Możliwość odzysku ciepła z wybranych instalacji stosowanych w górnictwie podziemnym

Wacław ANDRUSIKIEWICZ[1)], *Michał KARCH*[2)]

[1)] dr hab. inż., prof. AGH; Department of Mining Engineering & Occupational Safety, Faculty of Civil Engineering and Resource Management, AGH University of Krakow; email: andus@agh.edu.pl; ORCID: 0000-0002-4845-1404
[2)] dr inż.; Department of Power Systems and Environmental Protection Facilities, Faculty of Mechanical Engineering and Robotics, AGH University of Krakow; email: karch@agh.edu.pl; ORCID: 0000-0001-8191-4274

https://doi.org/10.29227/IM-2025-02-04-021

Submission date: 23-11-2025 | Review date: 13-12-2025

Abstrakt

W górnictwie podziemnym występują liczne procesy i instalacje, w których powstają znaczne ilości energii cieplnej odprowadzanej do otoczenia jako tzw. ciepło odpadowe. Źródłami tego ciepła są m.in. wody kopalniane, powietrze wentylacyjne, układy chłodzenia maszyn górniczych oraz systemy klimatyzacyjne. W artykule przedstawiono kilka możliwości wykorzystania ciepła z wód kopalnianych oraz możliwości wykorzystania odzysku ciepła z instalacji klimatyzacji w celu wspomagania procesów produkcji soli. Przedstawiono wady i zalety rozpatrywanych wariantów. W dobie rosnących kosztów energii i wymagań środowiskowych odzysk ciepła w kopalniach staje się istotnym kierunkiem poprawy efektywności energetycznej i ograniczenia emisji gazów cieplarnianych.

Słowa kluczowe: *odzysk ciepła, chłodzenie, odwadnianie kopalń, pompy ciepła*

1. Wstęp

Odzysk ciepła to proces polegający na ponownym wykorzystaniu energii cieplnej, która w normalnych warunkach zostałaby utracona do otoczenia. Najczęściej stosuje się go w systemach wentylacyjnych, grzewczych czy przemysłowych, gdzie powietrze, spaliny lub woda odprowadzane na zewnątrz zawierają jeszcze znaczną ilość energii. Dzięki specjalnym urządzeniom, takim jak wymienniki ciepła czy pompy ciepła, możliwe jest przekazanie tej energii do świeżego powietrza lub innych mediów, co pozwala obniżyć zużycie paliw i energii elektrycznej. Odzysk ciepła przyczynia się nie tylko do oszczędności finansowych, ale także do ochrony środowiska poprzez zmniejszenie emisji zanieczyszczeń.

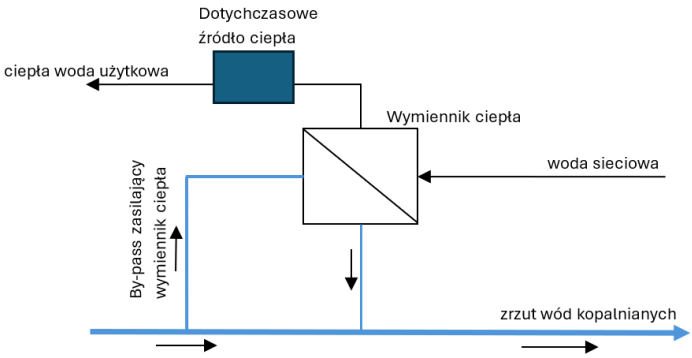
Zagadnienia odzysku ciepła w górnictwie nie są zagadnieniem nowym. Jednak ze względu na rosnące koszty energii oraz konieczność ograniczania emisji zanieczyszczeń obserwuje się w ostatnim czasie znaczne zwiększenie aktywności spółek górniczych w tym obszarze. W kopalniach odzysk ciepła znajduje szerokie zastosowanie, głównie ze względu na duże ilości energii traconej w procesach wentylacji i pracy maszyn górniczych. Systemy wentylacyjne, które dostarczają świeże powietrze pod ziemię i odprowadzają powietrze zużyte, mogą być wyposażone w wymienniki ciepła umożliwiające odzyskanie energii z ciepłego strumienia powietrza. Podobne rozwiązania stosuje się przy wodach kopalnianych – często wypompowywana woda ma podwyższoną temperaturę, co pozwala wykorzystać ją jako źródło energii cieplnej np. do ogrzewania budynków powierzchniowych.

Stosunkowo często podejmowany temat wykorzystania ciepła z wód kopalnianych [1, 2, 3, 4, 7] jest przedstawiany jako perspektywiczny sposób na obniżenie kosztów eksploatacyjnych w kopalniach oraz ograniczenie emisji zanieczyszczeń. Najczęściej proponowanym rozwiązaniem jest wykorzystanie ciepła odpadowego z wód kopalnianych do podgrzewu ciepłej wody użytkowej w sposób bezpośredni lub przy użyciu instalacji z pompami ciepła. Aktualnie można wskazać kilka działających oraz planowanych tego typu instalacji [2, 5, 6]:

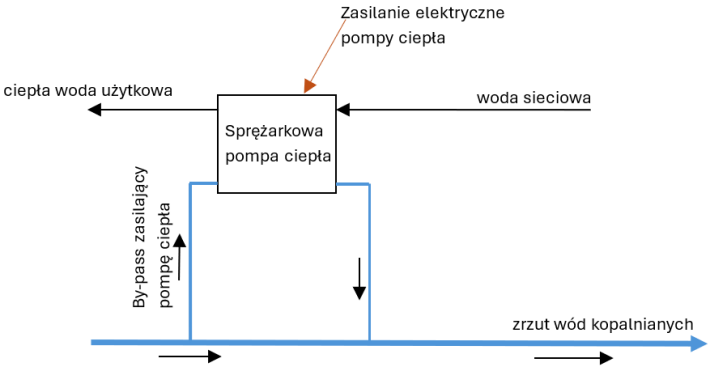
- Zakład Górniczy Sobieski (Jaworzno). Od 2015 roku działa pilotażowa instalacja odzysku ciepła z wód dołowych. System wykorzystuje 5 pomp ciepła typu woda-woda o łącznej mocy 420 kW;
- Centralny Zakład Odwadniania Kopalń, Czeladź. Zastosowano pompy ciepła woda/woda. Całkowita moc grzewcza instalacji wynosi 117,8 kW;
- Szombierki (Bytom), pilotaż demonstracyjny. Ogrzewanie siedziby firmy z wykorzystaniem ciepła wód odwadniających stare kopalnie;
- Kopalnia Mysłowice-Wesoła (PGG), planowana jest budowa instalacji odzysku ciepła z wód dołowych o mocy 2 MW;
- prowadzone są przygotowania do wdrożenia podobnych systemów w kolejnych kopalniach: Ruch Ziemowit (Lędziny) – planowana moc instalacji ok. 1,5 MW, Kopalnia Rydułtowy – projektowana moc ok. 4 MW, Kopalnia Sośnica (Gliwice) – w fazie analiz i przygotowań.

Koncepcje odzysku ciepła odpadowego, powstałego w wyniku procesu zestudzenia wody technologicznej w kopalni Lubelski Węgiel „Bogdanka" przedstawiono w [8]. Nadrzędnym celem omawianej instalacji jest chłodzenie wody technologicznej wykorzystywanej przez kopalnię do chłodzenia maszyn górniczych (silniki, kombajny, strugi i inne urządzenia infra-struktury podziemnej). W artykule przedstawiono możliwość rozbudowy systemu o układ z pompami ciepła, które pozwoliłyby zasilać magistralę ciepłowniczą.

Dzięki odzyskowi ciepła w górnictwie możliwe jest zmniejszenie kosztów eksploatacyjnych, poprawa efektywności energetycznej zakładu oraz ograniczenie emisji gazów cieplarnianych. W nowoczesnych kopalniach coraz częściej wdraża



Rys. 1. Schemat bezpośredniego wykorzystania ciepła z wód kopalnianych
Fig. 1. Scheme of direct use of heat from mine water



Rys. 2. Schemat instalacji z pompą ciepła
Fig. 2. Heat pump installation diagram

się także rozwiązania hybrydowe, które łączą odzysk energii z systemami grzewczymi i chłodniczymi, dostosowując je do specyficznych warunków pracy pod ziemią [1, 2].

2. Założenia

W rozpatrywanej lokalizacji przyjmuje się następujące maksymalne strumienie wód kopalnianych w poszczególnych ujęciach:

- Zakład 1 – 30816 m^3/dobę tj. 21,4 m^3/min,
- Zakład 2 – 46224m^3/dobę tj. 32,1 m^3/min,
- Zakład 3 – 18144m^3/dobę tj. 12,6 m^3/min,
- Zakład 4 – 18000m^3/dobę tj.12,5 m^3/min.

Daje to sumaryczny strumień wody 113 184 m^3/dobę o temperaturze w granicach 22–28°C. Wody kopalniane zawierają domieszki soli mineralnych, co nieco obniża wartość ciepła właściwego. W zależności od zasolenia może ono wynosić cw ≈ 3,6-4,1 kJ/(kg·K), natomiast gęstość tych wód najczęściej zawiera się w granicach 1010÷1200kg/m^3. Jeżeli przyjmie się, że na wymienniku ciepła nastąpi schłodzenie wody o 6K to oznacza, że zgodnie ze wzorem (1) powstanie do dyspozycji moc cieplna wynosząca 31 125 600W.

$$\dot{Q}_w = \dot{M}_w c_{w_{t1}}^{t2} \cdot \Delta t_w \qquad (1)$$

gdzie:
M_w – strumień masowy wody,
$c_{w_{t1}}^{t2}$ – średnie ciepło właściwe wody w zakresie temperatur t_1-t_2,
Δt_w – różnica temperatur.

Oczywiście należy przyjąć, że nie cały strumień wody będzie schładzany. Zakłada się wykorzystanie wód w 60%, co oznacza moc cieplną na poziomie 18,7 MW.

3. Odzysk ciepła z wód kopalnianych

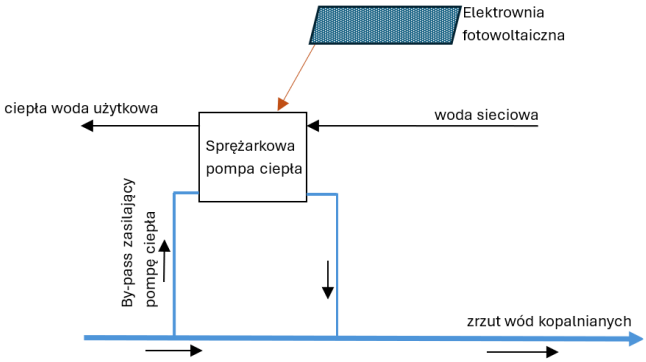
Wariant 1 zakłada bezpośrednie wykorzystanie wody kopalnianej do wstępnego podgrzewania ciepłej wody użytkowej. Schemat takiego rozwiązania przedstawia Rys. 1.

W tym rozwiązaniu woda wodociągowa jest wstępnie podgrzewana w wymienniku ciepła przez wody kopalnianie, a następnie dogrzewana przez istniejący system grzewczy do temperatury 55°C. Uzyskana w ten sposób ciepła woda użytkowa (c.w.u.) może być wykorzystana w instalacji łaźni na terenie zakładu górniczego. Woda wodociągowa posiada zazwyczaj średnioroczną temperaturę rzędu 12°C. W takim układzie można założyć podgrzanie wody sieciowej do około 18°C. Rozwiązanie to charakteryzuje się prostotą i niskimi kosztami inwestycyjnymi. Dodatkowe zasilanie jest wymagane tylko dla pomp obiegowych. Wadą tego rozwiązania jest konieczność dalszego dogrzewania wody konwencjonalnymi metodami.

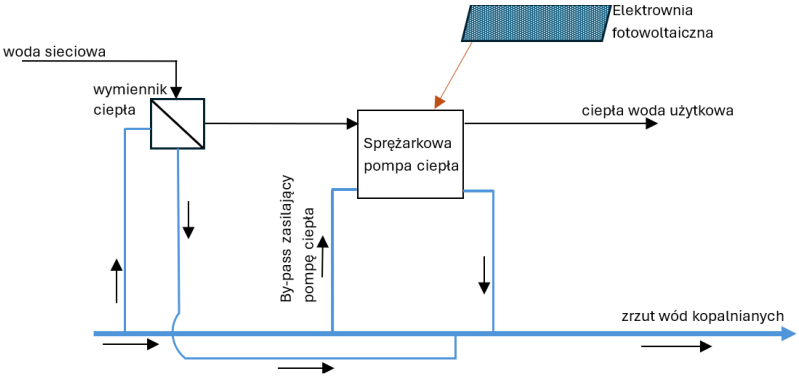
Wariant 2 zakłada zastosowanie sprężarkowych pomp ciepła do przygotowania c.w.u..

W tym przypadku przygotowanie c.w.u. odbywa się przy pomocy instalacji sprężarkowych pompy ciepła wykorzystujących energię cieplną zawartą w wodach kopalnianych. Schemat instalacji przedstawiono na Rys. 2.

Główna różnica w stosunku do poprzedniego wariantu polega na wyeliminowaniu dodatkowych zewnętrznych źródeł ciepła. Całe ciepło na potrzeby przygotowania c.w.u.



Rys. 3. Schemat instalacji z pompą ciepła i elektrownią fotowoltaiczną
Fig. 3. Diagram of an installation with a heat pump and a photovoltaic power plant



Rys. 4. Schemat instalacji z pompą ciepła, elektrownią fotowoltaiczną i wstępnym podgrzaniem wody sieciowej
Fig. 4. Diagram of the installation with a heat pump, photovoltaic power plant and preheating of the network water

wytwarzane jest przez pompę ciepła. Rozpatrując przykładowo wydajność ujęcia wód w zakładzie nr 2 można wyliczyć moc grzewczą, która wyniesie około 7,8 MW. Jest to wielkość, która bez problemu pozwala pokryć zapotrzebowanie na ciepło w łaźni górniczej. Zainstalowanie pomp ciepła umożliwia bezpośrednie uzyskanie wymaganej temperatury ciepłej wody użytkowej wynoszącej 55°C.

Temperatura dolnego źródła jakim są wody kopalniane oraz temperatura c.w.u. przy których będzie pracować pompa ciepła zapewnią dość wysokie wartości współczynnika efektywności energetycznej (COP) – należy oczekiwać wartości na poziomie od 3,5 do 4. Ze względu na możliwe agresywne własności wód kopalnianych należy liczyć się z koniecznością zastosowania pośredniego wymiennika ciepła przed pompą ciepła lub zapewnienie odpowiedniej jakości samego parownika pompy ciepła. Należy również pamiętać, że w tym wariancie będzie wymagane dodatkowe zasilanie w energię elektryczną potrzebną do napędu pompy ciepła. Niemniej jednak wysoka wartość wskaźnika COP oraz doświadczenia Zakładu Górniczego Sobieski [2] wskazują na możliwość zapewnienia rentowności tego rozwiązania.

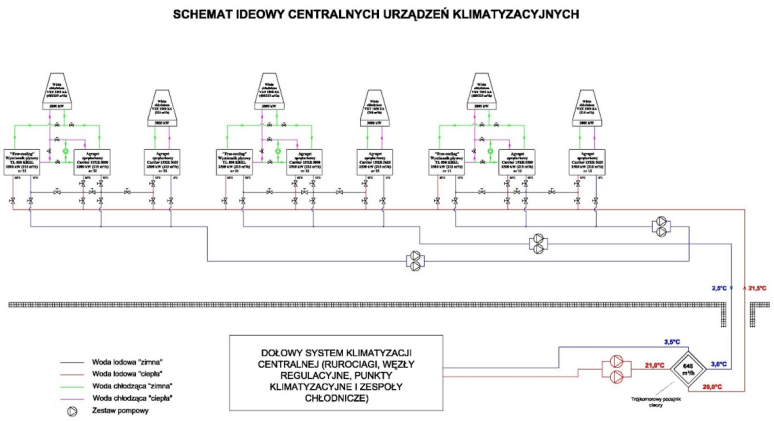
Rozwinięciem wariantu 2 jest wariant 3, w którym dodatkowo zastosowana zostanie elektrownia solarna wykorzystująca panele fotowoltaiczne. Schemat takiego rozwiązania przedstawiono na Rys. 3.

Zaletą takiego rozwiązania jest wykorzystanie odnawialnego źródła energii jakim jest promieniowanie słoneczne. Obniża to koszty eksploatacyjne i emisje zanieczyszczeń. Przykładem takiego rozwiązania może być projekt zrealizowany w mieście Gateshead w północno-wschodniej Anglii. Lokalny producent energii, firma Gateshead Energy Company (GEC), oraz władze miasta zobowiązały się do 2030 roku osiągnąć neutralny status pod względem emisji dwutlenku węgla. Celem projektu Gateshead jest odzysk ciepła z wód kopalnianych w celu realizacji strategii zero emisyjności miasta Gateshead. System opiera się na dwóch amoniakalnych pompach ciepła 3 MW GEA, które pozwalają uzyskać temperaturę wody do nawet 80°C, co pozwala na wykorzystanie jej również do ogrzewania budynków. Element tego systemu stanowią elektrownie fotowoltaiczne, zasilające pompy ciepła [9]. Niestety należy zaznaczyć, że pod względem kosztów inwestycyjnych jest to najdroższe rozwiązanie z dotychczas przedstawionych. Jednak w tym przypadku można założyć pozyskanie środków zewnętrznych np. dotacji m.in. z Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej.

Ponieważ zapotrzebowanie na moc cieplną do ogrzewania c.w.u. w kopalni jest zazwyczaj mniejsze niż moc dostępna w zrzucanych wodach kopalnianych można rozważyć wariant 4, w którym woda sieciowa za nim trafi na pompę ciepła jest wstępnie podgrzewana w wymienniku ciepła. Schemat takiego rozwiązania przedstawiono na Rys. 4.

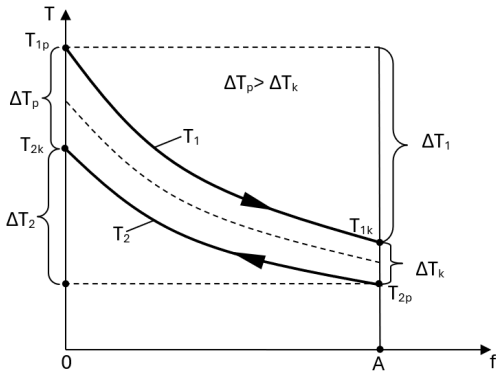
4. Odzysk ciepła z instalacji klimatyzacji

W tym przypadku ciepło odpadowe rozumiane jest jako ciepło odbierane z agregatów chłodniczych przez wieże chłodnicze. W skład przykładowego systemu klimatyzacji wchodzi 6 wież chłodniczych: trzy o mocy 3 000 kW każda i trzy o mocy 2 800 kW każda – Rys. 5. Daje tą łączną moc 17 400 kW. Bardzo istotnym parametrem jest temperatura medium, od którego ma nastąpić odbiór ciepła. W przypadku



Rys. 5. Schemat przykładowej instalacji klimatyzacji

Fig. 5. Diagram of an example air conditioning installation



Rys. 6. Rozkład temperatury w rekuperatorze przeciwprądowym

Fig. 6. Temperature distribution in the counter-flow recuperator

rozpatrywanej instalacji temperatura „zasilania" wież chłodniczych wynosi 32°C.

Założono wykorzystanie odzysku ciepła do zasilania układu technologicznego np. podgrzewanie wody na potrzeby łaźni. Przyjęto, że odległość zasilanego układu od agregatów chłodniczych wynosi 1000 m. Rurociąg transportujący wodę chłodzącą, skraplacz do wymiennika zabudowanego w układzie technologicznym musi być izolowany. Przy aktualnych własnościach cieplnych rur preizolowanych spadek temperatury wody na długości 1000 m nie powinien przekroczyć 1°C, stąd temperatura wody na wejściu do wymiennika wyniesie 31°C.

Zakłada się, że odzyskiwanie ciepła z urządzeń klimatyzacyjnych realizowane jest tylko drogą wymiany ciepła – temperatura determinowana jest temperaturą czynnika ochładzanego i zastosowanym rodzajem wymiennika ciepła. W tym wariancie temperatura medium ogrzewanego nie przekracza temperatury czynnika ochładzanego.

Na Rys. 6 przedstawiono rozkład temperatury w rekuperatorze przeciwprądowym. Kierunek przepływu czynników w takim wymienniku jest przeciwny, co oznacza, że czynnik podgrzewający o temperaturze T_{1p} na wlocie do wymiennika poprzez przegrodę styka się z czynnikiem podgrzewanym o temperaturze T_{2k} na wylocie. Wykres ten przedstawia schematycznie zmiany temperatur w zależności od wartości f stanowiącej bieżącą powierzchnię przegrody rozdzielającej czynniki, a obrazującą stadium wymiany ciepła. Wielkość A oznacza pole całej powierzchni przegrody, przez którą następuje wymiana ciepła. Ustalenie początkowej różnicy ΔT_p temperatury obu czynników opiera się na umowie: $\Delta T_p > \Delta T_k$.

W równaniu na przenikanie ciepła

$$Q = k \cdot F \cdot \Delta T \tag{2}$$

gdzie:

Q – ciepło przepływające przez przegrodę,

k – współczynnik przenikania ciepła,

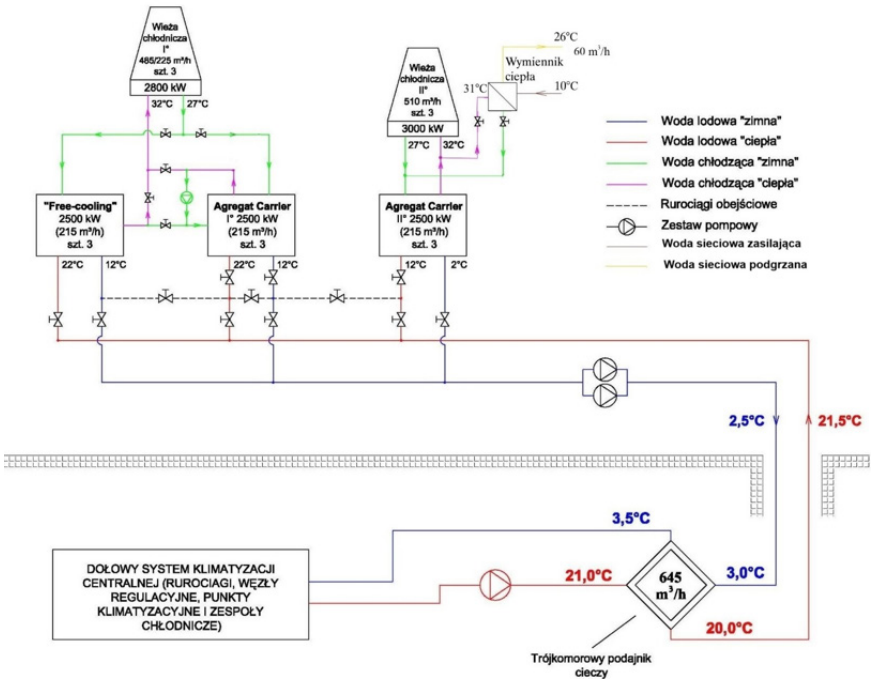
F – pole powierzchni wymiany ciepła,

ΔT – spadek temperatury,

spadek temperatury ΔT stanowi niejako siłę napędową ruchu ciepła. Należy zauważyć, że na ogół spadek ten zmienia się wzdłuż drogi procesu.

Z praktycznego punktu widzenia powyższe rozważania wskazują, że im mniejsza różnica temperatur będzie do dyspozycji, tym większą należy zastosować powierzchnię wymiany ciepła, czyli większy wymiennik ciepła. Z tego też względu praktycznie przyjmuje się dla wymienników ΔT = 4÷7 °K. W rozpatrywanym przypadku oznacza to, że maksymalna do uzyskania temperatura w procesie odzysku ciepła tylko przy pomocy wymienników ciepła nie przekroczy 26°C.

Przyjęto, że ciepło odpadowe zostanie wykorzystane do wstępnego podgrzania wody sieciowej zasilającej układ ogrzewania wody na potrzeby łaźni. Średnioroczna temperatura wody sieciowej wynosi około 10°C. Przy założeniu, że szczytowe zapotrzebowanie na gorącą wodę w łaźni wynosi 60



Rys. 7. Schemat zastosowania wymiennika ciepła w celu odzysku ciepła z instalacji klimatyzacji
Fig. 7. Schematic diagram of the use of a heat exchanger for heat recovery from an air conditioning system

m^3/h, to ze wzoru 1 można obliczyć moc wymiennika ciepła, która wyniesie 1 122 kW. Wymiennik o takiej mocy należałoby zabudować w układzie, aby wstępnie podgrzać całą wymaganą ilość wody do 26°C. Następnie należałoby dogrzać wodę do wymaganych 55°C. Woda chłodząca skraplacz cyrkuluje w obiegu zamkniętym – skraplacz, wymiennik ciepła – w rurociągu izolowanym o długości zależnej od wzajemnej lokalizacji tych elementów układu. W przypadku znacznych odległości może to generować wyższe koszty inwestycyjne związane z kosztami rur preizolowanych, kosztami budowy rurociągu czy mocą pompy obiegowej.

Zaletą takiego rozwiązania jest jednak prosta budowa układu i stosunkowo niskie koszty wykonania, koszty eksploatacyjne tego układu będą głównie generowane przez napęd pompy obiegowej. Niestety w rozwiązaniu takim należy dostarczyć dodatkową energię do ogrzania wody do końcowej temperatury 55°C. Opłacalność takiego rozwiązania będzie zależała zatem również od sposobu dogrzewania wody do wymaganej temperatury. Schemat proponowanego rozwiązania przedstawiono na Rys. 7.

5. Wykorzystanie źródeł ciepła jawnego powietrza z wyrobisk górniczych

W tym przypadku odzysk ciepła jawnego z powietrza można przeprowadzić zasadniczo dwoma sposobami:

- układ bez medium pośredniczącego, w którym przekazanie ciepła następuje w systemie powietrze – woda,
- układ z medium pośredniczącym, w którym ciepło przekazywane jest w systemie powietrze – nośnik ciepła – woda.

Układ bezpośredni może pracować z jednym wymiennikiem ciepła typu powietrze – ciecz, natomiast w układzie drugim wymagane są dwa wymienniki jeden powietrze-ciecz i drugi ciecz-ciecz. Zasadnicza różnica w efekcie pracy tych układów będzie polegała na tym, że inna będzie temperatura dyspozycyjna wody (związana ze spadkami temperatur na wymiennikach). W układzie bezpośrednim końcowa temperatura wody będzie wyższa niż w przypadku układu pośredniego. Żaden z tych układów nie stanowi problemu technicznego, jednak aby się nimi poważniej zająć należałoby podjąć szereg decyzji dotyczących założeń projektowych np. miejsce odbioru ciepła (ilość dostępnego miejsca), parametry powietrza ochładzanego (temperatury, wydatek, wilgotność), sposób transportu ciepła (przebieg ciepłociągów, zastosowana izolacja) itp.. Można np. rozważyć transport powietrza otworami wielkośrednicowymi z rejonu kopalni o najwyższej temperaturze powietrza na powierzchnię. Strumień powietrza wykorzystany byłby do podgrzania wody w wymienniku ciepła znajdującym się na terenie łaźni. Należy jednak zdawać sobie sprawę, że przyrost temperatury wody w takich układach będzie niewielki, rzędu kilku stopni Kelvina. Będzie o tym decydować różnica temperatur powietrza i wody plus straty na wymiennikach i przesyle. Można oczywiście zaproponować szereg różnych rozwiązań technicznych, różniących się między sobą sposobem działania, jednak wszystkie one będą generowały dodatkowe (mniejsze bądź większe) koszty. Koszty te będą rosły wraz z żądaną temperaturą końcową wody. Uwzględniając dodatkowo, że aktualnie kopalnia dysponuje nadwyżką niskotemperaturowego ciepła odpadowego z klimatyzacji centralnej bądź wód kopalnianych, taki wariant jest ekonomicznie nieuzasadniony.

6. Podsumowanie

W artykule przedstawiono możliwości odzysku ciepła z różnych układów technologicznych w kopalni. Z przedstawionych wariantów wykorzystania ciepła z wód kopalnianych najbardziej zaawansowanym jest rozwiązanie 4. Pozwala ono uzyskać najwyższe wskaźniki ograniczenia emisji zanieczyszc-

zeń i wykorzystania energii odnawialnej. Należy jednak podkreślić, że wybór optymalnego rozwiązania będzie w dużej mierze zależał od precyzyjnego określenia zapotrzebowania na ciepło uzyskane w wyniku odzysku. Najlepsza sytuacja jest wtedy, gdy zapotrzebowanie na ciepło jest w miarę stałe przez cały rok, a parametry temperaturowe nie są wygórowane. Dlatego najczęściej rozważa się wykorzystanie odzyskanego ciepła do przygotowania wody na potrzeby łaźni kopalnianej. Przedstawione przykłady pokazują, że możliwe jest również zaproponowanie systemu zapewniającego ogrzewanie budynków. Istotnym jest aby odbiór ciepła znajdował jak najbliżej instalacji odzysku ciepła, ponieważ pozwala to zredukować straty i koszty przesyłu energii cieplnej.

Literatura – References

1. Solik-Heliasz E., Ocena możliwości odzysku ciepła z wód pompowanych z kopalń węgla kamiennego, Prace naukowe GIG, Górnictwo i Środowisko, nr 2/2002, Katowice
2. Karpiński M., Sowiżdżał A., Kopalnie węgla kamiennego źródłem ciepła dla pomp ciepła, Rynek Instalacyjny 4/2018
3. Tokarz M., Mucha W., Wykorzystanie energii geotermalnej pochodzącej z odwadniania zakładów górniczych, na przykładzie rozwiązań zastosowanych w SRK S.A. Zakładzie CZOK w Czeladzi, „Technika Poszukiwań Geologicznych Geotermia, Zrównoważony Rozwój" nr 1/2013.
4. Zagospodarowanie ciepła odpadowego, jako cennego i taniego źródła energii. Możliwości i efektywność produkcji ciepła z zastosowaniem pomp ciepła na wybranych przykładach, materiały Geo-Term Polska, 2015
5. https://www.pgg.pl/strefa-korporacyjna/aktualnosci/1974/Cieplo-z-odwadniania-kopalni.
6. https://www.rybnik.com.pl/wiadomosci,pgg-odzyskuje-cieplo-z-kopaln-po-ruchu-wesola-czas-na-ziemowita-rydultowy-i-gliwicka-sosnice,wia5-3273-62533.html.
7. Szlązak N., Obracaj D., Korzec M., Wykorzystanie wody dołowej w odbiorze i wykorzystaniu ciepła skraplania z podziemnych układów klimatyzacji w kopalniach, Inżynieria Mineralna, Tom 1, Nr 1, 2023.
8. Waniczek S., Kołodziej P., Bartela Ł., Koncepcja odzysku ciepła odpadowego powstałego w wyniku procesu zestudzenia wody technologicznej w kopalni „bogdanka", Rynek Energii,10/2019.
9. https://www.gea.com/pl/customer-cases/gea-heat-pumps-turn-redundant-gateshead-mine-water-into-clean-energy/.

Possibility of Heat Recovery from Selected Installations Used in Underground Mining

Underground mining involves numerous processes and installations that generate significant amounts of thermal energy that is released into the environment as waste heat. Sources of this heat include mine water, ventilation air, mining machine cooling systems, and air conditioning systems. This article presents several options for utilizing heat from mine water and the potential for using heat recovery from air conditioning systems to support salt production processes. The advantages and disadvantages of each option are presented. In an era of rising energy costs and environmental requirements, heat recovery in mines is becoming an important approach to improving energy efficiency and reducing greenhouse gas emissions.

Keywords: *heat recovery, cooling, mine drainage, heat pumps*