

# Sorpcyjne układy chłodzenia

## Cz. 7. Porównanie kosztów wytworzenia 6MW ciepła przy pomocy sprężarkowej i absorpcyjnej pompy ciepła oraz kotła gazowego

Marcin MALICKI

Najszybciej obecnie rosnącą grupę zastosowań technologii sorpcyjnej stanowią aplikacje absorpcyjnych pomp ciepła w systemach ciepłowniczych, technologicznych i energetycznych, prowadzące do znaczącego ograniczenia zużycia energii pierwotnej poprzez odzyskanie energii nieużytecznej, bądź wykorzystanie niskojakościowej energii odnawialnej. Kontynuując cykl poświęcony sorpcyjnym układom chłodzenia, przedstawiamy analizę porównawczą kosztów wyprodukowania ciepła przez kotłownię o mocy 6 MW, pracującą na potrzeby lokalnej miejskiej sieci ciepłowniczej, przy użyciu trzech różnych technologii: absorpcyjnej pompy ciepła z wbudowanym palnikiem, sprężarkowej pompy ciepła oraz kotła gazowego.

### Absorpcyjne pompy ciepła – charakterystyka urządzeń

Podstawową funkcjonalnością absorpcyjnej pompy ciepła (APC) jest wykorzystanie ciepła odpadowego w postaci nieużytecznej, nazywanego dolnym źródłem ciepła – DZ. Przy pomocy ciepła, o wysokiej temperaturze, używanego jako energia zasila jąca nazywanym górnym źródłem ciepła – GZ (w postaci bezpośredniego spalania paliwa we wbudowanym palniku, dostawy pary, bądź ostatecznie gorącej wody o temperaturze wyższej niż 100°C), w APC zachodzi zamiana DZ na ciepło użyteczne o temperaturze pośredniej w ilości równej energii odzyskanej z dolnego źródła oraz wprowadzonego przy pomocy górnego źródła.

Czynnikiem roboczym w urządzeniu jest najczęściej wodny roztwór bromku litu (LiBr) – nietoksyczna sól, a czynnikiem chłodniczym woda. Zasada działania obiegu została przedstawiona na rysunku 1. W generatorze, kosztem dostarczonego ciepła, na przykład przy pomocy spalania gazu we wbudowanym palniku, następuje odparowanie pary wodnej z rozcieńczonego roztworu bromku litu i wody. Odparowanie w generatorze jest możliwe dzięki ciśnieniu znacząco niższemu od atmosferycznego. Wyprodukowana w ten sposób czysta para wodna przechodzi do skraplacza, gdzie zostaje skroplona oddając ciepło przez wymiennik przeponowy. Uzyskana po skropleniu woda, podawana jest poprzez układ dławiący do parownika, gdzie odparowując w warunkach wysokiej próżni na ściankach wymiennika, odbiera ciepło nieużyteczne z dolnego źródła ciepła. Powstała w parowniku para wodna jest następnie pochłaniana w absorberze przez stężony roztwór bromku litu, z którego wcześniej w generatorze odparowała woda, utrzymując w ten sposób wysoką próżnię w urządzeniu, a więc i niską temperaturę wrzenia w parowniku. Proces absorpcji jest silnie egzotermiczny, dlatego też wymagany jest odbiór znaczącej ilości ciepła, co stanowi dodatkowe źródło energii oraz pierwszy stopień podgrzewu wody wlotowej powracającej z miejskiej sieci ciepłowniczej (MSC). Stężony roztwór, pochłaniając parę wodną rozcieńcza się, a następnie przetłaczany jest przez pompę roztworu z powrotem do generatora, gdzie

### Cykl „Sorpcyjne układy chłodzenia” – jakie zagadnienia poruszaliśmy we wcześniejszych artykułach

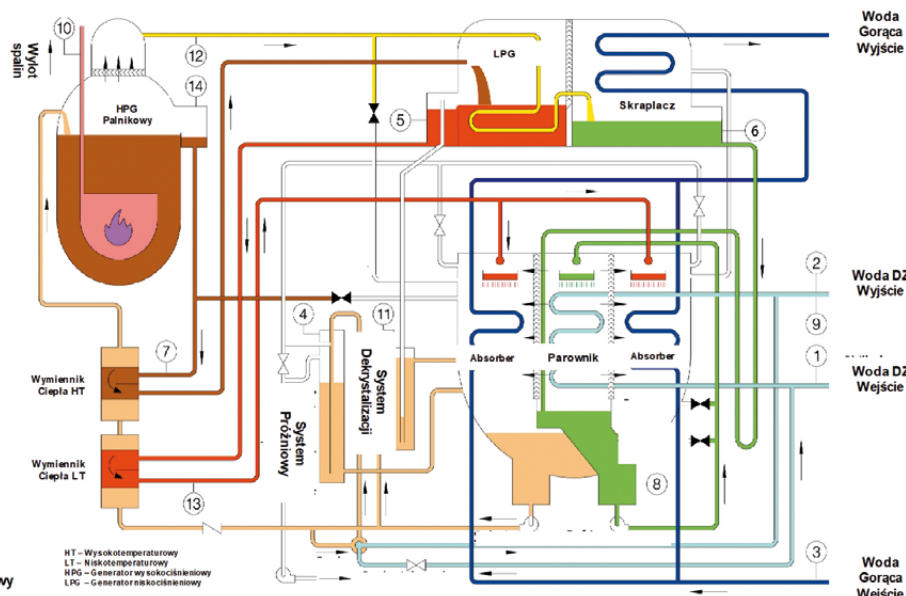
W pierwszej części cyklu dotyczącego technologii sorpcyjnych pt. „Praktyczne zastosowania agregatów sorpcyjnych” (Ch&K 5/2018 s. 30) zaprezentowano możliwe scenariusze implementacji chłodziarki absorpcyjnej oraz adsorpcyjnej do zastosowań przemysłowych i klimatyzacyjnych. W kolejnej części zatytułowanej „Ekonomika zastosowania agregatów absorpcyjnych zasilanych różnymi źródłami ciepła” (Ch&K 6/2018 s. 62) przedstawiono uwarunkowania ekonomiczne eksploatacji układów absorpcyjnych zasilanych różnymi źródłami ciepła, przy różnych cenach energii zasila jącej oraz porównano koszt wytworzenia chłodu z rozwiązaniem konwencjonalnym. Nakreślono także uwarunkowania kierujące inwestorów w stronę rozpoczęcia budowy konkretnego typu źródła sorpcyjnego. W trzeciej części cyklu popod tytułem „Zastosowanie agregatów adsorpcyjnych ze złożem klejonym” (Ch&K 7/2018 s. 52) skupiono się na możliwości zastosowania agregatów adsorpcyjnych o innowacyjnej, klejonej, konstrukcji złoża, do produkcji wody lodowej do celów klimatyzacyjnych bądź procesowych oraz możliwości implementacji takich agregatów do hybrydowych źródeł chłodniczych składających się z różnych konfiguracji urządzeń sprężarkowych i sorpcyjnych. W czwartej części cyklu dotyczącego technologii sorpcyjnej, przedstawiono odwrotne do wcześniejszych zastosowanie urządzeń sorpcyjnych: do produkcji ciepła na cele technologiczne bądź ciepłownicze przy jednoczesnym odzysku ciepła o bardzo niskiej temperaturze (Ch&K 8/2018 s. 30). Zaprezentowano zasadę działania układu absorpcyjnej pompy ciepła, określono korzystne w skali kraju obszary implementacji technologii i przedstawiono ciekawe realizacje. W piątej części cyklu (Ch&K 9/2018 s. 32), skupiono się na przemysłowym zastosowaniu amoniakalnych agregatów absorpcyjnych – do produkcji chłodu niskotemperaturowego a w szóstej skupiono się na ogólnej analizie wpływu wzrostu ceny energii elektrycznej na koszt wytworzenia chłodu do celów technologicznych oraz klimatyzacyjnych dla rozwiązań chłodniczych opartych na urządzeniach zasilanych energią elektryczną lub ciepłem (Ch&K nr 9/2019 s. 66). Analizy przygotowano dla szeregu wariantów uwzględniających spodziewane perspektywy wzrostu cen energii elektrycznej w kraju. Naturalną kontynuacją cyklu jest więc przedstawienie analizy porównawczą kosztu wyprodukowania ciepła przez kotłownię o mocy 6 MW pracującą na potrzeby lokalnej miejskiej sieci ciepłowniczej przy użyciu trzech różnych technologii: absorpcyjnej pompy ciepła z wbudowanym palnikiem, sprężarkowej pompy ciepła oraz kotła gazowego. W analizie uwzględniono zaktualizowane nakłady inwestycyjne oraz obliczono koszt wyprodukowania 1 GJ ciepła.

woda z roztworu zostaje odparowana, a stężony roztwór zostaje przepompowany do absorbera i cykl powtarza się.

Do prawidłowego działania APC należy dostarczyć przede wszystkim ciepło w dwóch postaciach – wysokotemperaturowej dla generatora i niskotemperaturowej dla parownika. Należy także



- Palnik
- Spaliny
- Woda ogrzewana
- Woda dolnego źródła
- Roztwór stężony
- Roztwór pośredni
- Roztwór rozcieńczony
- Pary czynnika z HPG
- Czynnik chłodniczy
- Czynnik chłodniczy gazowy



- |  |   |   |
|--|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>① Temp. wody chłodzonej wlot (I)</li> <li>② Temp. wody chłodzonej wylot</li> <li>③ Temp. wody chłodzącej wlot (I,C,A)</li> <li>④ Poziom próżni (I)</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>⑤ Temp. roztworu stężonego LPG (C,I)</li> <li>⑥ Temp. skraplania(I,C,A)</li> <li>⑦ Temp. roztworu pośredniego HPG (A,I)</li> <li>Temp. wrzenia(I,A)</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>⑧ Temp. wrzenia(I,A)</li> <li>⑨ Przepływ wody chłodzonej</li> <li>⑩ Temp. spalin palnika (I,A)</li> <li>⑪ Temp. dekrystalizacji (I,A)</li> <li>⑫ Ciśnienie HPG (I,C,A)</li> <li>⑬ Temp. zraszania roztworem(I,C)</li> <li>⑭ Poziom czynnika HPG (C,I)</li> </ul> |
|--|---|---|
- C – Kontrola**  
**A – Alarm**  
**I – Wskazanie**

Rys. 1. Schemat bromolitowej absorpcyjnej pompy ciepła na przykładzie urządzenia SL Eco Energy Systems

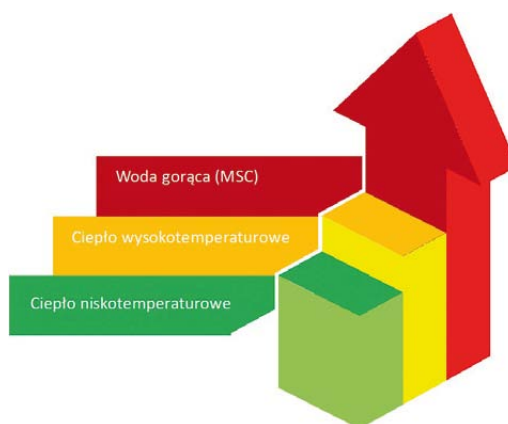
zapewnić zasilanie elektryczne systemu automatyki i pomp obiegowych o mocy około 0,1% mocy cieplnej urządzenia. Znikome zużycie ciepła jest bardzo istotne w porównaniu ze sprężarkową pompą ciepła (SPC), która, mimo iż legitymuje się wyższą sprawnością, to zużywa znacząco większe ilości drogiej energii elektrycznej.

Najistotniejsze parametry, mające wpływ na fizyczną wielkość układu APC, to temperatura DZ oraz wymagana temperatura ciepła użytkowego. W celu zminimalizowania wymiarów urządzenia, a co za tym idzie nakładów inwestycyjnych, zaleca się zapewnienie parametrów pracy układu APC gwarantujących różnicę temperatur pomiędzy wylotem z DZ a powrotem wody gorącej z MSC (miejskiej sieci ciepłowniczej) na poziomie nieprzekraczającym 35° Kelwina. W związku z tym, że na wielkość oraz sprawność układu wpływ może mieć aż dziewięć parametrów (temperatury zasilania i powrotu oraz przepływ dla każdego z obiegów) prawidłowy dobór układu APC każdorazowo wymaga starannej i indywidualnej analizy. Sama eksploatacja układu nie jest dużym wyzwaniem, między innymi dzięki bardzo szerokiej regulacji mocy, na przykład moc ciepłownicza może być regulowana w zakresie 20÷100% mocy nominalnej, przy możliwości zmiany przepływu od 50 do 120% przepływu nominalnego oraz faktycznemu brakowi elementów ruchomych. Determinuje to także bardzo wysoka dyspozycyjność urządzeń, na poziomie przekraczającym 8500 godzin rocznie, oraz żywotność instalacji przekraczająca 20 lat, co stawia ją na równi z kotłem gazowym (KG) i stanowi znaczącą przewagę w stosunku do SPC (sprężarkowa pompa ciepła).

Ponieważ zadanie pomp ciepła polega na odzyskaniu znaczących ilości ciepła niskoparametrowego, główną korzyścią z zastosowania APC jest znaczące zwiększenie sprawności wytwarzania energii cieplnej w systemie wytwórczym, w porównaniu z systemem konwencjonalnym opartym na KG, a co za tym idzie obniżenie kosztu wytworzenia ciepła. Także, jeśli ciepło ni-

sko-parametrowe pochodzi ze źródła odnawialnego (np. geotermalny odwiert niskotemperaturowy) znaczącemu zwiększeniu ulega udział odnawialnego źródła energii w produkowanym strumieniu ciepła. Poza znaczącą poprawą sprawności wytwarzania, układy APC umożliwiają istotne zwiększenie mocy ciepłowniczej konwencjonalnych systemów kogeneracyjnych opartych na silnikach tłokowych bądź turbinach parowych przy zachowaniu takiego samego jak przed modernizacją zużycia paliwa. Na rysunku 2. przedstawiono udział ciepła nieużytecznego w całkowitej sprawności absorpcyjnej pompy ciepła.

Urządzenie poza jednostką dostarczonej energii w postaci użytecznej (ciepło zasilające), odzyskuje około 0,7 jednostki energii z ciepła odpadowego, aby wyprodukować 1,7 jednostki ciepła użytkowego możliwego do wykorzystania na potrzeby zasilania MSC. Podane dane dotyczą warunków krajowych



Rys. 2. Składowe sprawności absorpcyjnej pompy ciepła



Rys. 3. Schemat Absorpcyjnej Pompy Ciepła z wbudowanym palnikiem marki SL Eco-Energy Systems

zarówno w zakresie temperatur ciepła użytecznego, jak i możliwych do odzyskania temperatur ciepła niskotemperaturowego. Oznacza to także, że możliwa do uzyskania moc pompy ciepła jest wprost proporcjonalna do możliwej do uzyskania ilości energii zasilającej (GZ) oraz przeznaczonej do odzyskania energii odpadowej (DZ). Układy APC produkowane są jako monobloki przeznaczone do montażu wewnątrz pomieszczeń, w których przez cały rok utrzymywana jest temperatura dodatnia. Wynika to z faktu, że czynnikiem chłodniczym jest woda. Ze względu na

swoją konstrukcję jedynymi ograniczeniami w zakresie mocy urządzeń są te związane z logistyką dostawy poszczególnych elementów. Na rynku dostępne są urządzenia o mocy cieplowniczej od 1 do 180 MW dostarczane jako pojedyncze elementy, a do Polski zostały dostarczone instalacje o mocy od około 2 MW do około 15 MW. Dzięki możliwości łączenia urządzeń w bloki, ograniczenie mocy praktycznie nie występuje. Przykładową APC z wbudowanym palnikiem zaprezentowano na rysunku 3.

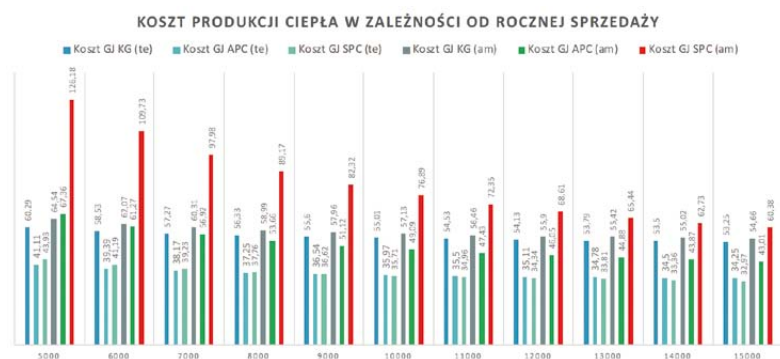
### Porównanie kosztów wytworzenia ciepła

Postępująca dekarbonizacja sektora cieplowniczego wymusza poszukiwanie alternatywnych źródeł energii, mogących zastąpić paliwa kopalne. Istnieje wiele koncepcji prowadzących do pokrycia zapotrzebowania na ciepło miejskiej sieci cieplowniczej w sposób efektywny oraz przyjazny środowisku przy jednoczesnym ograniczeniu zużycia paliw kopalnych. Niestety większość takich rozwiązań prowadzi do znaczącego wzrostu ceny ciepła dla odbiorców końcowych. Technologią leżącą aktualnie w centrum zainteresowania producentów ciepła jest zastosowanie właśnie pomp ciepła – czy to absorpcyjnych, czy sprężarkowych dużej mocy. Układy te mogą wykorzystywać szeroki wachlarz dolnych źródeł, z których odzyskują energię odpadową bądź nieużyteczną, wśród nich są między innymi niskotemperaturowe źródła geotermalne, woda geotermalna po wymiennikach cieplowniczych, płytkie odwierty, pola solarne, przemysłowe układy chłodzenia, procesowe ciepło skraplania itp., każdorazowo zapewniające klientowi możliwość wykorzystania energii odpadowej bądź odnawialnej. Jednak ze względu na fundamentalne różnice konstrukcyjne oraz eksploatacyjne, nie zawsze gwarantują one atrakcyjną dla producenta cenę ciepła. Z tego też powodu, przeprowadzono analizę porównawczą zastosowania trzech wariantów modernizacyjnych źródła ciepła o mocy zamówionej 5 MW i mocy szczytowej 6 MW:

- **Wariant 1 (W1)** traktowany jako porównawczy, obejmuje instalację nowego, wysokosprawnego kotła gazowego wykorzystującego istniejącą infrastrukturę kotłowni. Koszt inwestycyjny W1 to 425 000 zł;
- **Wariant 2 (W2)** obejmuje instalację absorpcyjnej pompy ciepła wykorzystującej istniejącą infrastrukturę gazową (zużycie gazu APC jest mniejsze niż KG, stąd infrastrukturę można uznać za w pełni adekwatną) wraz z przygotowaniem niezbędnej instalacji dolnego źródła. Koszt inwestycyjny W2 to 2 625 000 zł;
- **Wariant 3 (W3)** obejmuje instalację sprężarkowej pompy ciepła. W tym wypadku istniejąca infrastruktura gazowa jest niepotrzebna. Ze względu na znaczącą wymaganą moc elektryczną niezbędna jest dodatkowa infrastruktura elektryczna, której koszt zdecydowano się w tej analizie pominąć ze względu na znaczące różnice w nakładach inwestycyjnych w zależności od sytuacji na miejscu. Koszt instalacji dolnego źródła przyjęto na takim samym poziomie jak dla APC. Koszt inwestycyjny W3 to 8 225 000 zł.

Lp.	Opis	Kocioł Gazowy	Absorpcyjna Pompa Ciepła z wbudowanym palnikiem gazowym	Sprężarkowa Pompa Ciepła	
1	Moc układu		5000		[kW]
2	Nakłady inwestycyjne	425 000	2 625 000	8 225 000	[PLN]
3	Sprawność układu	0,98	1,67	5,02	[E/E]
4	Nominalne zużycie gazu	500	310	0	[Nm <sup>3</sup> /h]
5	Nominalne zużycie prądu	17,4	9	1020	[kW/h]
6	Energia dostarczona w paliwie	5486	3401	0	[kW/h]
7	Sprawność rzeczywista	0,91	1,47	4,90	[E/E]
8	Cena gazu		1,79		[PLN/Nm <sup>3</sup> ]
9	Cena prądu		485		[PLN/MWh]
10	Produkcja ciepła		11405		[GJ/a]
11	Koszt gazu	567 082	351 591	0	[PLN/a]
12	Koszt prądu	48 609	25 142	313 447	[PLN/a]
13	Koszt serwisu	4 250	26 250	82 250	[PLN/a]
14	Suma kosztów eksploatacyjnych	619 941	402 983	395 697	[PLN/a]
15	Przelicznikowa cena ciepła (tylko eksploatacja)	54,36	35,33	34,70	[PLN/GJ]
16	Przelicznikowa cena ciepła (także inwestycja)	56,22	46,84	70,75	[PLN/GJ]
17	Oszczędności w 20 letnim cyklu eksploatacji	0,00	2 139 148 zł	4 321 157 zł	[PLN]

Rys. 4. Porównanie wariantów modernizacji maszynowi



Rys. 5. Porównanie kosztów produkcji ciepła bez uwzględniania kosztów inwestycyjnych (te) oraz z uwzględnieniem kosztów amortyzacji (am) dla rocznej produkcji ciepła w zakresie od 5000 do 15000 GJ

Dla wszystkich wariantów analiza zakłada stałą cenę gazu oraz energii elektrycznej, jak również sprzedaż ciepła. W wypadku obliczeń uwzględniających nie tylko nakłady eksploatacyjne, ale także inwestycyjne, przyjęto liniową amortyzację urządzeń przez okres 20 lat. Podsumowanie wyników analizy dla wszystkich wariantów zostało przedstawione na rysunku 4.

Kotłownia gazowa gwarantuje najniższe nakłady inwestycyjne, prawie 20 razy niższe w porównaniu do wariantu najdroższego, jednak ze względu na niską, w stosunku do pomp ciepła,

sprawność produkcji, cena ciepła zawierająca tylko nakłady eksploatacyjne, jest zdecydowanie najwyższa z porównywanych wariantów sięgając 54,36 zł/GJ. Zdecydowanie najniższą cenę ciepła, zawierającą tylko nakłady eksploatacyjne, zapewnia sprężarkowa pompa ciepła produkując GJ za 34,70 zł. Jest to niewątpliwa zaleta układów SPC gwarantujących najniższe koszty eksploatacyjne. W wypadku uwzględnienia kosztów amortyzacji zdecydowanie najniższą cenę ciepła gwarantuje Wariant 2, oparty na absorpcyjnej pompie ciepła, produkujący każdy GJ za 46,84 zł w porównaniu do 56,22 zł/GJ w wypadku Wariantu 1 oraz 70,75 zł w wypadku Wariantu 3. Kluczowe znaczenie w tym zakresie mają niezbędne do zamortyzowania różnice w nakładach inwestycyjnych między poszczególnymi wariantami. Wariant 1 wymaga amortyzacji 425 000 zł, obciążając każdy wyprodukowany GJ ciepła tylko kwotą 1,86 zł w porównaniu do Wariantu 2 wymagającego zamortyzowania kwoty o 2,2 mln zł większej, obciążającej każdy GJ ciepła kwotą 11,51 zł oraz Wariantu 3 wymagającego zamortyzowania 7,8 mln zł, co prowadzi do obciążenia GJ ciepła kwotą 36,06 zł. W wypadku Wariantu 3 koszty amortyzacji są wyższe niż koszty eksploatacji.

Bardzo ciekawe wyniki, otrzymujemy w wypadku przyjętych założeń, uwzględniając 20-letnie koszty inwestycji, rozumiane jako suma nakładów inwestycyjnych oraz dwudziestokrotności nakładów eksploatacyjnych. W wypadku traktowania Wariantu 1 jako poziom odniesienia eksploatacja Wariantu 2 zapewni ponad 2,1 mln zł oszczędności, kiedy to Wariant 3 doprowadzi do ponad 3,3 mln zł straty. Takie zachowanie Wariantu 2 i 3 wynika z faktu, że mimo iż eksploatacja SPC jest tańsza niż APC, bardzo znacząca różnica w kosztach inwestycyjnych uniemożliwia finansowanie różnicy w amortyzacji w cyklu życia maszynowni.

Bardzo ciekawe wyniki przedstawia także powyższa analiza uwzględniająca zmienną roczną produkcję ciepła. Wszystkie pozostałe założenia pozostają bez zmian, dając pełen obraz opłacalności inwestycji dla rocznej produkcji ciepła w zakresie od 5 000 GJ do 15 000 GJ. Widoczny jest wyraźny trend obniżenia ceny ciepła w wypadku wzrostu rocznej produkcji, który ma bardziej dynamiczny charakter dla Wariantu 3. Wynika to z wyższych, niezbędnych do zamortyzowania nakładów inwestycyjnych. Szczegóły przedstawiono na rysunku 5.

## Podsumowanie

Pompy ciepła dużej mocy stanowią realną drogę do dekarbonizacji sektora ciepłowniczego. Zarówno urządzenia sprężarkowe jak i absorpcyjne zapewniają znacząco niższą cenę ciepła, w wypadku uwzględnienia tylko nakładów eksploatacyjnych, a pompy absorpcyjne także w wypadku uwzględnienia nakładów inwestycyjnych. Uwzględnienie nakładów inwestycyjnych gwarantuje także cena ciepła z absorpcyjnej pompy ciepła niższą niż z kotłowni gazowej, prowadząc do oszczędności przekraczających 2,1 mln zł w ciągu 20 lat.

## O AUTORZE

dr inż. Marcin MALICKI – absolwent Wydziału Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska Politechniki Warszawskiej; Dyrektor ds. technologii i innowacji w New Energy Transfer; ekspert merytoryczny Komisji Europejskiej, Innovation Fund Republiki Serbii, Narodowego Centrum Badań i Rozwoju oraz Solar Impulse Foundation; autor patentów i publikacji w dziedzinie poprawy efektywności energetycznej i integracji odnawialnych źródeł energii.



reklama