

Karol Trojanowicz

Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa im. St. Pignonia w Krośnie, Zakład Inżynierii Środowiska

Łukasz Karamus

Miejskie Przedsiębiorstwo Gospodarki Komunalnej w Krośnie Sp. z o.o., Oczyszczalnia ścieków

Energetyczna utylizacja biogazu jako element gospodarki osadowej w oczyszczalni ścieków w Krośnie

W odniesieniu do koncepcji oczyszczalni ścieków komunalnych jako „zakładów odzysku zasobów i energii”, warto zwrócić uwagę na osiągnięcia w zakresie odzysku energii ze ścieków w naszym kraju. W artykule przedstawiono doświadczenia z eksploatacji, uruchomionej w 2009 roku w oczyszczalni ścieków komunalnych w Krośnie, instalacji do energetycznego zagospodarowania biogazu z kogeneracją energii elektrycznej i ciepłej. Scharakteryzowano linię technologiczną przeróbki osadów ściekowych. Przedstawiono efektywność wytwarzania biogazu w wydzielonych komorach fermentacji (WKF), wartości podstawowych parametrów ilościowych i jakościowych biogazu, analizę struktury zużycia i produkcji energii ciepłej i elektrycznej oraz wartości odzysku energii ze ścieków i materii organicznej zawartej w osadach ściekowych.

1. Wstęp

Oczyszczalnie ścieków komunalnych w nieodległej przyszłości mają stać się „zrównoważonymi ekologicznie” układami technologicznymi. Celem jest między innymi ich samowystarczalność energetyczna, a nawet eksploatacja z dodatnim bilansem energetycznym. Mają zostać przekształcone w źródło cennych zasobów – przede wszystkim wody, ale również związków azotu i fosforu (w formie nawozów organicznych lub mineralnych) [5, 6]. Możliwy i ekonomicznie opłacalny jest już w tej chwili odzysk z popiołów, pozostających po spalaniu osadów ściekowych, takich cennych pierwiastków jak miedź, srebro lub złoto [12]. Innowacyjna technologia autotroficznej deamonifikacji umożliwi redukcję zapotrzebowania na energię elektryczną w procesach usuwania zanieczyszczeń ze ścieków [10, 11]. Naukowcy na wiodących światowych uczelniach technicznych prowadzą również prace badawcze nad biotechnologiami oczyszczania ścieków, dającymi sposobność produkcji biodegradowalnych tworzyw sztucznych z polihydroksyalkanianów (PHA) zakumulowanych w biomacie rozwijającej się w reaktorach do oczyszczania ścieków [3]. Prowadzone są również próby bezpośredniego wytwarzania energii elektrycznej podczas procesu usuwania zanieczyszczeń ze ścieków z zastosowaniem

biologicznych ogniwi paliwowych (ang. *Biological Fuel Cells* – BFC) [9]. Promocja przedstawionych powyżej koncepcji została również mocno podkreślona w oficjalnym stanowisku Komisji Środowiska Senatu Rzeczypospolitej Polskiej z 17 marca 2016 r. [8]. W takim kontekście warto zwrócić uwagę na osiągnięcia w zakresie odzysku energii ze ścieków w naszym kraju. Dotyczy to oczywiście, w pierwszej kolejności, energetycznego wykorzystania biogazu będącego produktem ubocznym beztlenowej stabilizacji osadów ściekowych. W artykule przedstawiono doświadczenia z tego zakresu w oczyszczalni ścieków komunalnych w Krośnie.

2. Charakterystyka oczyszczalni ścieków komunalnych w Krośnie

W skład aglomeracji obsługiwanej przez oczyszczalnię ścieków w Krośnie wchodzi oprócz samego miasta Krosna jeszcze dziewięć okolicznych gmin. Średni dobowy dopływ ścieków z sieci kanalizacyjnej wynosi około 21 tys. m³, a roczna ilość ścieków, to ok. 7,6 mln m³. W momencie uruchomienia w 1974 roku projektowana przepustowość oczyszczalni wynosiła 10 500 m³/d, a po rozbudowie, zakończonej w 2000 roku, została ona zwiększona do 35 400 m³/d. Dodatkowo, taborem asenizacyjnym, dowożone są ścieki bytowo-gospodarcze w ilości

około 2 500 m³/rok. Ładunek zanieczyszczeń, który usuwany jest w mechaniczno-biologicznej oczyszczalni ścieków z podwyższonym usuwaniem związków biogenych, wynosi około 117 tys. RLM (dane za 2015 r.). Mechaniczne oczyszczanie dopływających ścieków odbywa się z użyciem: krat mechanicznych z prasopłuczką skratek, piaskowników podłużnych o przepływie poziomym, wyposażonych w hydrauliczne zgarniacze denne firmy Zickert oraz sprzężone z klasyfikatorami piasku, a dalej z wykorzystaniem prostokątnych osadników wstępnych – wyposażonych w mechaniczne zgarniacze osadu i materii wyflotowanej.

Podnoszenie ścieków z użyciem pomp odbywa się tylko raz, w pompowni głównej. Do kolejnych urządzeń dopływ jest grawitacyjny. Koloidalna i rozpuszczona materia organiczna oraz związki azotu i fosforu usuwane są w zintegrowanym systemie biologicznego oczyszczania ścieków, skonfigurowanym według schematu procesu Bardenpho. W jego skład wchodzi dwa dwukomorowe reaktory biologiczne, składające się kolejno z dwóch komór anoksycznych: predenitryfikacji (do której recykulowany jest osad czynny z osadników wtórnych) i denitryfikacji, komory beztlenowej – defosfatacji, oraz komory napowietrzanej – nityfikacji. Usuwanie fosforu wspomaganie jest z wykorzystaniem strącania preparatem

Tab. 1. Dopuszczalne wartości wskaźników zanieczyszczeń w ściekach oczyszczonych oraz ich średnie wartości w latach 2014 i 2015

	Wskaźniki jakości ścieków					
	T [°C]	BZT ₅ [mgO ₂ /l]	ChZT [mgO ₂ /l]	Zawiesina og. [mg/l]	Azot og. [mg N/l]	Fosfor og. [mg P/l]
Wartość dopuszczalna	35	15	125	35	10	1
Wartość średnia (2014÷2015)	14	5	60	9	8,87*	0,4

* Wartość średnioroczna dla temperatury ścieków w reaktorze biologicznym powyżej 12°C.

PIX-113, dozowanym do koryta odpływowego na wylocie z bioreaktora. Efektywność procesu denitryfikacji zwiększana jest poprzez dozowanie do bioreaktora związków organicznych węgla w formie wywaru gorzelnianego. Bioreaktory wyposażone są w pomiary on-line: tlenu rozpuszczonego, potencjału redox, stężenia osadu czynnego, oraz, dodatkowo, na wylocie z reaktora zainstalowano automatyczną stację pomiarową stężenia frakcji azotu nieorganicznego (azotynów, azotanów i jonów amonowych) oraz ortofosforanów. Pomiary wykorzystywane są do monitoringu oraz sterowania procesem biologicznego oczyszczania ścieków. Rozdział osadu czynnego od ścieków oczyszczonych odbywa się w dwóch radialnych osadnikach wtórnych. Oczyszczone ścieki odprowadzane są do rzeki Wisłok. W tab. 1 przedstawiono dopuszczalne wartości wskaźników zanieczyszczeń dla ścieków oczyszczonych, określone w aktualnym pozwoleniu wodno-prawnym oraz ich średnie, roczne wartości w latach 2014÷2015.

3. Układ technologiczny linii przeróbki osadów ściekowych**3.1. Źródła, ilość i jakość osadów ściekowych**

Osady ściekowe, które kierowane są do ciągu technologicznego ich przeróbki i unieszkodliwiania, powstają w osadnikach wstępnych i wtórnych. Średnia, roczna ilość wytwarzanych osadów ściekowych w latach 2010÷2015 wynosiła około 121 419 m³, przy średniej zawartości suchej masy (s.m.) i suchej masy organicznej (s.m.o.) odpowiednio 2,6% i 1,9% (co jest równoważne ilości, odpowiednio około 3138 Mg s.m./rok i 2311 Mg s.m.o./rok). Zmienność tych parametrów, wyrażona jako względne odchylenie standardowe (RSD), nie przekraczała przy tym 17%. Dane dotyczące jakości ustabilizowanych i odwodnionych osadów ściekowych zostały przedstawione w tab. 2. Wynika z nich, że jakość osadów ściekowych spełnia

wymagania Rozporządzenia Ministra Środowiska w sprawie komunalnych osadów ściekowych, wyspecyfikowane dla wykorzystania w rolnictwie oraz do rekultywacji gruntów na cele rolne [7]. Nie wykryto w nich również bakterii z rodzaju *Salmonella* ani żywych jaj pasożytów jelitowych.

3.2. Procesy jednostkowe stosowane do przeróbki i unieszkodliwiania osadów ściekowych

Osady wstępne i nadmierne w początkowym etapie są przetwarzane oddzielnie. Osady wstępne przetwarzane są przez wydzieloną pompownię i zagęszczane grawitacyjnie. Osady nadmierne natomiast kierowane są poprzez pompownię osadu nadmiernego do zagęszczacza grawitacyjnego, a następnie do linii mechanicznych zagęszczarek taśmowych. Dopiero tak wykondycjonowane, transportowane są do grawitacyjnego zagęszczacza osadów zmieszanych, skąd dozowane są do wydzielonych komór fermentacji (WKF). W pompowni osadów wstępnych znajduje się również stacja zlewca, która umożliwia przyjmowanie biologicznie rozkładalnej frakcji odpadów komunalnych do ewentualnej kofermentacji wraz z osadami ściekowymi.

Proces beztlenowej stabilizacji osadów prowadzony jest w dwóch, pracujących równolegle, wydzielonych komorach fermentacji (WKF) o pojemności 2500 m³ każda. Fermentacja mezofilowa prowadzona jest w temperaturze 37÷39°C (aczkolwiek z doświadczenia wynika, że powolny spadek temperatury, obserwowany w okresie zimowym, poniżej tej wartości nie powoduje znaczącego spadku efektywności procesu). Temperatura osadów ściekowych

utrzymywana jest na optymalnym poziomie, z zastosowaniem podgrzewu ciepłem odpadowym z układu utylizacji biogazu w spiralnych wymiennikach ciepła. Dzięki temu proces jest autotermiczny. Częstotliwość dozowania osadów ściekowych do WKF wynosi przeciętnie 6 razy na dobę. Hydrauliczny czas zatrzymania mieści się w zakresie od 13 do 18 dni. Prawidłowe mieszanie zawartości komór fermentacji zapewniają pompy cyrkulacyjne wspomagane mieszadłami mechanicznymi. Ujmowany w najwyższych punktach komór biogaz, kierowany jest przez węzeł oczyszczania i zbiornik magazynowy do układu kogeneracji (CHP). Do monitoringu procesu fermentacji metanowej stosowane są pomiary on-line pH i temperatury. Ustabilizowane osady ściekowe magazynowane są w zbiorniku retencyjnym o pojemności 585 m³, a następnie odwadnianie na prasach taśmowych Pektus typu DYPE-18ST i Bellmer typu WPN-K3 z użyciem polielektrolitu Praestol 644. Po odwodnieniu zawartość suchej masy w osadach ściekowych wynosi około 20%.

Ciecze osadowe powstające podczas odwadniania osadów ściekowych w chwili obecnej kierowane są bezpośrednio do pompowni głównej – czyli na wlot oczyszczalni ścieków. Końcowa przeróbka odwodnionych i ustabilizowanych osadów ściekowych polega na ich higienizacji w stacji wapnowania (jeżeli zachodzi taka potrzeba) oraz suszeniu. Suszarnia słoneczna jest eksploatowana od 2012 roku. Prowadzona jest w trzech halach suszarniczych o lekkiej konstrukcji stalowej, pokrytych płytami poliwęglanowymi, o powierzchni podłoża 1195 m² każda. Jako główne źródło ciepła wykorzystywana jest energia promieniowania słonecznego. Dodatkowo proces suszenia wspomagany jest ciepłem odpadowym z elektrowni biogazowej. Zasilanie w energię ciepłą odbywa się z wykorzystaniem instalacji ogrzewania podłogowego. Osady mieszane są przy pomocy samojezdnej przewracarki bębnowej. Zawartość suchej masy w wysuszonych osadach ściekowych wzrasta do około 75%, mają one postać granulatu. Ich objętość zmniejsza

Tab. 2. Jakość ustabilizowanych i odwodnionych osadów ściekowych w latach 2011÷2015

Rok	N _{og}	P _{og}	Hg	Cd	Pb	Cr	Ni	Zn	Cu
	% s.m.								
	[mg/kg s.m.]								
Średnia	4,4	2,7	0,8	2,6	47,2	75,0	53,3	901,3	152,0
SD	0,9	0,4	0,2	0,7	12,4	10,3	22,4	138,8	21,7
RSD [%]	20,6	15,6	26,4	28,5	26,3	13,8	42,1	15,4	14,3



Fot. 1. Wydzielone komory fermentacji (WKF)

się przy tym 3,5÷4-krotnie. Wydajność suszarni osadów ściekowych w 2015 r. osiągnęła 406 Mg s.m. Część osadów ściekowych, która nie jest poddawana procesowi suszenia, wykorzystywana jest w rolnictwie do uprawy roślin nieprzeznaczonych do spożycia i produkcji pasz (średnio ok. 1320 Mg s.m./rok).

W celu ograniczenia uciążliwości zapachowej z hal suszarniczych, zostały one wyposażone w system suchej dezodoryzacji powietrza. Aby zmniejszyć oddziaływanie substancji złośliwych z procesów oczyszczania ścieków, plac magazynowy osadów ustabilizowanych został zaduszony i wyposażony w kurtyny dezodoryzacji mokrej. Zhermetyzowano również zagęszczacze osadu i halę krat, a odprowadzane z tych urządzeń powietrze oczyszczane jest w biofiltrach.

4. Energetyczna utylizacja biogazu

4.1. Instalacja oczyszczania biogazu

Biogaz ujmowany jest w szczytowym punkcie reaktorów WKF z użyciem dzwonów gazowych ($d = 400$ mm) i kierowany rurociągiem ($d = 100$ mm) do węzła oczyszczania biogazu. W chwili obecnej oczyszczanie biogazu prowadzone jest jedynie w układzie odsiarczania. W nim z biogazu usuwany jest siarkowodor, którego zawartość maleje ze stężenia ok. $4\div 8$ g/m³ do poziomu poniżej $0,2$ g/m³. Umożliwia to jego bezpieczne spalanie w silnikach agregatów prądotwórczych (bez obaw o ich awarię w wyniku korozji) oraz zabezpiecza przed nadmierną emisją dwutlenku siarki do atmosfery. Proces odsiarczania oparty jest o chemisorpcję na złożach filtracyjnych z rudy darniowej. System odsiarczania składa się z sześciu cylindrycznych adsorberów (filtrów odsiarczających) o pojemności $1,8$ m³ każdy. Aktywność złoża jest wystarczająca do pracy filtra przez okres do 3 miesięcy ze względu na dużą zawartość siarkowodoru w surowym biogazie. Z adsorberów oczyszczony biogaz kierowany jest do stacji rozdzielczo-pomiarowej. Z niej gaz może być kierowany do zbiornika magazynowego, do węzła kogeneracji lub na pochodnię (gdzie jest spalany w przypadku wystąpienia nadwyżek ciśnienia w instalacji). Dane dotyczące jakości oczyszczonego biogazu oraz jego wartości opałowej podano w tab. 3. Rozruch bloku kogeneracji energii elektrycznej i ciepłej z biogazu (ang. *Combined Heat and Power Production* – CHP) miał miejsce w 2009 roku i od tego czasu jest on z sukcesem eksploatowany.



Fot. 2. Zbiornik magazynowy biogazu



Fot. 3. Hala suszarnicza osadów ściekowych - wewnątrz

Tab. 3. Skład jakościowy oraz wartość opałowa oczyszczonego biogazu

Średnia z lat	Składnik biogazu				Wartość opałowa [kWh/m ³]
	CH ₄ [%]	CO ₂ [%]	O ₂ [%]	H ₂ S [ppm]	
2010÷2015	62,0	37,0	0,5	384	6,1

Na rys. 1 przedstawiono wykres ilustrujący ilości materii organicznej osadów ściekowych doprowadzonej do WKF i po procesie fermentacji, a także stopień redukcji materii organicznej w trakcie stabilizacji beztlenowej. Materia organiczna podczas fermentacji była usuwana średnio w około 49% (RSD na poziomie 12%). Nieznaczny spadek stopnia redukcji widoczny w latach 2013÷2015 był związany ze skróceniem czasu zatrzymania osadów w WKF z około 17 do 13 dni.

Materia organiczna usunięta z osadów ulega w dużej części przemianie w biogaz (patrz rys. 2). Średnia roczna produkcja biogazu w omawianym okresie wyniosła ok. $1\,426\,148$ m³, z maksimum w roku 2014, wynoszącym ok. $1\,580\,000$ m³. Z jednego m³ osadów ściekowych wprowadzonych do komór WKF uzyskiwano średnio $11,8$ m³ biogazu (RSD = 11%). Bardziej obiektywną miarą produkcji biogazu jest jego ilość w odniesieniu do jednostkowej suchej masy materii organicznej wprowadzonej do WKF lub usuniętej w trakcie fermentacji. Z analizy danych zgromadzonych na oczyszczalni ścieków w Krośnie wynika, że z jednego kilograma materii organicznej (s.m.o.), usuniętej z osadów ściekowych w WKF, powstawało średnio ok. $1,3$ m³ biogazu (od RSD = 22%). Wartość ta jest nieco wyższa od typowej, podawanej w dostępnej literaturze i wynoszącej około 1 m³/kg s.m.o. usuniętej [1]. Wpływ na to może mieć również fakt, że dane dotyczące ilości produkowanego biogazu podawane są w metrach sześciennych, zmierzonych w określonych warunkach ciśnienia i temperatury panujących w układzie – nie są to metry sześcienne gazu odniesione do warunków normalnych („normalne metry sześciennie” – Nm³). Nie zaobserwowano również wyraźnej zmienności sezonowej produkcji biogazu ani stopnia usuwania materii organicznej doprowadzanej do WKF.

Dodatkowo, wraz z osadami ściekowymi, w procesie fermentacji przetwarzano frakcję biologicznie rozkładalnych odpadów komunalnych (tzw. biofrakcję), wydzieloną i odpowiednio przygotowaną w dedykowanej instalacji technologicznej, która jest eksploatowana w Zakładzie Unieszkodliwiania Odpadów MPGK Krosno Sp. z o.o.

Średnia miesięczna ilość doprowadzonej do WKF biofrakcji w latach 2010÷2015 wynosiła ok. $23,4$ Mg s.m.o./miesiąc (co odpowiadało około 815 m³ biofrakcji/miesiąc). Stanowiło to ok. 10% całkowitej ilości materii organicznej przetwarzanej w komorach fermentacji.

Skład jakościowy oraz wartość opałową otrzymywanego biogazu (po procesie oczyszczania) przedstawiono w tab. 3. Średnia zawartość metanu w biogazie wynosiła około 62%. Jest to dobrze odzwierciedlone w stosunkowo wysokiej wartości opałowej biogazu, oznaczonej na poziomie około $6,1$ kWh/m³.

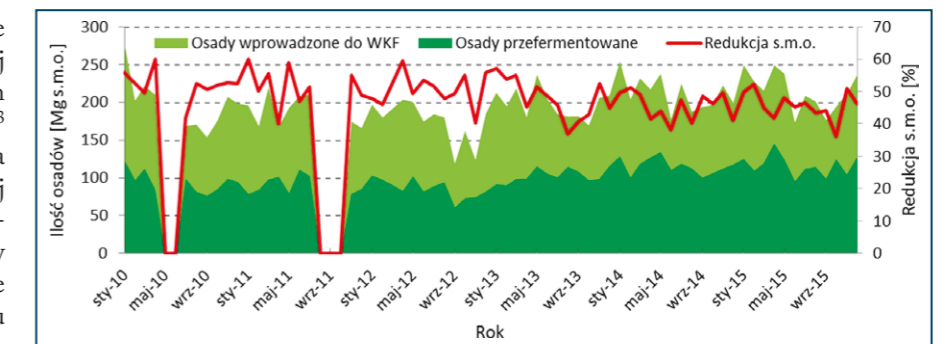
4.2. Blok kogeneracji energii elektrycznej i ciepłej z biogazu

Obecnie głównym odbiornikiem biogazu są moduły kogeneracyjne. Kogeneracja prowadzona jest z użyciem dwóch agregatów prądotwórczych produkcji MTU. Każdy agregat (moduł) składa się z silnika tłokowego z zapłonem iskrowym sprzężonego z generatorem synchronicznym. Ponadto, w skład modułu wchodzi dodatkowe systemy wraz

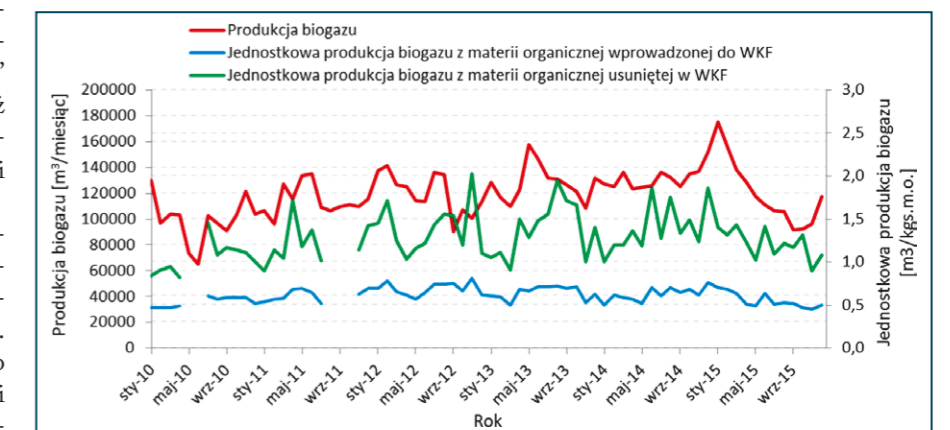
z instalacjami (m.in. układ kontroli składu mieszanki, układ chłodzenia wraz z wymiennikami ciepła, systemy pomiaru ilości energii elektrycznej i ciepłej, układ pomiaru ilości zużywanego paliwa). Moduł zamknięty jest w obudowie system stanowią urządzenia pomiarowe energii elektrycznej, służące do rozliczeń z zakładem energetycznym oraz do rozliczeń i ewidencjonowania zielonych certyfikatów. Oddzielny układ stanowi również analizator biogazu kontrolujący jego skład w zakresie podstawowych wskaźników (stężenie metanu, dwutlenku węgla, tlenu i siarkowodoru).

W celu optymalizacji pracy silnika, zarówno pod względem ilości spalanego paliwa jak i jego zużycia oraz emisji zanieczyszczeń do atmosfery, zastosowane zostało rozwiązanie, które umożliwia wysokoefektywną i stabilną pracę agregatu przy zmiennej zawartości metanu w biogazie. Jest to układ kontrolny mieszanki z sondą lambda.

Każdy agregat posiada odrębny układ sterowania, umożliwiający również prowadzenie monitoringu i wizualizacji. Ponadto agregatornia posiada system monitoringu, wizualizacji i archiwizacji danych, umożliwiający śledzenie pracy agregatów w centralnej dyspozytorni oczyszczalni ścieków.



Rys. 1. Ilości materii organicznej osadów ściekowych doprowadzonej do WKF i po procesie fermentacji oraz stopień redukcji materii organicznej w trakcie stabilizacji beztlenowej



Rys. 2. Produkcja oraz jednostkowa produkcja biogazu (w odniesieniu do jednostkowej masy materii organicznej wprowadzonej i zredukowanej w WKF)

Układ chłodzenia agregatu pracuje w zakresie temperatur 70/90°C, czyli temperatura wody chłodzącej na wyjściu z modułu kogeneracji wynosi około 90°C, natomiast temperatura wody chłodzącej powracającej do agregatu wynosi około 70°C. Układ ciepły został tak zaprojektowany, aby mógł współpracować (w sytuacjach awaryjnych) z zakładową kotłownią. Ponadto, obieg chłodzenia agregatów został wyposażony w chłodnie wentylatorowe, które zabezpieczają agregat w przypadku braku przejmowania ciepła przez określone odbiorniki. Chłodnie uruchamiane są w momencie, kiedy temperatura wody chłodzącej powracającej do agregatu jest wyższa od 70°C. Zabezpiecza to agregat przed przegrzaniem i umożliwia jego ciągłą pracę. Warto podkreślić, że eksploatowany system CHP posiada dodatkowy obieg służący do chłodzenia mieszanki paliwowej do około 50°C z użyciem chłodni wentylatorowych (czyli o 20°C poniżej standardowej temperatury w pozostałych układach). Umożliwia to podniesienie sprawności energetycznej systemu (poprawę stopnia konwersji energii chemicznej metanu w energię elektryczną). Wynikiem tego jest wzrost mocy elektrycznej generatora nawet o 20 kW w stosunku do standardowego układu (w którym mieszanka wprowadzana do komór spalania silnika ma temperaturę 70°C). Podstawowe parametry techniczne modułów CHP zostały przedstawione w tab. 4. Rozruch bloku kogeneracji miał miejsce w 2009 r.

Nadwyżka biogazu, która nie może zostać zużyta w bloku kogeneracji, trafia do kotłów gazowych, zasilających dodatkowo w energię ciepłą urządzenia i budynki oczyszczalni ścieków. Kotłownia wyposażona jest w dwa kotły firmy Buderus o mocy cieplnej 400 kW każdy. Do chwili uruchomienia modułów CHP kotłownia stanowiła główne źródło zaopatrzenia w ciepło technologiczne oczyszczalni.

4.3. Produkcja energii elektrycznej i cieplnej z biogazu

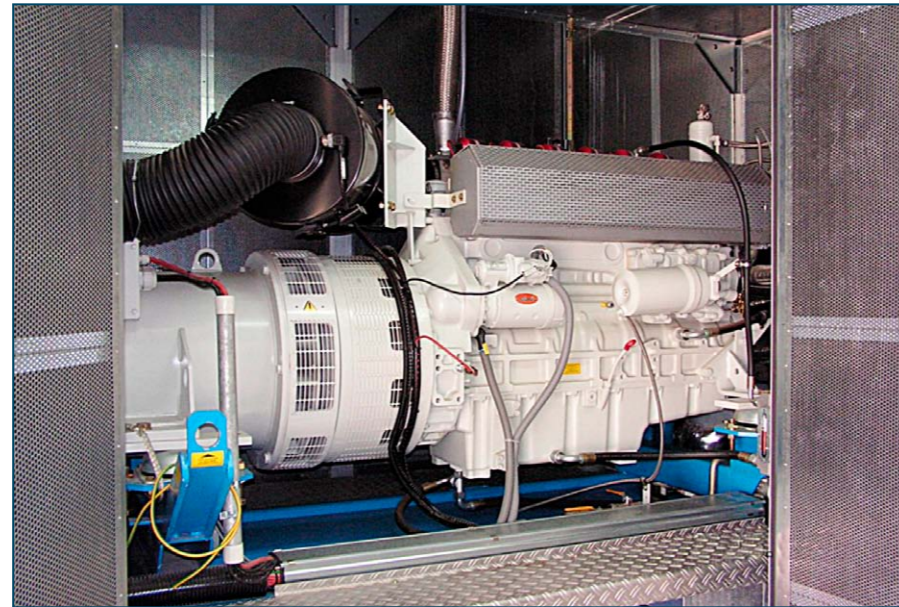
Zasilanie biogazem węzła kogeneracji pozwoliło na wytwarzanie znaczącej ilości energii (patrz rys. 3 „A” i „B”). Średnia produkcja energii elektrycznej i cieplnej w latach 2010÷2015 wynosiła odpowiednio 2585 MWh/rok i 3379 MWh/rok. Umożliwiło to pokrycie zapotrzebowania na energię elektryczną w ok. 70% oraz uzyskanie samowystarczalności jeżeli chodzi o pokrycie zapotrzebowania na energię

Tab. 4. Podstawowe parametry techniczne eksploatowanych modułów CHP w oczyszczalni ścieków w Krośnie

Moc elektryczna [kW]	192
Moc cieplna [kW]	214
Prędkość obrotowa [obr/min]	1500
Maksymalna temperatura wody na wejściu do modułu [°C]	70
Maksymalna temperatura wody na wyjściu z modułu [°C]	90
Maksymalne zapotrzebowanie na energię elektryczną dla napędów pomocniczych [kW]	4
Zużycie gazu (dla 54% CH ₄) [m ³ /h]	90,7



Fot. 4. Agregat kogeneracyjny MTU (192 kW/214 kW)



Fot. 5. Kotły zasilane biogazem BUDERUS (400 kW)

cieplną w krośnieńskiej oczyszczalni ścieków (patrz rys. 5 i 6). Wpłynęło to oczywiście na poprawę relacji pomiędzy ilością energii elektrycznej zakupionej z sieci i wyprodukowanej, a nawet dało możliwość odsprzedaży pewnej nadwyżki energii elektrycznej, która okresowo występuje (patrz rys. 3 „A”). Jak już wspomniano, ciepło w całości wytwarzane jest z biogazu w bloku

CHP oraz kotłach zasilanych biogazem. Energia cieplna w oczyszczalni ścieków w Krośnie zużywana jest głównie do utrzymywania odpowiedniej temperatury w WKF (średnio ok. 88% całkowitego zużycia). Pozostałe 12% zapotrzebowania na ciepło związane jest z eksploatacją suszarni osadów ściekowych oraz ogrzewaniem budynków technicznych i pomieszczeń socjalnych

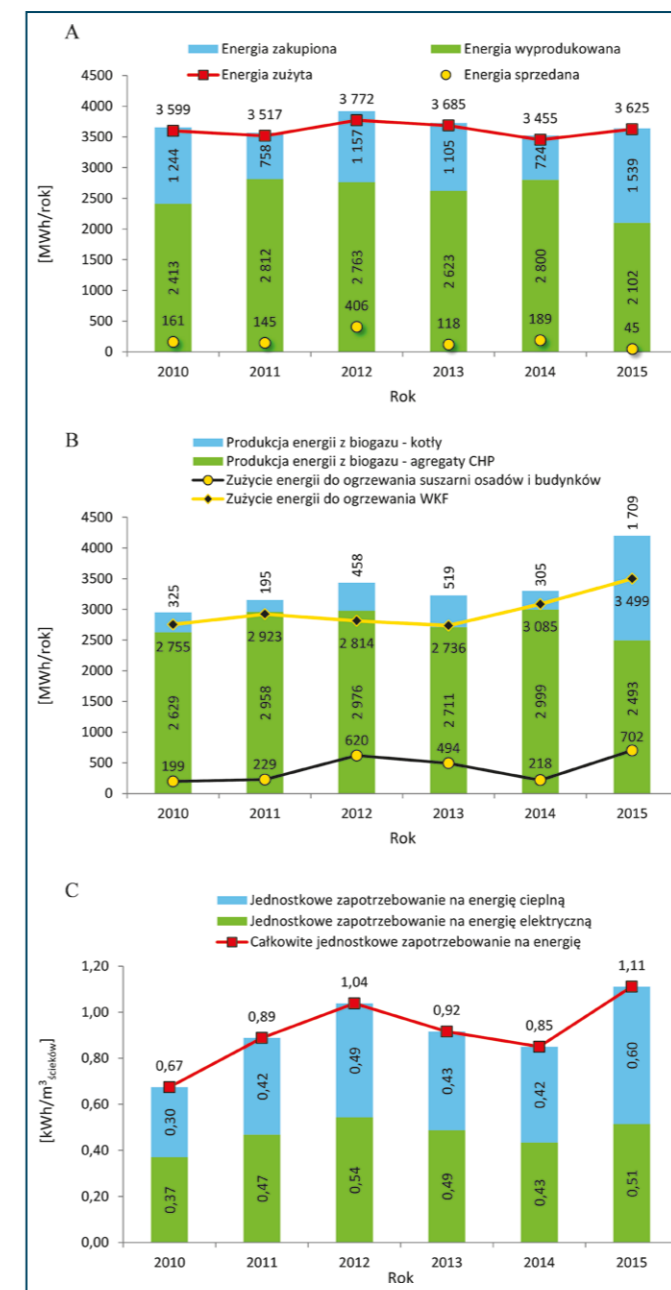
(patrz rys. 3 „B”). Z danych tych wynika również, że zastosowanie technologii wykorzystującej energię promieniowania słonecznego do suszenia ustabilizowanych osadów ściekowych było słuszną decyzją. Pomimo okresowej konieczności dodatkowego podgrzewu płyt w suszarni, hale suszarnicze nie są miejscem największego zużycia energii w oczyszczalni ścieków. Biorąc pod uwagę, że zastosowana technologia końcowej obróbki osadów ściekowych znacząco obniża koszty ich transportu (również ekologiczne – związane z redukcją zużycia paliwa samochodowego i emisją zanieczyszczeń do powietrza atmosferycznego) oraz fakt, że wysuszone osady ściekowe mogą być dalej

użytkowane termicznie z odzyskiem ciepła i energii elektrycznej, jak również eliminuje potrzebę zużycia surowców (wapna) do higienizacji ustabilizowanych osadów, można stwierdzić, że jest ona technologią zrównoważoną ekologicznie i spójną z wizją układów oczyszczania ścieków przyszłości, krótko przedstawioną we wstępie.

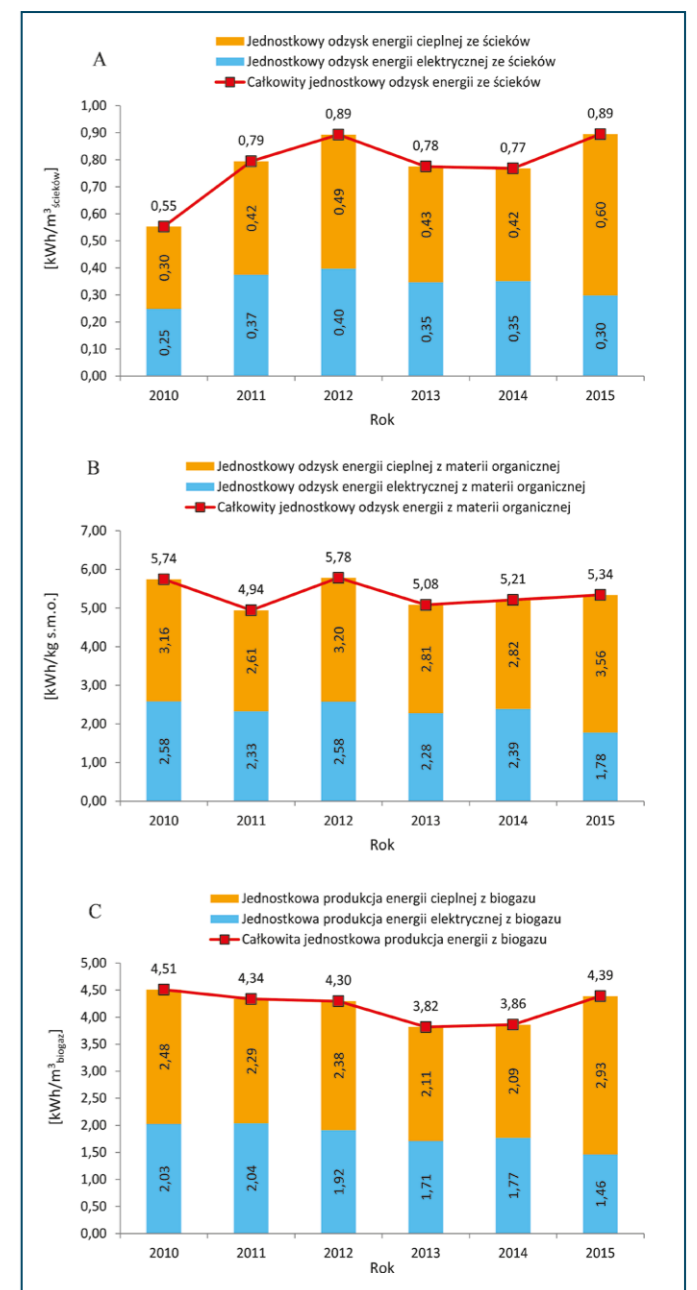
W odniesieniu do takiej koncepcji oczyszczalni ścieków komunalnych, ważna jest również wiedza dotycząca jednostkowego zapotrzebowania na energię do oczyszczania metra sześciennego ścieków. Wartość tego parametru w latach 2010÷2015 w oczyszczalni ścieków w Krośnie, wynosiła średnio 0,91 kWh/m³ ścieków (w tym na energię

elektryczną ok. 0,47 kWh/m³ ścieków, a na energię cieplną ok. 0,44 kWh/m³ ścieków) – patrz rys. 3 „C”.

Na rys. 4 „A” i „B”, z kolei, przedstawiono wartości jednostkowego odzysku energii ze ścieków i osadów ściekowych (traktowanych w takim ujęciu, jako źródło zasobów). Całkowity odzysk energii elektrycznej i cieplnej z metra sześciennego ścieków przy obecnym układzie technologicznym wynosi średnio 0,78 kWh/m³ ścieków (0,34 kWh/m³ ścieków energii elektrycznej i 0,44 kWh/m³ ścieków energii cieplnej). To już całkiem dużo, w odniesieniu do przedstawionej wcześniej wartości jednostkowego zapotrzebowania na energię. Odzysk energii



Rys. 3. A) Relacje między energią elektryczną wyprodukowaną, zakupioną, zużyta i sprzedaną w latach 2010÷2015; B) Produkcja i struktura zużycia energii cieplnej w latach 2010÷2015; C) Jednostkowe zapotrzebowanie na energię elektryczną i cieplną do oczyszczania ścieków w latach 2010÷2015



Rys. 4. A) Jednostkowy odzysk energii elektrycznej i cieplnej ze ścieków w latach 2010÷2015; B) Odzysk energii z materii organicznej usuniętej z osadów podczas procesu fermentacji w latach 2010÷2015; C) Jednostkowe ilości wyprodukowanej energii elektrycznej i cieplnej z biogazu w latach 2010÷2015

z materii organicznej przekształconej do formy biogazu wynosił średnio 5,3 kWh/kg s.m.o. (patrz rys. 4 „B”). Na rys. 4 „C” przedstawiono jednostkową produkcję energii z metra sześciennego biogazu, wynoszącą średnio ok. 4,2 kWh/m³ biogazu. W tym przypadku warto zastanowić się nad ewentualną możliwością poprawy tego wskaźnika (zwiększeniem sprawności energetycznej układu CHP) z uwzględnieniem kosztów takiej optymalizacji.

Uzyskiwany w chwili obecnej stopień pokrycia zapotrzebowania na energię z własnej produkcji – samowystarczalność energetyczna – został przedstawiony na rys. 5 i 6. Z analizy danych tam zawartych wynika, że cel taki jest realny i osiągalny. W chwili obecnej oczyszczalnia ścieków w Krośnie nie zużywa paliwa, pochodzącego z zakupów, do produkcji energii cieplnej. Zapotrzebowanie na to medium jest pokrywane w całości z wykorzystaniem biogazu jako źródła energii pierwotnej. W przypadku energii elektrycznej natomiast, średni stopień samowystarczalności wynosił 70%. Uzyskanie pełnego pokrycia zapotrzebowania na energię elektryczną w chwili obecnej jeszcze nie jest możliwe. Taki wynik udało się osiągnąć na przykład przez zwiększenie udziału materii organicznej pochodzącej z zewnętrznego źródła, jako wsadu do WKF (na przykład rozkładalne biologicznie odpady z przemysłu przetwórstwa spożywczego). Zostało to udowodnione w praktyce, na przykład w oczyszczalni ścieków w Mielcu [2]. Zrealizowanie tego bez udziału kofermentacji byłoby możliwe przy zwiększeniu odzysku energii ze ścieków z jednej strony, zaś z drugiej przy redukcji zapotrzebowania na energię do ich oczyszczania, np. przez zastosowanie urządzeń o wyższej sprawności energetycznej, a także energooszczędnych, innowacyjnych technologii oczyszczania ścieków i ich optymalizacji z użyciem zaawansowanych systemów sterowania.

Mając na uwadze fakt, że w samej materii organicznej zawartej w każdym metrze sześciennym ścieków zakumulowane jest od 1,4 do 2,8 kWh energii [13], przedstawione wyniki w zakresie odzysku energii ze ścieków teoretycznie można poprawić. Zagospodarowanie wysuszonych osadów ściekowych jako komponentu paliwa alternatywnego lub ich bezpośrednia, termiczna utylizacja może być jedną z metod poprawy tego bilansu. Potencjał energetyczny ścieków jest jednak jeszcze większy. Na przykład energia, którą można odzyskać

z użyciem pomp ciepła, przy założeniu schładzania każdego metra sześciennego ścieków o 5 K, co jest technicznie możliwe do zrealizowania nawet w okresie zimowym, to aż 5,8 kWh/m³, co daje w skali roku 45 GWh energii – dla dopływu ścieków rejestrowanego w oczyszczalni ścieków w Krośnie.

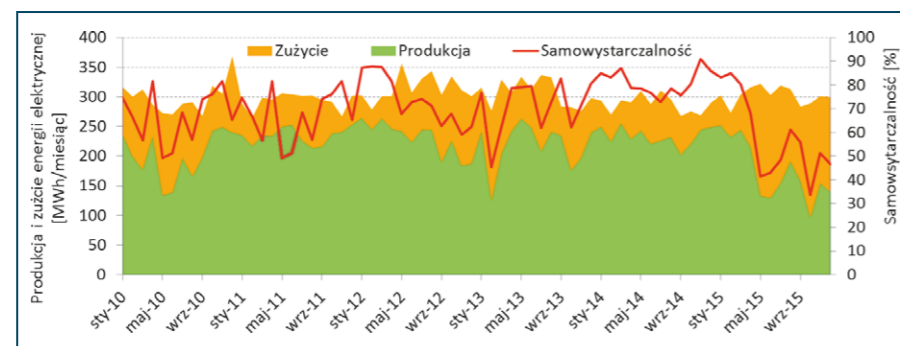
Oczywiście pozostają do dyskusji sprawy związane z kosztami produkcji czy zakupu energii elektrycznej potrzebnej do odzysku ciepła ze ścieków w takim systemie i możliwym do uzyskania wynikiem ekonomicznym. Takie układy technologiczne są eksploatowane z powodzeniem, na przykład w krajach skandynawskich i pozwalają na produkcję znaczących ilości ciepła wykorzystywanego do ogrzewania budynków mieszkalnych na terenie miejskich aglomeracji. Przykładem jest Sztokholm (Hammarbyverket), gdzie w ten sposób produkuje się rocznie około 1240 GWh energii cieplnej, przeznaczonej do ogrzewania 95 tys. budynków mieszkalnych [4].

5. Podsumowanie

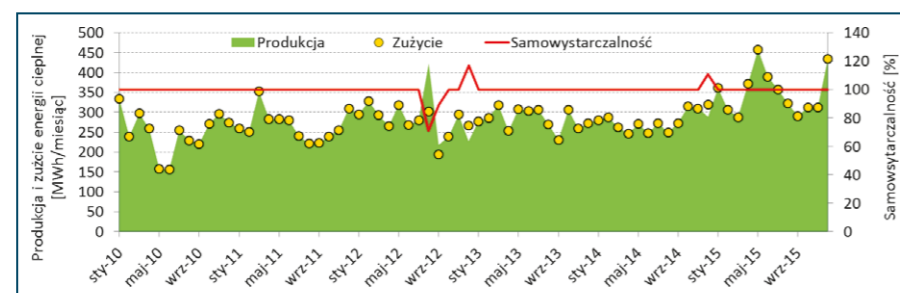
Podobnie jak inne oczyszczalnie ścieków komunalnych w Polsce, krośnieńska oczyszczalnia podlega procesowi ciągłego doskonalenia i przeszła ewolucyjną drogę od układu generującego odpady i będącego konsumentem znaczących ilości energii, do miejsca, w którym staje się jej wytwórcą. Od roku 2000 z sukcesem eksploatowana jest instalacja

beztlenowej stabilizacji osadów ściekowych wraz z uruchomioną w 2009 r. utylizacją biogazu do produkcji energii w układzie kogeneracji. Pozwoliło to na osiągnięcie w krótkim czasie niezależności energetycznej w odniesieniu do zapotrzebowania na energię cieplną oraz produkcję energii elektrycznej w ilości pokrywającej około 70% zużycia tego medium w oczyszczalni ścieków. Słuszną decyzją okazała się również inwestycja w słoneczną suszarnię osadów ściekowych, która umożliwiła znaczące zmniejszenie masy odwodnionych na prasach taśmowych osadów ściekowych, a przez to wpłynęła na redukcję kosztów ich dalszego zagospodarowania.

Wszystkie opisane w artykule instalacje technologiczne bez wątpienia sprawiają, że oczyszczalnia ścieków w Krośnie staje się systemem ekologicznie zrównoważonym. Planowany, kolejny etap jej modernizacji będzie związany, w pierwszej kolejności, ze zwiększeniem efektywności usuwania biogenów ze ścieków. Warto również stawiać dodatkowe cele związane z poprawą sprawności energetycznej całego układu oczyszczania ścieków. Możliwości techniczne do tego istnieją. Potrzebne są, jak zawsze, wizja, rozsądne planowanie i stabilny system prawno-ekonomiczny w szerszej skali. Ważna jest również możliwość porównania uzyskiwanych efektów w tym zakresie w naszej branży i wzajemna wymiana doświadczeń do wypracowania najlepszych praktyk.



Rys. 5. Produkcja i zużycie energii elektrycznej w oczyszczalni ścieków oraz stopień pokrycia zapotrzebowania na energię elektryczną z produkcji własnej (samowystarczalność)



Rys. 6. Produkcja i zużycie energii cieplnej w oczyszczalni ścieków oraz stopień pokrycia zapotrzebowania na energię cieplną z produkcji własnej (samowystarczalność)

6. Literatura

- [1] Dymaczewski Z.: *Poradnik eksploatatora oczyszczalni ścieków*. PZITS Poznań 2011.
- [2] Masłoń A., Pazdro S., Mroczek W.: *Gospodarka osadowa w oczyszczalni ścieków w Mielcu*. Forum Eksploatatora 2015, 4 (79), s. 47-54.
- [3] Md. Din M. F., Mohanadoss P., Ujang Z., Van Loosdrecht M., Yunus S. M., Chellian S., Zambare V., Olsson G.: *Development of Bio-PORec_ system for polyhydroxyalkanoates (PHA) production and its storage in mixed cultures of palm oil mill effluent (POME)*. Bioresource Technology 2012, 124, s. 208-216.
- [4] Mikkonen L., Rämö J., Keiski R. L., Pongrácz E.: *Heat recovery from wastewater: Assessing the potential in northern areas*. Water research at Oulu University 2014, s. 161-164 (dostępny: http://nortech.oulu.fi/pdf/Lauri%20article_WaResConf.pdf (2016-04-10)).
- [5] PUB (2015-11-10): (<http://www.pub.gov.sg/water/newater/Pages/default.aspx>) Singapore's national water agency.
- [6] Remy M., Kruit J., Hendrickx T., Haerhuis R., van Loosdrecht M.: *Phospaq: Full scale experience with phosphorus recovery via controlled struvite precipitation*. WEF/IWA Nutrient Removal and Recovery Conference – July 28-31, 2013, Vancouver, Canada.
- [7] Rozporządzenie Ministra Środowiska z 6 lutego 2015 r. w sprawie komunalnych osadów ściekowych. Dz.U. 2015 poz.257.
- [8] *Stanowisko Komisji Środowiska Senatu Rzeczypospolitej Polskiej z 17 marca 2016 r. na temat innowacyjnego wykorzystania ścieków jako źródła energii i zasobów*. Forum Eksploatatora 2016, 3(84), s. 8-9.
- [9] Sun H., Xu S., Zhuang G., Zhuang X.: *Performance and recent improvement in microbial fuel cells for simultaneous carbon and nitrogen removal: A review*. Journal of Environmental Sciences 2016, 39, s. 242-248.
- [10] Trojanowicz K., Plaza E., Trella J.: *Pilot Scale Studies on Nitrification-Anammox Process for Mainstream Wastewater at Low Temperature*. Water Science & Technology 2016, 73(4), s. 761-768.
- [11] Trojanowicz K.: *Rola technologii deamonifikacji w nowej koncepcji oczyszczania ścieków komunalnych*. Technologia Wody 2016, 3(47), s. 50-56.
- [12] Westerhoff P., Lee S., Yang Y., Gordon G. W., Hristovski K., Halden R. U., Herckes P.: *Characterization, Recovery Opportunities, and Valuation of Metals in Municipal Sludges from U.S. Wastewater Treatment Plants Nationwide*. Environ. Sci. Technol. 2015, 49 (16), s. 9479-9488.
- [13] Wójtowicz A.: *Kierunki rozwoju gospodarki osadowej*. Gaz Woda i Technika Sanitarna 2014, 4, s. 148-153.

