

## Utilization of waste heat in absorption refrigeration systems for air conditioning purposes

# Wykorzystanie ciepła odpadowego w absorpcyjnych układach chłodniczych na potrzeby klimatyzacji



DOI: 10.15199/62.2024.11.25

An anal. of waste heat utilization in absorption cooling systems was presented. The studies were conducted on an existing energy and cooling system using local fuel, which was  $CH_4$  from mine drainage, used in gas engines. The advantages of absorption cooling technol. were indicated, including its stability and adaptability to changing operating conditions. The measured and calcd. cooling capacities generated by the trigeneration system were compared. The implementation of trigeneration processes enabling simultaneous prodn. of cooling, elec. and thermal energy and improving the energy efficiency of industrial activities was discussed. The impact of trigeneration systems on the redn. of  $CH_4$  emissions to the atmosphere was described and the economic benefits associated with the redn. of gas. and dust pollution associated with the redn. of primary fuel consumption in energy systems were indicated.

**Keywords:** waste heat utilization, absorption cooling systems, energy efficiency, trigeneration processes

Przedstawiono obserwacje wynikające z zastosowania ciepła odpadowego w absorpcyjnych układach chłodniczych, koncentrując się na jego roli w systemach klimatyzacji. Omówiono metody wykorzystywania energii ciepłej generowanej w procesach przemysłowych w celu efektywnego chłodzenia. W ramach systemu centralnej klimatyzacji ciepło odpadowe z silników gazowych oraz z procesów chłodzenia wykorzystuje się do produkcji wody o niskiej temperaturze. Woda ta jest następnie transportowana do lokalizacji wymagających klimatyzacji, gdzie efektywnie odbiera ciepło z powietrza wentylacyjnego. Podkreślono zalety technologii chłodzenia absorpcyjnego, w tym stabilność i elastyczność systemu w zmiennych warunkach pracy. Dodatkowo wskazano na korzyści płynące z implementacji procesu trigeneracji, który znacząco zwiększa efektywność energetyczną operacji przemysłowych, umożliwiając jednoczesną produkcję chłodu, energii elektrycznej oraz ciepłej.

**Słowa kluczowe:** ciepło odpadowe, absorpcyjne układy chłodzenia, efektywność energetyczna, trigeneracja

## Ogrzewanie z perspektywy inżynierii cieplnej i ochrony środowiska

W warunkach klimatu środkowoeuropejskiego w okresie jesienno-zimowo-wiosennym utrzymanie komfortu cieplnego zależy od dostępnych technologii oraz zasobów energetycznych, co wymusza zastosowanie różnych systemów grzewczych. Brak ogrzewania oraz uzależnienie od zmiennych warunków atmosferycznych są uznawane za rozwiązania nieefektywne ze względu na ograniczoną kontrolę

nad temperaturą wewnętrzną budynków. W budownictwie mieszkalnym dominują indywidualne systemy grzewcze oparte na spalaniu paliw stałych, takich jak węgiel, pellet oraz gaz ziemny, ze względu na ich wysoką kaloryczność. W ostatnich latach popularność zyskują pompy ciepła, które charakteryzują się większą efektywnością energetyczną i mniejszym wpływem na środowisko<sup>1)</sup>. W budynkach wielorodzinnych dominują lokalne kotłownie, zazwyczaj zasilane gazem, umożliwiające centralne zaopatrzenie wielu mieszkań w energię cieplną. Z punktu widzenia inżynierii



Dr inż. Franciszek KURDZIEL (ORCID: 0000-0572-1019-6083) ukończył studia na Wydziale Techniki i Informatyki Uniwersytetu Śląskiego w Katowicach. W 2024 r. uzyskał stopień doktora nauk technicznych na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH w Krakowie. Pracuje na stanowisku głównego specjalisty inżynierii produkcji w PGNiG Termika Energetyka Przemysłowa SA. Specjalność – budowa i eksploatacja maszyn.



Dr hab. inż. Krzysztof PYTEL, prof. AGH (ORCID: 0000-0002-1924-8351), w roku 1996 ukończył studia na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH w Krakowie. W 2013 r. uzyskał stopień doktora habilitowanego nauk technicznych na tym samym wydziale. Jest profesorem uczelni w Katedrze Systemów Energetycznych i Urządzeń Ochrony Środowiska AGH. Specjalność – maszyny i urządzenia energetyczne.

### \* Adres do korespondencji:

Katedra Systemów Energetycznych i Urządzeń Ochrony Środowiska, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, tel.: (12) 617-32-40, e-mail: krzysztof.pytel@agh.edu.pl

cieplej i zrównoważonego rozwoju najbardziej efektywne są scentralizowane systemy ciepłownicze, które umożliwiają dostarczanie ciepła do indywidualnych lub grupowych węzłów ciepłych ze źródeł centralnych, takich jak ciepłownie i elektrociepłownie. Ciepłownie, głównie opalane gazem lub węglem, produkują ciepłą wodę użytkową, generują energię ciepłą, natomiast elektrociepłownie generują w procesie kogeneracji zarówno energię ciepłą, jak i elektryczną, co pozwala na uzyskanie większej efektywności energetycznej oraz zmniejszenie emisji<sup>2)</sup>. Ciepło systemowe produkowane przez systemy ciepłownicze wyróżnia się niewielkim negatywnym oddziaływaniem na środowisko, a istotną korzyścią jest ograniczenie emisji zanieczyszczeń do atmosfery, w tym ditlenku węgla ( $\text{CO}_2$ ), tlenku węgla ( $\text{CO}$ ), tlenków siarki ( $\text{SO}_x$ ), tlenków azotu ( $\text{NO}_x$ ), metali ciężkich oraz pyłów. Wysoką efektywność zmniejszania emisji zanieczyszczeń zapewniają zaawansowane systemy oczyszczania spalin oraz spalanie wysokiej jakości paliw w odpowiednich warunkach<sup>3)</sup>. W porównaniu z indywidualnymi źródłami ogrzewania emisja pyłów w systemach ciepłowniczych jest nawet 35-krotnie mniejsza, co korzystnie wpływa na zdrowie mieszkańców i jakość powietrza. Dodatkowo zastosowanie kogeneracji w elektrociepłowniach zapewnia większą efektywność energetyczną, zużycie paliwa jest o ok. 20% mniejsze w porównaniu z niezależną produkcją ciepła i energii elektrycznej. Równocześnie zmniejszenie emisji  $\text{CO}_2$  wynosi ok. 30%, co stanowi istotny wkład w ochronę środowiska i realizację polityki zrównoważonego rozwoju<sup>4)</sup>. To czyni scentralizowane systemy ciepłownicze nie tylko bardziej efektywnymi, ale także bardziej przyjaznymi dla środowiska i sprawia, że w wielu miastach są one preferowanym rozwiązaniem. Statystyczny domek jednorodzinny o powierzchni 120 m<sup>2</sup>, zużywający rocznie 60 GJ energii cieplnej, emituje ok. 9,7 t  $\text{CO}_2$ . Nowoczesny blok kogeneracyjny fluidalny, produkujący 1 000 000 GJ ciepła, jest w stanie ogrzać statystycznie ponad 16,5 tys. takich domów. Emisja  $\text{CO}_2$  z ogrzewania tej liczby domków przy indywidualnej produkcji ciepła wyniosłaby ok. 162 tys. t. Tymczasem blok kogeneracyjny dzięki bardziej efektywnemu procesowi produkcji energii emituje ok. 117 tys. t  $\text{CO}_2$ , co oznacza zmniejszenie emisji o prawie 45 tys. t  $\text{CO}_2$ . Porównując statystyczny domek jednorodzinny (162 kg  $\text{CO}_2$ /GJ ciepła) ze statystycznym blokiem fluidalnym kogeneracyjnym (117 kg  $\text{CO}_2$ /GJ ciepła), widać blisko o 28% mniejszą emisję  $\text{CO}_2$  z wielkoskalowej, przemysłowej produkcji ciepła.

## Ewolucja systemów HVAC drogą do zrównoważonej przyszłości

Ewolucja systemów HVAC (ogrzewanie, wentylacja i klimatyzacja) stanowi przykład postępu technologicznego, który rozpoczął się już w starożytności i wciąż trwa. Początki systemów sięgają starożytnego Egiptu, gdzie stosowano proste metody chłodzenia, takie jak zasłanianie okien mokrymi matami pozwalające na obniżenie temperatury powietrza. W Rzymie stosowano zaawansowane rozwiązania budowlane, takie jak systemy ogrzewania hipokaustum oraz wentylacji. W okresie renesansu powstały różne typy kominków oraz wprowadzono pierwsze systemy wentylacyjne, co przyczyniło się do poprawy jakości powietrza wewnętrznego. W XIX w. Gottlieb Daimler i Karl Benz wynaleźli silniki spalinowe, co otworzyło nowe możliwości dla systemów ogrzewania. Przełomowym wydarzeniem było zaprojektowanie na samym początku XX w., w 1902 r., przez Willisa Havilanda Carriera pierwszego nowoczesnego systemu klimatyzacji dla Brooklyn's Metropolitan Museum of Art, co uznawane jest za narodziny systemu klimatyzacji umożliwiającej kontrolę temperatury i wilgotności powietrza. W latach 1920–1930 systemy HVAC zyskały szczególnie na popularności i zaczęły być szeroko stosowane w budynkach komercyjnych, przemysłowych oraz mieszkalnych. Rozwój technologii chłodniczej przyczynił się do powszechnego wprowadzenia klimatyzacji do biur i sklepów, znacząco poprawiając komfort użytkowników. W latach 1950–1970 systemy HVAC stały się powszechnym elementem nowych budynków, a automatyzacja tych systemów zwiększyła ich efektywność energetyczną oraz zmniejszyła koszty eksploatacyjne. W XXI w., zwłaszcza w latach 2000–2010, wzrosła świadomość ekologiczna, co doprowadziło do większego zainteresowania energooszczędnymi systemami HVAC. Technologie wentylacji z odzyskiem ciepła oraz systemy VRF (*variable refrigerant flow*) stawały się powszechne, ponieważ oferowały znaczące oszczędności energetyczne. Od 2010 r. obserwowano także integrację systemów HVAC z technologią *smart home* oraz rozwój zdalnego zarządzania. W przyszłości systemy HVAC mogą koncentrować się na zrównoważonym rozwoju, efektywności energetycznej, inteligentnym zarządzaniu budynkami oraz zastosowaniu nowoczesnych technologii, takich jak internet rzeczy (IoT) oraz sztuczna inteligencja. W nadchodzących latach celem będzie minimalizacja



Dr inż. Roman FILIPEK (ORCID: 0000-0003-4763-023X) w roku 2006 ukończył studia na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH w Krakowie. W 2013 r. uzyskał stopień doktora nauk technicznych na tym samym wydziale. Jest adiunktem w Katedrze Systemów Energetycznych i Urządzeń Ochrony Środowiska AGH. Specjalność – mechanika komputerowa.



Dr inż. Adam KALWAR (ORCID: 0000-0001-6940-8053) w roku 2008 ukończył studia na Wydziale Informatyki i Zarządzania Wyższej Szkoły Humanistyczno-Ekonomicznej w Łodzi. W 2024 r. uzyskał stopień doktora nauk technicznych na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH w Krakowie. Jest pracownikiem PGNiG Termika Energetyka Przemysłowa SA. Specjalność – silniki gazowe, energetyka.



wpływu na środowisko oraz poprawa jakości powietrza wewnętrznego<sup>5</sup>).

Również rozwój klimatyzacji przemysłowej to proces, który przeszedł transformację i w konsekwencji technologia ta stała się nieodzownym elementem wielu branż, wpływając na komfort, jakość produktów, efektywność energetyczną i innowacje, które umożliwią dalsze zrównoważenie potrzeb przemysłu z wymaganiami ochrony środowiska<sup>6</sup>.

Urządzenia do schładzania powietrza to elementy systemów klimatyzacji i wentylacji, które zapewniają komfortowe warunki w budynkach mieszkalnych, biurowych i obiektach przemysłowych. W zależności od zastosowania, warunków środowiskowych i wymagań dotyczących efektywności energetycznej istnieje wiele rodzajów tych urządzeń. Najpopularniejsze urządzenia służące do schładzania powietrza to klimatyzatory, działające na zasadzie wymiany ciepła. Klimatyzatory przenośne jako mobilne jednostki są idealnym rozwiązaniem do tymczasowego chłodzenia w pomieszczeniach, gdzie instalacja systemu HVAC nie jest możliwa. Klimatyzatory okienne montowane w oknie chłodzą powietrze poprzez transport ciepła z wnętrza budynku na zewnątrz. Klimatyzatory typu *split* składają się z jednostki wewnętrznej i zewnętrznej, co sprawia, że są cichsze i bardziej efektywne niż klimatyzatory okienne, przez co są szeroko stosowane w domach, biurach i obiektach komercyjnych. Chłodnice powietrza stosowane w systemach wentylacyjnych i klimatyzacyjnych mają za zadanie obniżenie temperatury powietrza poprzez wymianę ciepła z czynnikiem chłodniczym. Chłodnice mogą być chłodzone wodą lub powietrzem, a ich wybór zależy od warunków eksploatacyjnych i wymagań systemu. Wentylatory z chłodzeniem ewaporacyjnym wykorzystują proces parowania wody do schładzania powietrza. Wymuszając przepływ powietrza przez wilgotne materiały, obniża się jego temperaturę, przez co przepływająca struga może znacząco zmniejszyć temperaturę i jednocześnie poprawić wilgotność powietrza. Systemy klimatyzacji centralnej stosowane w dużych budynkach obejmują sieć rur i kanałów do rozprowadzania schłodzonego powietrza. Zazwyczaj składają się z jednostki chłodzącej powietrze, które jest następnie rozprowadzane po budynku za pomocą wentylatorów umieszczonych w kanałach wentylacyjnych<sup>7</sup>.

Agregaty absorpcyjne to nowoczesne urządzenia chłodnicze, które wykorzystują innowacyjny proces absorpcji ciepła do generowania chłodu w systemach wentylacji i klimatyzacji. Ich wyjątkowa konstrukcja umożliwia korzystanie z różnych źródeł ciepła, takich jak gaz, energia słoneczna i odpady ciepłe. Dzięki niezawodności i efektywności agregaty absorpcyjne znajdują zastosowanie w wielu branżach i mogą pracować w trudnych warunkach środowiskowych, również w kopalniach. Zdolność tych urządzeń do pracy w niskich temperaturach czyni je idealnym rozwiązaniem dla systemów chłodniczych, gdzie wymagana jest wysoka wydajność energetyczna. Cykl chłodniczy w agregatach absorpcyjnych opiera się na wykorzystaniu procesów

absorpcji i desorpcji, a energia cieplna będąca źródłem napędu może pochodzić z ciepła odpadowego lub ze źródeł odnawialnych. Efektywność systemu chłodzenia jest szczególnie istotna dla przemysłu, gdzie optymalizacja procesów chłodniczych znacząco wpływa na koszty operacyjne oraz zmniejszenie negatywnego wpływu na środowisko. W związku z rosnącym zainteresowaniem technologiami niskoemisyjnymi i zrównoważonym rozwojem znaczenie chłodziarek absorpcyjnych stało się bardziej widoczne, szczególnie z powodu wprowadzenia unijnego systemu handlu uprawnieniami do emisji (EU ETS). W 2018 r. wprowadzono zmiany mające na celu zaostrzenie polityki klimatycznej UE oraz poprawę skuteczności systemu w ograniczaniu emisji gazów cieplarnianych, które miały wpływ na rynki emisji oraz zachowanie przedsiębiorstw. EU ETS stanowi narzędzie ekonomiczne, koncentrując się na zmniejszaniu emisji gazów cieplarnianych w walce ze zmianami klimatu. Efektywność agregatów absorpcyjnych, które mogą wykorzystywać zróżnicowane źródła ciepła i funkcjonować w trudnych warunkach, wpisuje się w cele tego systemu, oferując innowacyjne rozwiązania, które przyczyniają się do zmniejszenia emisji i poprawy efektywności energetycznej. W ramach czwartego etapu rozwoju EU ETS (lata 2021–2030) wprowadzono zmiany, których celem stało się zaostrzenie zasad, zmniejszenie liczby uprawnień i rozszerzenie systemu na nowe sektory. W szczególności zwiększono tempo rocznego zmniejszania uprawnień do emisji do 2,2% od 2021 r., co miało na celu przyspieszenie procesu dekarbonizacji sektora energetycznego i przemysłowego. Kontynuacja przydziału bezpłatnych uprawnień stała się elementem polityki EU ETS mającym na celu zabezpieczenie konkurencyjności sektorów przemysłowych oraz wzmocnienie rezerwy stabilności rynkowej. Zasady dotyczące ustalania przydziału tych uprawnień uwzględniają postęp technologiczny, co ma na celu zachęcanie do innowacji i modernizacji procesów produkcyjnych. Wykorzystanie agregatów absorpcyjnych w przedsiębiorstwach objętych EU ETS pozwala na lepsze zagospodarowanie ciepła odpadowego, a przez to zmniejszenie emisji CO<sub>2</sub>, optymalizację kosztów operacyjnych oraz zwiększanie efektywności energetycznej<sup>8</sup>.

Systemy trigeneracji, w których pracują agregaty absorpcyjne, to nowoczesne rozwiązania w obszarze zarządzania energią zapewniające efektywne wykorzystanie paliwa oraz minimalizację strat energii. Dzięki jednoczesnemu wytwarzaniu różnych form energii w obiektach o zróżnicowanych potrzebach energetycznych, trigeneracja wspiera zmniejszenie zużycia paliw konwencjonalnych i emisji zanieczyszczeń, co przekłada się na korzyści zarówno ekonomiczne, jak i środowiskowe<sup>9</sup>.

Celem badań była analiza wykorzystania ciepła odpadowego poprzez ocenę pracy trigeneracyjnych układów energetycznych opartych na silnikach gazowych zasilanych metanem z procesu odmetanowania kopalni. W analizach uwzględniono zarówno korzyści środowiskowe, jak i eko-

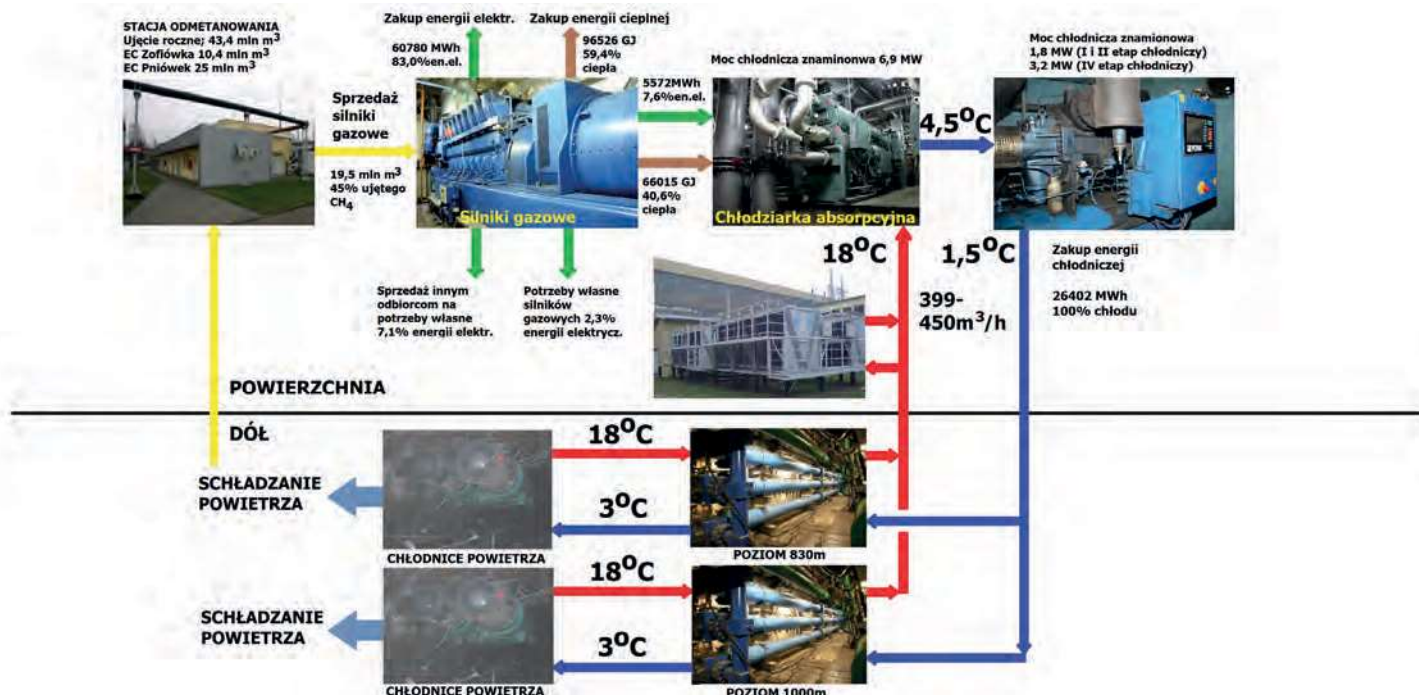


Fig. 1. Simplified diagram of media production in trigeneration system within a centralized energy and cooling system

Rys. 1. Schemat uproszczony produkcji mediów w systemie trigeneracji w scentralizowanym układzie energetyczno-chłodniczym

nomiczne, wynikające ze zmniejszenia emisji metanu do atmosfery oraz ograniczenia emisji zanieczyszczeń gazowych i pyłowych.

## Część doświadczalna

### Obiekt badań

Badania nad wykorzystaniem ciepła odpadowego w absorpcyjnych układach chłodniczych na potrzeby klimatyzacji przeprowadzono dla przemysłowego układu energetyczno-chłodniczego. Omawiany układ realizuje jednoczesną produkcję energii elektrycznej, ciepłej oraz chłodu, co klasyfikuje go jako system trigeneracyjny. W takich układach możliwe stało się efektywne zarządzanie zasobami energetycznymi, przy jednoczesnym ograniczeniu strat energii i zwiększeniu wydajności całego systemu.

Obiekt badań stanowił scentralizowany układ energetyczno-chłodniczy oparty na chłodziarkach absorpcyjnych zasilanych gorącą wodą uzyskiwaną z ciepła odpadowego z silników gazowych (rys. 1). W procesie produkcji chłodu zastosowano roztwór bromku litu (LiBr), który pełnił funkcję absorbentu.

Centralny element analizowanego systemu stanowił silnik gazowy, w którym spalany był metan z procesu odmetanowania kopalń. Silnik gazowy charakteryzował się sięgającą 50% sprawnością. Energia chemiczna paliwa była w nim efektywnie przekształcana w energię mechaniczną, która napędzała generator, produkując energię elektryczną, co stanowiło stabilne źródło zasilania dla Krajowego Systemu Energetycznego. Ze względu na charakter pracy silnika konieczne było jego chłodzenie, co generowało ciepło odpadowe, które skutecznie wykorzystano do ogrzewania oraz do zasilania absorpcyjnych układów chłodniczych. W nich produkowana była woda lodowa o temp. ok. 2°C.

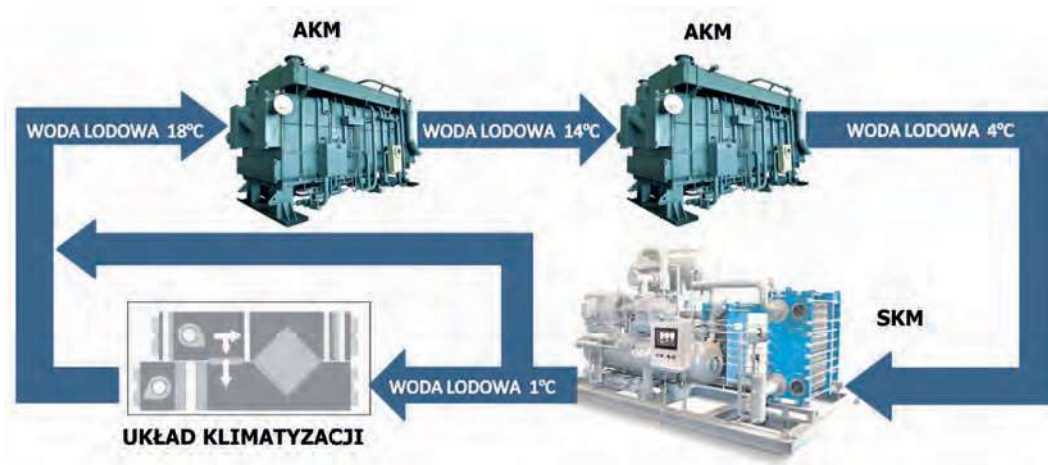


Fig. 2. Operational diagram of an air conditioning station

Rys. 2. Uproszczony schemat działania stacji klimatyzacyjnej

Była ona transportowana do podajników cieczy, a w trakcie tego procesu następowała zmiana ciśnienia wody lodowej pomiędzy obiegiem pierwotnym o wysokim ciśnieniu (do 12 MPa) a obiegiem wtórnym o niskim ciśnieniu. Następnie woda lodowa o zmniejszonym ciśnieniu



niu była przesyłana preizolowanymi rurociągami do obszarów zagrożonych zwiększeniem temperatury, gdzie zasilala wodne chłodnice powietrza. Woda lodowa przepływająca przez chłodnice powietrza odbierała ciepło z powietrza wentylacyjnego, a następnie podgrzana wracała rurociągami do podajników cieczy, z których była transportowana obiegiem pierwotnym do urządzeń chłodniczych, gdzie ponownie następowało jej schłodzenie do temp. ok. 2°C. Od tego momentu proces wymiany ciepła cyklicznie się powtarzał. Ilustrację tego procesu przedstawiono na rys. 2.

### Metodyka badań

Nominalna moc elektryczna wytwarzana w generatorach zasilanych silnikami gazowymi wynosiła ok. 10,30 MW, natomiast moc cieplna pochodząca z odzysku ciepła z tych silników to ok. 11,7 MW. Część wyprodukowanej energii elektrycznej trafiała do Krajowego Systemu Energetycznego, a pozostałe ilości energii elektrycznej i cieplnej wykorzystywane były przez instalację układu skrajzonego. Reszta energii elektrycznej zasilala sieć kopalnianą, natomiast nadwyżka energii cieplnej zasilala sieć ciepłowniczą. Zainstalowana w układzie moc elektryczna równa ok. 3,4 MW zasilala napędy pomp wody grzewczej w obiegach chłodziarek absorpcyjnych, napędy pomp wody lodowej, silniki chłodziarek sprężarkowych i wentylatory przewietrzania pomieszczeń silników gazowych.

Pobór mocy elektrycznej i cieplnej układu energetyczno-chłodniczego zależy od zapotrzebowania na wodę lodową, temperatury powietrza atmosferycznego i temperatury wody powracającej<sup>10)</sup>. W celu określenia faktycznego poboru mocy przez układ, dokonano wielu pomiarów i odczytów na przełomie kilku miesięcy (od marca do lipca) o różnych porach dnia. Archiwizowano moc cieplną zasilającą urządzenia absorpcyjne, moc chłodniczą oraz moc elektryczną. Dodatkowo odczytano chwilowe zużycie metanu do zasilania silników gazowych, generowaną moc czynną, przepływy chłodzonej wody krążącej w układzie z podziałem na poszczególne etapy chłodzenia oraz jej temperatury na wejściach i na wyjściach urządzeń chłodniczych. Na podstawie uzyskanych wyników wykonano wykresy Sankeya dla każdego etapu chłodnictwa, obrazujące faktyczne zużycie mocy układu do schłodzenia wody wykorzystywanej w systemie klimatyzacji.

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów wykreślono wykresy zapotrzebowania układu na moc cieplną i elektryczną do wyprodukowania wody lodowej w okresie od marca do lipca. W celu sprawdzenia poprawności działania układu opomiarowania moc chłodniczą obliczono, korzystając ze wzoru (1) i porównano z mocą zmierzoną przez system opomiarowania:

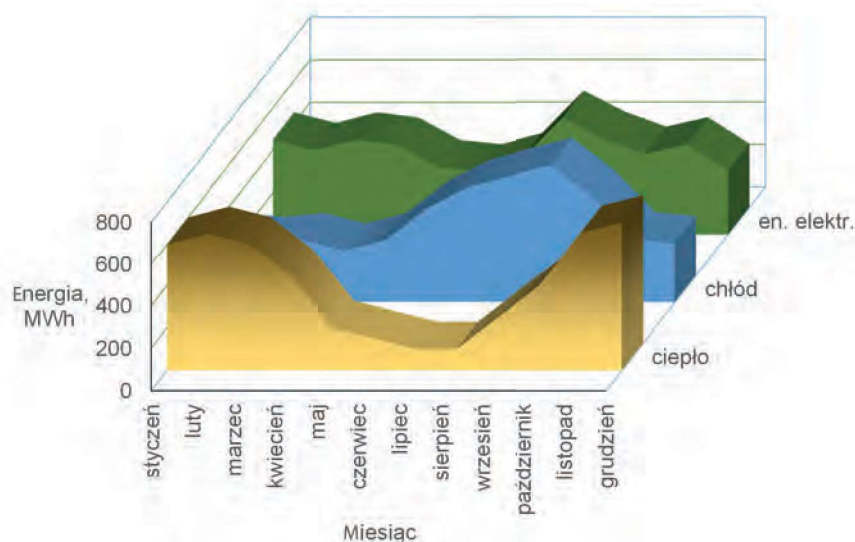


Fig. 3. Balance of demand for each media during the year

Rys. 3. Bilans zapotrzebowania na każde z mediów w ciągu roku

$$Q = (t_{wl} - t_{wy}) \cdot \dot{m} \cdot \frac{c_w}{3600} \quad (1)$$

w którym  $Q$  oznacza ilość ciepła, MW,  $t_{wl}$  zmierzoną temperaturę wody na wlocie chłodnicy, °C,  $t_{wy}$  zmierzoną temperaturę wody na wylocie chłodnicy, °C,  $\dot{m}$  zmierzony strumień masy wody przepływający przez chłodnicę, m<sup>3</sup>/h, a  $c_w$  ciepło właściwe wody, 4,19 kJ/(kg·K).

Wzór określający ilość ciepła przekazanego przez płyn uwzględnia kilka elementów, które wpływają na efektywność tego procesu. Symbol  $Q$  oznacza ilość ciepła, którą oblicza się na podstawie tego wzoru. Różnica temperatur odzwierciedla różnicę między temperaturą płynu na wejściu a temperaturą na wyjściu z układu. Im większa różnica temperatur między wejściem a wyjściem płynu, tym więcej ciepła zostaje oddane lub pochłonięte. Kolejnym istotnym parametrem jest strumień masowy płynu, który wskazuje, jaka masa płynu przepływa przez układ, a im większy przepływ, tym większa ilość ciepła może być transportowana. Ciepło właściwe opisuje zdolność płynu do pochłaniania lub oddawania ciepła, a im wyższe ciepło właściwe, tym więcej energii cieplnej płyn może przenieść przy zmianie temperatury. Wzór uwzględnia również stałą konwersji 3600, która przelicza jednostki czasu z s na h. Wzór ten wskazuje, że ilość przekazanego ciepła zależy od trzech głównych czynników: różnicy temperatur, strumienia masowego i ciepła właściwego płynu<sup>11)</sup>.

### Wyniki badań

W sytuacji, gdy energia elektryczna wytworzona w skrajzeniu nie może być bezpośrednio wykorzystana w obiekcie, istnieje możliwość jej sprzedaży do Krajowego Systemu Energetycznego. Powstaje jednak problem z zagospodarowaniem nadmiaru ciepła, które towarzyszy produkcji energii, szczególnie w okresie letnim, gdy zapotrzebowanie na ciepło jest małe i brak jest możliwości jego efektywne-

go wykorzystania. W takich przypadkach nadmiar ciepła byłby zazwyczaj bezpowrotnie tracony, odprowadzany do atmosfery za pomocą chłodni wentylatorowych, dlatego zasadne staje się zastosowanie trigeneracji, której istotą jest nie tylko wykorzystanie ciepła i energii elektrycznej, ale także wytwarzanie chłodu w absorpcyjnych agregatach chłodniczych napędzanych energią cieplną<sup>12</sup>). Na rys. 3 przedstawiono przykładowy wykres zapotrzebowania na każde z mediów w ciągu roku. Z analizy wykresu wynika, że zapotrzebowanie na energię elektryczną utrzymywało się praktycznie na stałym poziomie przez cały rok, podczas gdy w okresie letnim zapotrzebowanie na ciepło było małe, a równocześnie występował znaczny popyt na chłód użytkowy. Taka sytuacja stwarza możliwości efektywnego wykorzystania nadmiaru ciepła, co podnosi znaczenie trigeneracji w zintegrowanym systemie zarządzania energią.

Przeprowadzono analizę skojarzonego układu energetyczno-chłodniczego zainstalowanego i pracującego na potrzeby produkcji energii elektrycznej, ciepłej i chłodu. Na rys. 4 przedstawiono zintegrowany proces wytwarzania energii elektrycznej i ciepłej przez silniki gazowe zasilane metanem z odmetanowania kopalń. Zaprezentowany bilans energii układu trigeneracji odnosi się do szczegółowej analizy przepływów energii w systemie, który jednocześnie produkuje energię elektryczną, ciepłą oraz chłodniczą. Układ trigeneracji został zaprojektowany w taki sposób, aby maksymalnie wykorzystać dostępną energię pierwotną pochodzącą z metanu odzyskanego z procesów odmetanowania kopalń. Metan jako wysokoenergetyczne paliwo zasilal silniki gazowe, które napędzały procesy wymiany energii i ciepła. Energia chemiczna paliwa była przekształcana w energię mechaniczną w silniku, a następnie w generatorze w energię elektryczną. Część energii mechanicznej generowanej w silnikach była zamieniana na energię elektryczną, która zasilala odbiorniki, część była przesyłana do Krajowego Systemu Energetycznego, co przynosiło

korzyści finansowe i poprawiało efektywność ekonomiczną układu. W procesie spalania paliwa w silniku powstawała duża ilość ciepła odpadowego, które było odzyskiwane ze spalin, z obiegu chłodzenia silnika oraz z oleju smarowego. Odzyskane ciepło było wykorzystane do zasilania chłodziarek absorpcyjnych, co zmniejszało zużycie energii elektrycznej. Dzięki zastosowaniu chłodziarek absorpcyjnych zasilanych ciepłem odpadowym możliwe było wytwarzanie chłodu potrzebnego do systemów wentylacji i klimatyzacji obiektów przemysłowych. Takie urządzenia zmniejszają zapotrzebowanie na energię elektryczną, która byłaby potrzebna do zasilania standardowych chłodziarek sprężarkowych. Część energii nie mogła być efektywnie wykorzystana i zamieniała się w straty ciepłne, które wynikały np. z niezupełnego przekształcenia energii chemicznej paliwa, strat w układach konwersji energii, takich jak silniki i generatory, oraz strat przesyłowych w sieci energetycznej i ciepłej. Niemniej jednak straty w układach trigeneracji były znacznie mniejsze w porównaniu z tradycyjnymi systemami energetycznymi, w których energia cieplna nie jest odzyskiwana<sup>13</sup>).

Silniki gazowe przekształcają energię chemiczną metanu na energię mechaniczną, która następnie zamieniana jest na energię elektryczną<sup>14</sup>). Moc elektryczna produkowana w analizowanym układzie trzech silników wynosiła ok. 11,3 MWe, z czego ok. 1 MWe przeznaczono na pokrycie potrzeb własnych systemu, takich jak zasilanie urządzeń pomocniczych oraz kompensacja strat mechanicznych. W trakcie pracy silników generowana była także znaczna ilość energii ciepłej (ok. 14,0 MWt), z czego ok. 3 MWt to straty ciepła. Wygenerowane ciepło znajdowało zastosowanie w dwóch obszarach: część była przekazywana do sieci grzewczej, wspierając lokalne potrzeby ciepłne, a pozostała część służyła do zasilania chłodziarek absorpcyjnych, które przekształcały ciepło w chłód. W celu zwiększenia efektywności układu dodatkowo zastosowano chłodziarki sprężarkowe, które wspierały proces chłodzenia w sytuacjach zwiększonego zapotrzebowania na chłód. Wytworzony chłód pomniejszony o straty był następnie wykorzystywany do schładzania powietrza w instalacjach wentylacyjnych i klimatyzacyjnych. Na każdym etapie procesu występowały wynikające z przemian energetycznych oraz przesyłu nieuniknione straty energii, takie jak: straty mechaniczne będące efektem tarcia w urządzeniach mechanicznych, straty elektryczne będące efektem oporu elektrycznego przewodów i urządzeń, straty ciepłne, takie jak nieszczelności, różnice temperatur oraz brak odpowiedniej izolacji, oraz straty związane z przemianami energii, ponieważ każda przemiana energii wiąże się ze stratami, np. przy prze-

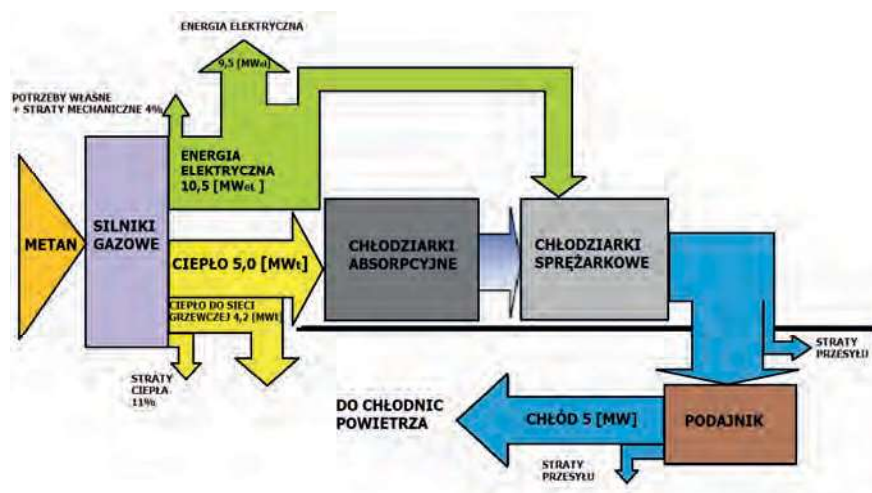


Fig. 4. Integrated process of generating electricity, heat and cooling energy by methane-powered gas engines

Rys. 4. Zintegrowany proces wytwarzania energii elektrycznej, ciepłej i chłodniczej przez silniki gazowe zasilane metanem

zwiększenia efektywności układu dodatkowo zastosowano chłodziarki sprężarkowe, które wspierały proces chłodzenia w sytuacjach zwiększonego zapotrzebowania na chłód. Wytworzony chłód pomniejszony o straty był następnie wykorzystywany do schładzania powietrza w instalacjach wentylacyjnych i klimatyzacyjnych. Na każdym etapie procesu występowały wynikające z przemian energetycznych oraz przesyłu nieuniknione straty energii, takie jak: straty mechaniczne będące efektem tarcia w urządzeniach mechanicznych, straty elektryczne będące efektem oporu elektrycznego przewodów i urządzeń, straty ciepłne, takie jak nieszczelności, różnice temperatur oraz brak odpowiedniej izolacji, oraz straty związane z przemianami energii, ponieważ każda przemiana energii wiąże się ze stratami, np. przy prze-



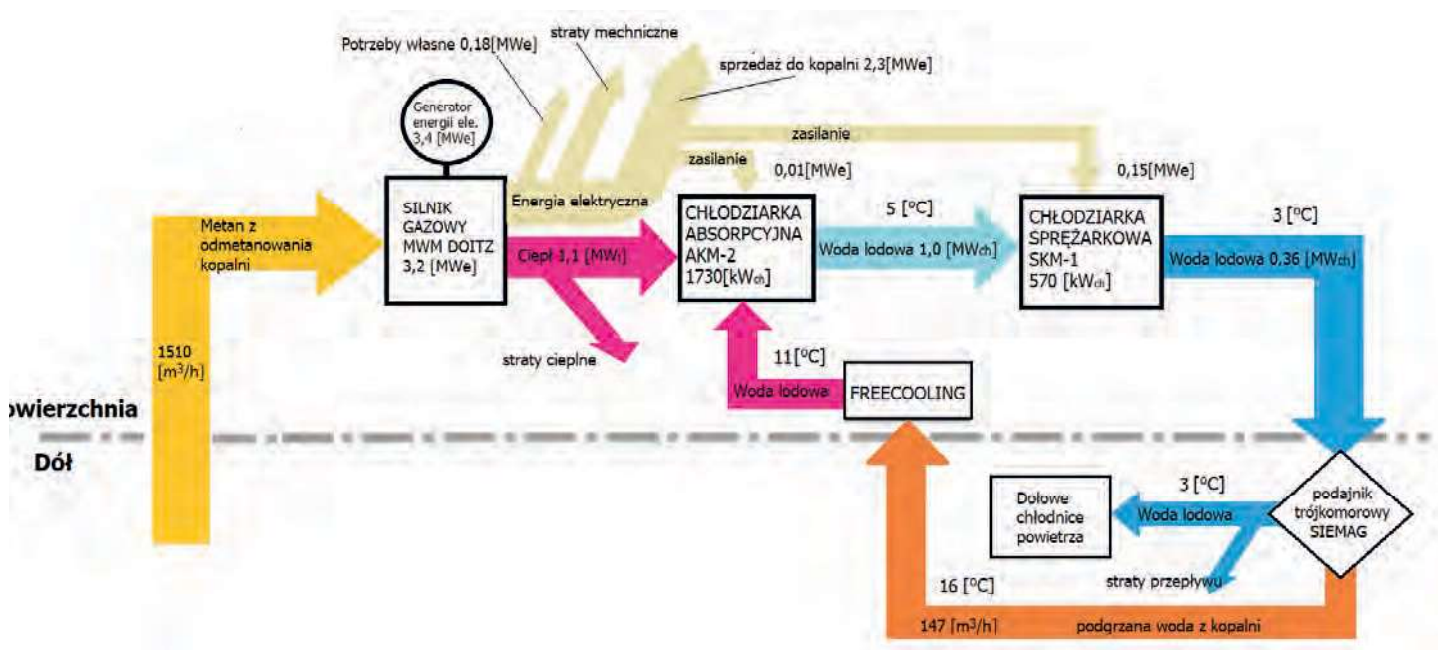


Fig. 5. Sankey diagram for the chilled water production process

Rys. 5. Wykres Sankeya dla procesu wytwarzania wody lodowej

kształcaniu energii mechanicznej na elektryczną<sup>15</sup>). System pozwala na pełne zagospodarowanie ciepła będącego produktem ubocznym wytwarzania energii elektrycznej, co umożliwia jego wykorzystanie do ogrzewania, chłodzenia oraz zasilania innych odbiorników. Dzięki temu ograniczane jest zużycie dodatkowych paliw oraz zwiększa się efektywność energetyczna całego procesu, przynosząc korzyści ekonomiczne i ekologiczne.

Wykres Sankeya przedstawiony na rys. 5 ilustruje proces wytwarzania wody lodowej, gdzie konfiguracja układu trigeneracyjnego może zmieniać się w zależności od miesiąca, dnia tygodnia lub pory dnia. Każdy z układów chłodnictwa składa się z dwóch chłodziarek absorpcyjnych i jednej chłodziarki sprężarkowej. Analizując wykres Sankeya, zauważono brak jednej z chłodziarek absorpcyjnych AKM1. W korzystnych warunkach atmosferycznych, gdy temperatura powietrza spadała poniżej 14°C, zastosowano system chłodzenia, który wykorzystywał naturalne źródła chłodzenia, takie jak zimne powietrze zewnętrzne, do obniżania temperatury w procesach przemysłowych, bez potrzeby używania tradycyjnych, energochłonnych systemów chłodzenia. Ogrzana woda powracająca z systemu wentylacji, o temp. 16,8°C i przepływie 147 m<sup>3</sup>/h, była kierowana do tego układu, który schładzał medium do temp. 11,2°C, generując moc chłodniczą na poziomie 0,25 MW. Następnie woda trafiała do chłodziarki absorpcyjnej AKM2, która do wytworzenia wody lodowej o temp. 5,3°C wymagała 1,1 MW mocy cieplnej oraz 0,01 MW mocy elektrycznej, przy mocy chłodniczej wynoszącej 1 MW. Ostatnim etapem schładzania była chłodziarka sprężarkowa SKM1, która schładzała wodę lodową do 3°C, zużywając 0,15 MW mocy elektrycznej. Łącznie woda lodowa o temp. 3°C i mocy chłodniczej 1,61 MW była kierowana do

trójkomorowego podajnika cieczy, rozdzielającego ją na chłodnice powietrza. Wytworzona moc elektryczna przez agregat prądowłóczy z silnikiem gazowym była częściowo wykorzystana na potrzeby własne układu trigeneracyjnego (0,18 MW), a jej nadwyżka (2,32 MW) sprzedawana.

Na rys. 6 i 7 przedstawiono odpowiednio sumaryczny pobór mocy cieplnej i elektrycznej przez skojarzony układ energetyczno-chłodniczy, niezbędny do produkcji wody lodowej na potrzeby klimatyzacji. Analiza wykresu zapotrzebowania na moc cieplną wskazuje, że największe zużycie ciepła przez chłodziarki absorpcyjne występowało w okresie wiosenno-letnim. Wyjątkiem były dni, w których zmniejszone zużycie wynikało z prowadzonych remontów lub mniejszego zapotrzebowania na wodę lodową podczas weekendów, gdy intensywność pracy była ograniczona.

W odniesieniu do wykresu poboru mocy elektrycznej układ wykazywał stabilne zużycie w dniach pomiarów, choć pewnym odstępstwem był dzień, w którym zanotowano zwiększenie poboru energii elektrycznej. Było to spowodowane koniecznością zastąpienia remontowanego układu chłodzącego systemem sprężarkowym, który wymagał wyłącznie energii elektrycznej. Z kolei wyższy pobór zarówno mocy elektrycznej, jak i cieplnej w kolejnym dniu był związany z większym zapotrzebowaniem na moc chłodniczą w kopalni. Potwierdziło się również większe zapotrzebowanie na moc chłodniczą w okresie letnim. Niewielkie różnice między wartościami obliczonymi a zmierzonymi przez system opomiarowania świadczą o jego poprawnym działaniu, a największy błąd względny wyniósł jedynie 5% (rys. 8).

Układy trigeneracyjne oparte na silnikach gazowych zasilanych metanem z odmetanowania kopalń

są efektywnym rozwiązaniem, które umożliwia wykorzystanie taniego, lokalnego paliwa do jednoczesnej produkcji energii elektrycznej, ciepłej oraz chłodu. Wykorzystanie tak pozyskanego metanu nie tylko przynosi korzyści finansowe, lecz także ogranicza emisję gazu do atmosfery, zmniejsza ilość zanieczyszczeń gazowych i pyłowych generowanych przez elektrownie oraz zmniejsza zużycie paliw pochodzących z zasobów nieodnawialnych. Dodatkowo poprawia bezpieczeństwo klimatyczne<sup>16)</sup>.

Generatory stosowane w systemach trigeneracyjnych wpływają także na poprawę bilansu energii biernej w stacjach elektroenergetycznych, co przynosi wymierne oszczędności dzięki obniżeniu opłat za nadmierny pobór mocy biernej. Jednakże kogeneracyjne zespoły prądoworcze zasilane metanem nie mogą pełnić funkcji zasilania awaryjnego w zakładach górniczych, bowiem całkowity zanik zasilania powoduje zatrzymanie stacji odmetanowania, a tym samym odcięcie dostaw paliwa do agregatów i uniemożliwienie uruchomienia niezbędnych urządzeń pomocniczych.

Chłodziarki absorpcyjne, zasilane energią ciepłą pochodzącą z odzysku ciepła z korpusu silnika lub spalin, stanowią atrakcyjną alternatywę dla tradycyjnych systemów sprężarkowych. Ich zastosowanie pozwala na ograniczenie zużycia energii elektrycznej z sieci, co przekłada się na zmniejszenie zużycia konwencjonalnych nośników energii<sup>17)</sup>. Główną barierą ekonomiczną jest wyższy koszt instalacji systemu absorpcyjnego, który jednak jest rekompensowany znaczącymi oszczędnościami w trakcie eksploatacji.

## Podsumowanie i wnioski

Wykorzystanie energii gazu kopalnianego do napędzania silnika spalinowego w systemach trigeneracji wpływa korzystnie na bilans ekologiczny, ekonomiczny i energetyczny układu klimatyzacji.

Z punktu widzenia środowiska systemy trigeneracyjne pozwalają na znaczne zmniejszenie emisji CO<sub>2</sub>, ponieważ wykorzystują metan jako paliwo (rozwiązanie znacznie bardziej przyjazne dla środowiska niż spalanie węgla czy ropy naftowej). Dodatkowo integracja z lokalnymi źródłami gazu, takimi jak metan pozyskany z procesu odmetanowania kopalń, wspiera lokalne inicjatywy ekologiczne oraz sprzyja zrównoważonemu rozwojowi regionu.

Z ekonomicznego punktu widzenia systemy trigeneracji mogą osiągać 80–90% efektywności energetycznej dzięki jednoczesnej produkcji energii elektrycznej, ciepłej i chłodniczej. Wprowadzenie systemów monitorowania i zarządzania, takich jak SCADA, umożliwia bieżącą optymalizację pracy układu, co przekłada się na zwiększenie wydajności i zmniejszenie kosztów operacyjnych.

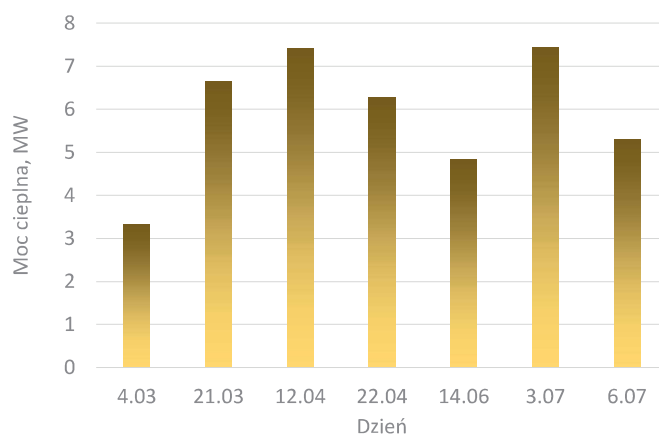


Fig. 6. System's thermal power demand on selected days from March to July

Rys. 6. Zapotrzebowanie układu na moc cieplną w wybrane dni w okresie marzec-lipiec

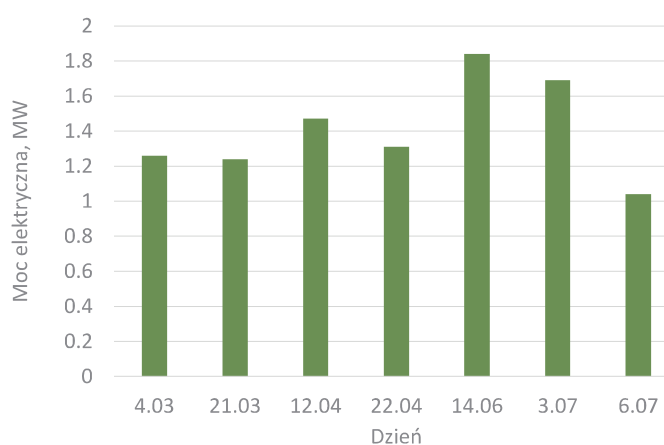


Fig. 7. System's electrical power demand on selected days from March to July

Rys. 7. Zapotrzebowanie układu na moc elektryczną w wybrane dni w okresie marzec-lipiec

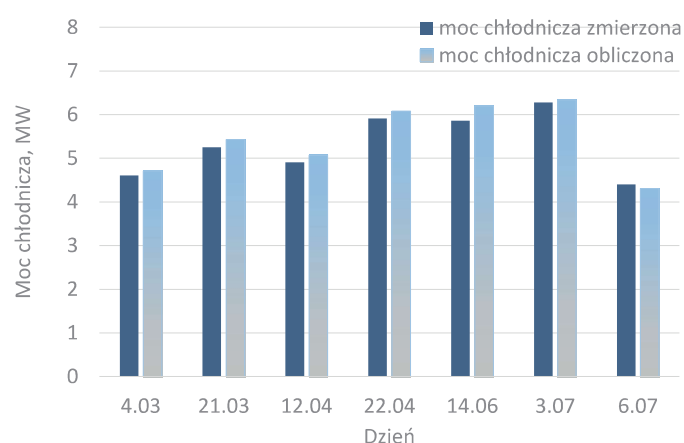


Fig. 8. Comparison of measured and calculated cooling power generated by the trigeneration system on selected days from March to July

Rys. 8. Porównanie zmierzonych i obliczonych mocy chłodniczych wytworzonych przez układ trigeneracyjny w wybrane dni w okresie marzec-lipiec

Pod względem energetycznym trigeneracja stanowi innowacyjne i wydajne rozwiązanie, które znacząco poprawia efektywność energetyczną i wspiera zrównoważony rozwój. Zyskuje ona na znaczeniu zarówno w sektorze przemysłowym, jak i w obiektach użyteczności publicznej.



Inwestycje oparte na trigeneracji wspierają rozwój firm poprzez zwiększenie sprzedaży energii elektrycznej, energii cieplnej w postaci gorącej wody oraz chłodu. Produkcja w układach trójgeneracyjnych pozwala na ograniczenie emisji szkodliwych substancji powstających podczas spalania, a także na zmniejszenie opłat za korzystanie ze środowiska naturalnego.

Otrzymano: 27-09-2024

Zrecenzowano: 01-10-2024

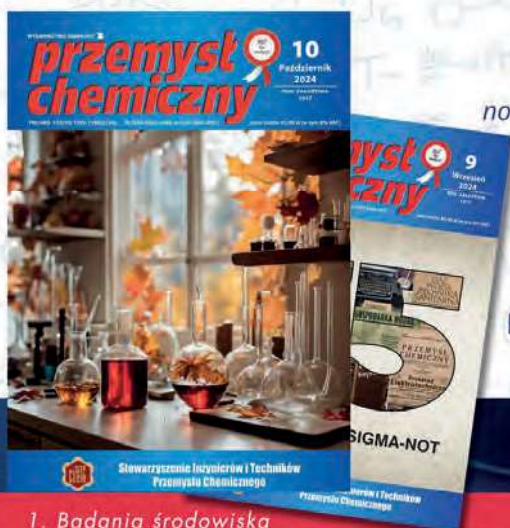
Zaakceptowano: 29-10-2024

Opublikowano: 20-11-2024

#### LITERATURA

- [1] J. Szymiczek, K. Szczotka, M. Banaś, P. Jura, *Energies* 2022, **15**, 5546.
- [2] P. Ptak, T. Prauzner, H. Noga, P. Migo, A. Gajewska, J. Gajda, *Przeegl. Elektrotech.* 2023, **99**, nr 2, 255.
- [3] M. Pałuchowska, B. Danek, *Przem. Chem.* 2014, **93**, nr 6, 828.

- [4] K. Pytel, W. Hudy, *Energies* 2022, **15**, nr 21, 8192.
- [5] D.R. Mckoy, R.C. Tesiero, Y.T. Acquaah, B. Gokaraju, *Energies* 2023, **16**, 6109.
- [6] İ.C. Yılmaz, D. Yılmaz, O. Kandemir, H. Tekin, Ş. Atabay, Ü. Bulut Karaca, *Buildings* 2024, **14**, 788.
- [7] J. Ahn, *Sustainability* 2023, **15**, 16619.
- [8] S. Gumuła, W. Hudy, M. Piaskowska-Silarska, K. Pytel, *Przem. Chem.* 2015, **94**, nr 9, 1516.
- [9] J. Veerapen, M. Beerepoot, *Co-generation and renewables. Solution for low-carbon energy future*, IEA, 2011.
- [10] A. Kalwar, F. Kurdziel, K. Pytel, *Przem. Chem.* 2021, **100**, nr 9, 846.
- [11] S. Gumuła, K. Pytel, M. Piaskowska-Silarska, *Pol. J. Environ. Stud.* 2014, **23**, nr 6, 2318.
- [12] Z. Zhang, X. Si, C. Hu, Y. Lei, *Eur. J. Operat. Res.* 2018, **271**, 775.
- [13] L.M. Bednarz, *Przem. Chem.* 2014, **93**, nr 6, 817.
- [14] A. Żarczyński, M. Wilk, M. Grabarczyk-Gortat, *Przem. Chem.* 2015, **94**, nr 1, 43.
- [15] F. Calise, F.L. Cappiello, L. Cimmino, M. Vicidomini, F. Petrakopoulou, *Appl. Energy* 2024, **371**, 123718.
- [16] B. Haduch, R. Tadeusiewicz, *Przem. Chem.* **97**, nr 11, 1843.
- [17] S. Kilkis, G. Krajačić, N. Duić, M.A. Rosen, M. Al-Nimr, *Energy Conv. Manag.* 2024, **320**, 118953.



**Przemysł Chemiczny** jest najstarszym polskim, branżowym czasopismem, wydawanym od 1917 r. Miesięcznik od 1964 r. jest notowany na tzw. liście filadelfijskiej najlepszych naukowych pism świata.

Miesięcznik adresowany jest do **menedżerów krajowego przemysłu chemicznego, inżynierów i technologów w przemyśle, projektantów w biurach projektowych oraz pracowników naukowych w instytutach naukowo-badawczych i na wyższych uczelniach oraz studentów chemii.** Wszystkie publikowane prace poddawane są recenzji.

## dyscypliny powiązane

1. Badania środowiska
2. Bezpieczeństwo chemiczne i ochrona zdrowia
3. Bioinżynieria
4. Biomateriały
5. Biotechnologia
6. Biotechnologia i mikrobiologia stosowana
7. Chemia (ogólnie)
8. Chemia materiałowa
9. Chemia środowiskowa
10. Ekologia
11. Energetyka i inżynieria jądrowa
12. Ekonomia
13. Ekonomia i organizacja przedsiębiorstw
14. Farmakologia, toksykologia i farmaceutyka (różne)
15. Geochemia i petrologia
16. Gospodarka odpadami i utylizacja
17. Inżynieria bezpieczeństwa
18. Inżynieria chemiczna i procesowa
19. Inżynieria energetyczna
20. Inżynieria biomedyczna
21. Inżynieria chemiczna (ogólnie)
22. Inżynieria chemiczna (różnie)
23. Inżynieria przemysłowa
24. Inżynieria środowiskowa
25. Inżynieria materiałowa
26. Inżynieria mechaniczna
27. Marketing
28. Mikrotechnologia i biotechnologia stosowana
29. Modelowanie ekologiczne
30. Multidyscypliny
31. Nauki leśne
32. Ochrona różnorodności biologicznej
33. Ochrona środowiska
34. Organizacja i zarządzanie
35. Polimery i tworzywa sztuczne
36. Powierzchnie, powłoki i warstwy
37. Rachunkowość
38. Rolnictwo i ogrodnictwo
39. Stosunki przemysłowe
40. Strategia i zarządzanie
41. Systemy informacyjne zarządzania
42. Sztuczna inteligencja
43. Technologia paliw
44. Technologia żywności i żywienia
45. Weterynaria
46. Zachowania organizacyjne i zarządzanie zasobami ludzkimi
47. Zanieczyszczenie środowiska
48. Zarządzanie technologią i innowacjami
49. Zastosowania informatyki
50. Zootechnika i rybactwo



[www.przemyslchemiczny.com](http://www.przemyslchemiczny.com)