

dr inż. Piotr Krawczyk, mgr inż. Aleksandra Mikołajczak,  
Instytut Techniki Ciepłej, Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa, Politechnika Warszawska

# Układy kombinowane do wytwarzania energii elektrycznej w procesie regazyfikacji LNG

Rosnące zapotrzebowanie na energię elektryczną oraz jednoczesny wzrost świadomości ekologicznej skłania naukowców na całym świecie do poszukiwania czystszych i bardziej efektywnych paliw. Jednym z nich jest gaz ziemny. Dostępność gazu ziemnego jest jednak ograniczona w wielu rejonach, również naszego kraju. Rozwiązaniem w takiej sytuacji może być gaz skroplony LNG. W ubiegłej dekadzie obserwowano znaczący rozwój infrastruktury sektora LNG (*ang. Liquid Natural Gas*), zarówno w zakresie skraplania, jak i regazyfikacji. Gaz ziemny zaspokaja ok. 25% światowego zapotrzebowania na energię, z czego 9,8% dostarcza się w postaci płynnej (LNG). Całkowity obrót LNG wyniósł 244,8 MT w 2015 r., czyli wzrósł o 4,7 MT w stosunku do roku poprzedniego. Artykuł przedstawia aspekty techniczne sposobów podnoszenia sprawności układów regazyfikacji gazu ziemnego w różnych konfiguracjach.

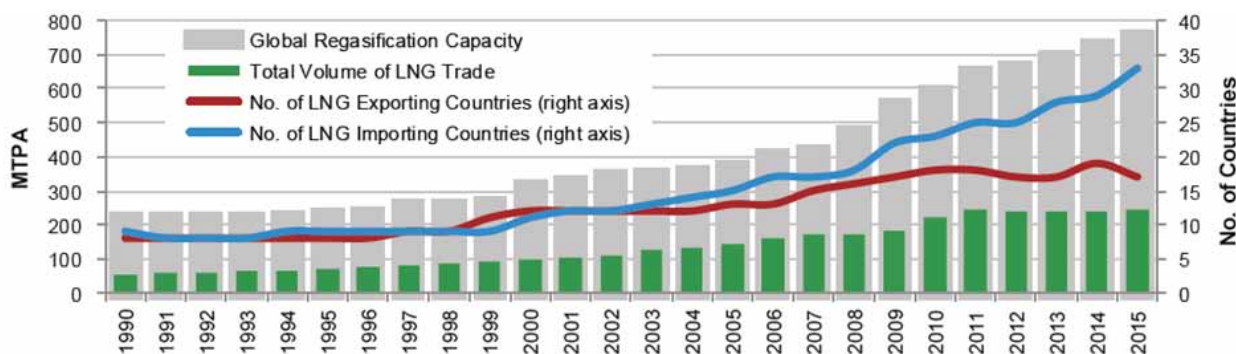
Systematyczny wzrost zapotrzebowania na skroplony gaz ziemny (LNG) zdaje się utrzymać w ciągu najbliższych lat. Globalna przepustowość układów regazyfikacji (zarówno na lądzie, jak i na morzach) osiągnęła w styczniu 2016 r. 757 MTPA. Zważając na rosnącą liczbę krajów importujących LNG oraz planowane inwestycje, takie jak nowe terminale regazyfikacji oraz mniejsze śródlądowe stacje regazyfikacji, przepustowość ta ma perspektywę dalszego wzrostu w najbliższym czasie.

Skraplanie gazu ziemnego oraz jego transport w stanie ciekłym jest ekonomicznie uzasadnione w przypadku, gdy

odbiorca znajduje się w znacznej odległości od miejsca wydobycia paliwa<sup>1</sup>. Generalnie skraplanie i transport LNG jest tańszy od budowy rurociągów dla odległości ok. 1000 km dla transportu morskiego oraz 4000 km w przypadku rurociągu śródlądowego.

Poszukiwania nowych źródeł gazu ziemnego przyczyniają się do zwiększenia zainteresowania jego transportem w postaci skroplonej. LNG przed dostarczeniem do odbiorcy końcowego musi zostać przekształcony do stanu gazowego. Proces ten nazywany regazyfikacją, zachodzi w stacjach regazyfikacji. Tradycyjne metody regazyfikacji opiera-

ją się o wytwarzanie ciepła niezbędnego do procesu odparowania gazu poprzez spalanie części regazyfikowanego paliwa, co generuje straty<sup>4,5</sup>. Procesy zachodzące od momentu wydobycia do zużycia u odbiorcy końcowego, takie jak chłodzenie kriogeniczne, transport morski, podnoszenie ciśnienia oraz regazyfikacja, są bardzo energochłonne. Mogą one wymagać konsumpcji nawet ponad 10% energii dostarczanego paliwa, co skutkuje ograniczeniem zdolności przesyłania, sprawności oraz spadkiem opłacalności wykorzystania LNG<sup>6,7</sup>. Co więcej, skraplanie i transport drogą morską znacznie obniżają zyski ekologiczne, w rozumieniu emisji



Source: IHS, IEA, IGU

Rys. 1. Obrót LNG oraz liczba krajów importujących i eksportujących to paliwo<sup>3</sup>

gazów cieplarnianych w przeliczeniu na jednostkę wyprodukowanej energii elektrycznej w oparciu o to paliwo<sup>8</sup>.

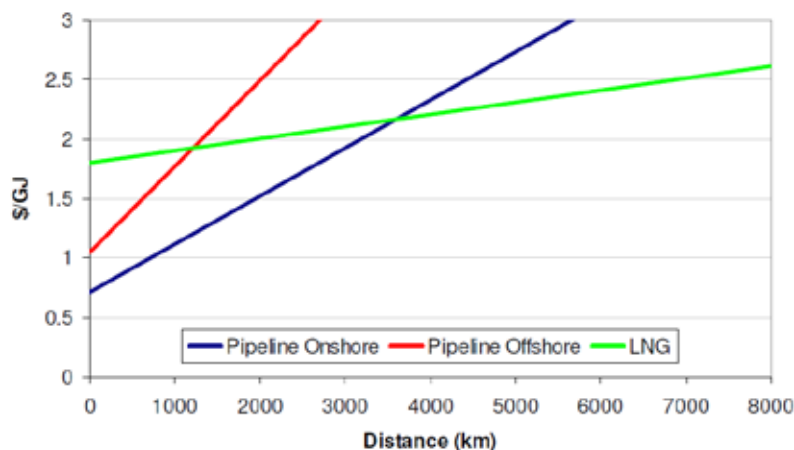
Część egzergii gazu ziemnego w postaci skroplonej może być odzyskana podczas procesu regazyfikacji i zamieniona na inny rodzaj energii, np. energię elektryczną. Przykładem realizacji takiego pomysłu może być zastosowanie cyklu Rankine'a<sup>1</sup>. Taka instalacja musi składać się z pompy zasilającej, wymiennika ciepła oraz turbiny. Gaz opuszczający taki układ (za turbiną) powinien mieć parametry umożliwiające dostarczenie go do odbiorcy końcowego. Niska temperatura parowania gazu ziemnego pozwala zastosować ciepło odpadowe lub ciepło uzyskane z odnawialnych źródeł energii (np. energii słonecznej lub geotermalnej), jako górne źródło ciepła, co może być dodatkową zaletą instalacji. Generacja energii elektrycznej z tego rodzaju źródeł w tradycyjnym podejściu jest zazwyczaj nieopłacalna ze względu na zbyt niskie temperatury możliwe do osiągnięcia, przy wykorzystaniu tych źródeł. Zastosowanie takiego podejścia pozwala uniknąć spalania transportowanego gazu.

### ■ Wybrane konfiguracje układów regazyfikacji

Parametry gazu na wylocie z instalacji regazyfikacji powinny być dostosowane do parametrów niskociśnieniowych rurociągów gazu. Maksymalne ciśnienie takiego gazu, zgodnie z regulacją Ministerstwa Energii nie może przekroczyć

10 kPa. Temperatura kształtuje się na poziomie 0°C.

Najprostszy układ do regazyfikacji gazu ziemnego z odzyskiem energii poprzez zastosowanie cyklu Rankine'a przedstawia rys. 3. Składa się on z dwóch wymienników ciepła (2 i 4), pompy wody (5), kriogenicznej pompy LNG (1) oraz turbiny (3). Pierwszy wymiennik ciepła jest umieszczony między pompą kriogeniczną i turbiną, a drugi - za turbiną, przed oddaniem gazu do odbiorcy końcowego. W wymiennikach ciepła gaz ogrzewa się kosztem ciepła oddanego przez wodę. Zza pierwszego wymiennika ciepła, gaz trafia na turbinę sprężniętą z generatorem, gdzie rozpręża się produkując energię elektryczną. Część tej energii zużywana jest na potrzeby własne układu (zasilanie pomp), natomiast pozostała część może zostać



Rys. 2. Koszty transport gazu ziemnego<sup>2</sup>

sprzedana lub wykorzystana do zaspokojenia innych potrzeb energetycznych przedsiębiorstwa. Zimna woda z za wymienników ciepła może być wykorzystana według potrzeb lokalnych przedsiębiorstw, bądź samej stacji regazyfikacji. Temperatura wody zasilającej wymienniki ciepła to ok. 30°C, natomiast temperatura wylotowa wody ok. 15-18°C. Przykładowo dla wydatku gazu rzędu 500 kg/h zastosowanie takiego układu pozwala na generowanie ok. 33 kW mocy elektrycznej.

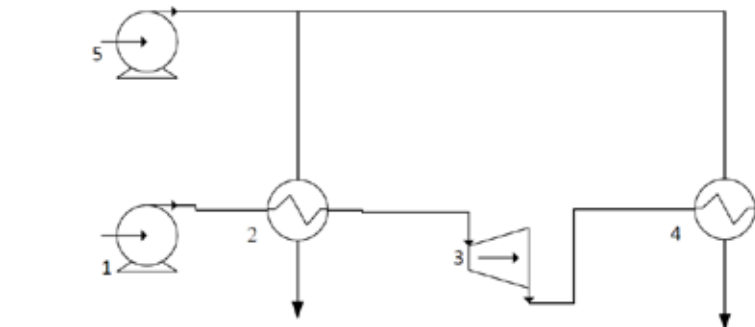
Innym przykładem tego typu rozwiązań może być wielostopniowy adiabatyczny układ regazyfikacji, przedstawiony na rys. 4. Składa się on z czterech wymienników ciepła (2, 4, 6 i 8) oraz trzech stopni turbinowych (3, 5 i 7). Pierwsze trzy podgrzewają gaz przed odpowiadającymi im stopniami turbinowymi, nato-

miast czwarty umieszczono za turbiną, podobnie jak w poprzedniej konfiguracji celem podwyższenia temperatury gazu do odpowiedniego poziomu. Układ wielostopniowy jest rozszerzeniem rozwiązania pierwszego, poprzez dodanie dodatkowych wymienników i podział procesu rozprężania na stopnie.

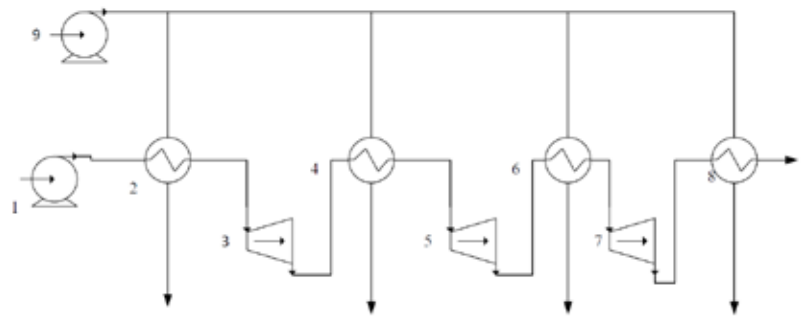
Zastosowanie takiego rozwiązania pozwoliło znacznie poprawić osiągi układu. Dla analogicznego wydatku masowego gazu możliwe jest osiągnięcie o ok. 20% większej mocy.

Trzeci zaprezentowany w tym artykule układ opiera się na wykorzystaniu ciepła odpadowego w układzie regazyfikacji (rys. 5). Jako źródło tego ciepła można wykorzystać mikroturbinę gazową lub gazowy silnik tłokowy (5). Ciepło odpadowe z silnika może pochodzić z dwóch źródeł: chłodzenia obudowy silnika (pompa 6) oraz z gazów wylotowych. Chłód otrzymany w wymiennikach ciepła (2 i 3) może zostać wykorzystany np. do chłodzenia warzyw czy owoców, w klimatyzacji lub do chłodzenia maszyn i urządzeń (w tym np. serwerowni), wszystko zależy od lokalnych uwarunkowań. Zastosowanie ciepła odpadowego z silnika lub mikroturbiny pozwala osiągnąć wyższą temperaturę gazu w układzie regazyfikacji, co skutkuje wyższą mocą elektryczną możliwą do wygenerowania. W opisywanym układzie zastosowano podgrzew dwustopniowy gazu. W pierwszym wymienniku ciepła (2) wykorzystywane jest ciepło z chłodzenia silnika, ze względu na niższe temperatury. W drugim kroku następuje podgrzew gazu ziemnego w wyniku oddawania ciepła od spalin, które mają znacząco wyższą temperaturę. Należy także podkreślić, że silnik gazowy spala paliwo, ale także produkuje energię elektryczną bądź mechaniczną, która może być wykorzystana do celów własnych przedsiębiorstwa, bądź sprzedana do sieci. Sprawność silników tłokowych zasilanych gazem ziemnym sięga dzisiaj 40%.

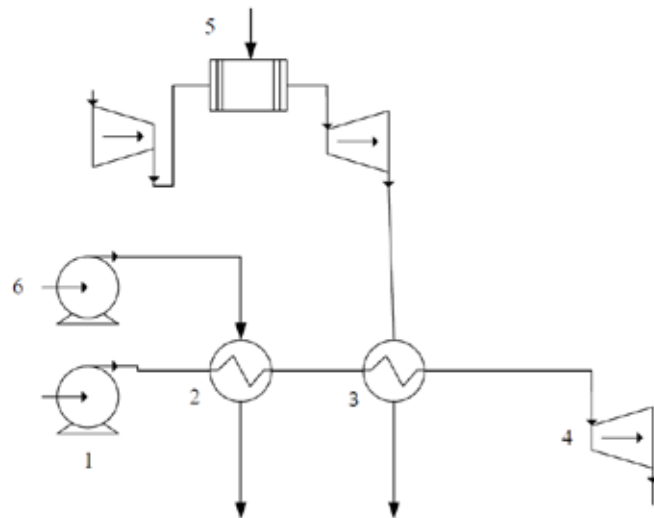
Opisany powyżej układ może odzyskać niecałe 60 kW (przy założeniu wydatku masowego gazu 500 kg/h). Gdy-



Rys. 3. Prosty adiabaticzny układ regazyfikacji LNG



Rys. 4. Wielostopniowy adiabaticzny układ do regazyfikacji LNG



Rys. 5. Układ regazyfikacji LNG wykorzystujący ciepło odpadowe

by uwzględnić także energię elektryczną wyprodukowaną przez silnik gazowy, układ może oddawać ponad 130 kW.

## ■ Podsumowanie

Zważywszy na zwiększające się zainteresowania gazem skroplonym

LNG należy (zdaniem autorów) spodziewać się rozwoju technologii wykorzystywanych w tym obszarze. Zaprezentowane układy do regazyfikacji gazu ziemnego pozwalają poprawić sprawność energetyczną tego procesu, w stosunku do technologii wykorzystywanych obecnie. Bazują one

na powszechnie znanych i stosowanych maszynach i urządzeniach. W celu porównania opisanych układów do regazyfikacji LNG, zestawiono ich podstawowe parametry (tab. 4). Przypomnijmy: obliczenia wykonano dla wydatku masowego gazu równego 500 kg/h oraz temperatury wody w wymiennikach od 27°C do 18°C.

Z powyższych danych wynika, że najkorzystniejszym energetycznie rozwiązaniem jest użycie ciepła odpadowego z silnika gazowego w układzie regazyfikacji LNG. Takie rozwiązanie pozwala uzyskać najwyższą moc generowaną w układzie i efektywnie zagospodarować ciepło odpadowe. W ramach prezentowanych prac nie prowadzono analiz ekonomicznych, których wyniki zdecydują o zasadności wdrożenia jednej z proponowanych koncepcji.

□

**Tab. 4. Przykładowe wyniki obliczeń dla poszczególnych konfiguracji**

Nazwa układu	Moc odebrana przez układ [kW]	Wydatek masowy wody [kg/h]	Sumaryczna moc ciepła w wymiennikach [kW]
Prosty adiabatyczny	33	14000	151
Wielostopniowy adiabatyczny	46	15300	167
Wykorzystujący ciepło odpadowe	57 (133)	9200	100

*Bibliografia:*

1. A. Chrzczonowski and K. Jesionek, "Analysis of turbine regasification system operating in Rankine cycle," *Model. Inżynierskie*, vol. 9, no. 40, pp. 37-42, 2010.
2. "http://www.gastechnology.org."
3. International Gas Union, "World LNG Report," 2016.
4. J. Molenda, *Gaz ziemny: paliwo i surowiec*. Wydawnictwo Naukowo Techniczne, 1996.
5. S. Deng, H. Jin, R. Cai, and R. Lin, "Novel co-generation power system with liquefied natural gas (LNG) cryogenic exergy utilization," *Energy*,

vol. 29, no. 4, pp. 497-512, Mar. 2004.

6. S. Sutopo and M. Archiastan, "20 years' operating experience of steam-driven sea water cooling in the badak lng plant," 1998.
7. K. Vink and R. Nagelvoort, "Comparison of Baseload Liquefaction Processes," in *Paper presented at the 1998 Intl. Conference on Liquefied Natural Gas, Perth, Australia, 4-7 May, 1998*.
8. T. Okamura, M. Furukawa, and H. Ishitani, "Future forecast for life-cycle greenhouse gas emissions of LNG and city gas 13A," *Appl. Energy*, vol. 84, no. 11, pp. 1136-1149, Nov. 2007.

INNOWACYJNE ŻYCIE.

# STACJE DO ŁADOWANIA SAMOCHODÓW ELEKTRYCZNYCH



**EKONOMIA UŻYTKOWANIA**

Nie przepłacaj - oszczędzaj!



**PROSTOTA OBSŁUGI**

Produkt przyjazny w użyciu



**INTEGRACJA Z SYSTEMEM**

Kontroluj i monitoruj zdalnie

