

Dr inż. Mariusz Tańczuk, Energetyka Ciepła Opolszczyzny SA

Odzysk energii odpadowej

z żużla kotła ciepłowniczego - przymiarka techniczna

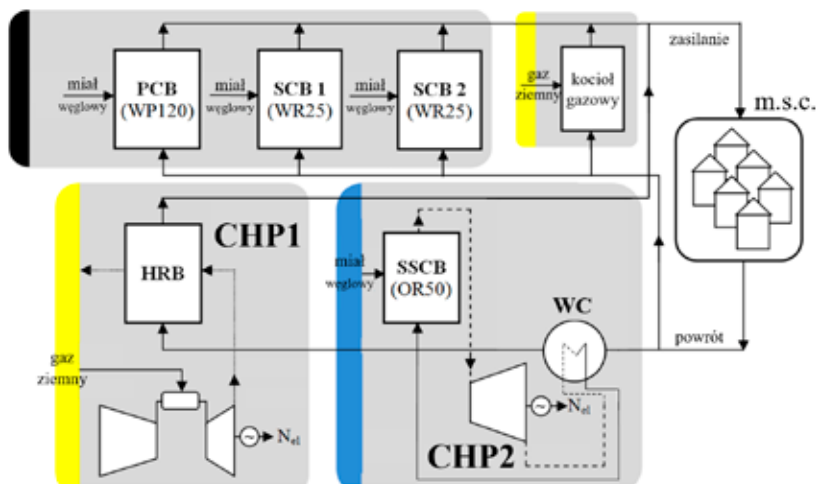
Ogromne zainteresowanie nowoczesnym i efektywnym wytwarzaniem, konwersją, przesyłem i magazynowaniem energii ma obecnie miejsce zarówno w nauce, jak i w przemyśle zarówno w Polsce, jak i na świecie. Zapotrzebowanie na energię gwałtownie rośnie, a potrzeba zrównoważonego zarządzania procesami wymusza poszukiwanie nowych rozwiązań i technologii energetycznych. Jednym z rozwiązań jest oszczędzanie i odzyskiwanie energii. Energia zaoszczędzona w procesach konwersji lub odzyskana energia odpadowa mogą być traktowane jak użyteczne formy energii, których wykorzystanie daje wymierne efekty finansowe.

Jedną z obiecujących opcji odzyskiwania energii jest fizyczne wykorzystanie entalpii stałych produktów spalania, takich jak żużel i popiół, które powstają w wyniku różnych procesów technologicznych. Odzyskiwanie ciepła odpadowego z płynnych żużli piecowych stosowany jest w przemyśle ciężkim, jednak żużel generowany jest także w innych procesach, między innymi w energetyce ze szczególnym wskazaniem na ciepłownictwo bazujące na spalaniu węgla. Paliwo to nadal dominuje w strukturze paliwowej branży ciepłowniczej niektórych krajów europejskich. W Polsce ponad 40% ciepła wytwarzane jest w scentralizowanych systemach ciepłowniczych, z czego prawie 80% pochodzi z węgla kamiennego. Kocioł węglowy w systemach ciepłowniczych i energetyce towarzyszy tworzeniu dużych ilości żużla i popiołu, przy czym powstawanie żużla ma miejsce podczas spalania węgla kamiennego w kotłach

rusztowych dominujących w małych i średnich systemach ciepłowniczych. Ze względu na znaczną temperaturę, żużel ten może stanowić potencjalne źródło energii odpadowej. Obecnie, gorący żużel (a najczęściej mieszanina żużla i popiołów lotnych z układów odpylania) chłodzony jest w układach odżużlania, a następnie składowany lub przeznaczony do dalszego wykorzystania, np. w budownictwie. Jedną z cech charakterystycznych materiałów krzemionkowych w tym żużla kotłowego jest ich niski współczynnik przewodzenia ciepła, co znacznie utrudnia proces odzysku ciepła. Współczynnik ten w przypadku żużla ze spalania węgla waha się między 1 a 2 W/mK. Jest on także mocno zależny od temperatury żużla, która w przypadku spalania węgla w kotłach rusztowych zawiera się w przedziale od 200 do 900°C.

W niniejszym opracowaniu przeanalizowano techniczne możliwości

odzysku ciepła żużla z opalanego węglem kotła rusztowego o nominalnej mocy cieplnej 45 MW, zabudowanego w miejskiej elektrociepłowni komunalnej. Celem pracy jest zarówno oszacowanie potencjału energetycznego odpadów żużla w analizowanym kotle, jak i propozycja systemu odzysku ciepła. W ramach badań zaproponowano modernizację istniejącego systemu odżużlania poprzez zabudowę układu wymiany ciepła w wannie odżużlacza. Badania wykazały, że wysoka temperatura wody przyspiesza zużycie systemu, intensyfikując procesy trybokorozji wanny odżużlaczy. Odzysk ciepła z tego systemu może obniżyć temperaturę wody, co wydłuży żywotność układu odżużlania. Po wyznaczeniu potencjału ciepła odzyskowego zaproponowano instalację odzysku ciepła odpadowego z wysokotemperaturową pompą ciepła, pozwalającą na odbiór ciepła z wanny odżużlacza i jego konwersję do ruro-



Rys. 1. Konfiguracja technologiczna analizowanego źródła ciepła miejskiego systemu ciepłowniczego

ciągu powrotnego miejskiego systemu ciepłowniczego.

■ Studium przypadku

□ Opis analizowanego systemu

Analizowany kocioł rusztowy znajduje się w miejskiej elektrociepłowni będącej źródłem ciepła wysokotemperaturowego miejskiego systemu ciepłowniczego. Jest to kocioł parowy OR o nominalnej wydajności 50 ton pary na godzinę (co odpowiada ok. 45 MW mocy cieplnej). Nośnikiem ciepła w systemie miejskim jest woda o ciśnieniu nominalnym $p_n = 1,6$ MPa i nominalnej (maksymalnej) temperaturze zasilania $t_{s,n} = 120^\circ\text{C}$. Zgodnie z rys. 1, źródło ciepła składa się z następujących jednostek wytwórczych:

- układu wysokosprawnej kogeneracji CHP2 na bazie turbiny parowej, zasilanej parą w kocioł rusztowego OR50 opalanego węglem kamiennym i badanym pod kątem możliwości odzysku ciepła z wytwarzanego w nim żużla,
- kotła wodnego pyłowego WP120 o nominalnej mocy cieplnej 125 MW,
- dwóch wodnych kotłów rusztow-

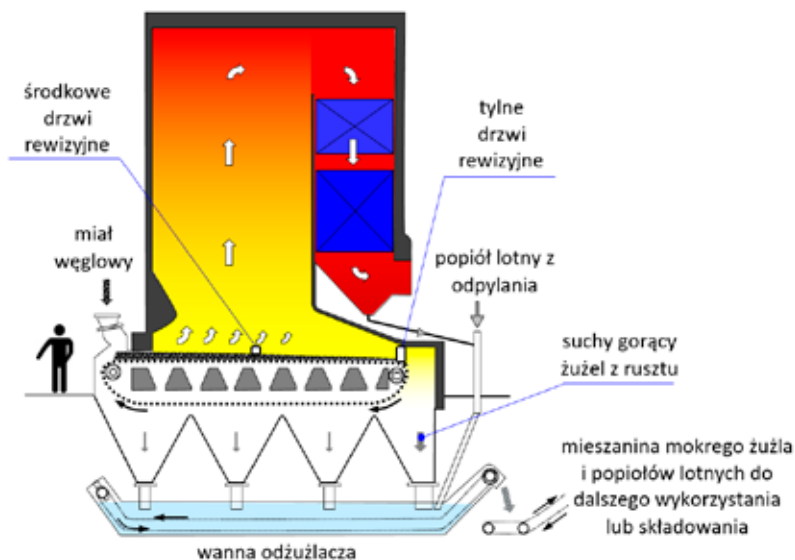
wych WR25 o nominalnych mocach cieplnych 33 MW każdy,

- układu wysokosprawnej kogeneracji CHP1 na bazie turbiny gazowej zasilającej kocioł odzyskowy HRB, o nominalnej mocy elektrycznej 7 MW i nominalnej mocy cieplnej 14,7 MW,

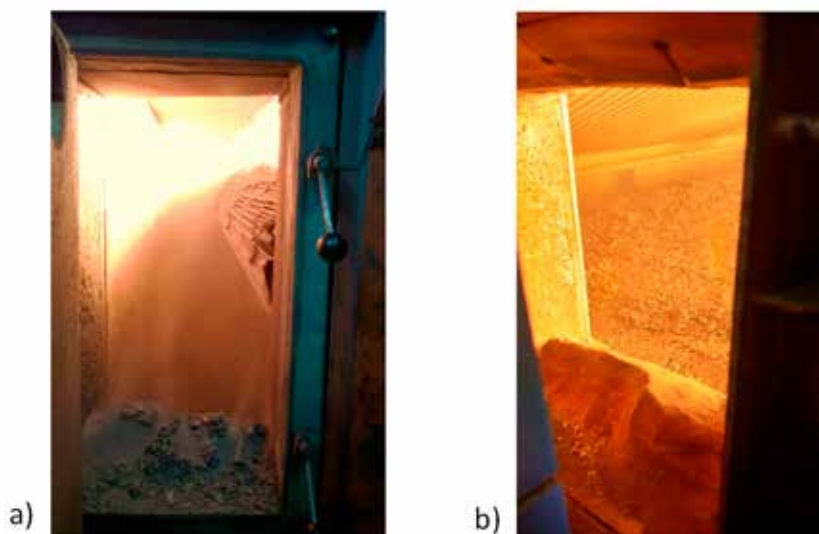
- szczytowego kotła gazowego o mocy nominalnej 20 MW.

Uproszczony schemat kotła rusztowego badanego pod kątem możliwości wykorzystania energii odpadowej z żużla, przedstawiono na rys. 2. Odpad trafiający do układu odzulfania to mieszanina żużla węglowego utworzonego na palenisku rusztowym podczas spalania mialu węglowego i popiołów lotnych zatrzymanych w układzie odpylania. Żużel i popiół trafiają do wanny odzulfacza, skąd po schłodzeniu do temperatury $30-50^\circ\text{C}$ za pomocą układu przenośników taśmowych transportowane są na zewnątrz budynku kotłowego, skąd są wywożone do dalszego wykorzystania w budownictwie lub składowania.

Ilość generowanego żużla (i popiołu) zależy od parametrów spalnego węgla oraz od chwilowego obciążenia kotła. Proces formowania żużla rozpoczyna się już w środkowej części rusztu, gdzie, po wysuszeniu węgla na początku rusztu, następuje jego spalanie. Długość strefy spalania jest bezpośrednim wynikiem obciążenia kotła. W przypadku kotłów ciepłow-



Rys. 2. Schemat poglądowy analizowanego kotła rusztowego z odzulfaczem z wanną wodną



Rys. 3. Końcowa sekcja rusztu z przesypem żużla do wanny odżuźlacza - widok przez tylne drzwi rewizyjne kotła: (a) praca z pełnym obciążeniem (b) praca z wydajnością 30% poza sezonem grzewczym

niczych ich obciążenie wynika z trybu pracy, który zależy od konfiguracji kotła w źródle ciepła. W przypadku kotłów o optymalnej wielkości eksploatowanych w podstawie obciążień, moc wyjściowa jest zwykle zbliżona do nominalnej przez cały rok. W innych konfiguracyjnych przypadkach wydajność może być modulowana, a zatem temperatura i ilość wyjściowego żużla mogą się znacznie zmieniać. Zarówno ilość żużla, jego rozkład na kotle, a także temperatura

wynika z grubości warstw węgla na ruszcie oraz prędkości jego posuwu, przy czym wielkość potencjału energetycznego żużla wynika bezpośrednio z temperatury w końcowej części rusztu. Na rys. 3 pokazano różnicę w ilości i wyglądzie żużla na końcu rusztu w dwóch różnych przypadkach obciążenia badanego kotła. W przypadku pracy kotła z maksymalną wydajnością, strefa spalania wydłuża się i sięga aż do końca rusztu (rys. 3a). Obserwacje wykonane przez tylne

drzwi rewizyjne wskazują nawet na możliwość chwilowych przesypów palącego się węgla do wanny odżuźlacza. W przypadku zmniejszonego obciążenia kotła, głównie w okresie poza sezonem grzewczym, strefa spalania wyraźnie się skraca (rys. 3b).

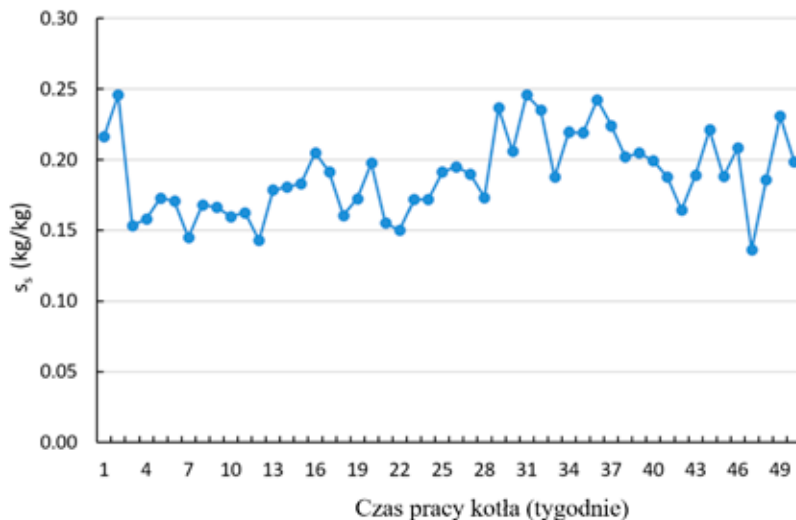
Idea odzyskiwania ciepła odpadowego z żużla wynika nie tylko z możliwości zwiększenia efektywności energetycznej procesu produkcji ciepła, ale także z potrzeby obniżenia temperatury wody w wannie odżuźlacza w celu zminimalizowania zjawiska tzw. trybokorozji zachodzącego w wannie odżuźlacza. W analizowanym przypadku korozja jest tym bardziej intensywna i problematyczna im wyższa jest temperatura wody w wannie odżuźlacza. Rys. 4 przedstawia negatywne efekty zjawiska korozji w postaci wykwitów solnych soli i wżerów na ścianach odwadniacza po miesiącu pracy w warunkach wysokiej temperatury.

□ Wyznaczenie potencjału żużla i propozycja jego wykorzystania

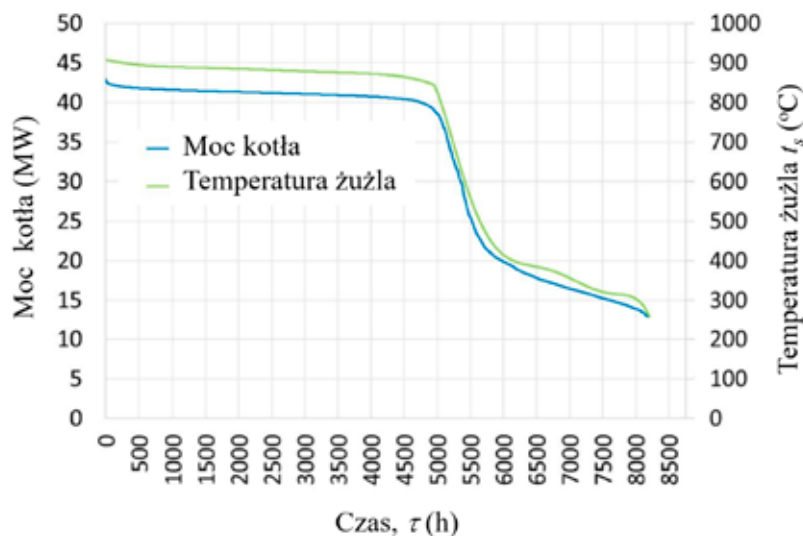
W celu wyznaczenia potencjału energetycznego mieszaniny żużla i popiołu trafiających do wanny odżuźlacza konieczne było określenie ilości mieszaniny, jak i jej temperatury. Wyniki badań przedstawiono na rys. 5 i 6.



Rys. 4. Ślady trybokorozji na ścianach wanny odżuźlacza widoczne w czasie pracy w warunkach wysokiej temperatury wody w wannie



Rys. 5. Jednostkowa ilość mieszanki żużla i popiołu ss na jednostkę spalonego węgla w analizowanym kotle



Rys. 6. Temperatura żużla na tle mocy kotła - wykresy uporządkowane dla okresu rocznego pracy kotła

Jak wynika z danych zaprezentowanych na rys. 6, temperatura żużla na wejściu do odźwiżacza (przesyp z rusztu) kształtuje się w przedziale od 300 do 900°C i jest ściśle skorelowana z mocą kotła. Spadek mocy kotła z 40 MW do 15 MW powoduje znaczny spadek temperatury żużla trafiającego do odźwiżacza. W analizowanym przypadku kocioł pracuje z mocą zbliżoną do nominalnej przez około 5000

h. Przez pozostałe 3000 h pracy obciążenie kotła kształtuje się na poziomie 30%, a temperatura żużla między 400 a 300°C.

W celu określenia potencjału energetycznego żużla, w badanym kotle konieczne jest wyznaczenie bilansu energii wanny odźwiżacza. Na podstawie przeprowadzonego bilansu wyznaczono następnie wielkość strumienia entalpii fizycznej żużla do-

stępnej do odzyskania (rys. 7). Jak można zauważyć, maksymalna wartość strumienia entalpii wynosi ok. 500 kW. Jest to stosunkowo mało w porównaniu do mocy kotła (ok. 40 MW). Poza sezonem potencjał ten zmniejsza się znacząco ze względu na zarówno mniejszą ilość żużla, jak i jego niższą temperaturę.

Roczna ilość ciepła odpadowego dla wyznaczonego strumienia entalpii wynosi 1 969 451 kWh (7090 GJ). W celu jego wykorzystania zaproponowano układ bazujący na wymienniku ciepła zamontowanym w wannie odźwiżacza oraz wysokotemperaturowej pompie ciepła. Pompa ciepła konieczna jest do transformacji ciepła z wanny do rurociągu powrotnego z miejskiego systemu ciepłowniczego. Temperatura powrotu w systemie kształtuje się od 55°C do 70°C, w zależności od temperatury otoczenia i zapotrzebowania na ciepło systemu.

Na rys. 8 pokazano konfigurację techniczną elektrociepłowni z uwzględnieniem układu odzysku ciepła z żużla na bazie pompy ciepła.

Szczegółowy schemat technologiczny proponowanego układu do odzysku ciepła pokazano na rys. 9. Składa się on z wymiennika ciepła zintegrowanego z wanną odźwiżacza połączonego ze sprzętem hydraulicznym. Ta część instalacji stanowi dolne źródło pompy ciepła. Sprzęt hydrauliczny oddziela obieg wysokotemperaturowej pompy ciepła od zanieczyszczonej wody w odźwiżaku. Po stronie wysokotemperaturowej pompa ciepła połączona jest z rurociągiem powrotnym miejskiego systemu ciepłowniczego, który pełni rolę górnego źródła pompy ciepła.

Analizując możliwości odzysku ciepła z żużla za pomocą pompy ciepła, należy pamiętać, że w wannie odźwiżacza występują wahania temperatury wody. W zależności od obciążenia kotła temperatura ta może zarówno spaść poniżej 50°C, jak i osiągnąć wartość 100°C. Tempera-

tura ta ma duży wpływ na trwałość całego układu odzūżlacza. Z punktu widzenia technologii korzystne jest zatem utrzymywanie możliwie najniższej temperatury w wannie. Z drugiej strony mamy temperatury od 55°C do 70°C na rurociągu wody powrotnej z sieci ciepłowniczej. Oznacza to, że nie jest możliwe odzyskanie ciepła bezpośrednio z wody w wannie żuźlowej. Ponadto, w przypadku awarii takiego bezpośredniego wymiennika ciepła istnieje niebez-

pieczeństwo zanieczyszczenia wody w sieci ciepłowniczej. Stąd też proponuje się rozwiązanie oparte na pompie ciepła, które z jednej strony obniży temperaturę w wannie żuźła i ustabilizuje ją, z drugiej strony będzie w stanie ogrzewać wodę powrotną z sieci ciepłowniczej, nawet gdy jej temperatura wynosi 70°C. W tym celu czynnik chłodniczy w pompie ciepła powinien osiągnąć temperaturę powyżej 70°C podczas kondensacji. Dobrym i ekonomicznym rozwią-

niem jest zastosowanie 1,1,1,2-tetrafluoroetanu (R134a, określanego także jako HFC-R134a) z GWP = 1430. Czynnik R134a pozwala nam uzyskać 78°C w skraplaczu, utrzymując temperaturę dolnego źródła na poziomie 45°C (rys. 9). Pompa ciepła pracująca z R134a zgodnie z teoretycznym cyklem termodynamicznym może osiągnąć wysoki współczynnik COP, nawet do 6,6. Realne COP po uwzględnieniu sprawności urządzeń wyniesie 3.7 dla warunków nominalnych warunków pracy.

Parametry nominalne pracy pompy ciepła pokazano w tab. 1.

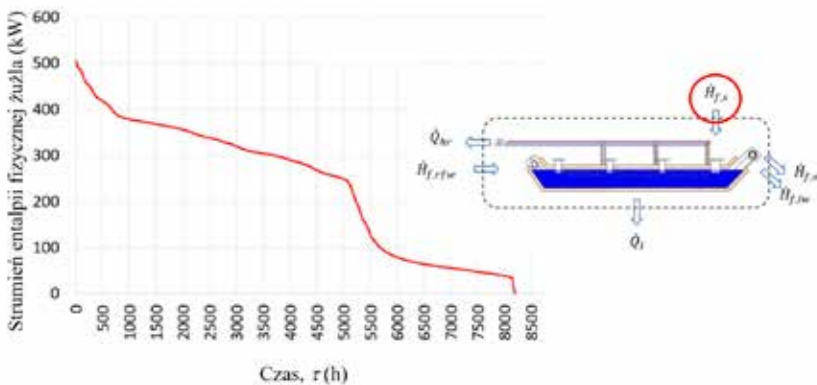
Wykres uporządkowany strumienia ciepła możliwego do odzyskania przez zaproponowaną instalację z pompą ciepła na tle wykresu dostępnego strumienia entalpii fizycznej żuźła pokazano na rys. 10. Roczna ilość ciepła odzyskana przez pompę ciepła wynosi w tym przypadku ok. 6 122 GJ (1 700 600 kWh).

Roczne efekty pracy pompy ciepła wyznaczono w oparciu o wykres uporządkowany przedstawiono na rys. 10 oraz parametrów znamionowych pompy zawartych w tab. 1:

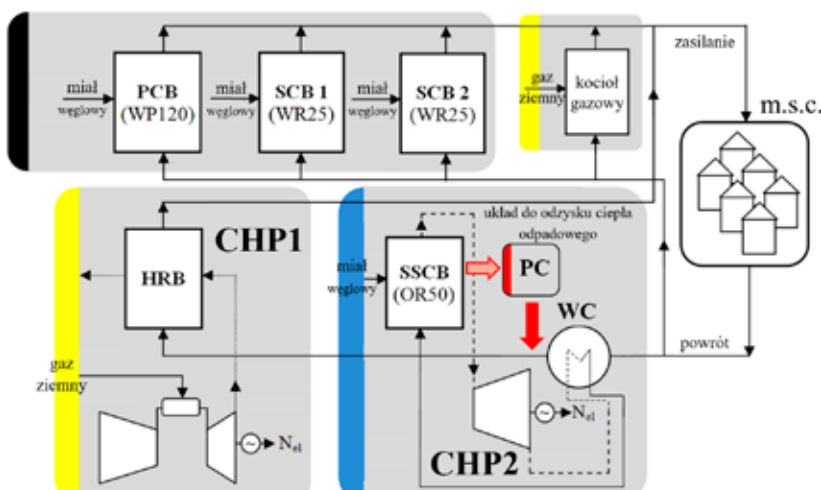
- roczny czas pracy pompy ciepła $\tau_{HP} = 3115$ h,
- ilość odzyskanego ciepła: $Q_{hr} = 1\,700\,600$ kWh (6122 GJ),
- ilość ciepła wprowadzona do systemu ciepłowniczego przez pompę: $Q_{DH} = 2\,270\,582$ kWh (8174 GJ),
- energia elektryczna zużyta przez pompę ciepła: $E_{el, DH} = 616\,390$ kWh.

Wnioski

Bezpośrednim rezultatem prezentowanych badań jest oszacowanie potencjału ciepła odpadowego z żuźła węglowego wytworzonego w kotle rusztowym zasilanym węglem kamiennym. Strumień ciepła odpadowego dostępnego do odzysku jest badanym przypadku stosunkowo niski i nie przekracza 1% maksymal-



Rys. 7. Wykres uporządkowany strumienia entalpii fizycznej żuźła wprowadzanego do wanny odzūżlacza



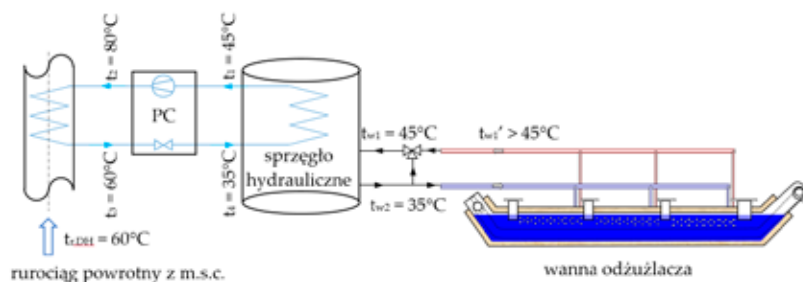
Rys. 8. Konfiguracja technologiczna analizowanego źródła ciepła miejskiego systemu ciepłowniczego nadbudowanego układem odzysku ciepła odpadowego z żuźła na bazie pompy ciepła PC

nej mocy cieplnej kotła. Niezależnie od tego, zaproponowano technicznie możliwe rozwiązanie pozwalające na odzyskanie dużej części tego potencjału. Przedstawiona instalacja bazuje na wysokotemperaturowej pompie ciepła podłączonej do wanny odzūżlacza, jako strategicznego urządzenia w układzie każdego kotła rusztowego. Bezawaryjna praca tego odzūżlacza ma kluczowe znaczenie dla całego źródła ciepła.

Na podstawie przeprowadzonej analizy można wyciągnąć następujące wnioski końcowe:

1. wysoka temperatura żużła wytwarzanego w kotle może stanowić przesłankę do opracowania systemu odzysku ciepła,
2. potencjał energetyczny żużła produkowanego w kotłach opalanych węglem kamiennym ma stosunkowo niewielki udział w bilansie energetycznym kotła,
3. odzyskiwanie ciepła z żużła nie tylko poprawia efektywność energetyczną systemu ciepłowniczego, ale, ze względu na obniżenie temperatury wody w wannie żużlowej, ogranicza zjawisko trybokorozji w odzūżlaczu,
4. propozycja systemu odzysku ciepła z żużła niskotemperaturowego stanowi wyzwanie techniczne, warte do rozważenia pod kątem opłacalności ekonomicznej,
5. zastosowanie pompy ciepła do odzysku energii z żużła może być bardziej uzasadnione ekonomicznie, jeżeli energia elektryczna jest dostępna na terenie zakładu produkcyjnego (jednostki kogeneracyjne w analizowanym przypadku),
6. układ do odzysku energii z żużła powinien być zabudowany w momencie wymiany odzūżlacza w celu poprawienia wskaźników ekonomicznych wprowadzanego rozwiązania.

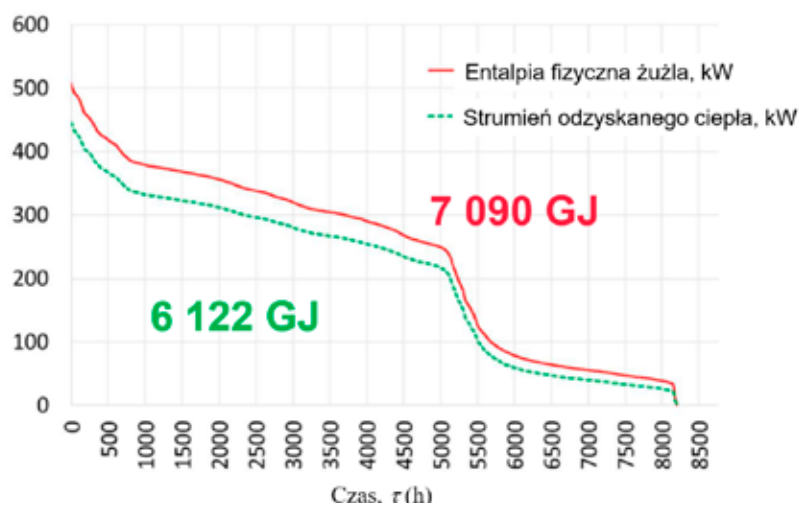
□



Rys. 9. Schemat technologiczny układu do odzysku ciepła z żużła na bazie wysokotemperaturowej pompy ciepła PC

Parametr	Wartość
Moc cieplna	729 kW
Współczynnik COP	3.69 kW/kW
Moc chłodnicza	546 kW
Moc napędowa (elektryczna)	198 kW
Temperatura powrotu (parowacz)	35°C
Temperatura zasilania (parowacz)	45°C
Temperatura powrotu (skraplacz)	80°C
Temperatura zasilania (skraplacz)	60°C

Tab. 1. Główne parametry znamionowej dobranej pompy ciepła



Rys. 10. Roczny rozkład strumienia ciepła możliwego do pozyskania przez proponowany układ odzysku