

MAREK BOROWSKI
KLAUDIA ZWOLIŃSKA-GLĄDYS
ANDRZEJ SZMUK

Analiza możliwości wykorzystania metanu z kopalni węgla kamiennego w układzie trójgeneracyjnym w celu ograniczenia emisji do atmosfery

Z uwagi na zmiany klimatyczne coraz częściej poruszane są zagadnienia dotyczące gazów cieplarnianych i ich emisji. Metan, obok dwutlenku węgla, uznawany jest za jeden z najistotniejszych gazów cieplarnianych, którego ograniczenie emisji może przynieść w krótkim czasie zauważalne korzyści dla środowiska. Emisje antropogeniczne stanowią około 60% całkowitej emisji metanu, stąd też to właśnie w tym obszarze najczęściej poszukiwane są rozwiązania ograniczające emisje tego gazu. Przedmiotem opracowania jest system ujęcia metanu w kopalni „Pniówek” należącej do Górnośląskiego Zagłębia Węglowego (południowa Polska) oraz możliwości zagospodarowania tego gazu za pomocą silników trójgeneracyjnych. W artykule omówiono możliwość wykorzystania metanu z kopalń węgla kamiennego w celu ograniczenia jego emisji do atmosfery oraz z uwagi na możliwość jego opłacalnego wykorzystania. Autorzy przedstawiają zastosowanie układu trójgeneracyjnego, w którym metan z kopalni jest spalany w silnikach gazowych i wykorzystywany do produkcji energii elektrycznej, ciepłej i chłodniczej. Pozwala to na zmniejszenie emisji metanu do atmosfery przy jednoczesnym zwiększeniu efektywności wykorzystania węgla. W artykule przedstawiono wyniki badań przeprowadzonych w kopalni węgla kamiennego w Polsce i na tym przykładzie wskazano na ekologiczne i ekonomiczne korzyści wynikające z zastosowania układu trójgeneracyjnego.

Słowa kluczowe: emisja metanu, ograniczenie emisji, wykorzystanie gospodarcze, układ trójgeneracyjny

1. WPROWADZENIE

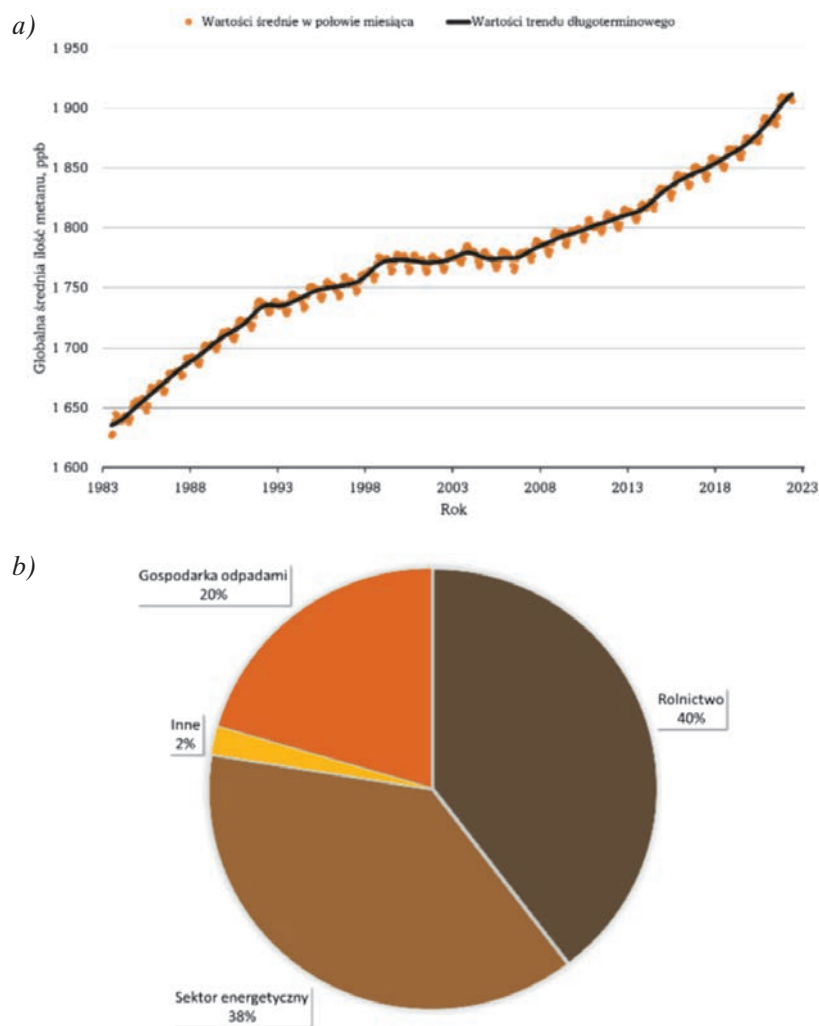
Metan został uznany przez Międzyrządowy Zespół ds. Zmian Klimatu jako drugi z najistotniejszych gazów cieplarnianych, stąd też niezbędne jest zwrócenie uwagi na możliwości ograniczenia jego emisji. Postępujące zmiany klimatyczne wpłynęły na wzrost zainteresowania emisjami gazów cieplarnianych i możliwościami ich ograniczenia. Znaczna dominacja dwutlenku węgla w całkowitej emisji gazów cieplarnianych spowodowała w ostatnich latach skupienie uwagi na źródłach jego emisji. Pomimo niższego poziomu emisji metan stanowi obok dwutlenku węgla najistotniejsze zagrożenie dla neutralności klimatycznej środowiska.

Ilość metanu w atmosferze wzrosła znacząco w ciągu ostatnich dekad. Pierwszy wzrost zauważalny był w latach 80. ubiegłego wieku. Następnie po 1998 roku wartość ta zaczęła się stabilizować, aż do roku 2008,

kiedy ponownie zauważono znaczny wzrost stężenia tego gazu, a tendencja ta jest wciąż utrzymywana. Jednocześnie pokazuje to, jak istotne jest wprowadzenie środków zaradczych w tym zakresie.

Źródła emisji metanu mogą być naturalne lub też wynikać z działalności człowieka. Wśród źródeł naturalnych wymienić można mokradła, torfowiska, natomiast do źródeł antropogenicznych można zaliczyć: hodowlę zwierząt, sektor energetyczny, w tym działalność związaną w wydobywaniu kopalni i składowiska odpadów [1]. Emisje antropogeniczne stanowią około 60% całkowitej emisji metanu.

Istnieje wiele możliwych przyczyn tak intensywnego wzrostu zawartości metanu w atmosferze. Czynnikiem dominującym jest zwiększenie emisji metanu w sektorach energetycznym i odpadów (w tym ścieków) oraz w rolnictwie [2]. Na rysunku 1 przedstawiono strukturę globalnej emisji metanu.



Rys. 1. Metan w środowisku: a) globalne średniomiesięczne stężenie metanu w atmosferze, wyznaczone z powierzchniowych obszarów morskich w latach 1983–2022 – na podstawie [3]; b) zestawienie emisji metanu ze źródeł antropogenicznych według głównych sektorów na rok 2020 – na podstawie [4]

Na przedstawioną globalną tendencję wzrostową mogą wpływać zarówno zwiększona emisja w sektorach rolnictwa, odpadów i paliw kopalnych z południowej i południowo-wschodniej Azji, a także wzrostu w sektorze paliw kopalnych w Stanach Zjednoczonych [2]. Natomiast Europa, dla której całkowita emisja ze źródeł antropogenicznych stanowi 7,4% globalnej emisji metanu, jest jedynym kontynentem, na którym emisje metanu są stale ograniczane. Dla porównania emisja występująca na terenie Azji i Pacyfiku (z wykluczeniem obszaru Bliskiego Wschodu i Rosji) stanowi 42,6% całkowitej emisji metanu na świecie [4]. Zgodnie z danymi Europejskiej Agencji Środowiska (European Environment Agency, EEA) emisja metanu w krajach EU-27 w roku 2021 uległa redukcji o 37,4% w porównaniu z rokiem 1990, a rok do roku obserwowane wartości zauważalnie maleją. Analizując dane emisyjne w krótszym okresie, należy zwrócić uwagę, że w ciągu 10 lat uzyskano zmniejszenie rocz-

nej emisji o 10,1%. Ze względu na już przyjęte strategie polityki klimatycznej oczekuje się, że Unia Europejska będzie na dobrej drodze do zmniejszenia emisji CH_4 . Według ułożonych scenariuszy [5] w latach 2015–2030 przewiduje się zmniejszenie emisji metanu o około 20%. Dalsze obniżenie poziomu emisji wymagać będzie wdrożenia dodatkowych strategii w tym kierunku. Jedną z inicjatyw globalnych zmierzających do podejmowania wspólnych działań na rzecz ograniczenia emisji metanu jest porozumienie metanowe – *The Global Methane Pledge* (GMP), podpisane przez ponad sto krajów w 2021 roku podczas konferencji klimatycznej COP26. Obecnie w GMP uczestniczy 155 krajów, których celem jest ograniczenie emisji metanu do 2030 roku o 30% w stosunku do poziomu z 2020 roku, co może spowolnić globalne ocieplenie o ponad $0,2^\circ\text{C}$ do 2050 roku.

W artykule skupiono się na wykorzystaniu ujętego metanu do produkcji energii elektrycznej, ciepła

i chłodu w trójgeneracyjnym systemie na przykładzie kopalni „Pniówek”. Przedstawiono analizę efektywności pracy systemu, a w szczególności możliwości wykorzystania metanu jako źródła produkcji energii elektrycznej. Szczegółowe wyniki obejmują ujęcie metanu za pomocą systemu odmetanowania, stężenie gazu oraz produkcję energii elektrycznej w okresie półrocznym.

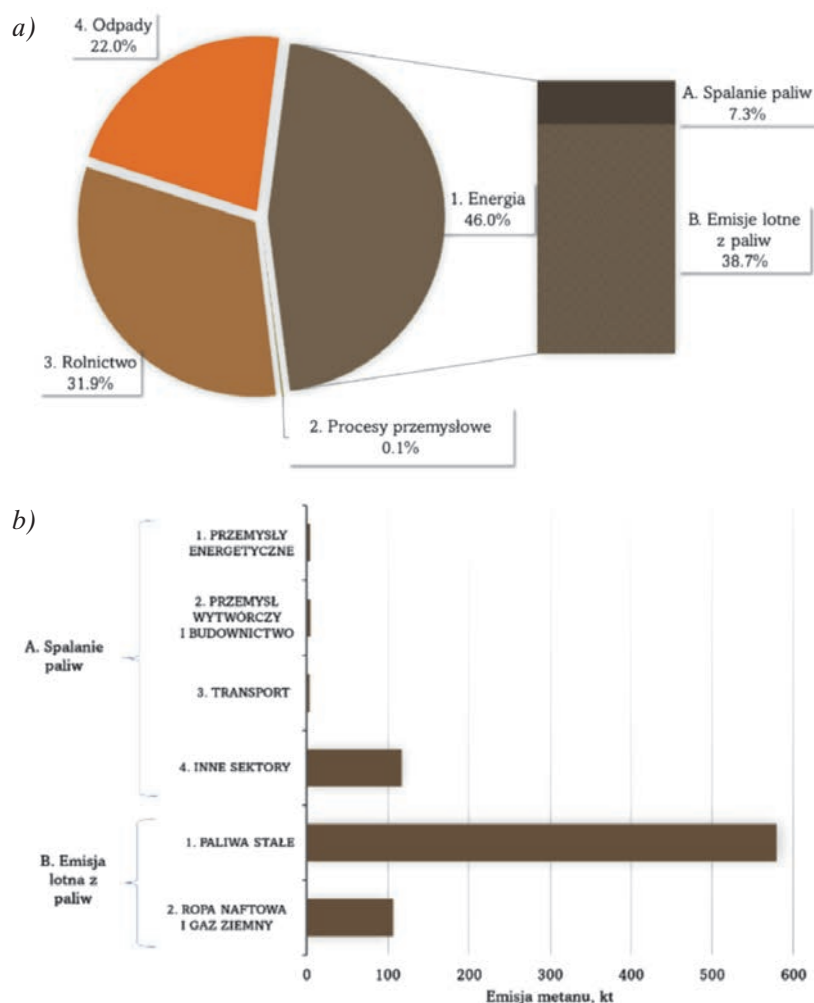
2. EMISJA METANU DO POWIETRZA ATMOSFERYCZNEGO

2.1. Emisja metanu w Polsce

Podobnie jak w przypadku analizy globalnej sytuacji, rozważania o strukturze emisji metanu w Polsce

także rozpoczęto od podziału na główne sektory. Zestawienie emisji metanu w Polsce w roku 2020 przedstawia rysunek 2.

Wśród najważniejszych źródeł emisji metanu w Polsce można wymienić sektor energetyczny, rolnictwo i gospodarkę odpadami. Odpowiadają one za odpowiednio 46,0%, 31,9% i 22,0% emisji. Pierwszą z wymienionych kategorii można rozważyć z podziałem na dwie podkategorie: spalanie paliw i emisje lotne z paliw. Druga z wymienionych kategorii jest wyraźnie dominująca i odpowiada za około 38,7% całkowitej emisji metanu w Polsce. Skupiając się szczegółowo na sektorze energetyki, można zauważyć, że przeważająca wartość emisji pochodzi z emisji lotnej z paliw stałych, które w 2020 roku szacuje się na 579,1 kt.



Rys. 2. Zestawienie emisji metanu w Polsce w roku 2020: a) ze źródeł antropogenicznych według głównych sektorów; b) ze źródeł związanych z sektorem energetycznym – na podstawie [6]

2.2. Charakterystyka wydzielania metanu do wyrobisk górniczych

Charakter wydzielania się metanu do wyrobisk kopalnianych jest bardzo złożony, zależy bowiem od

wielu czynników geologicznych, górniczych i zmian ciśnienia atmosferycznego. Metan w złożu węglowym może występować w dwóch formach: w postaci swobodnej w porach i szczelinach złoża oraz w postaci gazu związanego fizykochemicznie z węglem. W trakcie

przewodzenia eksploatacji górniczej dochodzi do odprężenia i spękania zarówno pokładów węgla, jak i skał znajdujących się w otoczeniu pokładu, co w konsekwencji prowadzi do wzrostu przepuszczalności i wydzielania metanu ze strefy odprężonej do zrobów oraz do wyrobisk. Jest to związane z zaburzeniem równowagi ciśnień w złożu, gdzie rozkład zmian ciśnienia w górotworze charakteryzuje się zmiennością w czasie i przestrzeni. Występujący gradient ciśnienia powoduje, że rozpoczyna się ruch masy gazu skierowany do wyrobiska, gdzie ciśnienie jest mniejsze od ciśnienia gazu zawartego w górotworze. Strumień uwalnianego do wyrobisk metanu określany jest jako sumaryczna wartość ilości metanu wydzielającego się z pokładu eksploatowanego zarówno z urobionego i transportowanego węgla, jak i odsłoniętej calizny węglowej czoła wyrobiska oraz emisji z pokładów sąsiednich zalegających w stropie i spągu, będących w zasięgu wpływów eksploatacyjnych [7].

Istnieje wiele czynników, które mogą w istotny sposób wpłynąć na intensywność emisji metanu do wyrobiska górniczego. Spośród najważniejszych z nich można wymienić sposób eksploatacji złoża, stosowane techniki urabiania, wielkość wydobycia oraz wybrany sposób wentylacji i drenażu metanu z górotworu. Kluczowa jest również praca pomocniczych urządzeń aktywnego zwalczania zagrożenia metanowego lub wpływ tam oddzielających prądy powietrza. Na emisyjność wpływają także okoliczności niezależne od człowieka, w tym gwałtowne spadki ciśnienia atmosferycznego, wytrzymałość skał stropowych czy też występowanie wstrząsów górotworów.

Spośród 20 kopalń, które zajmują się wydobywaniem węgla kamiennego w Polsce, aż 19 zlokalizowanych jest w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym. Jednak tylko jedna, Lubelski Węgiel „Bogdanka” SA, działa w Lubelskim Zagłębiu Węglowym. W latach 2021–2022 w 12 zakładach górniczych prowadzono wydobywanie z pokładów metanowych, gdzie zaobserwowano emisję metanu. Natomiast w czterech zakładach górniczych, gdzie również wykonywano prace w pokładach metanowych, nie stwierdzono emisji tego gazu. Eksploatacja w polach wyłącznie niemetanowych była prowadzona w czterech innych kopalniach. Głównymi źródłami ujęcia metanu w polskich podziemnych kopalniach są rejon prowadzonych robót górniczych: tzw. odmetanowanie eksploatacyjne (64%) i tamy izolujące zroby poeksploatacyjne (34%). Udział odmetanowania prowadzonego z drażonych przodków jest bardzo mały (2%). Całkowita metanowość bezwzględna w 2022 roku wyniosła 778,95 mln m³/rok, z czego metanowość wentylacyjna stanowiła 475,48 mln m³/rok,

natomiast przez system drenażu odprowadzono 303,47 mln m³/rok. Z ujętego metanu przez system odmetanowania gospodarczo wykorzystywano 206,07 mln m³/rok (68%). Metan pozyskiwany z instalacji odmetanowania nie zawsze jest w pełni efektywnie wykorzystywany, co można tłumaczyć następującymi czynnikami: zmienną jakością gazu, niewystarczającą infrastrukturą techniczną oraz regulacjami i normami w tym zakresie. Zatem za całkowitą emisję metanu do atmosfery w polskich kopalniach odpowiada emisja z szybów wentylacyjnych (VAM) oraz emisja gazu niewykorzystanego z odmetanowania. Aktualnie realizowanych jest szereg projektów związanych z pozyskiwaniem i utylizacją metanu z górotworu. Niestety występują pewne ograniczenia z pozyskiwaniem metanu w szczególności z rejonów poeksploatacyjnych, co jest związane z minimalnymi stężeniami ujmowanego gazu, które wynosi 30%. Dlatego w ramach projektu redukcji emisji metanu (REM) podjęto się budowy równoległego systemu odmetanowania o obniżonym stężeniu gazu. Zakres prac obejmuje zarówno etap projektowy, jak i budowlany. W ten sposób w „Pniówku” powstanie powierzchniowa stacja odmetanowania z sieciami dółowych rurociągów z ujęciami metanu, system pomiarowy oraz automatycznego sterownia. Pozyskany ze zrobów poeksploatacyjnych metan wykorzystany zostanie do produkcji energii elektrycznej w silnikach gazowych połączonych z generatorami prądu. Kolejnym realizowanym projektem jest inteligentny system odmetanowania, którego celem jest optymalizacja i poprawa efektywności pracy kopalnianego systemu odmetanowania przez jego automatyzację i cyfryzację.

3. TECHNOLOGIE UJĘCIA I WYKORZYSTANIA METANU

Techniki drenażu metanowego, ujęcia i wykorzystania gazu w kopalniach węgla są znane od wielu lat, jednak na przełomie XX i XXI wieku zauważono znaczny postęp zarówno w zaawansowaniu technologii, jak i w zakresie jej zastosowania [8]. Głównym celem wychwytywania metanu jest zapewnienie bezpieczeństwa pracy kopalni i ciągłości pracy wydobywczej. Systemy odmetanowania mają za zadanie wychwytnie metanu i odprowadzenie go poza rejon eksploatacji lub na powierzchnię. Dobór niewłaściwej metody może skutkować niską efektywnością ujęcia metanu i/lub uzyskaniem niskich stężeń metanu w gazie. Nie należy jednak zapominać o kwestii ochrony środowiska i coraz wyższych wymagań co do redukcji emisji metanu do atmosfery. Dlatego rośnie znaczenie zagospodarowania ujętego metanu, a także jego efektyw-

nego wykorzystania. Na efektywność wykorzystania wpływa przede wszystkim wydajny system odmetanowania, który zapewni stałe stężenie metanu w ujmowanej mieszaninie metan-powietrze. Stacja odmetanowania zostaje automatycznie wyłączona w sytuacji, gdy stężenie CH₄ spada poniżej 30%. Dlatego podejmuje się próby budowy alternatywnej instalacji ujęcia metanu o obniżonym stężeniu do 20%. Ujęcie metanu poniżej tej wartości nie jest możliwe, ponieważ zbliżamy się do górnej granicy wybuchowości.

W celu zwiększenia skuteczności i bezpieczeństwa wychwytywania metanu konieczne jest kontrolowanie i pomiar jego stężenia w ujętej mieszaninie w instalacji odmetanowania. Dzięki bieżącej kontroli stężenia metanu można zidentyfikować obszary o podwyższonym ryzyku wzrostu dopływu metanu lub słabą efektywność ujmowania, co umożliwi podejmowanie działań naprawczych i optymalizacyjnych zmierzających do poprawy efektywności całego systemu ujęcia metanu. Kontrola stężenia metanu i precyzyjny pomiar mają zasadnicze znaczenie zarówno dla zapewnienia bezpieczeństwa, jak i dla optymalizacji procesów wychwytu tego gazu. Środki monitoringu stanowią kluczową część strategii zarządzania ryzykiem związanym z metanem oraz pozwalają na skuteczne działania w celu redukcji emisji i optymalizacji operacji górniczych.

Na świecie obserwuje się różne trendy w zakresie odmetanowania pokładów węgla. Drenaż otworami może być odpowiednio wykonywany w celu ujęcia metanu z wyrobisk eksploatacyjnych, wyrobisk korytarzowych lub też przestrzeni zrobów poeksploatacyjnych. Podstawowy podział z uwagi na okres wykonywania drenażu górotworu obejmuje odmetanowanie wyprzedzające z pokładów węgla nienaruszonych eksploatacją górniczą (CBM – *coalbed methane*) oraz bieżące ujęcie gazu uwalnianego podczas prowadzenia działalności górniczej (CMM – *coal mine methane*) [9]. Odmetanowanie wyprzedzające jest stosowane dla silnie meta-

nowych, głęboko zalegających pokładów o wysokiej przepuszczalności po uprzednim zastosowaniu techniki szczelinowania. Pozwala to odgazować pokład w ciągu kilku lat przed eksploatacją. W odmetanowaniu przed-eksploatacyjnym można stosować zarówno odwierty dołowe w pokładzie węgla, jak i odwierty z powierzchni. Stężenie ujętego metanu wynosi około 90%. O skuteczności tej metody decyduje odpowiednia gazoprzepuszczalność. W warunkach polskich, ze względu na małe wartości przepuszczalności pokładów, odmetanowanie przedeksploatacyjne praktycznie nie jest stosowane. Odmetanowanie eksploatacyjne w rejonie wyrobisk eksploatacyjnych ogólnie charakteryzuje się dobrą efektywnością, co wynika z odprężenia pokładów węgla w trakcie prowadzonej eksploatacji. Stosowane metody drenażu otworowego muszą być dostosowane do sposobu przewietrzania. Stężenie ujętego metanu kształtuje się na poziomie 40–50%.

Parametry charakterystyczne dla polskich kopalń węgla kamiennego w latach 2018–2022, w tym metanowość bezwzględna, ilość ujętego metanu, efektywność odmetanowania, efektywność zagospodarowania ujętego metanu oraz wydobycie węgla kamiennego zestawiono w tabeli 1. Średnia efektywność odmetanowania w roku 2022 wyniosła 38,9%, co jest wartością niższą w stosunku do wartości uzyskanej w 2021 roku. Jednocześnie zauważono wzrost efektywności zagospodarowania ujętego metanu o ponad 5 punktów procentowych.

Metan pochodzący z odmetanowania, w zależności od jakości i strumienia objętościowego odprowadzanej mieszanki, może być wykorzystywany w różnych rozwiązaniach zagospodarowania gazu. Wśród znanych metod można wymienić spalanie gazu, odprowadzenie do sieci gazowej, wykorzystanie jako pomocnicze lub główne źródło energii, stosowane jako wsad chemiczny lub paliwo samochodowe. Główną zaletą popularnego rozwiązania, jakim jest spalanie w pochodni, jest niski koszt inwestycyjny i ograniczenie emisji metanu.

Tabela 1
Metanowość w kopalniach węgla kamiennego w latach 2018–2022 [10]

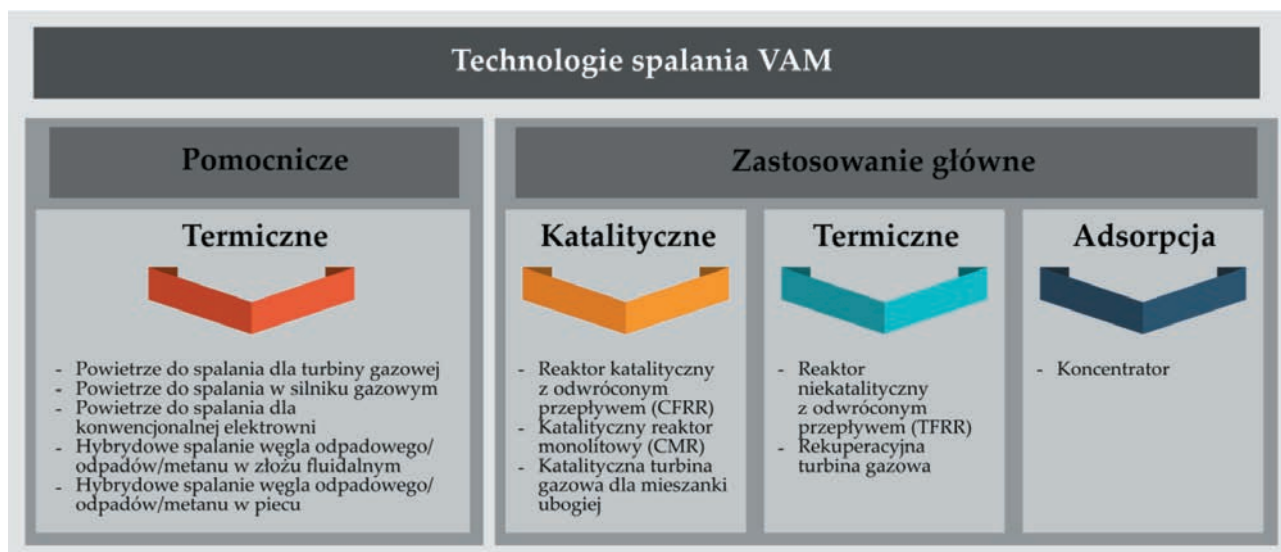
Parametr	Rok				
	2018	2019	2020	2021	2022
Metanowość bezwzględna [mln m ³ /rok]	916,1	803,8	819,6	815,3	778,9
Ilość ujętego metanu [mln m ³ /rok]	317,0	301,6	302,8	340,9	303,5
Efektywność odmetanowania [%]	34,6	37,5	37,0	41,8	38,9
Efektywność zagospodarowania ujętego metanu [%]	64,1	62,8	62,1	62,8	67,9
Wydobycie węgla kamiennego [mln ton]	63,4	61,6	54,4	55,0	52,8

Jednocześnie do atmosfery emitowany jest dwutlenek węgla, w związku z czym zastosowanie tej metody będzie sukcesywnie ograniczane lub wykorzystywane głównie w sytuacjach awaryjnych. Wprowadzanie gazu do sieci gazowych wymaga bardzo wysokiej jakości gazu, w tym także wzbogacania i kosztownego oczyszczania dostarczanego gazu. Rozwiązaniem coraz częściej implementowanym obecnie jest wykorzystanie metanu jako źródła energii. Zazwyczaj energia ta wykorzystywana jest na potrzeby zakładu górniczego. Metan może być wykorzystany jako paliwo dodatkowe i współspalane z innymi nośnikami energii lub też jako paliwo podstawowe w silnikach, turbinach gazowych, ogniach paliwowych, siłowniach i innych instalacjach energetycznych.

Oczyszczony i wzbogacony gaz może być także dostawany do CNG i LNG. Głównymi wadami tego rozwiązania obok wysokich kosztów przetwarzania, przechowywania i transportu jest także konieczność spełnienia wysokich wymagań jakościowych uzyskanego paliwa [8]. W polskich warunkach przeważają metody utylizacji metanu związane z wytwarzaniem energii (głównie w silnikach gazowych) oraz współspalania. Szczególnie dynamicznie rozwija się wykorzystanie układów kogeneracyjnych do wytwarzania zarówno energii elektrycznej, jak i ciepła. Spalanie ujmowanego metanu jest najprostszą metodą ograniczenia emisji CH_4 . Bezpośrednie spalanie metanu jest najczęściej wykorzystywane tylko wtedy, gdy nie ma innej możliwości zagospodarowania lub w przypadku awarii. Zwiększenie efektywności zagospodarowania gazu z odmetanowania możliwe jest dzięki zapewnieniu stabilności składu metanowo-powietrznej mieszaniny dostarczanej do instalacji energetycznych. Stabilność parametrów zarówno jakościowych, jak

i ilościowych gazu może być zapewniona dzięki realizacji odpowiednich działań, w tym prowadzeniu kontroli i regulacji procesu odmetanowania, doprowadzeniu gazu o wysokim stężeniu z zewnętrznych źródeł lub też oczyszczaniu mieszaniny z gazów inertnych [11].

Odrębnym zagadnieniem jest wykorzystanie metanu z powietrza wentylacyjnego (VAM), gdzie głównym wyzwaniem jest ujęcie znacznych ilości mieszaniny gazów o niskim stężeniu metanu. Średnia zawartość metanu w powietrzu wentylacyjnym może się znacznie różnić w zależności od charakterystyki górotworu i zawartości metanu w pokładach węgla. W warunkach polskich zakładów górniczych zawartość metanu wynosi zwykle 0,3% (może być wyższa, ale nigdy nie przekracza 0,75%). Pomimo tak niskich wartości stężenia metanu i z uwagi na wysokie natężenie przepływu powietrza wentylacyjnego w kopalniach do atmosfery emitowana jest znaczna ilość metanu. Szacuje się, że około 70% całkowitej ilości metanu uwalnianego podczas robót górniczych emitowane jest do atmosfery szybami wentylacyjnymi. Dotychczas wdrożone na skalę przemysłową rozwiązania opierają się głównie na redukcji emisji VAM przez spalanie. Inne rozwiązania w tym zakresie są intensywnie rozwijane. Coraz większym zainteresowaniem cieszą się technologie umożliwiające wzbogacenie mieszaniny metanopowietrze do takich stężeń metanu, które umożliwią jego wykorzystanie w już istniejących urządzeniach, wymagających do poprawnej pracy wyższych zawartości składnika palnego w mieszaninie zasilającej [12]. Klasyfikacja rozwiązań zagospodarowania metanu z podziałem na wykorzystanie jako główny i pomocniczy zasób w danej technologii przedstawiono na rysunku 3.

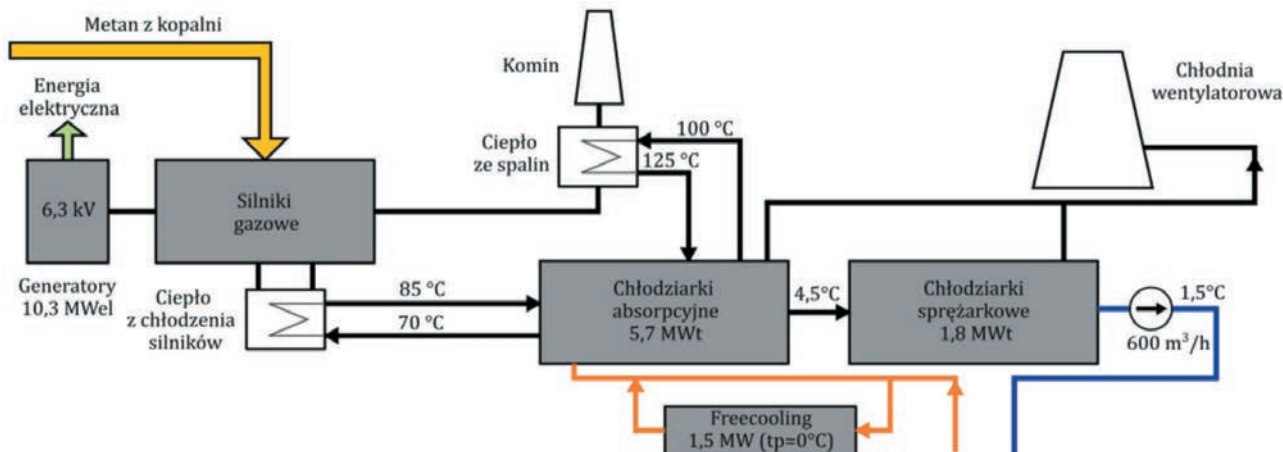


Rys. 3. Technologie spalania VAM: klasyfikacja i przykłady – na podstawie [12]

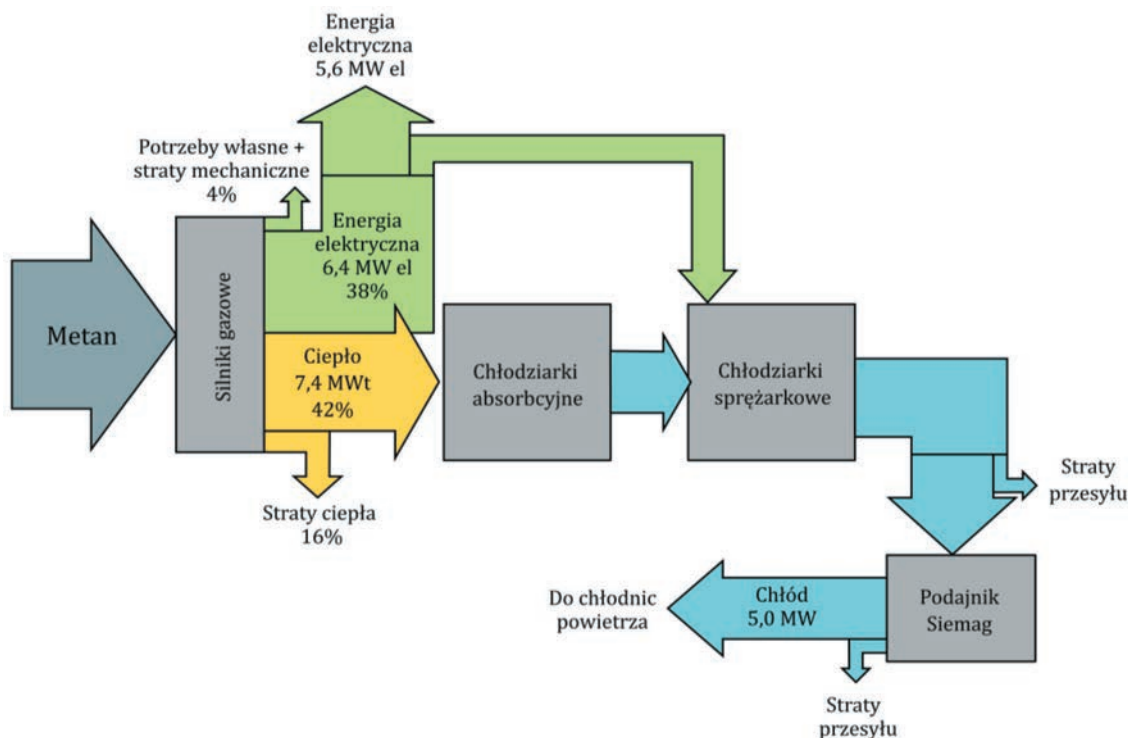
4. ANALIZA PRZYPADKU ZAGOSPODAROWANIA UJĘTEGO METANU PRZEZ SILNIKI GAZOWE ZABUDOWANE W UKŁADZIE TRÓJGENERACYJNYM

Przedmiotem analizy jest system ujęcia i utylizacji metanu w kopalni „Pniówek”, położonej na obszarze Górnośląskiego Zagłębia Węglowego (południowa Polska). Analiza dotyczy pracy układu trójgeneracyj-

nego zbudowanego z wykorzystaniem gazowego silnika tłokowego zasilanego gazem kopalnianym i chłodziarek absorpcyjnych. Silniki produkują energię elektryczną oraz ciepłą. Po stronie chłodniczej zadaniem układu jest chłodzenie powietrza wentylacyjnego w wyrobiskach górniczych dla części podziemnej kopalni. Schemat instalacji oraz parametry urządzeń zostały przedstawione na rysunku 4. Natomiast na rysunku 5 pokazano bilans energii układu trójgeneracyjnego.



Rys. 4. Schemat instalacji układu trójgeneracyjnego – na podstawie [13]



Rys. 5. Bilans energii układu trójgeneracyjnego – na podstawie [13]

4.1. Charakterystyka stacji odmetanowania

Głównym elementem systemu ujęcia jest stacja odmetanowania. Jej zadaniem jest wytworzenie podciśnienia w sieci rurociągów instalacji odmetanowania

oraz przesyłanie ujętego gazu od urządzeń wykorzystujących metan. W stacji odmetanowania można wyodrębnić instalację po stronie ssącej (I stopień sprężenia), urządzenia wytwarzające podciśnienie oraz instalację po stronie tłocznej (II stopień sprężenia),

urządzenia wytwarzające nadciśnienie oraz układy pomocnicze, w tym instalację chłodzenia gazu, urządzenia regulujące i zabezpieczające oraz aparaturę kontrolno-pomiarową. W instalacji po stronie ssącej znajduje się również komin wydmuchu umożliwiający odprowadzanie gazu do atmosfery pod ciśnieniem złożowym w przypadku postoju stacji odmetanowania. Ze względu na bardzo dużą ilość ujmowanego gazu z górotworu przez stację odmetanowania w kopalni „Pniówek” mieszanina metan-powietrze przetłaczana jest pod różnym ciśnieniem do trzech odbiorników, tj. silników gazowych, instalacji przesyłu gazu międzykopalnianego i elektrociepłowni, gdzie gaz jest spalany i wykorzystywany na potrzeby kopalni. Przedmiotem dalszej analizy jest tylko spalanie

metanu w silniku gazowym. Aby uzyskać wymagane parametry ciśnienia gazu po stronie przesyłu do odbiorców za stacją odmetanowania, stosuje się drugi stopień sprężania.

Stacja odmetanowania pracuje w sposób automatyczny. Dzięki temu uzyskiwane jest stabilne ciśnienie gazu przesyłanego do odbiorców. Z ujmowanego gazu usuwane są wszelkie zanieczyszczenia w postaci pyłów, wody czy kondensatu olejowo-wodnego po przejściu gazu przez sprężarki, co pozwala na zastosowanie gazu do produkcji energii elektrycznej i ciepła. Szczegółowe parametry pracy stacji odmetanowania w kopalni „Pniówek” przedstawiono w artykule [14]. Widok stacji odmetanowania wraz z silnikami gazowymi przedstawia rysunek 6.

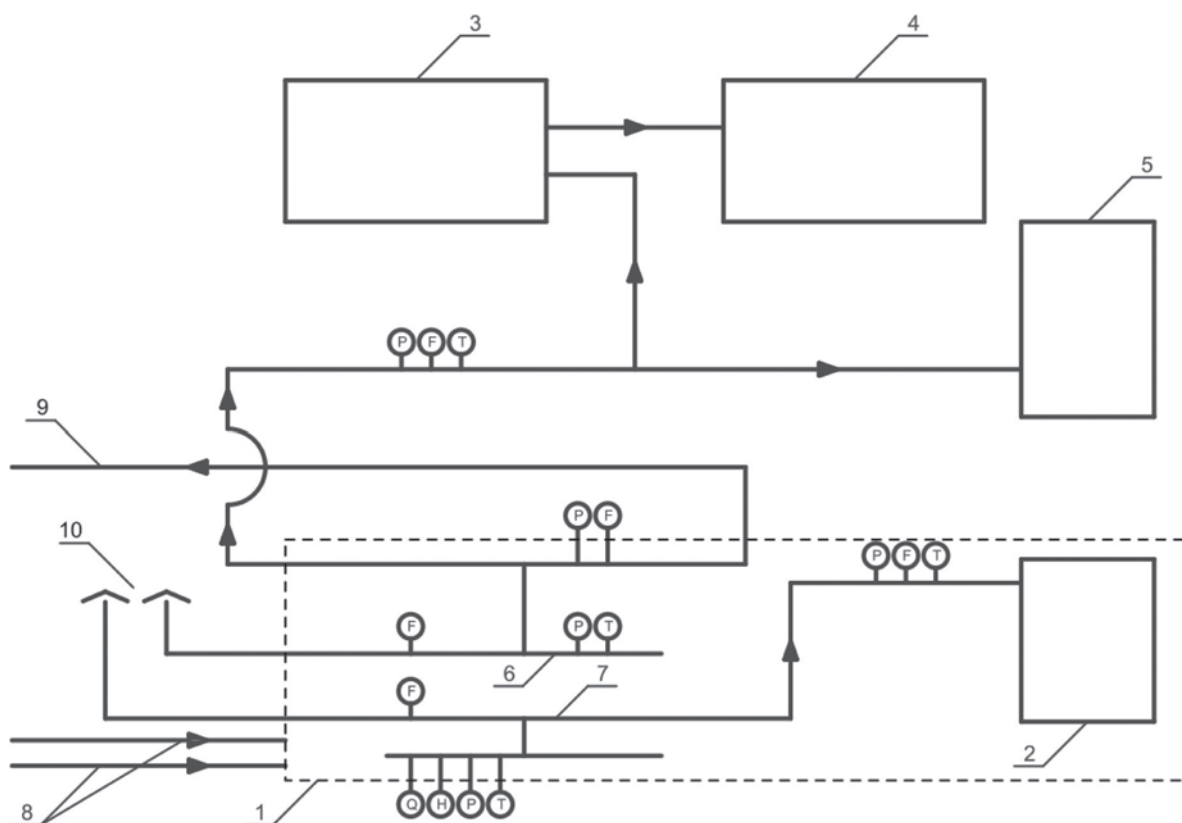


Rys. 6. System odmetanowania w kopalni „Pniówek”: a) stacja odmetanowania [14]; b) silnik gazowy

4.2. Schemat pomiarowy

Skojarzony system energetyczno-chłodniczy w kopalni „Pniówek” wyposażony jest w układ pomiarowy pozwalający na analizę parametrów pozyskiwanego gazu z odmetanowania oraz wielkość produkcji energii elektrycznej (rys. 7). Prezentowane wyniki zbierane były w okresie od 1 stycznia do 31 czerwca, gdzie

analizowane były głównie strumień ujętego metanu, stężenie metanu w mieszance oraz produkcja energii elektrycznej. Odczyty wykonywane były w próbkowaniu co 15 min, a następnie uśredniane odpowiednio w cyklu godzinowym, dobowym i miesięcznym. Na podstawie wyników ze stacji odmetanowania przeprowadzono analizę ujęcia gazu z odmetanowania w okresie badawczym.

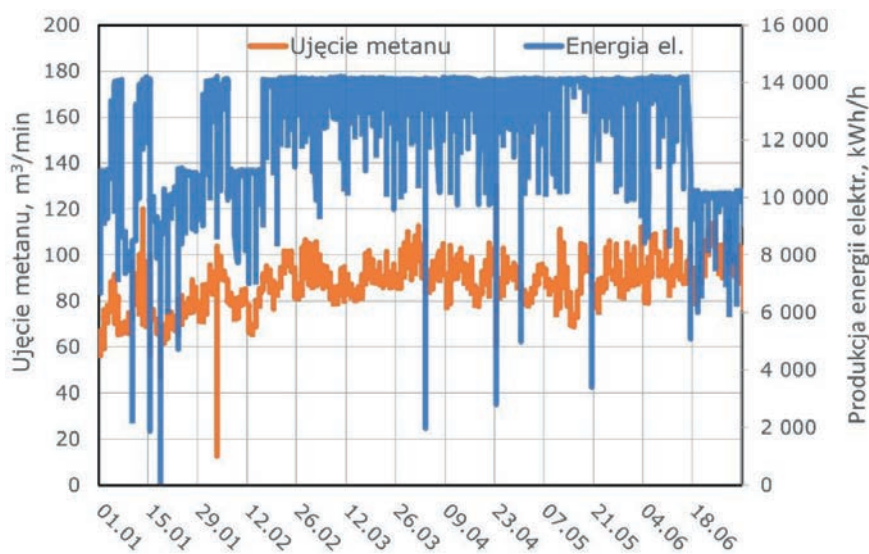


Rys. 7. System pomiarowy z rozmieszczeniem czujników: T – pomiar temperatury gazu; H – pomiar wilgotności gazu; P – pomiar ciśnienia gazu; F – pomiar natężenia przepływu gazu; Q – pomiar jakości gazu; 1 – stacja odmetanowania; 2 – hala sprężarek; 3 – stacja redukcyjna; 4 – elektrociepłownia; 5 – silniki gazowe; 6 – II stopień kolektora ciśnieniowego; 7 – I stopień kolektora ciśnieniowego; 8 – rurociąg z mieszaniną metan-powietrze z kopalni węgla kamiennego; 9 – instalacja przesyłu między kopalnianego; 10 – wydmychy

4.3. Analiza i dyskusja wyników

Zgromadzone wyniki ze stacji odmetanowania kopalni stanowiły podstawę przedstawionej analizy, gdzie skupiono się na zmienności ujęcia gazu i produkcji energii elektrycznej. W pierwszym etapie pracy surowe dane zo-

stały uśrednione cyklu godzinowym. Wyniki przedstawiono na rysunku 8. Przy ujęciu mieszaniny metan-powietrze na poziomie 90–100 m³/min uzyskano produkcję energii elektrycznej na poziomie 14 000 kWh/h. Zmniejszenie ujęcia metanu do wartości 60–70 m³/min powoduje obniżenie produkcji elektrycznej do poziomu 11 000 kWh/h.

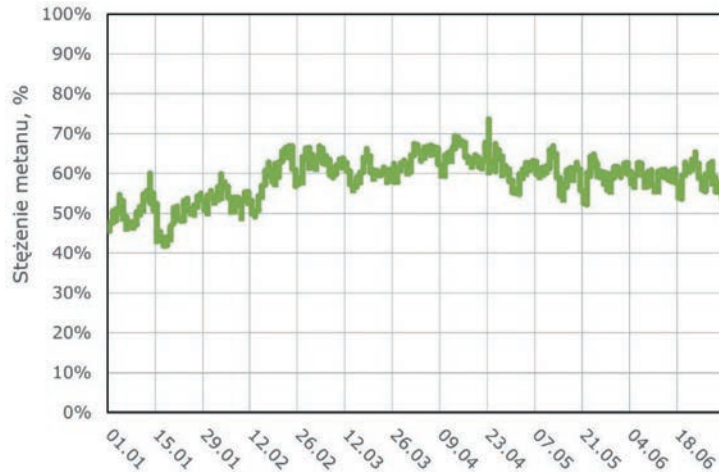


Rys. 8. Wykres zmian ujęcia metanu i produkcji energii elektrycznej w cyklu godzinowym

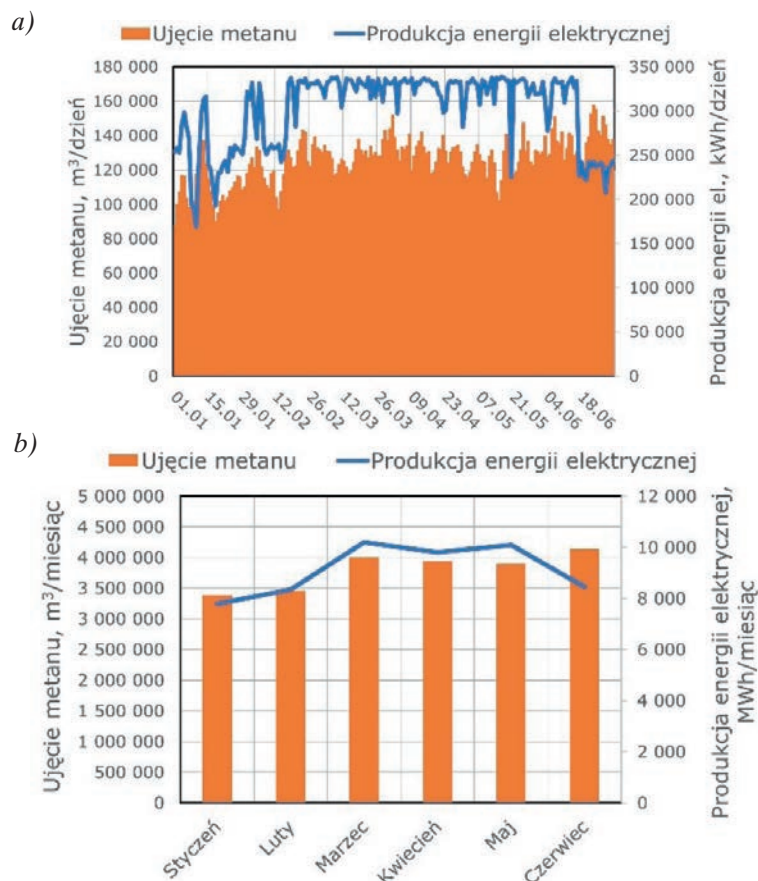
W celu wykorzystania ujętej mieszaniny w opisanym powyżej systemie kluczowe jest utrzymanie odpowiedniego stężenia metanu w strumieniu metanopowietrze. Analizie poddano zatem także stężenie tego parametru, a przebieg zmienności przedstawiono na rysunku 9. Z wykresu wynika, że stężenie

nie metanu utrzymywało się na średnim poziomie około 60%.

Na rysunku 10 przedstawiono zmiany stężenia metanu, produkcji energii elektrycznej oraz ujęcia mieszaniny po uśrednieniu dobowym i miesięcznym w analizowanym okresie.



Rys. 9. Wykres zmian stężenia metanu w mieszance



Rys. 10. Zmienność ujęcia metanu w I półroczu: a) w cyklu dziennym; b) w cyklu miesięcznym

Miesięczne ujęcie metanu w pierwszym półroczu zmienia się w zakresie od 3,3 do 4,2 mln m^3 na miesiąc, co przekłada się na produkcję energii elektrycznej od 7,7 do 10,2 tys. MWh na miesiąc. Emisja me-

tanu w takiej ilości odpowiada około 55–65 tysięcy ton CO_2e , przy założeniu współczynnika GWP na poziomie 25. W wyniku spalania metanu do atmosfery uwalniany jest dwutlenek węgla w większej ilości niż

metan, który jest dostarczany do procesu. Na każdą tonę spalnego metanu emitowane jest 2,75 Mg dwutlenku węgla. W związku ze znacznie niższym wpływem tego gazu na efekt cieplarniany, pomimo większej emisji, proces ten ma o wiele mniejszy wpływ na atmosferę w porównaniu z emisją czystego metanu. Przy tak znacznej emisji metanu do atmosfery w trakcie wydobycia spalanie metanu odgrywa kluczową rolę w procesie ograniczania efektu cieplarnianego.

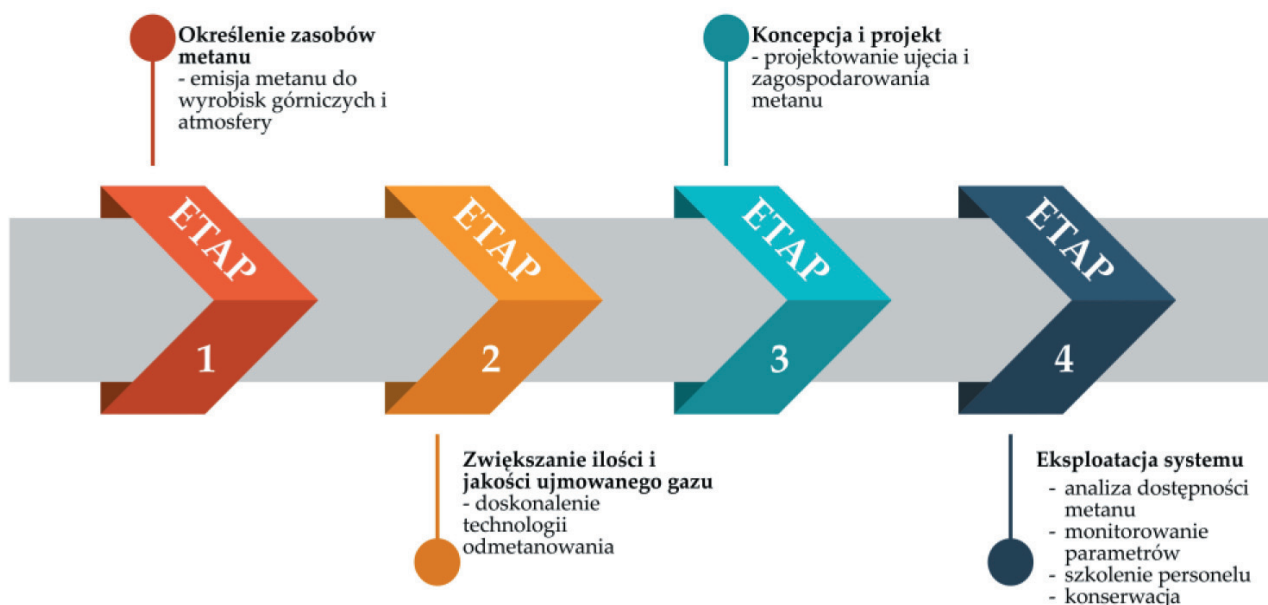
4.4. Propozycja kompleksowego podejścia do zarządzania i gospodarczego wykorzystania metanu

Stosowanie najlepszych praktyk w zakresie odmetanowania i wykorzystania metanu ma kluczowe znaczenie dla ograniczenia zdarzeń związanych z metanem, które zbyt często towarzyszą wydobyciu węgla, a jednocześnie przyczynia się do ochrony środowiska przez redukcję emisji gazów cieplarnianych (GHG) [8].

Brak efektywnego zarządzania produkcją i dystrybucją energii elektrycznej/ciepłej/chłodniczej uniemożliwia eksploatację pokładów węgla o dużym zagrożeniu metanowym i klimatycznym, a dodatkowo niezagospodarowane emisje metanu powodują szkody

środowiskowe, ale także wiążą się z opłatami emisyjnymi, co w przyszłości będzie stanowić problem opłacalności wydobycia. Stąd też tak ważne jest kompleksowe podejście do problematyki ujmowania metanu i jego optymalnego zagospodarowania. Na rysunku 11 przedstawiono diagram kompleksowego podejścia do zagadnienia ujmowania i wykorzystania metanu.

Za pierwszy etap postępowania przyjęto szczegółowe rozeznanie w zakresie źródła metanu w analizowanej kopalni, czyli ustalenia prognozowanej emisji do wyrobisk górniczych i/lub atmosfery. Rozpoznanie zasobów jest niezbędne do właściwego doboru techniki ujmowania i wykorzystania gazu. Kolejny krok dotyczy optymalizacji wybranej metody odmetanowania przez zwiększenie ilości i jakości ujmowanego gazu. Na podstawie dwóch pierwszych etapów możliwe jest opracowanie koncepcji projektowanego ujęcia i zagospodarowania metanu, a następnie wdrożenie projektu. Nie jest to jednak ostatni etap właściwego zarządzania emisjami metanu w kopalni. Jednym z najważniejszych etapów jest właściwa eksploatacja systemu. Dotyczy to głównie bieżącej analizy zmian w dostępności metanu, monitorowania parametrów ujętej mieszaniny, szkolenia personelu w zakresie właściwej obsługi systemu oraz systematycznej konserwacji.



Rys. 11. Schemat kompleksowego podejścia do problematyki ujmowania i zagospodarowania metanu

5. PODSUMOWANIE

Emisja metanu z kopalń od lat budzi duże zainteresowanie. Jest to temat bardzo istotny nie tylko ze względów środowiskowych, ale także z uwagi na korzyści energetyczne, a co za tym idzie – finansowe. Polska jest obok Stanów Zjednoczonych, Rosji, Au-

stralii, Ukrainy, Kazachstanu i Indii jednym z krajów o znaczącej emisji CMM.

Aby zapewnić profesjonalne i skuteczne zarządzanie ryzykiem, należy przenieść dobre praktyki wydobywcze do wszystkich krajów. Niezależnie od lokalizacji czy warunków górniczych możliwe jest znaczne ograniczenie ryzyka wystąpienia zdarzeń i wybuchów

metanu. Skuteczne zarządzanie ryzykiem metanowym w kopalniach węgla może również przynieść korzyść w postaci przyczynienia się do ograniczenia emisji gazów cieplarnianych. Zastosowanie układu trójgeneracyjnego, w którym metan z kopalni jest spalany w silnikach gazowych i wykorzystywany do produkcji energii elektrycznej, ciepłej i chłodniczej, jest przykładem optymalnego zagospodarowania. Pozwala to na zmniejszenie emisji metanu do atmosfery przy jednoczesnym zwiększeniu efektywności wydobywania węgla w warunkach zagrożenia metanowego oraz klimatycznego.

W artykule przedstawiono wyniki badań przeprowadzonych w kopalni węgla kamiennego w Polsce i na tym przykładzie wskazano na ekologiczne i ekonomiczne korzyści wynikające z zastosowania układu trójgeneracyjnego. Miesięczne ujęcie metanu waha się od 3,3 mln m³ do 4,1 mln m³, co odpowiada miesięcznej produkcji energii elektrycznej od 7790 MWh do 10 190 MWh. Taka emisja metanu w ekwiwalencji CO₂ wynosi około 55–66 tys. ton CO₂e.

Istnieje zatem potencjał do wykorzystania metanu z kopalni węgla kamiennego w układzie trójgeneracyjnym w celu skutecznego ograniczenia emisji tego gazu do atmosfery. Jednakże, aby osiągnąć ten cel, konieczne jest zapewnienie odpowiedniego stężenia i ilości ujmowanego metanu przez system odmetanowania, co stanowi kluczowy element skutecznej strategii redukcji emisji metanu w sektorze węglowym.

Literatura

- [1] Modzelewski W., Nęcki J.: *Emisje metanu: wyzwanie dla klimatu, energetyki i prawa*. ClientEarth, Prawnicy dla Ziemi, Warszawa 2022, <https://www.clientearth.pl/media/fz5hbsnu/2022-01-26-emisje-metanu-wyzwanie-dla-klimatu-energetyki-i-prawa.pdf> [20.02.2023].
- [2] Jackson R.B., Saunio M., Bousquet P., Canadell J.G., Poulter B., Stavert A.R., Bergamaschi P., Niwa Y., Segers A., Tsuruta A.: *Increasing anthropogenic methane emissions arise equally from agricultural and fossil fuel sources*. Environmental Research Letters 2020, 15, 071002, <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/ab9ed2>.
- [3] Lan X., Thoning K.W., Dlugokencky E.J.: *Trends in globally-averaged CH₄, N₂O, and SF₆ determined from NOAA Global Monitoring, Laboratory measurements. Version 2022-10*, 2022, <https://doi.org/10.15138/P8XG-AA10>.
- [4] International Energy Agency: *Methane Tracker Database*, 2022, <https://www.iea.org/reports/global-methane-tracker-2022> [20.02.2023].

- [5] Höglund-Isaksson L., Gómez-Sanabria A., Klimont Z., Rafaj P., Schöpp W.: *Technical potentials and costs for reducing global anthropogenic methane emissions in the 2050 time-frame – results from the GAINS model*. Environmental Research Letters 2020, 2, 025004.
- [6] Krajowy Ośrodek Bilansowania i Zarządzania Emisjami (KOBiZE). *Krajowy Raport Inwentaryzacyjny 2022 Inwentaryzacja emisji i pochłaniania gazów cieplarnianych w Polsce dla lat 1988–2020. Raport syntetyczny*, Warszawa 2022, https://www.kobize.pl/uploads/materialy/materialy_do_pobrania/krajowa_inwentaryzacja_emisji/NIR_2022_raport_syntetyczny_PL.pdf.
- [7] Borowski M., Szlązak N., Swolkień J.: *Wpływ zmian ciśnienia barometrycznego na efektywność ujęcia metanu ze ściany wydobywczej przez system odmetanowania*. Wiadomości Górnicze 2016, 67, 9: 526–533.
- [8] United Nations. Economic Commission For Europe, and Methane To Markets Partnership: *Best Practice Guidance for Effective Methane Drainage and Use in Coal Mines*. New York – Geneva: United Nations, 2010, <https://lccn.loc.gov/2010554273> [20.02.2023].
- [9] Nawrat S., Kuczera Z., Łuczak R., Życzkowski P., Napieraj S., Gatnar K.: *Utylizacja metanu z pokładów węgla w polskich kopalniach podziemnych*. Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne, Kraków 2009.
- [10] Wyższy Urząd Górniczy: *Ocena stanu bezpieczeństwa pracy, ratownictwa górniczego oraz bezpieczeństwa powszechnego w związku z działalnością górniczo-geologiczną w 2022 roku (porównanie od roku 2017)*. Katowice 2023.
- [11] Borowski M., Życzkowski P., Łuczak R., Karch M., Cheng J.: *Tests to Ensure the Minimum Methane Concentration for Gas Engines to Limit Atmospheric Emissions*. Energies 2020, 13, 44, <https://doi.org/10.3390/en13010044>.
- [12] Pawlaczek-Kurek A., Suwak M.: *Will It Be Possible to Put into Practice the Mitigation of Ventilation Air Methane Emissions? Review on the State-of-the-Art and Emerging Materials and Technologies*. Catalysts 2021, 11, 1141, <https://doi.org/10.3390/catal11101141>.
- [13] Gatnar K.: *Kogeneracja i trójgeneracyjna na bazie gazu z odmetanowania kopalń – aktualny stan w Jastrzębskiej Spółce Węglowej*. XXX Konferencja z cyklu Zagadnienie surowców energetycznych i energii w gospodarce krajowej, Zakopane, 9–12.10.2016 r., https://se.min-pan.krakow.pl/pelne_teksty30/k30_mk_zk30mk_gatnar_z.pdf [20.02.2023].
- [14] Borowski M., Życzkowski P., Cheng J., Łuczak R., Zwolińska K.: *The Combustion of Methane from Hard Coal Seams in Gas Engines as a Technology Leading to Reducing Greenhouse Gas Emissions – Electricity Prediction Using ANN*. Energies 2020, 13, 4429, <https://doi.org/10.3390/en13174429>.

dr hab. inż. MAREK BOROWSKI, prof. AGH
borowski@agh.edu.pl

mgr inż. KLAUDIA ZWOLIŃSKA-GLADYS
kzwolinska@agh.edu.pl

mgr inż. ANDRZEJ SZMUK
szmuk@agh.edu.pl

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza
al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków