzywa początku procesu parowania, 2 – krzywa początku procesu kondensacji.  
 Opracowano na podstawie (Cryogenic air separation 2013)

Fig. 3. Vapour pressure curves of nitrogen and air.  
 1 – air-evaporation curve, 2 – air-condensation curve

Ze względu na to, że zarówno powietrze, jak i azot mają zbliżone właściwości termofizyczne w układach LAES rozważa się często możliwość zastąpienia skroplonego powietrza wyłącznie ciekłym azotem. Podstawową zaletą wykorzystania tego gazu jest szansa zagospodarowania dużej ilości nadwyżek, które powstają w procesie kaskadowego skraplania tlenu. Na korzyść azotu przemawiają także problemy, jakie wynikają z długotrwałego przechowywania ciekłego powietrza, które w miarę upływu czasu potrafi wzbogacać swój skład w tlen. Z drugiej strony, produkcja ciekłego powietrza nie wymaga tak skomplikowanej aparatury, cechuje się mniejszym

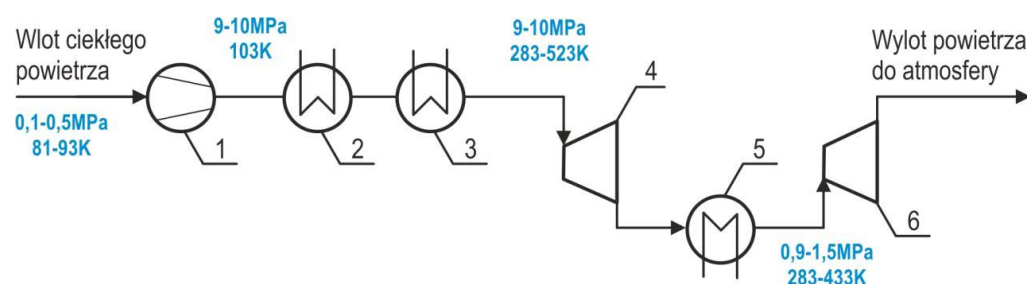
nakładem energetycznym i w związku z tym jest bardziej ekonomicznie opłacalna. Za produkcją ciekłego powietrza przemawiają także względy bezpieczeństwa. Ponieważ azot nie bierze udziału w procesach związanych z oddychaniem, instalacja skraplania tego gazu nie powinna być umieszczana w zamkniętych pomieszczeniach lub też pomieszczenia te powinny być dobrze wentylowane. W ostatecznym rozrachunku wybór rodzaju skroplonego gazu zależeć będzie od wielu czynników, które należy wziąć pod uwagę przy projektowaniu konkretnego magazynu energii.

### Faza II – Magazynowanie ciekłego powietrza

Ciekłe powietrze oddzielone w skraplaczu 10 (rys. 1) magazynowane jest następnie w izolowanym zbiorniku pod ciśnieniem od 0,1 do 0,5 MPa i w temperaturze od 81 do 93 K. Do tego celu wykorzystuje się zbiorniki izolowane próżniowo (pojemność nie większa niż 300 m<sup>3</sup>) bądź płaskodenne wielkogabarytowe zbiorniki cylindryczne (pojemność większa niż 500 m<sup>3</sup>) izolowane szkłem wulkanicznym. Istotnym problemem w procesie magazynowania skroplonego powietrza są straty spowodowane niedoskonałością izolacji. Szacuje się, że szybkość odparowania poszczególnych składników powietrza może wynosić od 0,1 do 0,2% na dobę, przy czym dla zbiorników o większych pojemnościach strata ta zazwyczaj jest dużo mniejsza (*Indirect CO<sub>2</sub> emissions compensation: Benchmark proposal for Air Separation Plants 2010*).

### Faza III – Rozładowanie magazynu energii

Proces rozładowania magazynu energii zazwyczaj przebiega według cyklu Rankine’a. W pierwszym etapie skroplone powietrze zasysane jest ze zbiornika ciekłego powietrza przez pompę kriogeniczną 1, która podnosi jego ciśnienie do wartości od 9 do 10 MPa i kieruje do parownika 2 (rys. 4).



Rys. 4. Schemat procesu rozładowania magazynu energii ze skroplonym powietrzem  
1 – pompa kriogeniczna, 2 – parownik, 3 – wymiennik ciepła, 4 – turbina wysokiego ciśnienia, 5 – wymiennik ciepła, 6 – turbina niskiego ciśnienia

Fig. 4. Schematic diagram of a power recovery process in a liquid air energy storage technology  
1 – cryogenic liquid pump, 2 – evaporator, 3 – heat exchanger, 4 – HP turbine, 5 – heat exchanger, 6 – LP turbine

Następnie powietrze podgrzewane jest w wymienniku ciepła 3, w którym czynnikiem ogrzewającym jest ciepło odpadowe z dowolnego procesu produkcyjnego bądź powietrze atmosferyczne.



ryczne. Ogrzane do temperatury 283–523 K powietrze o ciśnieniu 9–10 MPa trafia na część wysokoprężną turbiny 4, która częściowo rozprężony czynnik kieruje na międzystopniowy wymiennik ciepła 5. Stąd, powietrze o ciśnieniu nie większym niż 1,5 MPa oraz temperaturze nieprzekraczającej 433 K przepływa do turbiny 6, gdzie następuje jego całkowite rozprężenie. Rozładowanie magazynu energii może być realizowane także z wykorzystaniem cyklu rozprężania bezpośredniego, w którym ciecz kriogeniczna będąca pod wysokim ciśnieniem przed wykonaniem pracy ogrzewana jest ciepłem odpadowym lub pochodzącym z otoczenia, pośredniego obiegu Braytona lub w układzie kombinowanym (Li i in. 2010).

Efektywność procesu magazynowania energii w skroplonym powietrzu przedstawionego schematycznie na rysunku 1, 2 i 4 w dużym stopniu zależy od możliwości wykorzystania ciepła odpadowego w procesie rozprężania czynnika roboczego oraz ciepła wytwarzanego w procesie ładowania zbiornika skroplonym powietrzem. Szacuje się, że w optymalnie zorganizowanym procesie rzeczywista sprawność układu powinna osiągnąć wartość około 60% (Morgan i in. 2015; Strahan red. 2013). Podobne wnioski wypływają z pracy Ameela i in. 2013, w której w układzie złożonym z obiegu Lindego i Rankine’a wzrost temperatury źródła ciepła odpadowego od 300 do 400 K skutkowało podniesieniem sprawności od 43,3 do 63,7%. Dla układów hybrydowych zaproponowanych przez Li i in. 2011, sprawność magazynowania elektryczności wynosi około 54% z możliwością podwyższenia jej poprzez podniesienie temperatury na wejściu turbiny gazowej, prowadzenie procesu spalania przy optymalnym ciśnieniu 0,7 MPa oraz podniesienie sprawności izentropowej turbiny gazowej, jak również sprawności procesu skraplania tlenu i azotu. W przypadku układów będących połączeniem technologii CAES oraz LAES maksymalna sprawność procesu skraplania powietrza może osiągnąć wartość 63%, natomiast dla procesu odwrotnego 67% (Kantharaj i in. 2015).

## 2. Korzyści integracji układów LAES z systemem energetycznym

Podstawowym wyzwaniem, jakie stoi obecnie przed każdym systemem energetycznym, w którym rośnie udział nieciągłych źródeł wytwarzania (m.in. farmy wiatrowe, ogniwa fotowoltaiczne) jest precyzyjne bilansowanie zapotrzebowania na elektryczność. Zadanie to realizuje się obecnie na trzy sposoby poprzez:

- ◆ elastyczną pracę źródeł wytwarzania,
- ◆ przyłączenie sieci krajowej do sieci zewnętrznych (krajów sąsiadujących),
- ◆ elastyczne wykorzystanie energii przez odbiorców końcowych.

Najstarszą formą bilansowania zmiennego zapotrzebowania na elektryczność jest uelastycznienie pracy źródeł wytwarzania. W systemach konwencjonalnych, budowanych najczęściej na bazie elektrowni kondensacyjnych, rolę taką spełnia najczęściej kocioł, którego zmienne obciążenie cieplne korelowane jest z malejącym lub rosnącym popytem na energię. Niestety, ela-

styczność kotłów kondensacyjnych ma swoje ograniczenia, z których najważniejsze to: duża bezwładność cieplna (zwłaszcza kotłów o znacznych mocach) oraz brak możliwości pracy poniżej minimum technicznego.

Drugim sposobem poprawy elastyczności pracy sieci energetycznej jest przyłączenie jej do sieci zewnętrznych krajów sąsiadujących. W ten sposób realizuje się politykę dostaw energii z rynków, gdzie jej ceny są niższe do rynków, w którym osiągają one duże wartości. Przyłączenie krajowej sieci energetycznej do sieci państw sąsiadujących pozwala na jej pełniejsze wykorzystanie, zwłaszcza w okresach nadprodukcji elektryczności ze źródeł odnawialnych, podczas których energia ta może być eksportowana.

Trzecim sposobem zwiększenia elastyczności pracy sieci energetycznej jest rozwój sieci inteligentnych, w których stopień obciążenia próbuje się kształtować przesuwając okres maksymalnego zapotrzebowania na elektryczność do czasu, w którym występuje największa podaż. Zadanie to realizuje się poprzez wdrażanie polityki zachęty wykorzystania elektryczności przez odbiorców końcowych w okresach, w których ceny energii są najniższe. Niestety, pomimo tego, że sieci inteligentne wykazują duży potencjał do kształtowania elastycznego obciążenia systemu energetycznego, zarówno wysokie koszty inwestycyjne, jak i nieprzewidywalne reakcje konsumentów nadal stanowią poważne przeszkody na drodze do ich pełnej implementacji. Z tego względu, największe nadzieje na poprawę elastyczności pracy systemu energetycznego wiąże się obecnie z technologiami magazynowania energii, w tym technologią kriogeniczną (Li i in. 2011; Li i in. 2013; Strahan red. 2013; Zhang i in. 2015). Mówiąc o zaletach układów LAES, najczęściej podkreśla się ich rolę przy poprawie stabilności i niezawodności pracy sieci energetycznych. Zakres potencjalnych zastosowań magazynów energii bazujących na skroplonym powietrzu jest jednak znacznie szerszy i obejmuje:

- ◆ zwiększenie wykorzystania źródeł odnawialnych o zmiennej charakterystyce dostaw energii,
- ◆ zwiększenie dostępu do samodzielnych systemów energetycznych (np. systemów fotowoltaicznych),
- ◆ poprawę efektywności wykorzystania zasobów energetycznych,
- ◆ zapewnienie dostawy energii dla zimnego rozruchu bloków energetycznych.

Zalety te są typowe nie tylko dla układów LAES, ale także systemów bazujących na sprężonym powietrzu, bateriach oraz układach szczytowo-pompowych. Jednak tym, co decyduje o unikalności układów LAES jest:

- ◆ w porównaniu z układami CAES – kilkudziesięciokrotnie większa gęstość energii cieczy kriogenicznej (CAES –  $18 \text{ MJ/m}^3$ ; LAES –  $660 \text{ MJ/m}^3$ ), którą można magazynować niezależnie od formacji geologicznych w sztucznych izolowanych zbiornikach przy ciśnieniu atmosferycznym (Ameel i in. 2013; Kantharaj i in. 2015),
- ◆ w porównaniu z bateriami – brak szkodliwego oddziaływania na środowisko w wyniku konieczności stosowania toksycznych materiałów,
- ◆ w porównaniu z układami PSH – kilkusetkrotnie większa gęstość energii cieczy kriogenicznej oraz brak degradacyjnego oddziaływania na środowisko,
- ◆ możliwość zagospodarowania nadprodukcji ciekłego azotu, który w normalnym stanie uwalniany jest bezpowrotnie do otaczającego powietrza (Zhang i in. 2015).

Układy LAES wykazują potencjał do długoterminowego magazynowania energii (straty na poziomie 0,05% objętościowych na dobę (Morgan i in. 2015)) zachowując jednocześnie bardzo krótki czas reakcji (około kilku minut) w fazie produkcji elektryczności (Taylor i in. 2012). Ponieważ ciecz kriogeniczna jest nie tylko nośnikiem energii, ale także czynnikiem roboczym, niebagatelną zaletą układów LAES jest ich zdolność do zagospodarowania znacznych ilości ciepła i chłodu odpadowego. Ma to ogromne znaczenie, gdyż źródła energii o niskiej jakości nawet na obecnym etapie rozwoju bardzo trudno jest wykorzystać, czego najlepszym przykładem jest przemysł w Wielkiej Brytanii, w którym straty z tytułu niezagospodarowanego ciepła odpadowego szacuje się na poziomie aż 144PWs (Strahan red. 2013). Jest to energia, która pozwoliłoby na ogrzanie 2,4 miliona gospodarstw domowych (Strahan red. 2013). W Polsce istnieją ogromne zasoby niewykorzystanych źródeł o niskiej energii, które spotkać można przede wszystkim w przemyśle metalurgicznym, petrochemicznym oraz energetycznym. Szansę na wykorzystanie takich źródeł stwarza także eksploatowany terminal LNG w Świnoujściu, gdzie układy LAES mogą być wykorzystywane w procesie regazyfikacji gazu ziemnego. Jak wynika z doświadczeń eksploatacyjnych japońskich i koreańskich terminali LNG, wykorzystanie układów kriogenicznych w procesie podgrzewania gazu ziemnego pozwala na ograniczenie zużycia energii elektrycznej do produkcji skroplonego azotu aż o 67% (Strahan red., Rep. No 21 2013).

## Podsumowanie

Technologia magazynowania energii w ciekłym powietrzu stanowi realną alternatywę dla innych wielkoskalowych magazynów energii, do których zaliczane są obecnie: elektrownie szczytowo-pompowe, magazyny sprężonego powietrza oraz baterie. Choć na obecnym etapie układy LAES znajdują się w fazie wczesnej komercjalizacji, to z uwagi na dynamiczne tempo rozwoju wynikające między innymi z możliwości wykorzystania dostępnych urządzeń technologia ta ma szansę w niedługim czasie osiągnąć pełną dojrzałość komercyjną. Układy LAES charakteryzują się wysokim potencjałem integracyjnym. W systemie energetycznym mogą przyczynić się do zwiększenia wykorzystania źródeł odnawialnych o zmiennej charakterystyce dostaw energii, wpłynąć na poprawę efektywności wykorzystania zasobów energetycznych, a także zapewnić dostawy energii dla zimnego rozruchu bloków energetycznych. W porównaniu z układami CAES mogą być budowane niezależnie od istniejących formacji geologicznych. Są bezpieczne dla otoczenia i nie wymagają stosowania toksycznych materiałów i substancji. Pozwalają na wykorzystanie nadprodukcji ciekłego azotu, a przede wszystkim wykorzystanie energii niskiej jakości, które w znacznym stopniu podnoszą ich sprawność. Doświadczenia płynące z eksploatacji instalacji LAES w Slough Industrial Estate w Wielkiej Brytanii wykazały wysoki potencjał tych układów do efektywnego rozdzielenia procesu wytwarzania i konsumpcji elektryczności, pozwalając na realne uelastycznienie pracy nie tylko samej sieci energetycznej, ale przede wszystkim źródeł wytwarzania.

## Literatura

- AMEEL i in. 2013 – AMEEL, B., T'JOEN, C., DE KERPEL, K., DE JAEGER, P., HUISSEUNE, H., VAN BELLE-GHEM, M. i DE PAEPE, M. 2013. Thermodynamic analysis of energy storage with a liquid air Rankine cycle. *Applied Thermal Engineering* 52, s. 130–140.
- Cryogenic air separation. History and technological progress. Linde Engineering, 2013. [Online] Dostępne w: [http://www.linde-engineering.com/internet.global.lindeengineering.global/en/images/AS.B1EN%201113%20-%20%26AA\\_History\\_.layout19\\_4353.pdf](http://www.linde-engineering.com/internet.global.lindeengineering.global/en/images/AS.B1EN%201113%20-%20%26AA_History_.layout19_4353.pdf) [Dostęp: 30.09.2015].
- European energy storage technology development roadmap towards 2030, 2014. European Association for Storage of Energy, European Energy Research Alliance. Editor Deborah Martens.
- Highview Power Storage, 5MW Liquid Air Energy Storage pre-commercial demonstrator [Online] Dostępne w: <http://www.highview-power.com/wp-content/uploads/2015-LAES-Pre-Commercial-Unit.pdf> [Dostęp: 30.09.2015].
- IEA. Technology Roadmap: Energy Storage. OECD/IEA (2014).
- Indirect CO<sub>2</sub> emissions compensation: Benchmark proposal for Air Separation Plants, 2010. European Industrial Gases Association (EIGA), Position Paper PP-33.
- KANTHARAJ i in. 2015 – KANTHARAJ, B., GARVEY, S. i PIMM, A. 2015. Compressed air energy storage with liquid air capacity extension. *Applied Energy* 157, s. 152–164.
- KISHIMOTO i in. 1998 – KISHIMOTO, K., HASEGAWA, K. i ASANO, T. 1998. Development of generator of liquid air storage energy system. *Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. Technical Review* Vol. 35, No. 3, Oct., s. 117–120.
- LI i in. 2010 – LI, Y., CHEN, H. i DING, Y. 2010. Fundamentals and applications of cryogen as a thermal energy carrier: a critical assessment. *International Journal of Thermal Sciences* 49, s. 941–949.
- LI i in. 2011 – LI, Y., JIN, Y., CHEN, H., TAN, Ch. i DING, Y. 2011. An integrated system for thermal power generation, electrical energy storage and CO<sub>2</sub> capture. *International Journal of Energy Research* Vol. 35, Issue 13, s. 1158–1167.
- LI i in. 2013 – LI, Y., WANG, X. i DING, Y. 2013. A cryogen-based peak-shaving technology: systematic approach and techno-economic analysis. *International Journal of Energy Research* Vol. 37, Issue 6, s. 485–682.
- Liquid Air Energy Storage (LAES). Pumped hydro capability. No geographical constraints. [Online] Dostępne w: <http://www.highview-power.com/wp-content/uploads/Highview-Brochure-2015.pdf> [Dostęp: 30.09.2015].
- MORGAN i in. 2015 – MORGAN, R., NELMES, S., GIBSON, E. i BRETT, G. 2015. Liquid air energy storage – Analysis and first results from a pilot scale demonstration plant. *Applied Energy* 137, s. 845–853.
- ORDONEZ i in. 2001 – ORDONEZ, C.A., PLUMMER, M.C. i REIDY, R.F. 2001. Cryogenic heat engines for powering zero emission vehicles. Proceedings of 2001 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, IMECE2001/PID-25620.
- STRAHAN, D. 2013. Liquid Air in the energy and transport systems. Opportunities for industry and innovation in the UK. Full Report. Centre for low carbon futures. Rep. No. 021.
- STRAHAN, D. 2013. Liquid air technologies – a guide to the potential. Centre for Low Carbon Futures and Liquid Air Energy Network, s. 11.
- TAYLOR i in. 2012 – TAYLOR, P., BOLTON, R., STONE, D., ZHANG, X., MARTIN, Ch. i UPHAM, P. 2012. Pathways for Energy Storage in the UK. Centre for Low Carbon Futures, s. 21.
- The World, June 24th 1900, New York.
- ZHANG i in 2015 – ZHANG, Q., GROSSMANN, I., HEUBERGER, C., SUNDARAMOORTHY, A. i PINTO, J. 2015. Air separation with cryogenic energy storage: Optimal scheduling considering electric energy and reserve markets. *American Institute of Chemical Engineers Journal* Vol. 61, Issue 5, s. 1547–1558.

Paweł MIREK

## Liquid air energy storage technology

### Abstract

The interest in energy storage systems is a natural consequence of the implementation of the “20-20-20” policy, which, in accordance with the provisions of the Energy and Climate Package assumes a gradual increase in the utilization of renewable energy resources in heat and power energy technologies. As expected, this share in 2050 should constitute 57% of the global demand for energy, but the wind and solar energy will constitute 26% of this value. Unfortunately, the replacement of the conventional power plants with the scattered renewable energy sources characterized by non-uniform characteristics of supply is the big challenge for the whole energy system. In this situation, the only solution to stabilization of the power grid system is to use energy storage systems. These systems are well suited for dispatching the processes of generation and utilization of energy allowing for significantly increasing the flexibility of the power plants. Nowadays, among the large number of developing energy storage technologies, a special attention deserves the liquid air energy technology (LAES). As compared with other energy storage technologies LAES has a number of unique advantages, which are: independence from geological formations, the possibility of utilization of a large surplus of liquid nitrogen as well as of low exergy resources. LAES technology is the only technology of storage, which causes no harmful and degrading impact on the environment. Cryogenic energy storages have ability to integration with all conventional power plants, have relatively simple structure and do not require a utilization of prototype devices, which significantly increase the risk and investment costs. In the paper a multi-criteria comparative analysis of different energy storage technologies with a particular attention on Liquid Air Energy Storage technology has been presented. Basic principles of Liquid Air Energy Storage as well as the benefits of a direct liquefaction method have been discussed. The advantages resulting from integration of the cryogenic energy storage technology with an electric power system as well as utilizing low-quality energy in such systems have been presented.

KEYWORDS: liquid air energy storage (LAES), Cryogenic Energy Storage (CES), liquid air

