

Odzysk ciepła ze ścieków – przegląd literatury

Wastewater Heat Recovery – Literature Study

Katarzyna Stokowiec, Paulina Berezowska-Kominek^{*}

Słowa kluczowe: *odzysk ciepła, ścieki jako dolne źródło ciepła, pompy ciepła, efektywność energetyczna.*

Streszczenie

Odzysk ciepła ze ścieków staje się coraz bardziej istotnym elementem nowoczesnych strategii zarządzania zasobami energetycznymi i środowiskowymi. W obliczu globalnych wyzwań, związanych ze zmianami klimatycznymi oraz rosnącymi kosztami energii, poszukiwanie innowacyjnych rozwiązań technologicznych nabiera priorytetowego znaczenia. Ścieki, które przez lata były postrzegane jedynie jako odpad, stanowią obecnie cenne źródło energii cieplnej. Wykorzystanie tego potencjału wymaga jednak odpowiednich technologii oraz skutecznych strategii wdrożeniowych. Artykuł stanowi przegląd literatury naukowej dotyczącej technologii odzysku ciepła ze ścieków. Omówiono rozwiązania, strategie oraz korzyści wynikające z wdrożenia systemów odzysku ciepła. Przeanalizowano znaczenie energetyki w gospodarce wodno-kanalizacyjnej, zwracając uwagę na wysokie zużycie energii przez oczyszczalnie ścieków oraz wyzwania związane z redukcją emisji gazów cieplarnianych i poprawą efektywności energetycznej. Szczególną uwagę poświęcono ściekom jako źródłu ciepła odpadowego, przedstawiając technologie odzysku ciepła oraz przykłady ich zastosowania w różnych częściach systemu kanalizacyjnego. Podkreślono znaczenie zwiększania efektywności energetycznej i zrównoważonego zarządzania zasobami, a także wskazano na istniejące luki badawcze oraz możliwości dalszego rozwoju tej dziedziny.

Keywords: *heat recovery, wastewater as a low-temperature heat source, heat pumps, energy efficiency.*

Abstract

Wastewater heat recovery is becoming an increasingly important aspect in modern strategies for energy and environmental resources management. The global challenges are strongly related to climate change and rising energy costs. With respect to them, the search for innovative technological solutions is gaining its priority. For years, wastewater has only been seen as a waste. Presently it is recognized as a valuable source of thermal energy. However, harnessing this potential requires the right technologies and effective implementation strategies. The paper presents a review of the scientific knowledge on heat recovery technologies from wastewater. It discusses various solutions, strategies, and the benefits of implementing heat recovery systems. The paper analyzes the role of energy from water and wastewater sector, highlighting the high energy consumption of wastewater treatment plants and the challenges associated with reducing greenhouse gas emissions and improving energy efficiency. Particular attention is given to wastewater as a waste heat source, presenting heat recovery technologies along with examples of their application in various parts of the sewage system. The importance of improving energy efficiency and sustainable resource management is emphasized. What is more existing research gaps and opportunities for further development in this field are identified.

1. Wprowadzenie

W ostatnich latach obserwuje się zmiany klimatyczne, które przyczyniają się do nasilania licznych katastrof naturalnych. Państwa Unii Europejskiej, aby im zapobiegać, zaczęły podejmować wszelkie działania mające na celu ograniczenie emisji gazów cieplarnianych (GHG), w tym dwutlenku węgla, do atmosfery. Jednym z niepokojących zjawisk, obserwowanych w wyniku zwiększania śladu węglowego, jest globalne ocieplenie, które wpływa znacząco na środowisko naturalne na całej planecie. W 2019 r. na świecie średnia temperatura wyniosła o 1,1°C więcej niż przed epoką przemysłową [17], [48].

W celu zapobiegania zmianom klimatycznym oraz problemom energetycznym, dąży się do poszukiwania alternatywnych rozwiązań i zastąpienia tradycyjnych źródeł kopalnianych odnawialnymi źródłami energii [12], [19]. Rosnące zapotrzebowanie na energię sprawia, że konieczne jest także zwiększanie efektywności

energetycznej, zarówno urządzeń, jak i procesów przemysłowych. Wdrażanie nowoczesnych technologii pozwoli na maksymalne wykorzystanie energii przy minimalizacji jej strat. Dzięki podwyższaniu sprawności systemów, możliwe jest nie tylko obniżenie kosztów operacyjnych, ale także wydłużenie żywotności urządzeń oraz zmniejszenie ich wpływu na środowisko. Poprawa efektywności energetycznej stanowi kluczowy element zrównoważonego rozwoju, przyczyniając się do zmniejszenia zapotrzebowania na energię pierwotną i wspierania transformacji ku gospodarce niskoemisyjnej.

W ostatnich latach nastąpił dynamiczny rozwój energetyki odnawialnej, do której zalicza się głównie energię wiatru, energię wód, energię geotermalną, energię słoneczną oraz energię pozyskiwaną z biomasy. Ponadto do niekonwencjonalnych źródeł energii zalicza się odpady komunalne oraz pompy ciepła. Te ostatnie pozwalają na nowoczesne podejście do odzysku energii ze źródeł odpadowych. Aby w pełni wykorzystać energię odpadową, konieczne jest okreś-

^{*} Katarzyna Stokowiec, Paulina Berezowska-Kominek Kielce University of Technology, Faculty of Environmental Engineering, Geodesy and Renewable Energy, Aleja Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce, Poland, Correspondence: pkominek@tu.kielce.pl, ORCID: 0009-0008-0261-3384

lenie jej źródeł oraz ocena dostępnych zasobów [12]. Dolne źródło ciepła, czyli środowisko, z którego możliwe jest czerpanie ciepła niskotemperaturowego, powinno spełniać szereg istotnych warunków. Wśród nich kluczową rolę odgrywają duża pojemność cieplna, stała i odpowiednia temperatura, łatwa dostępność, niskie koszty inwestycji, eksploatacji i transportu ciepła, a także wysoka koherentność i brak niekorzystnego oddziaływania na instalację pompy ciepła.

Źródłem ciepła odpadowego może być np. powietrze czy też woda chłodząca z procesów przemysłowych. Jednym z innowacyjnych kierunków jest również wykorzystywanie ścieków jako dolnego źródła ciepła odpadowego. Jest to istotna kwestia, zwłaszcza dla oczyszczalni ścieków, ponieważ gospodarka wodno – ściekowa jest niezwykle energochłonnym sektorem. Ze względu na wysokie koszty energii, z jakimi musi zmagać się każda oczyszczalnia, jej podstawowym celem, oprócz odpowiedniego stopnia oczyszczania ścieków wprowadzanych do środowiska, jest także osiągnięcie neutralności energetycznej [26]. Procesy oczyszczania ścieków oraz przetwarzania osadów ściekowych należy uznawać za procesy wymagające dużego nakładu energii, dlatego też coraz więcej oczyszczalni stara się szukać rozwiązań, które mają na celu zmniejszenie jej wykorzystania [26]. Według danych UE, zużycie energii w oczyszczalniach ścieków odpowiada za ponad 1% całkowitego jej zużycia w Europie [49]. Redukcja energochłonności w gospodarce ściekowej jest także ważnym elementem efektywnego wykorzystywania surowców w gospodarce o obiegu zamkniętym (GOZ) oraz zmniejszenia emisji gazów cieplarnianych. Stanowi to jednak poważny problem, ponieważ przewiduje się, że w krajach rozwiniętych w przeciągu najbliższych 15 lat, zapotrzebowanie na energię w oczyszczalniach ścieków ma wzrosnąć nawet do 20%. Spowodowane jest to dość wysokimi wymaganiami jakościowymi oczyszczanych ścieków [49]. Według danych [4] ilość ścieków oczyszczonych w 2023 r., z podwyższonym usuwaniem związków biogenych, wzrosła o 1,6% w stosunku do roku ubiegłego osiągając wartość 1,19 km³, co stanowi 61% oczyszczanych ścieków. Efektywność energetyczna z kolei nie była kwestią priorytetową oczyszczania ścieków. W związku z czym, funkcjonowanie większości oczyszczalni ścieków nie jest zoptymalizowane pod tym kątem.

Istotne jest więc dążenie do poszukiwania alternatywnych rozwiązań. Jednym z nich jest wykorzystywanie ścieków jako dolnego źródła ciepła dla pomp ciepła, w celu odzysku energii, która z kolei może zostać wykorzystywana w dalszych procesach oczyszczania ścieków. Odzysk ciepła ze ścieków bytowych i przemysłowych, ze względu na ich temperaturę, jest uzasadniony pod względem środowiskowym:

- pozwala na redukcję gazów cieplarnianych, pod względem energetycznym;
- przyczynia się do oszczędności energii ze źródeł konwencjonalnych, pod względem ekonomicznym;
- powoduje długotrwałe oszczędności przy stosunkowo średnim kapitale początkowym [13].

Wysiłki globalnej polityki klimatycznej i środowiskowej skupiają się przede wszystkim na redukcji emisji GHG, które są głównym czynnikiem globalnego ocieplenia. Działaniem w kierunku ograniczenia tego zjawiska jest zmniejszenie wpływu działalności człowieka na klimat. W 2015 r., na konferencji COP21 w Paryżu, podpisano Porozumienie paryskie, które zobowiązało wszystkie państwa sygnatariuszy do działań, w celu ograniczenia wzrostu globalnej temperatury do 1,5°C powyżej poziomu sprzed rewolucji przemysłowej. Porozumienie to jest pierwszym w historii dokumentem międzynarodowym, który nakłada na wszystkie kraje obowiązek podejmowania działań na rzecz ochrony klimatu po 2020 r., rozpoczynając nową erę w globalnej polityce klimatycznej [1], [29], [34], [37], [38].

Decyzje podjęte na szczeblu globalnym wpłynęły także na kształt polityki klimatycznej Unii Europejskiej [35]. Poparcie przez Radę

Europejską nowego kierunku działań, mających na celu osiągnięcie neutralności klimatycznej do 2050 r. wymagało rewizji dotychczasowej polityki klimatyczno-energetycznej. Opracowany został m.in. pakiet regulacyjny "Fit for 55", który zawiera szeroki zakres działań redukcyjnych i wspierających w różnych sektorach gospodarki. Dodatkowo, Rada UE zgodziła się na utworzenie nowego systemu handlu uprawnieniami do emisji dla sektora budowlanego i transportu drogowego [6]. W odpowiedzi na agresję Rosji na Ukrainę, Komisja Europejska w 2022 r. zaprezentowała plan REPowerEU, którego długoterminowe działania obejmują m.in. przyspieszenie dekarbonizacji przemysłu, czy też inwestycje w zintegrowaną infrastrukturę gazową i elektroenergetyczną.

2. Energetyka w gospodarce wodno – kanalizacyjnej

Energetyka w gospodarce wodno – kanalizacyjnej jest jednym z kluczowych obszarów, który zyskuje na znaczeniu [2], [25]. Ze względu na wysokie wymagania stawiane przez państwa UE, w tym Polsce, w dążeniu do neutralności klimatycznej wprowadzono szereg obowiązków, w celu ograniczenia emisji gazów cieplarnianych oraz poprawy efektywności energetycznej. Oczyszczalnia ścieków ma za zadanie nie tylko zapewnić określoną jakość ścieków wprowadzanych do środowiska, czyli oczyścić ścieki do niezbędnego stopnia określonego w Rozporządzeniu [28], ale również ma za zadanie spełnienia szeregu innych wymagań, chociażby związanych z gospodarką osadową czy z odpadami powstałymi w instalacji oraz wodami opadowymi. Funkcjonowanie oczyszczalni ścieków wiąże się z poważnymi wyzwaniem, dotyczącymi zrównoważenia ekonomicznego i środowiskowego. Do głównych problemów należą rosnące zużycie zasobów, emisje gazów cieplarnianych na miejscu i poza nim oraz rosnące koszty energii [22], [39], [50]. Dlatego też negatywne skutki działania oczyszczalni muszą być mniejsze niż ich korzyści wynikające ze zrównoważonego rozwoju [15]. Aby oczyszczalnie ścieków mogły działać prawidłowo, potrzebują dużych nakładów energii, niezbędnej zarówno do prowadzenia procesów technologicznych, jak i do transportu ścieków w całym systemie technologicznym [16], [21], [25], [26]. Szacuje się, że oczyszczalnie odpowiadają za 3% światowego zapotrzebowania na energię [24], [30], przy czym w Europie średnie zużycie energii wynosi 1% całkowitego jej zużycia [49], z czego w branży wodociągowej – kanalizacyjnej same oczyszczalnie ścieków odpowiadają za około 35% wśród obiektów komunalnych [25]. We Włoszech miejskie oczyszczalnie ścieków zużywają rocznie około 1% całkowitej energii elektrycznej [10], podobnie jest w Niemczech, gdzie zapotrzebowanie wynosi również blisko 1% energii [40]. Dane te mogą być dobrym punktem odniesienia dla innych państw europejskich.

Początkowo w obiektach oczyszczalni ścieków nie zwracano uwagi na energochłonność. Jednak z chwilą wprowadzenia restrykcyjnych wymagań klimatycznych i energetycznych, zaczęto coraz większą uwagę poświęcać zużyciu energii na każdym etapie procesu technologicznego oraz optymalizacji kosztów operacyjnych, dążeniu do bycia niezależnym energetycznie i tym samym neutralnym energetycznie. Zgodnie z Dyrektywą [5] unikanie powstawania odpadów ma najwyższy priorytet, a jeżeli powstanie odpadów nie jest możliwe do uniknięcia, należy dążyć do ich minimalizacji i odzysku, zanim zostaną ostatecznie unieszkodliwione. Przepisy te wymusiły stosowanie w obiektach komunalnych obiegu zamkniętego. Zauważono, że oczyszczalnie są cennym źródłem zasobów m.in. azotu, fosforu czy też węgla [51]. Co więcej, zwrócono uwagę, że cennym źródłem energii są także ścieki, które mogą przyczynić się do zmniejszenia kosztów energii. Najpowszechniejszym alternatywnym źródłem energii, stosowanym w obiektach oczyszczania ścieków, jest biogaz wytwarzany z osadów ściekowych. Mniej popularnym odpadem z kolei są ścieki, które stanowią temat niniejszej pracy.

Na przestrzeni kilkudziesięciu lat prowadzono wiele badań skupiających się na bilansie energii w poszczególnych obiektach, etapach procesu oczyszczania. W ich wyniku powstały liczne opracowania literaturowe. Autorzy często analizują dwa główne kierunki poprawy efektywności energetycznej tych obiektów. Pierwszy skupia się na możliwościach produkcji energii elektrycznej i ciepłej przez same oczyszczalnie oraz systemy kanalizacyjne, na przykład poprzez wytwarzanie energii z biogazu, fotowoltaiki czy z pomp ciepła. Drugi kierunek koncentruje się na redukcji zużycia energii poprzez optymalizację procesów oczyszczania. Wielu badaczy z pierwszej grupy szczegółowo przeanalizowało różne metody wytwarzania energii z biogazu, a także rozważało możliwości spalania lub współspalania osuszonych osadów. Obok tych bardziej konwencjonalnych podejść, niektórzy naukowcy rozważali mniej typowe metody, takie jak odzysk energii ciepłej ze ścieków za pomocą pomp ciepła, czy odzyskiwanie energii ze ścieków dopływających do oczyszczalni lub odprowadzanych grawitacyjnie po ich oczyszczeniu [3].

Każda oczyszczalnia ścieków charakteryzuje się innym zapotrzebowaniem na energię, co sprawia, że trudno jest porównać zużycie energii między różnymi obiektami. Różnice te wynikają głównie z zastosowanych technologii oczyszczania, metod przetwarzania oraz zastosowanych urządzeń. Całkowite zużycie energii zależy od wielu czynników. Do najważniejszych należy ilość generowanych ścieków, charakter i stężenie obecnych zanieczyszczeń, poziom oczyszczania oraz docelowe standardy jakości dla oczyszczonej wody [20]. Dodatkowo, na zapotrzebowanie energetyczne wpływają takie aspekty jak rodzaj obiektu oczyszczającego, rozmiar systemu, typ systemu kanalizacyjnego (oddzielny lub zintegrowany), konieczność pompowania oraz lokalne warunki klimatyczne [32].

Zapotrzebowanie na energię zależy przede wszystkim od pojemności oczyszczalni oraz zastosowanego procesu technologicznego. Dlatego też wymagania energetyczne oczyszczalni wahają się w przedziale od 0,26 do 1,11 kWh/m³ [26]. Badania wykazały, że wraz ze wzrostem wielkości oczyszczalni ścieków maleje zapotrzebowanie na energię. Według Tchobanoglousa i in. [43] obiekty, stosujące metodę osadu czynnego, dla których przepływ dobowy Q_d ścieków surowych wynosi powyżej 100 000 m³/d, średnio zużywają 0,28 kWh/m³. Natomiast oczyszczalnie o przepływie Q_d wynoszące ok. 10 000 m³/d zużywają dwukrotną wartość tego co oczyszczalnie o wyższych przepływach ścieków na wlocie. Aby określić stopień redukcji lub zminimalizowania energochłonności, należy przede wszystkim określić zużycie energii na każdym etapie oczyszczania [26], bowiem każdy z nich wymaga innego zapotrzebowania na energię, co zestawiono w tab.1.

Tabela 1. Przykładowe procesy prowadzone na oczyszczalniach ścieków i zużycie przez nie energii [5, 32, 34, 51, 54]

Table 1. Example processes carried out at wastewater treatment plants and their energy consumption [5, 32, 34, 51, 54]

Proces	Zużycie energii
Część mechaniczna	0,022 – 0,042 kWh/m ³
Proces sedymentacji (praca głównie pomp, silników, a także zgrarniczy mechanicznych)	0,043 – 0,07 kWh/m ³
Proces osadu czynnego	0,30 – 0,65 kWh/m ³
Proces nityfikacji	Ponad 0,65 kWh/m ³
Proces napowietrzania	42% do 70% zapotrzebowania na energię
Proces przetwarzania osadów	5 – 31% zapotrzebowania na energię
Mieszanie osadu czynnego w bioreaktorach oraz recyrkulacja osadu	5 – 10% zapotrzebowania na energię
Membranowe bioreaktory	około 0,33 kWh/m ³
Proces fermentacji beztlenowej (mieszanie i podgrzewanie fermentorów)	0,38 do 0,48 kWh/m ³
Proces stabilizacji tlenowej	ponad 1,0 kWh/m ³

3. Potencjał ścieków jako źródła ciepła odpadowego

W 2022 r. gospodarstwa domowe odpowiadały za 25,8% końcowego zużycia energii, co stanowiło 18,1% krajowego zużycia w Unii Europejskiej. W Polsce udział energii na utrzymanie ciepła w domach wyniósł 62,8%, a na podgrzewanie wody użytkowej 18,0% [15]. Ciepło w ściekach pochodzi z energii zużywanej przez gospodarstwa domowe i nawet do 40% energii zużywanej w domach może być tracone razem ze ściekami [19]. Badania przeprowadzone w Szwajcarii wykazały, że 15% dostarczanej do budynków energii ciepłej tracone jest przez system kanalizacyjny. W przypadku budynków dobrze izolowanych o niskim zużyciu energii, strata ta wzrasta do 30% [53], [62].

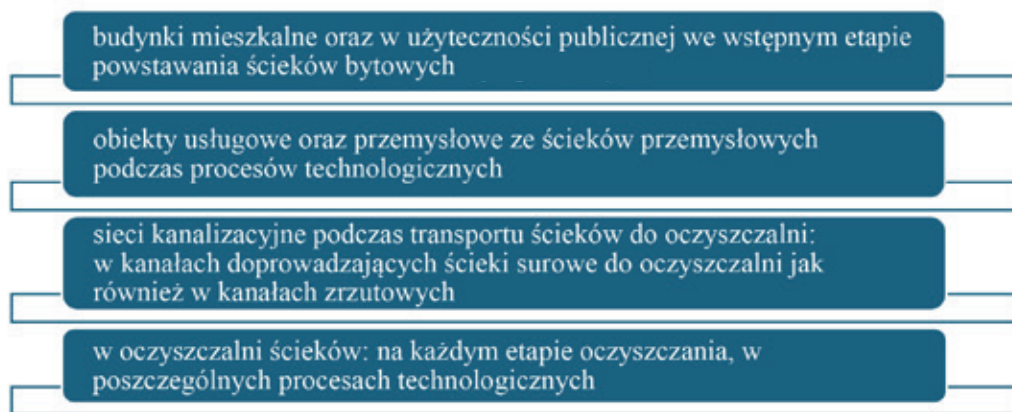
Istnieje duży potencjał w odzyskiwaniu energii ze ścieków szarych w gospodarstwach domowych, który przez cały rok jest stosunkowo stały [35]. Szacuje się, że dziennie można odzyskać około 3,5 kWh energii na osobę [35]. Według publikacji [44] system odzysku ciepła ze ścieków może efektywnie odebrać i natychmiast ponownie wykorzystać nawet do 70% energii odpadowej, co pozwala na zmniejszenie zużycia energii. Jednocześnie poprawia efektywność budynków, ogranicza emisję dwutlenku węgla oraz zwiększa udział energii odnawialnej [35]. Z kolei w pracy [2] stwierdzono, że ścieki stanowią ograniczone źródło energii, a możliwości ich odzysku są uzależnione od ilości zużytej wody w budynkach. W budynkach mieszkalnych dobowo i w skali roku obserwuje się zmienne natężenia przepływu oraz wahania temperatur ścieków, co utrudnia przewidywanie możliwości odzysku ciepła. Z kolei budynki niemieszkalne, takie jak szpitale, centra sportowe czy szkoły, mają większy potencjał do odzysku, ze względu na większe i stałe przepływy ścieków [53].

Odzysk ciepła ze zmieszania ścieków, zarówno szarych jak i czarnych jest ograniczony [55]. Ścieki czarne odprowadzane z toalet i pisuarów zawierają duże ilości zanieczyszczeń i charakteryzują się niższą temperaturą w granicach od 10°C do 25°C [46], co sprawia, że stanowią mniej wartościowe źródło do odzyskiwania ciepła niż ścieki szare. Z kolei ścieki szare, pochodzące ze zużycia wody odprowadzanej z pryszniców, wani, umywalk czy pralek, mają niewielką zawartość zanieczyszczeń i co najważniejsze, stanowią potencjalne źródło energii ze względu na temperaturę, która może wynosić około 18°C – 50°C [46]. W związku z powyższym lepszym rozwiązaniem jest wprowadzenie oddzielnej instalacji dla obu rodzajów ścieków, w celu uzyskania jak największej mocy ciepłej.

Generalnie odzysk ciepła ze źródeł odpadowych stanowi nowoczesne podejście do zrównoważonego zarządzania energią. Ścieki mają ogromny potencjał energetyczny, który niestety nie jest w pełni wykorzystywany. Aby móc określić, jaką moc ciepłą uzyska się ze strumienia odprowadzanych ścieków z instalacji kanalizacyjnych, niezbędna jest znajomość ilości zużycia wody oraz charakterystyka ścieków. Konieczne jest pozyskanie odpowiednich danych wejściowych, które mogą wynikać z dynamicznych statystyk zużycia wody. Umożliwi to dokładne modelowanie i analizowanie procesu odzysku energii przez cały rok, zarówno w budynkach mieszkalnych, jak i niemieszkalnych.

Rozwój technologii obecnie pozwala na prowadzenie procesów, mających na celu odzysk energii zawartej w ściekach już na wszystkich etapach ich powstawania, przepływu oraz utylizacji nieczystości, co pokazano na rys. 1.

Ścieki są cennym źródłem energii termalnej, ze względu na ich temperaturę, która jest zależna od miesiąca, ale także pory roku czy dnia [31]. Dodatkowo istotne jest to, na jakim etapie oczyszczania znajdują się ścieki. Ścieki surowe mają wyższą temperaturę niż ścieki oczyszczone. Jednakże w pracy [44] zauważono, że latem średnia temperatura ścieków oczyszczonych może być nieco wyższa od ścieków dopływających, jak to ma miejsce na oczyszczalni ścieków w Krośnie. Generalnie, ścieki surowe pod względem energetycznym teoretycznie prezentują wyższy potencjał. Jednakże wymagają one



Rys. 1. Możliwości odzysku ciepła ze ścieków [18],[55], [27] [14]

Fig. 1. Possibilities for heat recovery from wastewater [18], [55], [27], [14]

dalszego etapu oczyszczania biologicznego, na którym do prawidłowej realizacji procesów nityfikacji, denityfikacji czy defosfatacji powinna zostać utrzymana odpowiednia ich temperatura. Dlatego też nie ma możliwości znacznego obniżenia temperatury, w celu uzyskania większych strumieni energii. Co więcej, należy zwrócić uwagę na to, iż ścieki dopływające zawierają znaczne ilości zanieczyszczeń, które przyczyniają się do powstawania korozji elementów pomp ciepła, a także mogą powodować zaburzenie natężenia przepływu przez pompy. W związku z tym konieczne jest stosowanie dodatkowych wymienników pośrednich. Pozwala to na wykorzystywanie ścieków surowych, niosących znaczne ilości ładunków zanieczyszczeń, w celu odzyskiwania z nich ciepła [12], [44], ale obniża finalną sprawność układu. Rozwiązanie to polega na tym, że ścieki przekazują ciepło do pośredniego medium, takiego jak glikol, solanka lub woda. Następnie czynnik ten jest transportowany rurociągiem do parownika pompy ciepła. Ze względu na niską temperaturę, w porównaniu do otoczenia, medium pośredniczące może być przesyłane w izolowanych przewodach na duże odległości (ponad 1 km). Wymienniki ciepła występujące na sieci mogą być zintegrowane z konstrukcją przewodów lub zamontowane w istniejących kolektorach kanalizacyjnych. Należy jednak zwrócić uwagę, że technologia odzysku ciepła z kolektorów ściekowych jest obecnie rzadko stosowana w Polsce [40].

W przypadku oczyszczonego źródła odpadowego nie ma obowiązku stosowania dodatkowych urządzeń, które przyczyniają się do strat ciepła. Dlatego też ścieki oczyszczone pod tym względem stanowią lepszy potencjał energetyczny. Ponadto temperatury mogą być obniżone do zdecydowanie niższych wartości, a tym samym pozwolą na uzyskanie większej mocy cieplnej z tego medium.

Odzysk ciepła odpadowego może być prowadzony na różne sposoby. Najbardziej powszechne technologie oparte są o pompy ciepła oraz wymienniki ciepła [13]. Wymienniki ciepła i pompy ciepła mogą być stosowane do odzyskiwania ciepła w różnych częściach systemu kanalizacyjnego, od punktu, gdzie ścieki są używane, po miejsca ich oczyszczania [18]. Pompy ciepła zasilane ściekami mogą być integralną częścią systemów grzewczych, zapewniając skuteczne źródło ciepła do podgrzewania wody użytkowej, ogrzewania budynków czy też procesów przemysłowych [7]. W praktyce, rozwiązania tego typu są coraz częściej testowane i wdrażane. Jedną z korzyści takiego podejścia jest to, że pompy ciepła zasilane w ciepło pochodzące ze ścieków, mogą działać jako efektywne urządzenia, przyczyniając się do redukcji kosztów eksploatacyjnych i jednocześnie będąc przyjaznymi dla środowiska, w porównaniu do tradycyjnych źródeł ciepła, opartych na spalaniu paliw kopalnych, a instalacja pompy ciepła może być umiejscowiona w bezpośrednim sąsiedztwie odbiorców. Warto jednak zwrócić uwagę, że przed wdrożeniem takich systemów należy przeprowadzać dokładne analizy techniczne, ekonomiczne oraz środowiskowe, w celu oceny ich wydajności i opłacalności [55].

3.1. Odzysk ciepła odpadowego ze ścieków

W pracy [65] Zhang Q. i in. przeprowadzili badania, w których analizowali wydajność systemu pompy ciepła, z wykorzystaniem ścieków miejskich do ogrzewania i chłodzenia budynków. Przeprowadzono testy terenowe, mierząc wydajność cieplną systemu przez 72 godziny. Ścieki miejskie miały stabilną temperaturę wynoszącą 10 – 15°C zimą, co czyni je efektywnym źródłem ciepła dla pomp ciepła. Średni współczynnik wydajności COP systemu wyniósł 4,5. Jednocześnie pozwolił na zaoszczędzenie 53% energii pierwotnej, w porównaniu do tradycyjnych systemów oraz na zmniejszenie rocznych kosztów operacyjnych o 11%, a okres zwrotu inwestycji wyniósł około 4,7 lat.

W pracy [25] Li H. i in. dokonali analizy wydajności systemu pomp ciepła zasilanych ściekami pochodzącymi z pobliskich fabryk oraz z kampusu uniwersyteckiego w Shenyang, w Chinach. Do odzysku energii wykorzystano metodę pośrednią. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że system pomp ciepła wykazał stabilną wydajność i wysoką efektywność energetyczną, z wartością COP średnio 4,64. Jednak zła jakość ścieków wpływała znacząco na wydajność wymiennika ciepła. Współczynnik przenikania ciepła dla wymiennika ciepła wyniósł 66 W/(m²xK). Jest to spowodowane niską jakością wody ściekowej, która łatwo tworzy osady na ściankach wymiennika, a tym samym obniża jego efektywność.

Z kolei Liu Z. i in. [27] zastosowali system pomp ciepła, wykorzystujący nieoczyszczone ścieki miejskie jako źródło ciepła do ogrzewania i chłodzenia budynków (USSHP Untreated Sewage Source Heat Pump). Aby rozwiązać problem zanieczyszczeń, zastosowano urządzenie do automatycznego unikania zatykania, które usuwało zawieszone ciała stałe ze ścieków, co zapobiega blokowaniu wymienników ciepła. Jednocześnie zastosowano wymiennik ciepła typu płaszczowo-rurowego, gdzie ścieki przepływały przez rury, a woda pośrednia przez płaszcz. Na podstawie otrzymanych wyników stwierdzono, że opór cieplny osadów na wymienniku ciepła wzrastał z czasem, osiągając wartość 6,7 x 10⁻⁴ (m²xK)/W po 7 dniach. Współczynnik przenikania ciepła zmniejszył się o 40%, w wyniku ciągłej pracy systemu, natomiast współczynnik wydajności chłodniczej systemu USSHP wyniósł 4,3, a dla jednostki pompy ciepła osiągnął wartość 3,6. Mimo zastosowania urządzenia do usuwania zanieczyszczeń, na wewnętrznej powierzchni rur wymiennika ciepła szybko tworzyła się warstwa osadu, co powodowało zwiększenie oporu przepływu oraz spadek ciśnienia i wydajności.

Aby rozwiązać problemy związane z blokowaniem i zanieczyszczaniem wymienników ciepła w systemach pomp ciepła wykorzystujących ścieki, [39] Ni L. i in. zaproponowali i zbadali nowy hydrocyklon do oczyszczania ścieków z funkcją refluksu. Badania przeprowadzono na trzech rodzajach ścieków, tj. wodzie z piaskiem, ściekach o wysokim stężeniu i ściekach o niskim stężeniu zanieczyszczeń. Autorzy stwierdzili, że urządzenie skutecznie usuwa

zanieczyszczenia. Nowy hydrocyklon osiągnął wysoką wydajność separacji: 99,53 % – 99,94 % dla wody z piaskiem, 91% – 95% dla ścieków o wysokim stężeniu i 56 % – 72 % dla ścieków o niskim stężeniu. Wyższy przepływ poprawiał efektywność separacji. Hydrocyklon lepiej radził sobie z oddzielaniem ciężkich zanieczyszczeń niż lekkich. W odróżnieniu od konwencjonalnych urządzeń, ten hydrocyklon pozwalał na ciągłe usuwanie osadów, jednocześnie charakteryzując się niskim zużyciem energii.

Araz M. i in. [3] badali wydajność systemu fotowoltaicznego zintegrowanego z budynkiem, w połączeniu z systemem pompy ciepła zasilanej ściekami. Do systemu z pompą ciepła wykorzystano dwa zbiorniki o pojemności 500 litrów, w których woda była przechowywana i cyrkulowana za pomocą pomp, aby symulować lokalny system kanalizacyjny. Dzięki temu możliwe było utrzymanie stałej temperatury ścieków i osiągnięcie stabilnych warunków pracy systemu. Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że system osiągnął szczytową moc 7,44 kW i efektywność energetyczną rzędu 65,34%.

W związku z szerokim zainteresowaniem odpowiedniego i opłacalnego rozwiązania, mającego na celu odzysk energii ze ścieków, opatentowana została również znaczna liczba kanalizacyjnych wymienników ciepła. Ich celem było przede wszystkim optymalizacja stosowanych urządzeń, osiągnięcie jak najlepszych parametrów użytkowych [55].

Wang Q. i in. w pracy [61] przedstawili wyniki badań systemu pompy ciepła z niemetalowym wymiennikiem ciepła, zanurzonym w ściekach, wykorzystującym pierwiastki ziem rzadkich, który ma lepszą przewodność cieplną i odporność na korozję. Badania koncentrowały się na wydajności i trwałości niemetalowego wymiennika ciepła, używanego do odzyskiwania ciepła wody odpadowej z kąpeli, w rzeczywistych warunkach pracy. Współczynnik przenikania ciepła zmniejszył się o 7,8% przez 90 dni, co jest znacznie mniejszym spadkiem niż w przypadku tradycyjnych wymienników, a system osiągnął najwyższy współczynnik wydajności (SCOP) 5,65, co wskazuje na stabilną i efektywną pracę. System mógł produkować wodę o temperaturze 40,4–60,6°C. A to pozwoliło na oszczędność energii równoważną spaleniu $4,29 \times 10^4$ kg węgla rocznie, co zmniejsza emisję CO₂, NO_x i SO₂.

Qunli Z. i in. [48] dokonali analizy technologicznej i ekonomicznej metody ogrzewania miejskiego, z wykorzystaniem pomp ciepła zasilanych z dolnego źródła, którym są ścieki. Porównano trzy metody: tradycyjną, zdecentralizowaną z pompą ciepła oraz złożoną metodę z pompą ciepła. W tradycyjnym systemie ciepłowniczym ciepło było wytwarzane w kotłowniach opalanych węglem lub gazem i przesyłane przez sieć przewodów do budynków w mieście. W metodzie zdecentralizowanej, pompy ciepła zlokalizowane w pobliżu oczyszczalni ścieków odzyskiwały ciepło ze ścieków i wykorzystywały je do ogrzewania budynków. Natomiast złożony system ogrzewania, z wykorzystaniem pomp ciepła ze ścieków, łączył oczyszczalnię ścieków z tradycyjnym systemem ciepłowniczym, gdzie ciepło odzyskane ze ścieków było przekazywane do sieci ciepłowniczej, co umożliwiło ogrzewanie oddległych budynków. Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że najmniej efektywną metodą okazała się metoda tradycyjna, chociaż najczęściej stosowana. Najwyższą sprawność osiągnęła metoda druga, jednak ograniczona zasięgiem ogrzewania. Z kolei ostatnia metoda uzyskała najlepszą równowagę między efektywnością energetyczną a zasięgiem ogrzewania. System łączący pompy ciepła ze ścieków z tradycyjnym ciepłownictwem jest o około 31% bardziej efektywny energetycznie niż tradycyjne ogrzewanie. W całym sezonie grzewczym może to oznaczać oszczędność energii sięgającą 75%. Nowy system pozwala ogrzać większy obszar przy tej samej mocy zainstalowanej, co oznacza, że więcej budynków może korzystać z tego samego źródła ciepła. W przeciwieństwie do zdecentralizowanego systemu, połączony system nie ma ograniczeń co do odle-

głości, na jaką można przesyłać ciepło, co poprawia funkcjonowanie miejskich systemów grzewczych.

Alekseiko L. i in. w pracy [1] dokonali analizy efektywności pomp ciepła zainstalowanych w oczyszczalniach ścieków we Władystoku. Skupiono się na technologicznych i ekonomicznych aspektach wykorzystania pomp ciepła, do odzyskiwania ciepła z miejskich ścieków. Pompy wykazały wysoką efektywność w odzyskiwaniu ciepła z miejskich ścieków, szczególnie w zimie, gdy temperatura ścieków wynosiła 10 – 15°C. Wydajność pomp ciepła wynosiła od 3,5 do 4. Zastosowanie pomp ciepła pozwoliło na znaczące zmniejszenie kosztów ogrzewania. Inwestycja okazała się opłacalna, zwłaszcza w długoterminowej perspektywie, z okresem zwrotu wynoszącym od 3 do 5 lat.

Ze względu na wysokie temperatury ścieków w różnych gałęziach przemysłu i procesów technologicznych, istotną kwestią jest również odzysk ciepła ze ścieków przemysłowych w instalacjach kanalizacyjnych [23]. To medium stanowi zazwyczaj wyższe wartości temperatur niż ścieki bytowe. Zgodnie z Rozporządzeniem [7], dopuszczalna temperatura ścieków odprowadzanych do urządzeń kanalizacyjnych nie może przekraczać 35°C, co sprawia, że medium to jest jeszcze bardziej korzystne dla zastosowania w pompach ciepła w celu odzysku ciepła.

3.2. Przykłady rzeczywistych instalacji odzysku ciepła ze ścieków

Odzysk ciepła ze ścieków jest stosowany na świecie od około 30 lat. Pierwsza instalacja powstała w 1987 r. w oczyszczalni ścieków Ochiai w Tokio, gdzie wykorzystano ciepło ścieków do klimatyzacji biur administracyjnych [11]. Na całym świecie działa obecnie ponad 500 systemów oczyszczania ścieków, których moc waha się od 10 kW do 20 MW [53]. Obecnie liderem innowacji w międzynarodowej dziedzinie odzysku ciepła ze ścieków jest Szwajcaria [42].

W Oslo zainstalowano system odzysku ciepła ze ścieków oparty na pompach ciepła, który dostarcza 18 MW ciepła mieszkańcom miasta. W przeciwieństwie do podobnej instalacji w Finlandii (90 MW), która jest zintegrowana z oczyszczalniami ścieków, norweski system odzyskuje ciepło bezpośrednio z wody spływającej z toalet, łazienek i kanalizacji burzowej. Ścieki wchodzące do systemu mają temperaturę 9,6°C, a po przejściu przez instalację ich temperatura obniża się do 5,7°C. Dzięki temu możliwe jest efektywne podgrzewanie bieżącej wody i jej dostarczanie do klientów [8].

W Sztokholmie system składa się z siedmiu pomp ciepła o łącznej mocy 225 MW, które odzyskują ciepło z oczyszczalni ścieków, sieci chłodniczej i wody morskiej [36].

W Wiedniu na terenie oczyszczalni ścieków działa system z sześcioma pompami ciepła, o łącznej mocy 55 MW, który do 2027 r. ma wzrosnąć do 110 MW, co wystarczy na zasilenie 112 tys. gospodarstw domowych [36].

W Danii wykorzystuje się pompę ciepła o mocy grzewczej 50 MW, która dostarcza ciepło dla odbiorców w Esbjerg, Varde i Nordby. Jest to największa na świecie pompa ciepła z dwutlenkiem węgla jako czynnikiem chłodniczym [36].

Jedną z największych instalacji na świecie, która wykorzystuje metody odzysku ciepła ze ścieków, funkcjonuje w Helsinkach [13]. Oddana w 2006 r. do użytku instalacja Katri Vala wykorzystuje ścieki oczyszczone, a także nadwyżkę ciepła z budynków jako dolne źródło ciepła. Uzyskane ciepło służy, zarówno do ogrzewania sieciowego jak i ogrzewania wody. Jednocześnie instalacja ta stosowana jest do chłodzenia, wykorzystując przy tym wodę morską [44]. Wykonana została w jaskini, wydrążonej 25 metrów poniżej terenu, pod parkiem Katri Vala [9]. Początkowo system składał się z pięciu pomp ciepła. Moc grzewcza tej instalacji oscylowała na poziomie 90 MW, zaś moc chłodnicza była równa 60 MW [44],[13]. Sprawność pompy ciepła mogła osiągnąć nawet wartość 5,0 przy jednoczesnym wytwarzaniu ciepła oraz chłodu [44], a woda

grzewcza osiągała temperaturę 88°C [13]. Ostatecznie funkcjonuje tam 7 pomp ciepła. Ostatnia z nich została uruchomiona w 2023 r. Jej moc ciepła i chłodu wynoszą odpowiednio 32 MW oraz 21,5 MW. Jest to jedna z największych pomp ciepła na świecie. Aktualna moc elektrociepłowni wynosi 155 MW dla celów ogrzewania oraz 103,5 MW na potrzeby chłodzenia [45].

W Polsce, we Wrocławiu powstaje największa systemowa pompa ciepła, która ma zaspokoić 5% rocznego zapotrzebowania na ciepło. Energia cieplna będzie odzyskiwana ze ścieków, co ma zredukować zużycie węgla i emisję gazów cieplarnianych i będzie miała moc 12,5 MW. Rocznie zaoszczędzi 364 tys. GJ energii, co pozwoli na zmniejszenie emisji gazów o 35 tys. ton [33].

W Szlachęcinie, w województwie wielkopolskim, Veolia uruchomiła innowacyjną instalację kogeneracyjną połączoną z pompą ciepła, która odzyskuje ciepło ze ścieków. System ten przyczynia się do zmniejszenia emisji CO₂ o 2 tys. ton rocznie. Nowo powstała instalacja kogeneracyjna ma moc elektryczną wynoszącą około 1 MW. Z tej mocy, 700 kW jest wykorzystywane do zasilania pompy ciepła. Pompa ciepła ma moc cieplną wynoszącą 1,65 MW. Całkowita moc cieplna systemu, łącznie z kogeneracją, wynosi około 2,95 MW, a ciepło, które powstaje kierowane jest do sieci ciepłowniczej [46].

Pompy ciepła o mocach 16 MW i 5 MW są instalowane w Centralnej i Lewobrzeżnej Oczyszczalni Ścieków w Poznaniu. Te dwie inwestycje mają potencjał odzysku ciepła wynoszący 460 tysięcy GJ rocznie.

W Wodociągach Warszawskich trwają dwa projekty badawcze, we współpracy z Politechniką Warszawską i firmą Veolia. Ich celem jest stworzenie technologii, która umożliwi odzysk ciepła z oczyszczonych ścieków, z przeznaczeniem na ogrzewanie budynków, co przyczyni się do rozwoju gospodarki o obiegu zamkniętym [47].

Ponadto podpisano umowę na projekt, który koncentruje się na opracowaniu technologii odzysku ciepła ze ścieków komunalnych. Planowane jest zainstalowanie pomp ciepła w oczyszczalniach ścieków „Czajka”, „Południe” i „Pruszków”, a także w Stacji Termicznej Utylizacji Osadów Ściekowych. Częścią tego projektu jest również analiza możliwości wykorzystania oczyszczonych ścieków jako wody technologicznej w obiektach należących do PGNiG TERMIKA [41].

4. Podsumowanie

Odzysk ciepła ze ścieków, szczególnie tych, które przeszły proces oczyszczania w oczyszczalniach ścieków, zyskuje na znaczeniu w kontekście rosnącej potrzeby zwiększenia efektywności energetycznej i zrównoważonego zarządzania zasobami. Przegląd literatury naukowej w tym obszarze obejmuje analizę różnych technologii, strategii oraz korzyści, wynikających z zastosowania systemów odzysku ciepła, a także identyfikację istniejących luk w badaniach i możliwości dalszego rozwoju tej dziedziny.

Pierwsze prace dotyczące odzysku ciepła ze ścieków koncentrowały się głównie na identyfikacji potencjału energetycznego ścieków surowych. Wczesne badania podkreślały jednak problemy związane z technicznymi barierami, takimi jak zanieczyszczenia biologiczne oraz chemiczne, które mogłyby negatywnie wpływać na wydajność i żywotność systemów odzysku ciepła.

Wraz z postępem technologicznym, szczególnie w zakresie pomp ciepła, odzysk ciepła ze ścieków stał się bardziej realny i opłacalny. Pompy ciepła umożliwiły efektywne przekształcanie niskotemperaturowego ciepła na energię użyteczną. Prace naukowe wykazały, że oczyszczone ścieki, mimo niższej zawartości zanieczyszczeń, nadal mają wystarczający potencjał termiczny, który można efektywnie odzyskać i wykorzystać do celów grzewczych.

Literatura wskazuje na liczne przykłady zastosowań systemów odzysku ciepła w oczyszczalniach ścieków na całym świecie. Przykładem mogą być systemy wdrożone w Skandynawii czy w Szwaj-

carii, gdzie odzyskane ciepło ze ścieków oczyszczonych jest wykorzystywane do ogrzewania budynków komunalnych, a nawet osiedli mieszkaniowych. W badaniach podkreśla się korzyści ekonomiczne i środowiskowe wynikające z takich rozwiązań, a także wyzwania związane z integracją technologii w istniejących infrastrukturach miejskich.

Przegląd literatury dotyczącej odzysku ciepła ze ścieków oczyszczonych pokazuje, że technologia ta ma duży potencjał do zwiększenia efektywności energetycznej oczyszczalni ścieków i redukcji ich śladu węglowego. W przyszłości rozwój tej dziedziny może znacząco przyczynić się do zrównoważonego rozwoju gospodarki wodno-kanalizacyjnej. Pomimo wielu postępów w tej dziedzinie, istnieją nadal liczne wyzwania i obszary wymagające dalszych badań, w tym optymalizacja technologii, jej adaptacja do różnych warunków klimatycznych oraz ocena długoterminowych skutków stosowania tych systemów. Ponadto brakuje kompleksowych badań porównawczych, które oceniałyby efektywność energetyczną i ekonomiczną oczyszczalni w różnych skalach, od małych instalacji po duże obiekty obsługujące miejskie aglomeracje.

LITERATURA

- [1] Borek A., Wróblewski E. 2021. *Prawne Aspekty Adaptacji Do Zmian Klimatu Z Perspektywy UNFCCC I Prawa Krajowego. Adaptacja Do Zmian Klimatu Na Gruncie Porozumienia Paryskiego (PP)*.;
- [2] Carter NT. *Energy-Water Nexus: The Water Sector's Energy Use*.; 2017. Accessed April 2, 2024. www.crs.gov
- [3] Ciepliński J. 2020. *Rozprawa Doktorska Analiza Wybranych Czynnników Determinujących Energochłonność Średnich, Sekwencyjnych Oczyszczalni Ścieków*.
- [4] Departament Rolnictwa i Środowiska. *Ochrona Środowiska w 2023 r.*; 2024.
- [5] Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2008/98/WE z dnia 19 listopada 2008 r. w sprawie odpadów oraz uchylająca niektóre dyrektywy. 2008/L 312/3. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.07.111>
- [6] Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej. Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) w sprawie ustanowienia ram na potrzeby osiągnięcia neutralności klimatycznej i zmiany rozporządzeń (WE) nr 401/2009 i (UE) 2018/1999 (Europejskie prawo o klimacie). Published online June 30, 2021.
- [7] Dziennik Ustaw. *Rozporządzenie Ministra Budownictwa w Sprawie Sposobu Realizacji Obowiązków Dostawców Ścieków Przemysłowych Oraz Warunków Wprowadzania Ścieków Do Urządzeń Kanalizacyjnych*.
- [8] ENN News. Oslo odzyskuje ciepło ze ścieków. 2006. <https://www.wodkaneko.pl/wiadomosci-i-komunikaty/oslo-odzyskuje-cieplo-ze-sciekow-41105-10>
- [9] European Union. *Municipality-Led Circular Economy Case Studies In Partnership with the Climate KIC Circular City Project*.; 2018.
- [10] Faladori P., Vaccari M., Vitali F. Energy audit in small wastewater treatment plants: methodology, energy consumption indicators and lesson learned. In: *Water, Science and Technology*. Vol 72(6). IWA World Congress on Water, Climate and Energy; 2015:1007-1015. doi:DOI: 10.2166/wst.2015.306.
- [11] Funamizu N., Iida M., Sakakura Y., Takakuwa T. Reuse of heat energy in wastewater: implementation examples in Japan. *Water Science and Technology*. 2001;43:277-286. doi:<https://doi.org/10.2166/wst.2001.0640>.
- [12] Głodniok M., Żogała A., Darul H., Zawartka P. Municipal wastewater as an source of waste heat – Case Study. *Inżynieria Ekologiczna*. 2016;(49):208-212. doi:10.12912/23920629/64525.
- [13] Górski J., D. Matuszewska. Możliwości pozyskiwania ciepła odpadowego ze ścieków i systemów kanalizacji. *Inżynieria Środowiska*. Published online 2013:21-28. www.industrialfurnaces.pl, www.ppik.pl.

- [14] Ip K., She K., Adeyeye K. Life-cycle impacts of shower water waste heat recovery: case study of an installation at a university sport facility in the UK. *Environmental Science and Pollution Research*. 2018;25(20):19247-19258. doi:10.1007/s11356-017-0409-0.
- [15] Jiang H., Hua M., Zhang J., et al. Sustainability efficiency assessment of wastewater treatment plants in China: A data envelopment analysis based on cluster benchmarking. *J Clean Prod*. 2020;244. doi:https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118729.
- [16] Kirchem D., Á. Lynch M., Bertsch V., Casey E. Modelling demand response with process models and energy systems models: Potential applications for wastewater treatment within the energy-water nexus. *Appl Energy*. 2020;260. doi:https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114321.
- [17] Komisja Europejska. Przyczyny zmian klimatu. Accessed March 24, 2024. https://climate.ec.europa.eu/climate-change/causes-climate-change_pl
- [18] Kordana S., Pochwat K., Słyś D., Starzec M. Opportunities and threats of implementing drain water heat recovery units in Poland. *Resources*. 2019;8(2). doi:10.3390/resources8020088.
- [19] Kowalik R., Grdulska A. 2021. "Analiza odzysku ciepła ze ścieków przy wykorzystaniu pompy ciepła na wybranym przykładzie". *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*;1(1-2):24-27. doi:10.15199/17.2021.1-2.5.
- [20] Liu Y.-J., Gu J., Liu Y. Energy self-sufficient biological municipal wastewater reclamation: Present status, challenges and solutions forward. *Bioresour Technol*. 2018;269:513-519. doi:https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.08.104.
- [21] Longo S., Mauricio-Iglesias M., Soares A., et al. ENERWATER – A standard method for assessing and improving the energy efficiency of wastewater treatment plants. *Appl Energy*. 2019;242:897-910. doi:https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.03.130
- [22] Lorenzo-Toja Y., Vázquez-Rowe I., Chenel S., Marín-Navarro D., Teresa Moreira M., Feijoo G. Eco-efficiency analysis of Spanish WWTPs using the LCA + DEA method. *Water Res*. 2015;68:651-666. doi:https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.10.040.
- [23] Lu H., Price L., Zhang Q. Capturing the invisible resource: Analysis of waste heat potential in Chinese industry. *Appl Energy*. 2016;161:497-511. doi:doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.060.
- [24] Lu L., Guest J.S., Peters C.A., Zhu X., Rau G.H., Ren Z.J. Wastewater treatment for carbon capture and utilization. *Nat Sustain*. 2018;1:750-758. doi:https://doi.org/10.1038/s41893-018-0187-9.
- [25] Masłoń A. 2017. "Energochłonność wybranych oczyszczalni ścieków zlokalizowanych w południowo-wschodniej Polsce". *Inżynieria i Ochrona Środowiska*;20(3):331. doi:10.17512/ios.2017.3.5.
- [26] Masłoń A., Czarnota J., Szczyrba P., Szaja A., Szulżyk-Cieplak J., Łagód G. 2024. "Assessment of Energy Self-Sufficiency of Wastewater Treatment Plants—A Case Study from Poland". *Energies (Basel)*. 17(5). doi:10.3390/en17051164
- [27] Mazhar A.R., Liu S., Shukla A. 2018. "A key review of non-industrial grey-water heat harnessing". *Energies (Basel)*. 11(2). doi:10.3390/en11020386.
- [28] Minister Gospodarki Morskiej i Żeglugi Śródlądowej: M. Gróbarczyk. *Rozporządzenie z Dnia 12 Lipca 2019 r. w Sprawie Substancji Szczególnie Szkodliwych Dla Środowiska Wodnego Oraz Warunków, Jakich Należy Spełnić Przy Wprowadzaniu Do Wód Lub Do Ziemi Ścieków, a Także Przy Odprowadzaniu Wód Opadowych Lub Roztopowych Wód Lub Do Urządzeń Wodnych*; 2019.
- [29] Ministerstwo Klimatu i Środowiska. Polityka Energetyczna Polski do 2040 r. *Dziennik Urzędowy*. Published online 2021:3.
- [30] Nakkasunchi S., Hewitt N.J., Zoppi C., Brandoni C. 2021. "A review of energy optimization modelling tools for the decarbonisation of wastewater treatment plants". *J Clean Prod*. 279.
- [31] Niewitecka K. 2018. "Possibilities of heat energy recovery from grey-water systems". In: *E3S Web of Conferences*. Vol 30. EDP Sciences; doi:10.1051/e3sconf/20183003003.
- [32] Niu K., Wu J., Qi L., Niu Q. 2019. "Energy intensity of wastewater treatment plants and influencing factors in China". *Science of The Total Environment*. 2019;670:961-970. doi:https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.03.159.
- [33] Olender Z. Wrompa – energia cieplna ze ścieków ogrzeje Wrocław. 2023. Accessed April 12, 2024. <https://wodnesprawy.pl/wrompa-energia-cieplna-ze-sciekow-ogrzeje-wroclaw-w/>
- [34] Olkusi T., Piwowarczyk-Ściebura K., Brożek A. 2017. "Wpływ porozumienia paryskiego i systemu EU ETS na rynek węglowy". *Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk*. 2017:91-102.
- [35] Polski Komitet Energii Elektrycznej. *Polska Ścieżka Transformacji Energetycznej*.
- [36] Pompy ciepła mają wielką przyszłość. Także w miejskich sieciach. Pompy ciepła mają wielką przyszłość. Także w miejskich sieciach.
- [37] Rada Europejska Rada Unii Europejskiej. Paryskie porozumienie klimatyczne. Accessed March 23, 2024. <https://www.consilium.europa.eu/pl/policies/climate-change/paris-agreement/#EU>.
- [38] Rada Europejska Rada Unii Europejskiej. Zmiana klimatu: co robi UE? Accessed March 24, 2024. <https://www.consilium.europa.eu/pl/policies/climate-change/#2050>.
- [39] Ranieri E., D'Onghia G., Lopopolo L., et al. 2023. "Evaluation of greenhouse gas emissions from aerobic and anaerobic wastewater treatment plants in Southeast of Italy". *J Environ Manage*. 2023;337. doi:https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117767.
- [40] Reinders M., Greditgk-Hoffamnn S., Risse H., Lange M. 2012. "Solution approaches for energy optimization in the water sector". *IWA World Congress on Water, Climate and Energy*. Published online May 2012:13-18. doi:https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123811
- [41] Ryńska J. 2024. "Odzysk ciepła ze ścieków." *Rynek Instalacyjny*. Published online January 19.
- [42] Schmid F. 2008. "Sewage water: Interesting heat source for heat pumps and chillers". In: *9th International IEA Heat Pump Conference*. SwissEnergy Agency for Infrastructure Plants. 1-12.
- [43] Siatou A., Manali A., Gikas P. 2020. "Energy consumption and internal distribution in activated sludge wastewater treatment plants of Greece". *Water (Switzerland)*. 12(4). doi:10.3390/W12041204.
- [44] Słyś D., Kordana S. *Odzysk Ciepła Odpadowego w Instalacjach i Systemach Kanalizacyjnych*. Wydawnictwo i Handel Książkami "KaBe"; 2013.
- [45] Strona internetowa. Katri Vala heating and cooling plant. helen.fi. Accessed April 23, 2024. <https://www.helen.fi/en/about-us/energy/energy-production/power-plants/katri-vala-heating-and-cooling-plant>.
- [46] Strona internetowa. Veolia uruchamia instalację, która łączy kogenerację i odzysk ciepła ze ścieków. Veolia. 2020. Accessed June 12, 2024. <https://www.veolia.pl/media/aktualnosci/veolia-uruchamia-instalacje-ktora-laczy-kogeneracje-i-odzysk-ciepala-ze-sciekow>.
- [47] Strona internetowa. Wodociągi Warszawskie efektywne energetycznie. October 4, 2023. Accessed April 15, 2024. <https://www.mpwik.com.pl/view/scieki-odnawialne-zrodlo-energii>.
- [48] Unia Europejska. Czym jest zmiana klimatu? Accessed March 24, 2024. https://youth.europa.eu/get-involved/sustainable-development/what-climate-change_pl.
- [49] Walker N.L., Williams A.P., Styles D. Pitfalls in international benchmarking of energy intensity across wastewater treatment utilities. *J Environ Manage*. 2021;300. doi:10.1016/j.jenvman.2021.113613.
- [50] Yapıcıoğlu Pelin. 2021. "Minimization of greenhouse gas emissions from extended aeration activated sludge process". *Water Practice and Technology*. 16(1):96-107. doi:10.2166/wpt.2020.100.
- [51] Ye Y., Ngo H.H., Guo W., et al. 2018. "A critical review on ammonium recovery from wastewater for sustainable wastewater management". *Bioresour Technol*;268:749-758.