



Analiza ścieżek odzysku energii i poprawy efektywności w komunalnych oczyszczalniach ścieków

RAPORT W RAMACH PROJEKTU ETV4WATER

Beata Szatkowska, dot-eko@dot-eko.pl and Bjarne Paulsrud, pau@cowi.com,
Aquateam COWI
Ewa Neczej, e.neczaj@ietu.pl, rozdział 3.1, IETU

Oslo, wrzesień 2017

Spis treści

Streszczenie.....	3
1. Wprowadzenie	4
2. Strategia poprawy bilansu energetycznego w oczyszczalniach ścieków.....	4
3. Odzysk energii	11
3.1. Produkcja biogazu.....	11
3.2. Pompy ciepła.....	12
3.3. Odzysk energii z różnych strumieni o wysokiej temperaturze za pomocą wymienników ciepła	13
4. Poprawa efektywności energetycznej.....	14
4.1. Pompowanie ścieków surowych.....	18
4.2. Oczyszczanie wstępne	20
4.3. Oczyszczanie wtórne	21
4.4. Trzeci stopień oczyszczania	24
4.5. Obróbka i stabilizacja osadów	26
4.6. Nowe projektowane oczyszczalnie ścieków	29
5. Przykłady poprawy efektywności energetycznej w oczyszczaniu ścieków	30
5.1. Przejście od mezofilowej fermentacji beztlenowej (MAD) do termofilowej fermentacji beztlenowej (TAD).....	30
5.2. Pompowanie recykulowanego osadu czynnego (RAS).....	33
5.3. Zagęszczanie/odwadnianie osadu.....	33
5.4. Systemy napowietrzania	34
5.5. System napowietrzania i sterowania 1	34
5.6. System napowietrzania i sterowania 2	35
6. Korzyści wynikające z poprawy efektywności energetycznej	37
7. Wnioski	38
8. Literatura.....	39

Streszczenie

Zużycie energii przypadające na proces oczyszczania ścieków jest zazwyczaj jednym z głównych czynników składających się na całkowite zużycie energii zakładów miejskich zajmujących się dostawą wody i oczyszczaniem ścieków. Zastosowanie przykładowych i prezentowanych w raporcie zmian operacyjnych i inwestycyjnych na oczyszczalniach ścieków mogą znacząco przyczynić się do oszczędności energetycznych i finansowych. W niniejszym raporcie przedstawiono również przykłady poprawy efektywności energetycznej uzyskiwane na różnych oczyszczalniach ścieków głównie w Europie. Raport obejmuje ważne kwestie, takie jak korzyści płynące z poprawy efektywności energetycznej na oczyszczalniach ścieków. Ponadto wskazuje podstawowe strategie, które powinny pomóc eksploatatorom oczyszczalni ścieków z powodzeniem wdrożyć zmiany prowadzące do poprawy efektywności energetycznej w swoim zakładzie.

1. Wprowadzenie

Ze względu na działające przez 24 godziny na dobę pompy, silniki, dmuchawy i inne urządzenia, zakłady zajmujące się oczyszczaniem ścieków potrafią być największymi odbiorcami energii w gminie, a tym samym głównymi podmiotami przyczyniającymi się do jej całkowitej emisji gazów cieplarnianych. Wspomniane koszty ekonomiczne i środowiskowe można zmniejszyć, poprawiając wydajność energetyczną oczyszczalni ścieków, wybierając energooszczędne technologie, a także mniej energochłonne urządzenia oraz procesy. Można to osiągnąć przez odzysk energii ze ścieków i wytworzenie energii elektrycznej i ciepła lub/i poprzez zmniejszenie zużycia energii na poziomie procesów i wykorzystanych urządzeń. Zwiększona produkcja energii w oczyszczalniach ścieków poprzez spalanie biogazu z komór fermentacji beztlenowej w systemie kogeneracji oraz odzysk ciepła ze ścieków z zakładu za pomocą pomp ciepła, umożliwi oczyszczalniom wytwarzanie w części lub całości energii elektrycznej na własne potrzeby i do ogrzewania pomieszczeń, zmieniając je w konsumentów energii o zerowym bilansie energetycznym.

Potencjalna wartość energii zgromadzonej w różnych ściekach jest zmienna i waha się w granicach od 4,92 do 7,97 kWh/kg ChZT, czyli przekracza zapotrzebowanie energetyczne na ich oczyszczanie (Heidrich i in., 2011).

Biorąc pod uwagę fakt, że zużycie energii wiąże się ze znacznymi kosztami dla zakładów komunalnych oczyszczających ścieki, należy okresowo przeprowadzać audyty energetyczne i realizować pewne zmiany w zakresie operacji oraz infrastruktury, które mogą prowadzić do oszczędności energii. Koszt energii zazwyczaj stanowi główną pozycję na liście wydatków operacyjnych w oczyszczalniach ścieków (Guerrini i in., 2017).

Według European Benchmarking Cooperation (2016) średnie zużycie energii elektrycznej na oczyszczanie ścieków wynosiło 33,4 kWh/RLM. Raport WssTP (2011) przedstawia wartości zużycia energii w Europie na oczyszczalniach ścieków metodą osadu czynnego na poziomie 0,15-0,7 kWh/m³. Średnie zużycie energii w Niemczech, Wielkiej Brytanii, Holandii i Stanach Zjednoczonych wynosi odpowiednio 0,67, 0,64, 0,47 i 0,45 kWh/m³, a dla Włoch zmierzono wartości między 0,40 a 0,70 kWh/m³ w zależności od rodzaju zakładu (Global Water Research Coalition, 2010; Cantwell i in., 2010).

Niniejszy raport opisuje strategię, która w przypadku wdrożenia jej przez kierowników i operatorów, może znacznie ograniczyć zużycie energii w oczyszczalniach ścieków. Identyfikuje on możliwości występujące na różnych etapach pracy oczyszczalni ścieków, ze szczególnym uwzględnieniem głównej linii technologicznej (pierwszego, drugiego i trzeciego stopnia oczyszczania), aby pomóc w stopniowym zwiększaniu efektywności energetycznej, głównie poprzez optymalizację istniejących procesów technologicznych.

2. Strategia poprawy bilansu energetycznego w oczyszczalniach ścieków

Ciągła poprawa wydajności energetycznej wymaga ustanowienia skutecznych praktyk zarządzania energią i procesów wsparcia dla programu energetycznego. Każda organizacja, niezależnie od wielkości, funkcji lub misji, może opracować skuteczny program energetyczny, jeśli jest gotowa do zaangażowania się w takie przedsięwzięcie.

Niniejsze wytyczne dotyczące zarządzania energią mogą pomóc organizacji w poprawie jej efektywności energetycznej i ekonomicznej.

KROK 1: Zaangażowanie w poprawę efektywności energetycznej

Bez względu na wielkość i rodzaj organizacji, wspólnym mianownikiem dla skutecznego zarządzania energią jest zaangażowanie. Organizacje, które dostrzegają korzyści ekonomiczne z lepszego zarządzania energią nieustannie dążą do poprawy swojej efektywności energetycznej. Ich sukces opiera się na regularnej ocenie efektywności energetycznej zakładu i wdrażaniu kroków mających na celu jej zwiększenie.

W celu ustanowienia programu energetycznego, kierownicy powinni utworzyć dedykowany zespół ds. energii z liderem i ustanowić politykę energetyczną.

Kluczowe obowiązki lidera obejmują:

- koordynowanie i kierowanie ogólnym programem energetycznym,
- zwiększenie widoczności zarządzania energią w ramach organizacji,
- opracowanie Polityki Energetycznej,
- ocenę potencjalnej wartości wynikającej z ulepszanego zarządzania energią,
- utworzenie i kierowanie zespołem ds. energii,
- pozyskanie wystarczających środków na wdrożenie strategicznego zarządzania energią,
- zadbanie o odpowiedzialność i zaangażowanie ze strony kluczowych części organizacji,
- identyfikacja możliwości poprawy i zapewnienie wdrożenia (w tym szkolenia personelu),
- mierzenie, śledzenie, ocenianie i przekazywanie wyników,
- uzyskanie uznania za osiągnięcia.

Zespół ds. energii powinien realizować działania związane z zarządzaniem energią w różnych częściach organizacji i zapewniać wdrożenie najlepszych praktyk. Oprócz planowania i wdrażania konkretnych ulepszeń, zespół powinien mierzyć i monitorować efektywność energetyczną oraz komunikować się z kierownictwem, pracownikami i innymi interesariuszami.

KROK 1 obejmuje również Politykę Energetyczną, która stanowi podstawę skutecznego zarządzania energią. Powinna ona wyrażać zaangażowanie organizacji w poprawie wydajności energetycznej biorąc pod uwagę pracowników, udziałowców, społeczność i inne zainteresowane strony.

Polityka Energetyczna powinna:

- Określać cel — wyraźny, wymierny cel, który odzwierciedla zaangażowanie, kulturę i priorytety organizacji.
- Nakreślać odpowiedzialność — ustanowić łańcuch dowodzenia, zdefiniować role w organizacji oraz zapewnić personelowi uprawnienia służące wdrożeniu planu zarządzania energią.
- Zapewnić ciągłe doskonalenie — Uwzględniać postanowienia dotyczące oceny i aktualizacji polityki w celu odzwierciedlenia zmieniających się potrzeb i priorytetów.
- Promować cele — zapewnić kontekst do wyznaczania celów wydajności poprzez połączenie celów energetycznych z ogólnymi celami finansowymi i środowiskowymi organizacji.

KROK 2: Ocena efektywności energetycznej zakładu

Zrozumienie obecnego i przeszłego zużycia energii jest ważne dla identyfikacji możliwości poprawy efektywności energetycznej i uzyskania korzyści finansowych.

Określenie czynności i operacji, które zużywają najwięcej energii lub są nieefektywne. Zespół ds. energii i operatorzy zakładu mogą wykorzystywać informacje z audytu energetycznego do zidentyfikowania najbardziej energochłonnych i/lub nieefektywnych działań oraz operacji w zakładzie. Krok ten może wymagać porównania z wydajnością znamionową wskazaną na tabliczkach znamionowych urządzeń lub do porównania z podobnymi modelami urządzeń w celu poznania typowego zużycia energii. Ocena wydajności jest okresowym procesem oceny zużycia energii dla wszystkich głównych zakładów i funkcji w organizacji oraz wyznaczenia punktu odniesienia dla pomiaru przyszłych wyników działań związanych z efektywnością.

Ocena efektywności energetycznej wymaga dobrych informacji na temat tego, jak, kiedy i gdzie wykorzystywana jest energia. Zbieranie i monitorowanie tych informacji jest niezbędne do ustalenia wartości bazowych i zarządzania zużyciem energii.

Analiza danych w celu określenia trendów w zużyciu energii może pomóc organizacji w lepszym zrozumieniu czynników wpływających na efektywność energetyczną i zidentyfikowaniu kroków zorientowanych na zmniejszenie zużycia energii.

Audyty energetyczne są kompleksowymi przeglądami prowadzonymi przez specjalistów i/lub inżynierów zajmujących się energią, którzy oceniają faktyczne działanie systemów i sprzętu względem ich projektowego poziomu wydajności lub najlepszej dostępnej technologii. Różnica między nimi stanowi potencjalne oszczędności w zakresie energii.

Główne kroki przy przeprowadzaniu ocen technicznych i audytów są następujące:

- zbudować zespół ekspertów,
- zaplanować i opracować strategię,
- stworzyć raport końcowy.

Istnieje wiele sposobów analizy danych w zależności od potrzeb organizacji. Kluczowe aspekty obejmują:

- Gromadzenie i zarządzanie danymi
 - Zbieranie i monitorowanie danych — zbieranie informacji o zużyciu energii i dokumentowanie danych w czasie.
- Ustalanie wartości bazowych i analiza porównawcza
 - Ustalenie wartości bazowych — określenie punktu początkowego względem którego należy mierzyć postęp.
 - Analiza porównawcza (benchmarking) — porównanie wydajności energetycznej swoich urządzeń z urządzeniami z podobnych zakładów i konkurencją, a z biegiem czasu określenie priorytetów dla urządzeń, na których należy się skoncentrować w celu uzyskania poprawy.
- Analizę i ocenę
 - Analizowanie — zrozumienie swoich wzorców i trendów zużycia energii.
 - Oceny techniczne i audyty — Ocena wydajności operacyjnej systemów i sprzętu w zakładzie w celu określenia potencjału poprawy.

Ocena wydajności energetycznej pomaga:

- Skategoryzować bieżące zużycie energii według rodzaju działu, obiektu, linii produktów, itd.
- Zidentyfikować wydajne urządzenia w celu rozpoznawania i wyszukania powtarzalnych praktyk.
- Nadać priorytet dla słabszych urządzeń do celów natychmiastowej poprawy.
- Zrozumieć udział wydatków energetycznych w kosztach operacyjnych.
- Opracować historyczną perspektywę i kontekst dla przyszłych działań i decyzji.
- Ustalić punkty odniesienia dla pomiaru i nagradzanie dobrych wyników.

KROK 3: Ustalenie celu

Na podstawie wyników ocen energetycznych i audytów Zespół ds. energii powinien zidentyfikować, ocenić i ustalić priorytety dla potencjalnych projektów i działań związanych z ulepszeniami w zakresie energii. Zespół może sporządzić listę wszystkich projektów, które można wdrożyć w celu zwiększenia wydajności energetycznej. Projekty te mogą obejmować zmiany operacyjne lub modernizację urządzeń (np. wymiana pompy).

Postawione cele napędzają działania związane z zarządzaniem energią i promują ciągłe doskonalenie. Ustalanie jasnych i mierzalnych celów ma kluczowe znaczenie dla zrozumienia wyznaczonych osiągnięć, opracowania skutecznych strategii i osiągnięcia korzyści ekonomicznych.

Dobrze określone cele wspomagają bieżące podejmowanie decyzji i są podstawą dla monitorowania i mierzenia postępu. Komunikacja i ustalanie celów motywują pracowników do wspierania działań związanych z zarządzaniem energią w całej organizacji.

Aby opracować skuteczne cele należy:

- określić zakres — zidentyfikować parametry organizacyjne i czasowe dla celów,
- oszacować potencjał dla poprawy — dokonać przeglądu poziomów bazowych, wykonać analizę porównawczą dla określenia potencjału i kolejności usprawnień oraz przeprowadzić oceny techniczne i audyty. Przykłady kryteriów, które można zastosować przy ustalaniu rankingu priorytetowych działań, to chociażby: koszty kapitałowe, koszty utrzymania, potencjał redukcji zużycia energii, wymagana konserwacja, istniejąca potrzeba modernizacji sprzętu, zwrot z inwestycji, wymogi prawne, łatwość wdrożenia.
- ustalić cele — stworzyć i wyrazić jasne, mierzalne cele wraz z datami docelowymi dla całej organizacji, zakładów i innych jednostek.

Ustalanie celów pomaga w następującym zakresie:

- wdrożeniu wizji doskonalenia w ramach całej organizacji,
 - mierzeniu sukcesów programu zarządzania energią,
 - pomocy Zespołowi ds. energii w identyfikacji postępów i niepowodzeń na poziomie zakładu,
 - tworzeniu poczucia celu i motywowaniu pracowników,
 - wykazaniu zaangażowania w zmniejszanie wpływu na środowisko,
 - tworzeniu harmonogramów dla działań modernizacyjnych i identyfikowaniu kamieni milowych.
- oszacować potencjał dla poprawy wyznaczonych celów — ważne jest, aby mieć wiedzę na temat tego, jaki poziom wydajności jest osiągalny i jakie zasoby są potrzebne.

Istnieje wiele sposobów na określenie potencjału. Wybór metody zależy od wielu czynników, takich jak: dostępne zasoby, czas, rodzaj zużycia energii w zakładzie oraz sposób organizacji programu energetycznego.

Metody stosowane przez wiodące programy energetyczne obejmują:

- ✓ Ocenę danych wydajności - ocena wydajności i ustalenie poziomów bazowych powinny pomóc w zidentyfikowaniu różnic w zużyciu energii między podobnymi zakładami, zapewniając ograniczony, punktowy wgląd w potencjalną poprawę. Dane o wydajności obejmujące dłuższy okres czasu będą bardziej przydatne dla zrozumienia możliwości poprawy.
- ✓ Analiza porównawcza - analiza porównawcza stanowi punkt odniesienia do oceny możliwości, gdy dostępne są wystarczające dane, aby pokazać trendy w zużyciu energii.
- ✓ Ocena wcześniejszych projektów i najlepszych praktyk - ocena wcześniejszych projektów i najlepszych praktyk w obiektach o wyższej wydajności w celu określenia możliwości przeniesienia wspomnianych praktyk do innych części organizacji.
- ✓ Przegląd ocen technicznych i audytów - zidentyfikowanie możliwości zmniejszenia zużycia energii stwierdzonych podczas ocen technicznych i audytów w obiektach o gorszych wynikach służące jako mocna podstawa do określania potencjału poprawy.
- ✓ Porównywanie celów podobnych organizacji - sprawdzenie celów wydajności innych organizacji może pomóc w nakierowaniu i poinformowaniu podmiotu o potencjale jego własnej organizacji.
- ✓ Powiązanie z celami strategicznymi dla całej organizacji - zarówno strategicznymi, jak i operacyjnymi, takimi jak redukcja kosztów, może również pomóc w procesie ustalania celów.

KROK 4: Utworzenie planu działania

Organizacje odnoszące sukcesy korzystają ze szczegółowego planu działania, który pozwala zapewnić systematyczny proces wdrażania środków ukierunkowanych na efektywność energetyczną. W przeciwieństwie do polityki energetycznej, plan działania jest regularnie aktualizowany, najczęściej raz do roku, w celu odzwierciedlenia ostatnich osiągnięć, zmian w efektywności i w priorytetach.

Chociaż zakres i skala planu działania często zależą od organizacji, poniższe kroki stanowią punkt wyjścia do jego stworzenia:

- Określić techniczne kroki i cele
 - Opracować cele wydajności – dla każdego obiektu, działu i działania organizacji w celu śledzenia postępów w osiągnięciu celów.
 - Ustalić harmonogramy – dla działań, co obejmuje regularne spotkania kluczowych pracowników służące ocenie postępów, daty ukończenia, kamienie milowe i oczekiwane rezultaty.
 - Ustanowić system monitorowania – stworzyć system do śledzenia i monitorowania postępu w działaniach. System ten powinien monitorować i mierzyć zużycie energii oraz działania związane z projektem/programem.
- Określić role i zasoby

Współpracować z Zespołem ds. energii w celu przekazania planu działania wszystkim obszarom organizacji. Określić role wewnętrzne. Stwierdzić, kto powinien być zaangażowany i jakie będą obowiązki indywidualnych osób.

KROK 5: Wdrożenie planu działania

Uzyskanie wsparcia i współpracy kluczowych osób na różnych poziomach organizacji jest ważnym czynnikiem dla pomyślnego wdrożenia planu działania w wielu organizacjach. Ponadto, osiągnięcie celów często zależy od świadomości, zaangażowania i zdolności osób, które będą wdrażać projekty.

Przy wdrażaniu planu działania należy rozważyć następujące kroki:

- Stworzenie planu komunikacji — opracowanie informacji na temat przedmiotowego programu zarządzania energią ukierunkowanych na kluczowych odbiorców.
- Zwiększanie świadomości — budowanie wsparcia na wszystkich poziomach swojej organizacji na rzecz inicjatyw i celów związanych z zarządzaniem energią.

Większość ludzi nie zdaje sobie sprawy z tego, jak ich codzienne czynności i działania w domu oraz pracy wpływają na zużycie energii i środowisko. Zwiększenie ogólnej świadomości może być skutecznym sposobem na uzyskanie większego wsparcia dla inicjatyw energetycznych.

- Budowanie potencjału — można zwiększyć potencjał swoich pracowników poprzez zapewnianie szkoleń, dostępu do informacji, dzielenie się skutecznymi praktykami, procedurami i technologiami oraz wyciągniętymi wnioskami. Inwestowanie w szkolenia i systemy służące do wymiany zakończonych powodzeniem praktyk pomaga zapewnić sukces planu działania poprzez budowanie ogólnej zdolności organizacyjnej. Wiele organizacji przekonało się, że pracownicy posiadający wiedzę są bardziej skłonni do wnoszenia pomysłów, prawidłowego operowania sprzętem i przestrzegania procedur, co pomaga w zagwarantowaniu, że inwestycje kapitałowe w usprawnienia energetyczne zrealizują w pełni swój potencjał.
- Motywowanie — należy zachęcić pracowników do poprawy efektywności energetycznej w celu osiągnięcia celów. Oferowanie zachęt do zarządzania energią jest jednym ze sposobów jaki wiele organizacji wzbudza zainteresowanie inicjatywami energetycznymi i buduje poczucie odpowiedzialności wśród pracowników. Przykłady tego, w jaki sposób organizacje motywują pracowników obejmują:
 - Wewnętrzna konkurencja — wykorzystanie arkuszy monitorowania, kart wyników itp. do porównywania osiągnięć podobnych obiektów i zwiększenia poczucia rywalizacji.
 - Uznanie — Wyróżnianie i nagradzanie osiągnięć osób, działów i obiektów.
 - Premie finansowe i nagrody — Oferowanie premii pieniężnych i innych nagród w przypadku spełnienia celów.
 - Odpowiedzialność za środowisko — Wykorzystanie komunikatów o środowisku do promowania poczucia odpowiedzialności za środowisko oraz odpowiedzialności społecznej.
 - Odpowiedzialność finansowa — Użycie komunikatów o treści finansowej do promowania poczucia odpowiedzialności finansowej.
 - Standardy wydajności — Powiązanie standardów wydajności pracowników z celami energetycznymi.
- Śledzenie i monitorowanie — Wykorzystanie systemu śledzenia opracowanego jako część planu działania do regularnego śledzenia i monitorowania postępów. System monitorowania to sposób na nadzór nad działaniami w ramach programu energetycznego. System powinien być scentralizowany i dostępny dla wszystkich w celu umożliwienia oceny postępów w osiąganiu ustalonych celów, kamieni milowych i terminów. Utrzymanie systemu monitorowania umożliwia ocenę niezbędnych kroków, działań naprawczych

i identyfikację sukcesów. Okresowy przegląd działań nakreślonych w planie działania ma kluczowe znaczenie dla osiągnięcia celów z zakresu efektywności energetycznej. W celu śledzenia i monitorowania należy wykonywać regularne aktualizacje, przeprowadzać okresowe oceny, identyfikować niezbędne działania naprawcze.

KROK 6: Ocena postępu

Ocena postępów obejmuje formalny przegląd tak danych dotyczących zużycia energii, jak i działań przeprowadzonych w ramach planu działania w odniesieniu do celów wydajności. Wyniki oceny i informacje zebrane podczas formalnego procesu oceny są wykorzystywane przez wiele organizacji do tworzenia nowych planów działania, określania najlepszych praktyk i wyznaczania nowych celów wydajności.

Kluczowe kroki obejmują:

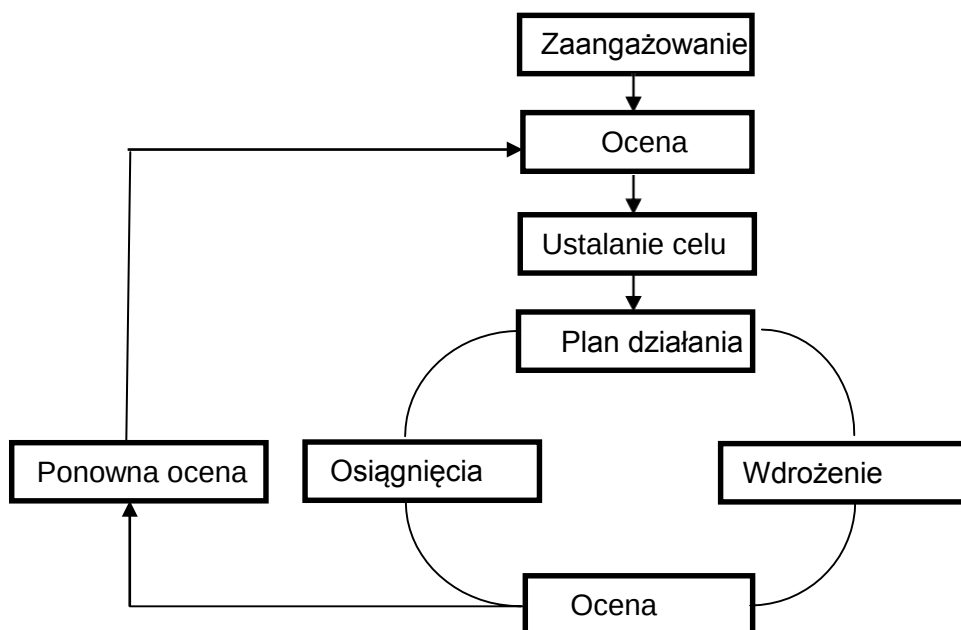
- Pomiar wyników – Porównanie aktualnej wydajności z ustalonymi celami.
- Przegląd planu działań – zrozumienie, co sprawdziło się, a co nie, w celu określenia najlepszych praktyk.

Regularna ocena efektywności energetycznej i skuteczności inicjatyw z zakresu zarządzania energią pozwala kierownikom ds. zarządzania energią:

- mierzyć skuteczność realizowanych projektów i programów,
- podejmować świadome decyzje o przyszłych projektach energetycznych,
- nagradzać osoby i zespoły za osiągnięcia,
- dokumentować dodatkowe szanse na oszczędności, a także niemierzalne korzyści, które można wykorzystać przy przyszłych inicjatywach.

KROK 7: Rozpoznanie osiągnięć

- Zapewnianie i uzyskiwanie uznania z tytułu osiągnięć w zarządzaniu energią jest sprawdzonym krokiem w utrzymaniu tempa i wsparcia dla programów poprawy energetycznej.
- Zapewnienie uznania tym, którzy pomogli organizacji w osiągnięciu tych wyników, motywuje pracowników oraz pozytywnie wpływa na program zarządzania energią.
- Uzyskiwanie uznania z zewnątrz potwierdza znaczenie programu zarządzania energią wewnętrznym, jak i zewnętrznym interesariuszom oraz zapewnia pozytywny wizerunek całej organizacji.
- Kluczowe kroki w okazywaniu i zdobywaniu uznania obejmują:
 - Zapewnienie wewnętrznego uznania — dla osób, zespołów i obiektów w organizacji.
 - Otrzymywanie zewnętrznego uznania — od agencji rządowych, mediów i innych organizacji zewnętrznych, które nagradzają osiągnięcia.



Rysunek 1. Wytyczne dla strategii zarządzania energią

3. Odzysk energii

Odzyskiwanie energii nie stanowi podstawowego elementu przedmiotowego raportu, ale ze względu na to, że jest ważnym aspektem efektywności energetycznej w oczyszczalniach ścieków, zostało w skrócie opisane.

3.1. Produkcja biogazu

Fermentacja beztlenowa (AD) to dobrze znana technologia odzyskiwania energii z osadów ściekowych. Jest to wieloetapowy proces biologiczny (hydroliza, octanogeneza, acetogeneza i metanogeneza), w których mikroorganizmy rozkładają biodegradowalny materiał bez udziału tlenu. Dwa podstawowe produkty fermentacji beztlenowej to osad przefermentowany i biogaz, który w ujęciu objętościowym zawiera 60-70% CH₄, od 20 do 30% CO₂ i nieznaczną ilość N₂, H₂, H₂S, pary wodnej i innych gazów. Biogaz wytwarzany w komorze fermentacyjnej jest głównym źródłem energii w oczyszczalni ścieków. Biogaz o zawartości metanu ok. 65% ma potencjał energetyczny na poziomie 6,5 kWh/m³.

Oczyszczalnie ścieków, które prowadzą proces fermentacji osadów zużywają około 40% mniej energii netto niż oczyszczalnie ścieków bez fermentacji beztlenowej. Efektywność produkcji biogazu z osadów może wahać się w szerokim zakresie, zależnie od stężenia zawiesiny organicznej we wsadzie do reaktora, aktywności biologicznej w bioreaktorze oraz parametrów procesowych. Typowe wartości produkcji biogazu wahają się od 0,75 do 1,12 m³/kg zawiesiny organicznej, podczas gdy wartość opałowa biogazu wynosi w przybliżeniu 22,4 kJ/m³. Biogaz może być wykorzystany do ogrzewania i/lub wytwarzania energii elektrycznej. Technologie kogeneracji (CHP), wytwarzające jednocześnie energię elektryczną i ciepło z biogazu, są najpowszechniej przyjętym rozwiązaniem w istniejących samowystarczalnych energetycznie oczyszczalniach ścieków.

Jak wskazują istniejące dane do około 15% zapotrzebowania na energię w oczyszczalniach ścieków można zaspokoić poprzez produkcję biogazu i jego wykorzystanie w układach kogeneracyjnych (Brandt i in., 2010).

Poprawa efektywności fermentacji beztlenowej jest powszechną praktyką służącą zwiększeniu samowystarczalności energetycznej oczyszczalni ścieków. Optymalizacja procesu fermentacji beztlenowej obejmuje wstępną obróbkę osadów mającą na celu poprawę ich podatności na biodegradację. W zależności od zastosowanej metody kondycjonowania procesy te można podzielić na mechaniczne, termiczne, chemiczne i biologiczne oraz łączone. Najpopularniejszymi technologiami dostępnymi na rynku są wstępne metody obróbki mechanicznej i termicznej. Technologie oparte na hydrolizie termicznej (THP), takie jak Cambi, Biothelys i Exelys, są najbardziej rozpowszechnionymi technologiami służącymi poprawie efektywności fermentacji beztlenowej w oczyszczalniach ścieków. Na przykład, w pierwszej oczyszczalni ścieków w Ameryce Północnej, która zastosowała technologię CAMBI (Waszyngton DC, USA), zaobserwowano o 50% wyższą produkcję biogazu przy krótszym czasie zatrzymania w reaktorze (HRT =12-15 dni).

Inną opcją jest ko-fermentacja osadów ściekowych z innymi ulegającymi biodegradacji odpadami, prowadząca do szeregu korzyści ekonomicznych i środowiskowych. Ko-fermentacja odpadów organicznych w połączeniu z osadami ściekowymi nie tylko umożliwia oczyszczalniom ścieków osiągnięcie neutralności energetycznej, ale również ogranicza koszty gospodarki odpadami komunalnymi i przemysłowymi. Ko-fermentacja osadów ściekowych z sześcioma różnymi grupami odpadów (np. odpadami spożywczymi, odpadami bogatymi w laktozę, tłuszczami) jest realizowana w Mossberg (Niemcy) od 10 lat. Ze względu na wysoki dodatek innych odpadów, produkcja ciepła i energii jest znacznie wyższa niż zapotrzebowanie wewnętrzne oczyszczalni ścieków. Nadmiar energii wytwarzanej w obiekcie w Mossberg jest wprowadzany do sieci, a nadmiar ciepła wykorzystywany do suszenia osadu odwodnionego z innych oczyszczalni.

Optymalizacja parametrów procesów fermentacji beztlenowej, takich jak obciążenie osadem, czas retencji osadu, a także obciążenie reaktora ładunkiem zanieczyszczeń organicznych, mogą również być kluczem do samowystarczalności energetycznej oczyszczalni ścieków.

Innym sposobem na zwiększenie produkcji biogazu jest zastosowanie fermentacji termofilowej zamiast mezofilowej (opisanej w rozdziale 5.1).

Podsumowując, wydajność energetyczną fermentacji można zwiększyć na kilka sposobów: (i) zwiększenie stężenia związków organicznych w bioreaktorach beztlenowych (ChZT) poprzez wstępne kondycjonowanie; (ii) wstępną obróbkę termiczną osadów; lub (iii) fermentację termofilową. Ponadto połączenie dwóch dowolnych opcji może zwiększyć efektywność energetyczną do około 50%.

Jeszcze wyższy poziom produkcji energii elektrycznej można uzyskać łącząc na oczyszczalni następujące technologie i procesy: (i) poprawę wydajności pracy osadnika wstępnego w celu wprowadzenia większej ilości związków organicznych (ChZT) do komory fermentacyjnej; (ii) wstępną obróbkę osadu w celu zwiększenia stopnia rozkładu zawiesiny organicznej w komorze fermentacji mezofilnej do 60%; (iii) wprowadzenie fermentacji termofilowej w celu osiągnięcia ~ 60% rozkładu zawiesiny organicznej; (iv) wysoką sprawność generatorów prądu ($\geq 40\%$); (v) Ko-fermentację, np. dodanie tłuszczów do komór fermentacyjnych (Cao, 2001).

3.2. Pompy ciepła

Ścieki oczyszczone wypływające z miejskich oczyszczalni ścieków stanowią obiecujące źródło ciepła do wykorzystania w pompach ciepła. Ciepło z pomp może być wykorzystane do ogrzewania budynków mieszkalnych, socjalnych i administracyjnych zakładu i/lub sąsiedniej

infrastruktury. Pompy ciepła wykorzystujące ścieki są szeroko stosowane w Europie, USA, Japonii, Korei Południowej i Chinach (Kalnin 1994). Są niezawodnym i ekonomicznym źródłem ciepła.

W porównaniu do innych tradycyjnych źródeł ciepła dla pomp ciepła, takich jak wody gruntowe, źródła geotermalne, powietrze zewnętrzne, ścieki wykazują stosunkowo wysokie temperatury w sezonie grzewczym (zima). Temperatura ścieków w europejskich krajach o zimnym klimacie w okresie zimowym mieści się zazwyczaj w przedziale 10–15°C. Dlatego też ścieki stanowią idealną matrycę dla wykorzystania ciepła. W okresie letnim, gdy temperatura może przekroczyć 20°C, ścieki mogą być wykorzystywane do wytwarzania zimna do klimatyzacji.

Różnice w ilości ścieków są drugą charakterystyczną cechą. W typowych połączonych układach kanalizacyjnych stosunek między minimalną ilością w nocy podczas suchej pogody i maksymalną podczas okresu opadów wynosi do 10. Dlatego należy to wziąć pod uwagę przy planowaniu i wymiarowaniu energetycznych (cieplnych) instalacji ściekowych.

Zwykle jako podstawę brana jest średnia dzienna wartość przepływu podczas pory suchej oraz uwzględniany jest współczynnik redukcji dla codziennych fluktuacji. W przypadku wykorzystania ciepła ze ścieków do ogrzewania budynków trzeba pamiętać o zmianach w przepływie ścieków. Retencja stanowi zatem warunek wstępny dla odzyskiwania ciepła.

Często budowa nowego układu oczyszczania ścieków lub modernizacja istniejącego zakładu o pompę ciepła może być zrealizowana bez istotnej modernizacji oczyszczalni ścieków. Dodanie pompy ciepła do ścieków oczyszczonych wypływających z zakładu nie ma wpływu na pracę oczyszczalni ścieków.

Wydajność pompy ciepła zależy od różnicy temperatur pomiędzy źródłem ciepła a odbiorcą oraz od temperatury źródła ciepła. W okresie letnim temperatura ścieków jest wysoka. W rezultacie wydajność konwersji jest wysoka. W takim przypadku pompa ciepła może podgrzać wodę przy niskim koszcie energii. W okresie zimowym, temperatura ścieków jest niższa, a zużycie energii znacznie wzrasta. Pompy ciepła w oczyszczalniach ścieków zmniejszają emisję ciepła do środowiska.

Wykorzystanie ciepła ze ścieków wykorzystywane jest w Norwegii od końca lat osiemdziesiątych. OŚ HIAS w Hamar jest jednym z wiodących w kraju zakładów z odzyskiwaniem energii za pomocą pompy ciepła, z ponad 30-letnim doświadczeniem. W 2010 roku system przeszedł modernizację. Zakłady Wodno-Kanalizacyjne w Oslo (VAV) również od wielu lat dysponują instalacją pompy ciepła z surowych ścieków doprowadzanych do największej oczyszczalni ścieków zlokalizowanej poza miastem.

Systemy pomp ciepła są w stanie zapewnić 3 MW mocy grzewczej. Pompa ciepła jest używana tylko w sezonie zimowym, gdy konieczne jest ogrzewanie. Roczne dostawy energii z systemu pomp ciepła wynoszą ok. 40 000 MWh, podczas gdy zużycie przez pompy ciepła wynosi 6 000 MWh na rok (Frijns, 2011).

3.3. Odzysk energii z różnych strumieni o wysokiej temperaturze za pomocą wymienników ciepła

Wszystkie oczyszczalnie ścieków wykorzystujące wysokotemperaturowe procesy obróbki osadów (tj. fermentacja beztlenowa, zarówno termofilowa, jak i mezofilowa, hydroliza termiczna, suszenie termiczne) powinny rozważyć możliwość zastosowania wymienników ciepła do odzyskiwania energii ze wszystkich strumieni (osadów, wody odpadowej,

kondensatu, itp.) o wysokiej temperaturze. Odzyskaną energię można wykorzystać do podgrzewania wody do różnych celów lub do ogrzewania surowych osadów podawanych procesowi obróbki wysokotemperaturowej.

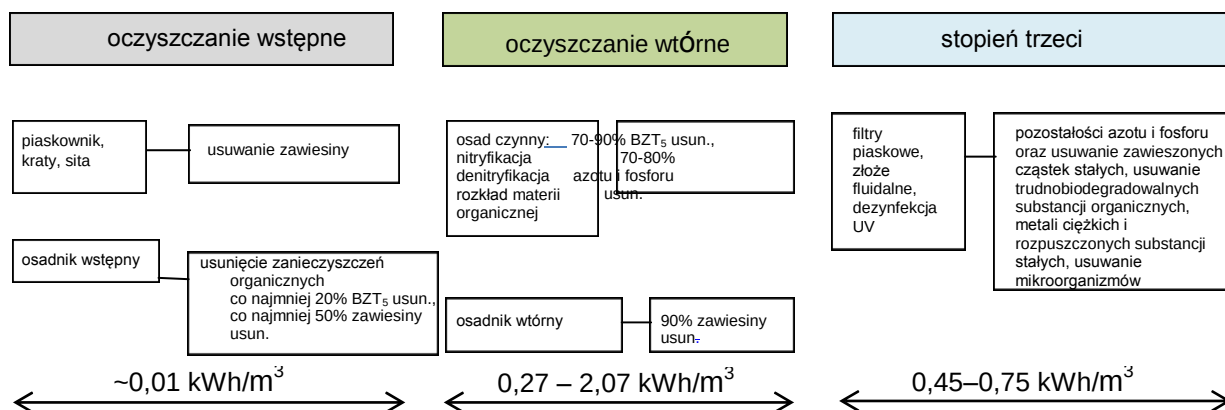
4. Poprawa efektywności energetycznej

Tradycyjny proces oczyszczania ścieków komunalnych obejmuje trzy główne stopnie oczyszczania: pierwszy (usuwanie zawieszonych cząstek stałych), drugi (usuwanie zanieczyszczeń organicznych, usuwanie związków azotu i fosforu) i trzeci (doczyszczanie i zaawansowane usuwanie związków azotu). Pierwszy stopień oczyszczania obejmuje odbiór ścieków i pompowanie, usuwanie skrutek, usuwanie piasku (alternatywnie nazywane obróbką wstępną, podczyszczaniem) i sedymentację w osadnikach wstępnych. Procesy te wykazują niskie zapotrzebowanie na energię (z wyjątkiem pompowania ścieków). Wskazane w literaturze dane dotyczące zużycia energii w pierwszym stopniu znacznie się różnią. Zużycie energii na pompowanie surowych ścieków zależy głównie od wysokości pompowania i wynosi od 0,02 do 0,1 kWh/m³ w Kanadzie, od 0,045 do 0,14 kWh/m³ na Węgrzech i od 0,1 do 0,37 kWh/m³ w Australii (Bodik i Kubaska, 2013).

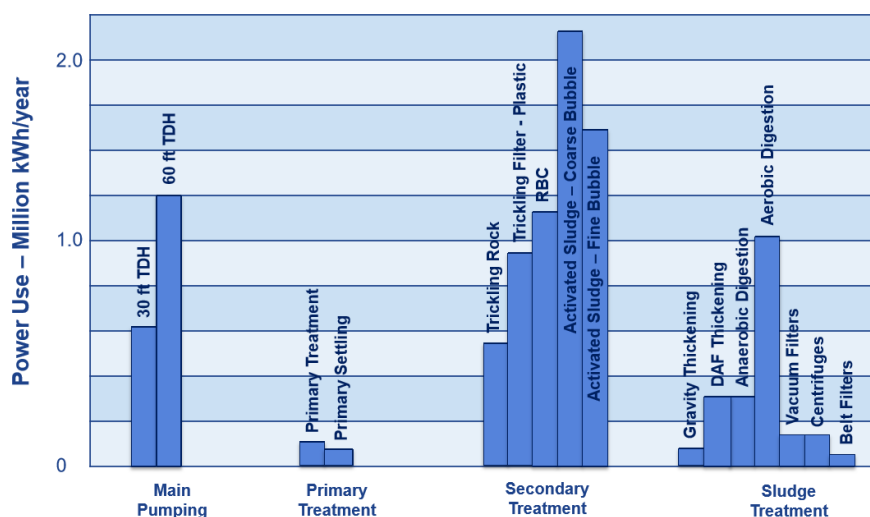
Proces napowietrzania w drugim stopniu oczyszczania charakteryzuje się najwyższym zużyciem energii w oczyszczalniach ścieków. Oprócz napowietrzania, bardzo ważnymi konsumentami energii w tym stopniu są również procesy: mieszania osadu czynnego w zbiornikach denitryfikacyjnych i recyrkulacja (pompowanie) osadu. Konwencjonalny proces osadu czynnego zużywa średnio 0,46 kWh/m³ (Australia), 0,269 kWh/m³ (Chiny), 0,33-0,60 kWh/m³ (USA) i 0,30-1,89 kWh/m³ (Japonia) (Bodik i Kubaska, 2013). Z drugiej strony, biologiczne rowy utleniania jako część drugiego stopnia mają wyższe zapotrzebowanie na energię, od 0,5 do 1,0 kWh/m³ (Australia), 0,302 kWh/m³ (Chiny) lub 0,43-2,07 kWh/m³ (Japonia) (Mizuta i Shimada M, 2010; Plappally i Lienhard, 2012; Water Environment Federation, 2009, Yang i in., 2010).

Oczyszczanie ścieków trzeciego stopnia (zaawansowane) zużywa stosunkowo dużo energii dzięki intensyfikacji procesów usuwania składników biogennych (nitryfikacja, denitryfikacja i biologiczne usuwanie fosforu) lub innym energochłonnym procesom, np. dezynfekcji UV. Na przykład, w Japonii zaawansowane procesy oczyszczania ścieków są bardzo energochłonne, z zapotrzebowaniem na energię na poziomie od 0,39 do 3,74 kWh/m³. W USA trzeci stopień oczyszczania pochłania średnio 0,43 kWh/m³. Wartość ta jest zbliżona do zużycia energii podanego w literaturze dla Tajwanu (0,41 kWh/m³), Nowej Zelandii (0,49 kWh/m³) oraz na Węgrzech (0,45-0,75 kWh/m³).

Rysunki 2, 3, 4 i 5 przedstawiają odpowiednio profile zużycia energii dla procesów 3-stopniowych w kWh/m³, procesów jednostkowych w kWh/rok, w kWh/RLM rok⁻¹ i kWh/dzień dla najpowszechniejszych oczyszczalni ścieków (z osadem czynnym).

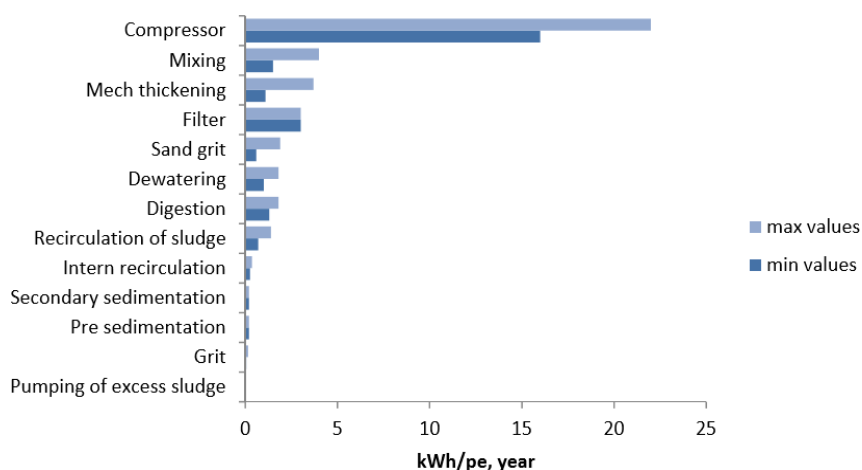


Rysunek 2. Ogólny schemat procesów oczyszczania ścieków i zużycia energii.



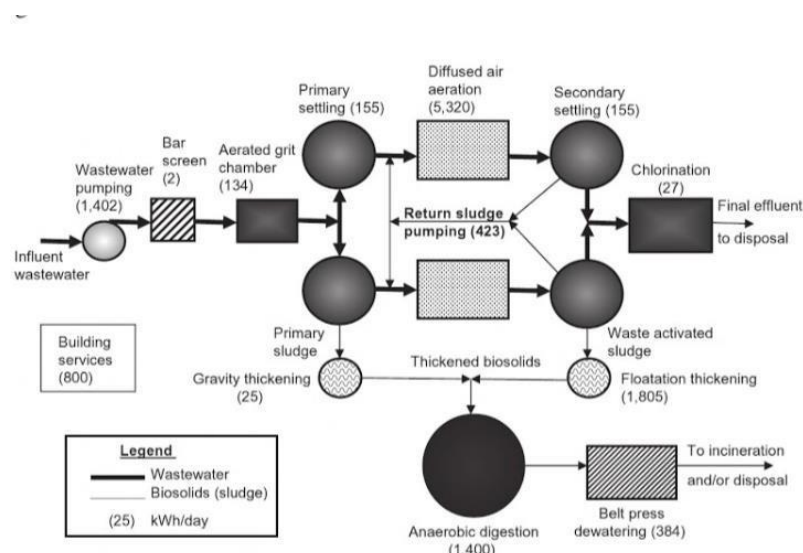
Rysunek 3. Typowy profil zużycia energii (dla 10 mgd = 37 854,1 m³/dzień). Źródło: Energy Conservation in Water and Wastewater Facilities - Manual of Practice Nr 32. WEF, McGraw-Hill Professional, 2009.

Primary treatment – podczyszczanie/oczyszczanie wstępne, primary settling – osadnik wstępny, trickling filters – złożo biologiczne zraszane, RBC – rotacyjne złożo biologiczne, activated sludge – osad czynny, coarse-bubble diffuser- dyfuzor grubopęcherzykowy, fine-bubble diffuser- dyfuzor drobnopęcherzykowy, gravity thickening – zagęszczacz garwiatyczny, DAF thickening – separator flotacyjny drobnopęcherzykowy, anaerobic digestion – fermentacja beztlenowa, aerobic digestion – stabilizacja tlenowa, vacuum filters – filtr próżniowy, centrifuge – wirówka, belt filters –prasa taśmowa.



Rysunek 4. Zużycie energii według procesu (kWh/RLM/rok) (Wennerholm, 2014).

compresor – kompresor, mixing – mieszanie, mech thickening – zagęszczanie mechaniczne, filter – filtr, sand grit – piaskownik (usuwanie piasku), dewatering – odwodnienie, digestion, fermentacja, recirculation of sludge – recyrkulacja osadu, intern recirculation – recyrkulacja wewnętrzna, secondary sedimentation – osadnik wtórny, pre sedimentation – osadnik wstępny, grit – usuwanie żwiru, pumping of excess sludge – pompowanie osadu nadmiernego.



Rysunek 5. Dzielne zużycie energii elektrycznej dla obiektu 37 854,1 m³/d, (Cao, 2001).

Tabela 1 przedstawia zużycie energii elektrycznej przez poszczególne elementy, rozkład energii i jednostkowe zużycie energii poszczególnych elementów obliczone na podstawie danych z rysunku 5.

Tabela 1. Zużycie energii elektrycznej i indywidualne zużycie energii elektrycznej przez poszczególne elementy (Cao, 2001).

Nr	Jednostka / urządzenie	Pobór prądu kWh/dzień	Rozkład łącznego zużycia energii, %	Indywidualne zużycie energii elektrycznej kWh/m ³
1	Pompa podnosząca	1402	8,2	0,04
2	Krata	2	0,01	nieistotne
3	Piaskownik	134	0,8	nieistotne
4	Osadnik wstępny	155	0,9	0,01
5	Napowietrzanie	8766 (5320+3446)1	51,2 (31,1+20)1	0,23 (0,14+0,09) ¹
6	Pompa recyrkulacji osadu (RAS)	508	3,0	0,01

7	Osadnik wtórny	155	0,9	0,01
8	Mieszalnik środków chemicznych	552	3,2	0,01
9	Pompa zasilająca filtry	822	4,8	0,02
10	Filtrowanie	385	2,2	0,01
11	Chlorowanie	27	0,1	nieistotne
12	Zagęszczanie grawitacyjne	25	0,1	nieistotne
13	Zagęszczanie flotacyjne	2022	11,8	0,05
14	Komora fermentacji beztlenowej	1700	10,0	0,05
15	Odwadnianie taśmowe	457	2,7	0,01

¹ liczba poza nawiasami to zużycie energii elektrycznej potrzebne do usunięcia ChZT i nityfikacji, podczas gdy pierwsza i druga liczba w nawiasach są indywidualnym zużyciem elektrycznym odpowiednio dla usuwania ChZT i nityfikacji.

Dane pokazują, że jednostkowe zużycie energii przy napowietrzaniu zarówno dla usuwania ChZT, jak i nityfikacji, wynosi 0,23 kWh/m³, co stanowi 51% całkowitego zużycia energii elektrycznej, oraz 0,14 kWh/m³ wyłącznie z tytułu usuwania ChZT, co stanowi 31% całkowitego zużycia energii.

Rozkład zużycia energii w ciągu oczyszczania ścieków, w tym pompowni wlotowej, procesów oczyszczania i przeróbki osadu wynosi odpowiednio 25, 60 i 15%. Jak pokazano w tabeli 2., procesy oczyszczania ścieków dają największe możliwości poprawy wydajności energetycznej.

Tabela 2. Matryca oszczędności energii w oczyszczaniu ścieków.

	Stopnie oczyszczania ścieków		
	Pompowanie wlotowe	Oczyszczanie ścieków	Obróbka i utylizacja osadów
Zużycie energii w %	25	60	15
pompowanie	X		X
osadnik wstępny		X	
mieszanie/koagulacja		X	
usuwanie biogenów		X	
pompa recyrkulacji osadu (RAS)		X	
zagęszczanie/odwadnianie		X	
fermentacja/ko-fermentacja		X	
suszenie osadu		X	
biogaz / kogeneracja		X	
energia słoneczna		X	
mini turbiny wodne	X		
turbiny wiatrowe			X

Podobny rozkład energii wskazujący na potencjalne oszczędności energii w oczyszczalniach ścieków podaje Parsons i in., 2012 (Tabela 3).

Tabela 3. Rozkład zużycia energii i potencjał dla oszczędności energii w oczyszczalni ścieków z układem osadu czynnego (na podstawie Parsons i in., 2012).

Stopień oczyszczania	Udział w zużyciu energii	Potencjał dla oszczędności energii	Komentarze
Pobór ścieków (pompowanie)	10%	5-10% poprzez modernizację istniejących pomp. Do 30% dzięki lepszej konserwacji i bliższemu dostosowaniu do wielkości obciążenia.	W zależności od udziału w odbiorze grawitacyjnym
Oczyszczanie (napowietrzanie)	55%	20-50% poprzez lepsze dobranie parametrów kontrolnych do standardów wyjściowych, np. poprawa/instalacja systemu sterowania online.	Głównie do napowietrzania ścieków
Obróbka i utylizacja osadów (odwadnianie na wirówkach i prasach i, pompowanie osadu)	35%	30% wydajności energetycznej można osiągnąć poprzez zastosowanie konwencjonalnej fermentacji mezofilowej z kogeneracją. Obróbka wstępna osadów lub fermentacja termofilowa mogą zwiększyć wydajność do 50%. Dalsze zastosowanie zintegrowanych, zaawansowanych procesów kofermentacji, wysoce sprawnej kogeneracji może zwiększyć efektywność energetyczną do 80%.	Energia może być wytwarzana przez fermentację beztlenową osadu

Z uwagi na fakt, że procesy oczyszczania, w tym pierwszy, drugi i trzeci stopień, są największymi konsumentami energii w oczyszczalniach ścieków (Tabele 1-3), niniejszy raport koncentruje się głównie na ich wydajności i zużyciu energii.

4.1. Pompowanie ścieków surowych

Pompowanie ścieków surowych może stanowić do 30% zapotrzebowania na energię w oczyszczaniu ścieków. Pompy ściekowe charakteryzują się wyższym zużyciem energii ze względu na zawarty w ściekach piasek, tkaniny, gruz i inne ciała stałe. Oszczędzanie energii polega na unikaniu pompowania przy częściowym zablokowaniu powyższymi materiałami oraz utrzymanie pomp i systemów pompowania blisko maksymalnej wydajności. Osoby projektujące pompy dobierają ich rozmiary pod kątem wydajnych przepływów w zakresie roboczym, ale prędkości przepływu pompy są znacznie wyższe niż prędkości przepływu w rurach.

Dobłą praktykę w minimalizowaniu strat na wysokości podnoszenia pompy i zapewnianiu wydajnego przepływu do i z pomp, można podsumować w następujący sposób:

- zaprojektowanie studzienek i wlotów zgodnie z najlepszą praktyką;
- utrzymanie krótkich przewodów ssawnych,
- utrzymanie niskich prędkości w przewodach ssawnych; od 1 do 2,5 m/s,
- unikanie sąsiadujących łuków w płaszczyznach prostopadłych; sprzyja to zawirowaniom,

- umiejscowienie pomp nisko w stosunku do poziomu komory ssawnej w celu zmniejszenia strat w nadadtku antykawitacyjnym NPSH (Net Positive Suction Head) i uniknięcia kawitacji,
- zapewnienie zanurzenia punktów ssawnych w celu eliminacji samozasysania i wciągania powietrza,
- nagłe skurcze po stronie ssawnej zwykle nie stanowią problemu pod warunkiem, że krawędzie są zaokrąglone i unika się powstawania wirów,
- zlokalizowanie pompy w sposób umożliwiający łatwy dostęp w celów konserwacji,
- zwiększenie rozmiaru rury poprzez zastosowanie stożka na kołnierzu tłocznym pompy, jeśli to możliwe,
- unikanie nagłego rozprężenia, ponieważ powoduje to niestabilność,
- prędkości tłoczenia na wylocie mogą być wyższe; od 1,5 do 3,5 m/s,
- zastosowanie, w miarę możliwości, zaokrąglonych zakrętów i unikanie ostrych krawędzi przy dużych prędkościach przepływu,
- użycie odpowiednich zaworów do odcinania i izolowania,
- zastosowanie urządzeń do pomiaru przepływu i wysokości podnoszenia pompy.

Ponadto, dobra praktyka projektowa w zakresie energooszczędnego pompowania ścieków powinna obejmować:

- strome nachylenie w studzienkach ssawnych i wlotach w celu uniknięcia osadzania różnych materiałów,
- dostęp i środki do usuwania zanieczyszczeń, osadów i odpadów,
- krótki, prosty i samoodpowietrzający układ dla rur pompowni,
- dobór pompy i łopatek pod kątem najgorszych warunków przepływu,
- lekko zagięte łuki i trójniki oraz brak zaworów, jeśli to możliwe, na rurociągu ssawnym,
- wszelkie nieuniknione ograniczenia na rurociągach zakryte przez pręty lub punkty spustowe,
- w miarę możliwości, zadbanie o możliwość automatycznego płukania wstecznego.

Ostatnia pozycja odnosi się do pomp z wolnym wylotem lub takich, gdzie można wbudować zawory powietrzne na rurach tłocznych, aby po wyłączeniu pompy kierunek przepływu został odwrócony na krótki czas. W wyniku tego dochodzi do przepływu wstecznego, co oczyszcza łopatki z wszelkich tkanin i odprowadza je do komory, co pozwala oczyścić jej podstawę wokół punktu ssawnego pompy.

Działanie układów pomp ściekowych obejmuje również dodatkowe środki. Regularne procedury pomagają w uniknięciu pewnych problemów:

- regularne cykle "napełniania i spuszczenia" w celu przepłukania kanałów ściekowych i komór pomp,
- regularne cykle spuszczenia do poziomu zaciągania powietrza w celu uniknięcia pływających pokładów szumowin,
- kontrole wydajności powinny być wykonywane częściej niż w przypadku pomp wody pitnej.

Ostatni punkt powinien obejmować kontrole ułamanych lub odgiętych łopatek, częściowe zablokowania oraz stan i luzy wokół pierścieni ścieralnych, wszystkie te czynniki mają wpływ na efektywność energetyczną procesu.

Łączny potencjał oszczędności energii na pompach i pompowaniu wynosi od 5 do 30%:

- 5-10% dzięki poprawie pracy istniejących pomp

- 3-7% poprzez przejście na nowe technologie pompowania (technologia pomp jest zaawansowana)
- zyski do 30% są możliwe dzięki poprawie konserwacji i dokładniejszemu dopasowaniu pomp do ich warunków pracy (takich jak używanie napędów o zmiennej prędkości; VSD)

4.2. Oczyszczanie wstępne

Pierwszy stopień oczyszczania służy usunięciu zawieszonych substancji stałych poprzez osadzanie (osadniki wstępne) lub przez flotację (drobnopęcherzykowa flotacja ciśnieniowa - DAF). Zastosowana metoda separacji jest zazwyczaj zależna od właściwości przeznaczonych do oczyszczenia ścieków surowych. Stopień pierwszy oczyszczania odpowiada za około 11% całkowitego zużycia energii przez zakład (Tchobanoglous i in., 2006).

Flokulacja odgrywa ważną rolę w procesie oczyszczania wstępnego. Jest to proces zużywający mało energii i może być hydrauliczny lub mechaniczny. Pobór mocy zależy od wielkości kłaczków wymaganych w procesie flotacji.

Usuwanie zawiesiny w osadnikach odbywa się mechanicznie, w osadnikach z zawieszonym osadem hydraulicznie, a w osadnikach flotacyjnych mechanicznie lub hydraulicznie.

Metoda flotacji (DAF) wymaga układu wtrysku powietrza, który jest energochłonny i obejmuje pompy obiegowe wody (8-12% przepływu dla instalacji) oraz instalację sprężonego powietrza. Stężenie usuniętych ciał stałych (osadu) w osadniku różni się w szerokim zakresie. Zależy od jego rodzaju i metody usuwania osadu. Im wyższa zawartość ciał stałych, tym mniejsza strata wody i mniejsza kubatura urządzeń w węźle osadowym oczyszczalni.

Energia w pierwszym stopniu oczyszczania ścieków wykorzystywana jest głównie do mieszania i pompowania zatrzymanych na siłach zanieczyszczeń, piasku i osadu wstępnego.

Można oszczędzić energię poprzez zarządzanie zgarniaczami w osadnikach (wstępnych lub wtórnych), na podstawie prędkości na dopływie i przepływu osadów recyrkulowanych lub w połączeniu ze stężeniem zawiesiny w zbiorniku napowietrzającym lub w osadzie recyrkulowanym, zamiast na podstawie stałego przepływu (zwykle przepływu w porze deszczowej). W tym celu zgarniacze powinny mieć regulowaną prędkość i wymagane jest wprowadzenie regulacji systemu ich pracy (monitoring procesu).

Głównymi parametrami wpływającymi na podstawowe procesy i produkcję energii są:

- usuwanie zawiesiny (KWh/kg) – wyższa zawartość materii organicznej w osadach z osadników wstępnych (wyższy stopień usunięcia ze ścieków) przekłada się na wyższą produkcję energii
- usuwanie fosforu (KWh/kg) (jeśli zastosowano usuwanie fosforu).

Jednak optymalizacja pierwszego stopnia oczyszczania wpływa pośrednio na produkcję energii w zakładzie. W wielu oczyszczalniach ścieków wdrażane jest nowe podejście, w którym produkcja osadu wstępnego jest zwiększana chemicznie, tzw. proces CEPT lub przez zastosowanie drobnych sit lub filtrów bębnowych zamiast zbiorników sedymentacyjnych, w celu uzyskania jak największej ilości materii organicznej do fermentacji beztlenowej (Zaborowska i in., 2017). Im wyższa produkcja osadu wstępnego, tym wyższy zysk energetyczny dzięki zwiększonej produkcji biogazu. Jednocześnie przy stosowaniu tych zabiegów należy pamiętać, aby zadbać o etap denitryfikacji poprzez zapewnienie

wystarczającej ilości łatwo rozkładalnej materii organicznej w ściekach po pierwszym stopniu oczyszczania.

4.3. Oczyszczanie wtórne

Znaczna część oczyszczalni ścieków w Europie stosuje procesy oczyszczania z zastosowaniem metod osadu czynnego, jako głównego etapu procesu wtórnego oczyszczania. Zapotrzebowanie energetyczne dla tego procesu jest bardzo wysokie. WssTP określił te wartości na poziomie 0,15-0,7 kWh./m³ (w roku 2011). Dostarczenie tlenu dla mikroorganizmów nityfikacyjnych prowadzących proces utleniania azotu amonowego poprzez azotyny do azotanów oraz rozkład materii organicznej do dwutlenku węgla i wody jest całą istotą procesu. Zużycie tlenu na etapie nityfikacji wynosi 4,57 kgO₂ / kgN. Dyfuzja tlenu odgrywa ważną rolę w tym procesie. Zastosowane dyfuzory posiadają różną zdolność wytwarzania pęcherzyków powietrza. Ilość pęcherzyków wytwarzanych na jednostkę objętości powietrza oraz średnica pęcherzyków stanowią zmienne, które różnicują poszczególne systemy. Pęcherzyki o mniejszej średnicy zapewniają większą powierzchnię dla lepszego stopnia wykorzystania tlenu (OT). OT oznacza procentową zawartość tlenu w powietrzu przekształcanym z powietrza pod ciśnieniem do mieszanej cieczy w idealnych warunkach. W tabeli 4. przedstawiono typowe wartości OT dla standardowych dyfuzorów przy zanurzeniu na głębokość 4,5 m.

Tabela 4. Stopień wykorzystania tlenu (OT) dla różnego rodzaju dyfuzorów (za van Haandel i Lubbe, 2007).

Rodzaj dyfuzora	Współczynnik przepływu powietrza (Nm ³ godz. ⁻¹)	STT (%) przy zanurzeniu na 4,5 m
Z dyskiem ceramicznym	0,5-6	25-35
Z kopułkami ceramicznymi	1-4	27-37
Z płytkami ceramicznymi	3,5-8,5	26-33
Ze sztywnymi porowatymi plastikowymi rurkami	4-7	28-32
Z giętkimi porowatymi plastikowymi rurkami	1,5-12	26-36
Z perforowanymi rurkami membranowymi	1,5-7	26-36
Z napowietrzaniem strumieniowym	100-500	15-24

Koszty kapitałowe drobnopęcherzykowego systemu napowietrzania będą prawdopodobnie wyższe, ale roczny koszt pracy instalacji będzie niższy niż w przypadku napowietrzaczy grubopęcherzykowych. Zastosowanie systemów drobnopęcherzykowych może obniżyć koszty energii napowietrzania o 40 do 50%. Okres zwrotu poniesionych nakładów w przypadku wymiany systemów grubopęcherzykowych na drobnopęcherzykowe wynosi od 5 do 7 lat w przypadku większości oczyszczalni ścieków. W przypadku wymiany systemu napowietrzania mechanicznego czas zwrotu wynosi 4-5 lat.

Istotną kwestią jest także rozmieszczenie dyfuzorów. Dla tej samej konfiguracji zbiornika napowietrzającego i typu dyfuzora, całkowite pokrycie dna zapewni wyższą efektywność transferu tlenu i zużyje mniej energii niż układ spiralny.

Właściwa konserwacja i czyszczenie dmuchaw również wpływa na mniejsze zużycie energii.

Skrócenie wieku osadu może znacznie zmniejszyć energię napowietrzania. Krótki wiek osadu stosowany w tak zwanych procesach wysokowydajnych może umożliwiać niemal pełne wykorzystanie biodegradowalnego materiału w wyższych temperaturach, ale czas retencji stałych cząstek jest zbyt krótki dla intensywnego rozkładu i związanego z nim oddychania wewnątrzkomórkowego. W związku z powyższym, zużycie tlenu w tych procesach będzie niskie, podczas gdy produkcja osadów będzie duża, a frakcja aktywnego (biodegradowalnego) osadu również wysoka (osady bogate w substancje organiczne powinny powodować wyższy uzysk biogazu).

Jednocześnie, przy optymalizacji wieku osadu konieczne jest dostosowanie czasu retencji w taki sposób, aby mikroorganizmy nie zostały wypłukane z systemu. Krótszy wiek osadu może być również niewystarczający do prawidłowego procesu nityfikacji w normalnych temperaturach ścieków. Sedymentacja osadów o niskim wieku osadu jest w związku z tym trudniejsza. Ewentualnie należy zastosować chemikalia, które aktywują proces flokulacji i zredukują stężenie zawieszonych substancji stałych w ściekach tak, aby spełnić normy dotyczące odpływu.

Dodatkowe koszty związane z użyciem chemikaliów i energii powstałe podczas przeróbki dodatkowych ilości osadu należy porównać z oczekiwaną oszczędnością energii w rezultacie zastosowania mniejszego napowietrzania i wyższej produkcji biogazu podczas fermentacji osadu.

Z uwagi na przewymiarowany sprzęt, jego nieefektywną pracę i brak kontroli, ilość dostarczanego tlenu jest zazwyczaj zbyt wysoka w porównaniu do jego zapotrzebowania w danym procesie. Nadmierny dopływ tlenu przekłada się nie tylko na duże zużycie energii, ale może także skutkować problemami z sedymentacją oraz wymywaniem osadu do ścieków. Podstawowa funkcja systemu kontroli napowietrzania polega na monitorowaniu zmiennych dotyczących oczyszczania ścieków i dostarczaniu informacji zwrotnej z danych do centrum sterowania, w którym komputer dostosowuje działanie systemu napowietrzania. Najprostszy system sterowania bazuje na ciągłym pomiarze rozpuszczonego tlenu (DO) za pomocą czujnika DO w zbiorniku napowietrzającym. Odczyty przyrządów służą do automatycznej regulacji działania systemu napowietrzania zgodnie z danymi otrzymanymi ze sterownika i standardowymi wymaganiami instalacji. Jeżeli istniejący system napowietrzania został zmodernizowany pod kątem monitorowania i automatyki urządzeń kontrolnych w celu utrzymania stężenia tlenu rozpuszczonego w zbiorniku napowietrzającym, energia napowietrzania mogłaby zostać obniżona, o co najmniej 20%. Aby skutecznie kontrolować poziom rozpuszczonego tlenu w zbiorniku, operatorzy muszą utrzymywać czujniki w należyтым i skalibrowanym stanie.

Obecnie dostępne są również bardziej zaawansowane systemy kontroli online oparte na dodatkowych pomiarach i czujnikach. Bakterie odpowiedzialne za nityfikację biologiczną wykazują znaczną różnorodność populacyjną. Wiele z nich wykazuje aktywność przy niskim stężeniu DO. Dlatego też, opierając się na monitoringu wyłącznie DO nie uzyskamy najbardziej efektywnego energetycznie systemu. Zaawansowane systemy wykorzystują wiele parametrów pomiarowych m.in.: azot amonowy, azotyny i azotany. Dzięki równoczesnym pomiarom DO oraz $\text{NH}_4\text{-N}$, można zaoszczędzić do 30% pierwotnej energii napowietrzania. Ponadto, napowietrzanie nieciągłe, bazujące na czujnikach, może zaoszczędzić 15% energii napowietrzania (Wett, 2007).

Ponadto, zamiast monitoringu oraz kontroli stężenia DO w komorze, inne innowacyjne rozwiązania mogą być wykorzystane, jako alternatywne sposoby pomiaru aktywności biologicznej i wykorzystywane dalej do kontroli procesu. Są to respirometria, kontrola punktu krytycznego tlenu oraz off/gas monitoring.

Szybkość napowietrzania można zmniejszyć poprzez zmniejszenie wartości zadanego stężenia rozpuszczonego tlenu w układzie, które zwykle jest zbyt wysokie. Za całkowicie napowietrzone i dobrze wymieszane zbiorniki uznaje się takie, w których występuje stężenie tlenu na poziomie min. 0,8 mg/L i maks. 2,0-2,5 mg/L.

Zastosowanie środków kontroli napowietrzania nieciągłego zwiększa zakres wykonywanej kontroli oraz umożliwia bardziej szczegółową regulację nakładu pod kątem rzeczywistego zapotrzebowania układu na tlen. Kontrola napowietrzania nieciągłego może przyczynić się do obniżenia energii o 5%.

Energia zużyta na napowietrzanie może być obniżona o około 1% dzięki wykorzystaniu powietrza wywiewnego, które może być transportowane do zbiornika napowietrzania przez dmuchawę powietrza zamiast oczyszczania powietrza na filtrach. Środek ten ma zastosowanie tylko dla operacji ciągłego napowietrzania.

Stosując tzw. „bump-aeration” (intensywne napowietrzanie w bardzo krótkim czasie) w okresach bez napowietrzania nie obserwuje się transferu tlenu, ale osad jest nadal mieszany. W konsekwencji, mieszadła mogą stać się zbędne, co przekłada się na zmniejszenie zużycia energii.

Energię można zaoszczędzić poprzez optymalizację działania mieszadeł na podstawie mierzonej prędkości przepływu cieczy w zbiorniku. Pomiary ciągłe są utrudnione z uwagi na trudność zwymiarowania profilu prędkości względem zbiornika. Prędkości te mogą być mierzone okresowo i dzięki temu można regulować działanie mieszadeł. W tym celu śruby napędowe wymagają napędu o zmiennej prędkości, pracującego z wysoką/niską prędkością, a także konieczne jest dostosowanie systemu operacyjnego.

Kolejnym istotnym aspektem energetycznym jaki brany jest pod uwagę podczas obsługi systemów z osadem czynnym jest osad recyrkulowany (RAS). Część biologicznego osadu usuniętego z osadnika wtórnego jest zawracana do komory napowietrzania, aby utrzymać odpowiednie stężenie osadu czynnego w bioreaktorze (MLSS). Pompy RAS zazwyczaj zużywają 5-10% zapotrzebowania na energię konieczną do oczyszczania ścieków. Jest to zwykle zależne od przepływu ścieków. Można jednakże zastosować inne parametry, takie jak właściwości sedymentacyjne osadu (mierzone jako SSVI – indeks osadu) oraz ogólne stężenie osadu w komorze napowietrzania. Zmniejszając szybkość pompowania RAS, zużywana jest mniejsza ilość energii. Zakres potencjalnych oszczędności może wynosić do 55% zużycia energii wymaganej przez RAS (patrz rozdział 5.2).

Podsumowując, istnieje kilka sposobów na zwiększenie efektywności energetycznej wtórnego stopnia oczyszczania:

- zastosowanie drobnopęcherzykowych systemów napowietrzania,
- prawidłowa konserwacja systemu napowietrzania,
- optymalizacja wieku osadu,
- zastosowanie sterowania systemem napowietrzania (optymalizacja pozycjonowania oraz ilości sensorów),
- kalibracja czujników,
- zastosowanie napowietrzania przerywanego,
- obniżenie poziomu stężenia tlenu,
- zastosowanie powietrza wywiewanego,

- zarządzanie przepływem osadu recyrkulowanego.

Najważniejszymi wskaźnikami wydajności procesu wpływającymi na efektywność energetyczną w procesach wtórnego oczyszczania są:

zużycie energii	kWh/m ³
zużycie tlenu	kWh/kg usuniętego ChZT (normalnie w zakresie 0,5-1,0)
OCP (potencjał zużycia tlenu) _{zred}	%; kg/RLM/dzień
energia na napowietrzanie	kWh/RLM/ dzień, kWh./kg zapotrzeb. na tlen; % energii całkowitej
energia na mieszanie	kWh/RLM/dzień % energii całkowitej
energia/usunięty parametr	kWh/kg usun. parametru: kWh./kg ChZT _{usun} , kWh./kg NH ₄ _{usun} , kWh./kg TN _{usun} , kWh./kg P _{bio usun}

4.4. Trzeci stopień oczyszczania

Stosuje się różnego typu procesy oczyszczania trzeciego stopnia, w razie potrzeby również metody łączone, które mają na celu spełnienia wymagań dotyczących stężenia związków fosforu i azotu w ściekach oczyszczonych. Procesy trzeciego stopnia oczyszczania oraz procesy zaawansowane mogą być realizowane dzięki różnym metodom np.: adsorpcja na węglu aktywnym, procesy separacji membranowej i zastosowanie filtra biologicznego. Po nich może następować dezynfekcja i/lub stosowanie zaawansowanych procesów inaktywacji patogenów lub złożonych substancji organicznych, takich jak farmaceutyki.

Procesy filtracji należą do najbardziej energochłonnych procesów w oczyszczalniach ścieków (patrz Rys. 4). Filtracja jest procesem wymagającym znacznych nakładów energii, około 7-12 % całkowitego zapotrzebowania na energię. Filtry piaskowe są przeznaczone do usuwania nadmiaru zawiesiny, BZT oraz P. Rodzaj zastosowanego filtra (np. na wkłady typu cartridge, piaskowe lub z ziemią okrzemkową [D.E.]) może mieć znaczący wpływ na zużycie energii, ponieważ każdy charakteryzuje różną wielkość oporów w układzie cyrkulacyjnym. Opór związany jest z efektywnością energetyczną ze względu na jej wpływ na przepływ wody. Spośród trzech rodzajów filtrów, filtracja z wykorzystaniem filtrów na wkłady typu cartridge zapewnia najmniejszy opór przepływu, co częściowo wynika z braku zaworów. Chociaż filtry piaskowe i filtry D.E. są bardziej efektywne w momencie gromadzenia się ciał stałych, to zanieczyszczony filtr może zwiększyć obciążenie pompy. W rzeczywistości różnica między czystym a zanieczyszczonym filtrem może prawie podwoić zużycie energii przez pompę.

Ze względu na obawy związane z bezpieczeństwem, obsługą oraz toksycznością związaną ze stosowaniem chloru, promieniowanie UV staje się coraz popularniejsze jako alternatywa dla dezynfekcji chemicznej. Wymagania energetyczne dla UV zależą od liczby, typu i konfiguracji lamp używanych do osiągnięcia docelowej dawki promieniowania UV w celu dezaktywacji patogenów. Jednym z najważniejszych czynników wpływających na dostarczanie dawki promieniowania UV jest przepuszczalność promieniowania UV (UVT) dezynfekowanej wody. Na poziom UVT wpływa poziom wstępnego oczyszczania. Filtrowane ścieki mają znacznie wyższą wartość UVT niż woda niefiltrowana. Mikroorganizmy, które przemieszczają się szybko przez reaktor z dala od lampy, otrzymają mniejszą dawkę promieniowania niż mikroorganizmy, które mają dłuższą ekspozycję na promieniowanie UV i znajdują się bliżej lampy. Inne czynniki wpływające na dawkę promieniowania UV to temperatura, wiek lampy i zanieczyszczenie lampy osadami. Ponieważ dezynfekcja UV jest

czynnością złożoną i opiera się na wielu czynnikach, metody szacowania dawki są skomplikowane i zwykle obejmują obliczeniowe modelowanie dynamiczne płynów lub testy biologiczne. Dawkę można utrzymywać na minimalnym poziomie lub można kontrolować w oparciu o jakość wody (tj. obniżać w okresach poprawy jakości), co może przełożyć się na oszczędność energii.

Badanie finansowane przez spółkę Pacific Gas and Electric (PG&E) wykazało, że energia pochodząca z dezynfekcji UV może stanowić około 10 do 25 % całkowitego zużycia energii w oczyszczalni ścieków (PG & E, 2001). Energia niezbędna dla lamp niskiego ciśnienia wynosiła od około 0,026 do 0,66 kWh/m³. Dezynfekcja za pomocą promieniowania UV lub filtrów membranowych wymagana w systemach średniociśnieniowych wahała się od 0,121 do 0,147 kWh/m³. W roku 2001, spółka PG&E ogłosiła, że skuteczność dezynfekcji UV w stosunku do energii wejściowej nie jest liniowa. Zwiększenie ilości energii jakie jest wymagane, skutkuje marginalnym zmniejszeniem całkowitej liczby bakterii z grupy coli.

Wg. Leong i in. (2008) zapotrzebowanie na energię dla niskociśnieniowych, wysokowydajnych systemów jest podobne do zapotrzebowania niskociśnieniowych systemów o niskiej intensywności. W związku z tym, niskociśnieniowe lampy o dużej mocy mogą być dobrym rozwiązaniem dla zmniejszenia liczby lamp i wielkości instalacji, przy jednoczesnym utrzymaniu niskiego zapotrzebowania na energię.

Trzeci stopień oczyszczania to również oczyszczanie strumieni bocznych np. wód odciekowych z procesu odwadniania osadów po fermentacji.

Jednym z procesów, który można zastosować do oczyszczania takiego strumienia odcieków o dużym ładunku azotu, zwiększając tym samym pojemność głównej linii oczyszczania ścieków i oszczędzając koszty energii do napowietrzania, jest deamonifikacja. Jest to proces biologicznej degradacji azotu amonowego w ściekach, poprzez przekształcenie azotu amonowego w azot gazowy w warunkach beztlenowych z użyciem azotynów. Jest to proces autotroficzny i nie wymaga dodatkowego źródła węgla. Proces składa się z dwóch etapów: utlenienia połowy azotu amonowego do azotynów i następnie reakcji pozostałego azotu amonowego z powstałym azotem azotynowym. Proces ten ma zastosowanie w ściekach o wysokich stężeniach azotu amonowego, takich jak wody osadowe. Niezbędnym jest, aby iloraz C/N był niski, a temperatura wysoka. Pierwszym etapem deamonifikacji polegającym na utlenianiu połowy ilości azotu amonowego do azotynów jest częściowa nitrytacja, natomiast drugim etapem przekształcania azotynu i pozostałego amonu jest proces Anammox (beztlenowe utlenianie azotu amonowego). W procesie tym amoniak jest utleniany za pomocą azotynów jako akceptora elektronów i dwutlenku węgla jako źródła energii przez bakterie utleniające w warunkach beztlenowych. Tlen i źródło węgla nie są wymagane, nie następuje emisja CO₂. Powstaje wyłącznie niewielki nadmiar osadu, ponieważ wydajność procesu jest bardzo niska. Zastosowanie procesu Anammox może prowadzić do 90% redukcji kosztów operacyjnych w porównaniu do konwencjonalnej metody nitryfikacji/denitryfikacji (Jetten i in., 2005). Pełne dane uzyskane z oczyszczalni Strass w Austrii wskazują, że zużycie energii elektrycznej do usuwania związków azotu z wód odciekowych wyniosło 1,16 kWh./kgN, co jest znacznie niższe w porównaniu do procesu usuwania azotu w głównym strumieniu wynoszącym 6,5 kWh./kgN (Wett, 2007).

Po zastosowaniu Anammox w strumieniu bocznym zużycie tlenu dla usunięcia azotu amonowego zmniejszyło się o 50%, co odpowiada około 12% oszczędności całkowitego zużycia energii elektrycznej na oczyszczalni.

Beztlenowe usuwanie azotu ma szczególne znaczenie, gdy stosowane jest zintensyfikowane oczyszczanie wstępne w głównej linii technologicznej (Zaborowska i in., 2017). Lepsza sedymentacja wstępna i wyższa wydajność usuwania osadu powodują niekorzystny stosunek

BZT/N w ściekach w osadzie czynnym co może powodować problemy w odniesieniu do denitryfikacji. Zastosowanie energooszczędnych technik dla usuwania azotu w strumieniu bocznym może stanowić rozwiązanie tego problemu (patrz rozdział 4.6).

Kluczowymi wskaźnikami efektywności procesu oczyszczania trzeciego stopnia są:

usuwanie zawiesin:	kWh./kg TSS _{usuniętego}
usuwanie azotu amonowego:	kWh./kg NH ₄ _{usuniętego}
usuwanie TN:	kWh./kg TN _{usuniętego}
usuwanie cząstek stałych i P:	kWh./kg TSS _{usuniętego} , kWh./kg P _{usuniętego}
usuwanie patogenów:	kWh./log zredukowanego
usuwanie niebezpiecznych zanieczyszczeń (np. estradiol):	kWh./estradiolu _{usuniętego} .

4.5. Obróbka i stabilizacja osadów

Istnieje wiele procesów obróbki i sposobów zagospodarowania osadów w zależności od rodzaju osadu, pochodzenia i lokalnych możliwości. Najbardziej rozpowszechnione opcje obróbki osadów w Polsce są następujące:

- Wyłącznie odwadnianie – dla np. spalania
- Fermentacja i odwadnianie – dla zastosowania przyrodniczego, składowania lub spalania
- Odwadnianie i kompostowanie – dla zastosowania przyrodniczego lub składowania
- Odwadnianie i suszenie – dla zastosowania jako paliwo
- Fermentacja, odwadnianie i suszenie – dla zastosowania jako paliwo oraz przyrodniczego.

Zagęszczanie i odwadnianie zazwyczaj zajmuje 5-10% zapotrzebowania na energię danej oczyszczalni. Zarówno zagęszczanie, jak i odwadnianie polega na usuwaniu wody z osadu.

Zagęszczanie i odwadnianie osadów

Oczyszczanie osadów ściekowych w pierwszym etapie obejmuje dwa główne procesy, które mogą mieć różne konfiguracje – zagęszczanie i odwadnianie osadu.

Funkcje zagęszczania osadów, takie jak wychwytywanie ciał stałych, wpływają na obciążenie zawracanym ładunkiem procesów oczyszczania ścieków, jak np. osadniki wstępne. Bilans usuniętego osadu z oczyszczonych ścieków może również wpływać na zagęszczanie, ponieważ osad nadmierny jest zwykle trudny do zagęszczenia lub odwadniania i często wymaga wirowania. Maksymalizacja produkcji osadu wstępnego może okazać się pomocna w obróbce osadu i zmaksymalizować potencjał fermentacyjny (patrz rozdział 4.2).

Zagęszczenie można osiągnąć grawitacyjnie, poprzez siłę odśrodkową (wirówki) lub przez filtrowanie (na filtrach taśmowych lub bębnowych). Odwadnianie odbywa się za pomocą siły odśrodkowej w wirówce lub przy użyciu siły fizycznej w prasie.

Zagęszczanie osadów może osiągać od 3 do 8% zawartości suchej masy (S.M.), odwadnianie stosuje się, gdy wymagane jest 20 do 25% lub więcej.

Wszystkie osady ściekowe wstępne, wtórne i przefermentowane różnią się od siebie i wymagają zastosowania różnych procesów zagęszczania/odwadniania. Procesy wspomagane są poprzez dodawanie polimeru.

Energia w obróbce osadów jest zużywana w pompach zasilających (podających osad), urządzeniach zagęszczających/odwadniających, pompach wyladowczych, urządzeniach do dozowania polimerów i recyklingu wód odciekowych lub oczyszczalni. Poprzez zastąpienie

wymagających dużej energii urządzeń zagęszczających można uzyskać poprawę efektywności energetycznej, a także efektu zagęszczenia, co z kolei przyczyni się do obniżenia zużycia energii na dalszych etapach obróbki.

Tabela 5. Hierarchia energochłonności procesów przetwarzania osadów (Brandt i in., 2010)

← Niskie zużycie energii		Wysokie zużycie energii →	
Zagęszczacz bębnowy	Zagęszczacz taśmowy	Prasa taśmowa	Wirówka

Fermentacja beztlenowa

Fermentacja beztlenowa, w tym przetwarzanie biogazu, zwykle wymaga od 10 do 15% zapotrzebowania na energię danej oczyszczalni ścieków, ale z drugiej strony może generować do 100% zapotrzebowania na energię w oczyszczalniach ścieków (rozdz. 3.1).

Tradycyjna fermentacja znana jako mezofilowa fermentacja beztlenowa (MAD) ma miejsce w temperaturach 32°C do 38°C przy braku tlenu. Różnego rodzaju osady ściekowe (substraty) pompuje się do zbiornika mieszającego, a następnie do komory fermentacyjnej, w której zawartość jest podgrzewana do wymaganej temperatury z zastosowaniem średniego czasu retencji, który wynosi 15 dni lub więcej. Biogaz może być spalany i używany do ogrzewania lub przy zastosowaniu silnika gazowego do produkcji energii elektrycznej i ciepła; może również zostać zmodernizowany (po usunięciu CO₂), skompresowany i użyty jako paliwo do pojazdów.

Istnieje kilka metod jakie można zastosować w celu zwiększenia efektywności energetycznej MAD:

- optymalizacja czasu retencji w komorze fermentacyjnej,
- dostarczanie różnych dodatkowych substratów i/lub zmiana stosunku osadu wstępnego i osadu nadmiernego.
- zmiana trybu procesu z mezofilowego na termofilowy (TAD) (55°C). TAD może zwiększyć redukcję materii organicznej o około 20%, a tym samym zwiększyć produkcję biogazu o ~ 20% w porównaniu do MAD.
- instalacja etapu kondyjonowania osadu, który może ułatwić rozkład wsadu przed komorą fermentacyjną (np. zastosowanie metod fizycznych lub termicznych zwiększa produkcję biogazu o 20%).

Potencjalne kroki, które należy rozważyć dla istniejących i nowych zakładów stosujących fermentację beztlenową w celu zwiększenia efektywności energetycznej to:

- zwiększenie produkcji osadu wstępnego (patrz rozdział 4.2),
- optymalizacja czasu retencji w komorze fermentacyjnej w celu produkcji maksymalnej ilości biogazu,
- zastosowanie nisko energochłonnych technologii mieszania i staranne zaprojektowanie układu mieszającego, biorąc pod uwagę reologię osadów,
- zapewnienie stałego dopływu raz dopasowanie zbiorników gazu, pomp dozujących oraz silników do wielkości komory fermentacyjnej, tak aby wykorzystać maksymalny potencjał osadów ściekowych do generowania gazu,
- wykorzystanie pompy ciepła do wytwarzania ciepła, aby utrzymywać temperaturę w komorze fermentacyjnej bez użycia biogazu (patrz także rozdział 3.1).

Suszenie osadów

Koszt utylizacji osadów ściekowych zależy od obsługiwanej zlewni i czynników środowiskowych. Suszenie osadów pozwala na aplikację na glebie bez uciążliwego zapachu (w przypadku stosowania fermentacji przed suszeniem) i przy znacznie zmniejszonym ryzyku zwiększenia zanieczyszczonego spływu do cieków wodnych z pól uprawnych, nawet w deszczową pogodę. Suszenie osadu jest jednak energochłonne. W większości przypadków, stosuje się suszenie w celu uzyskania 45% S.M. w osadzie. Suszenie odwodnionego osadu zazwyczaj wymaga temperatury spalania, a więc dostawy paliwa, którym może być albo biogazu z fermentacji, albo gaz ziemny z sieci.

Obróbka osadów i suszarni jest złożona. Działanie odbywa się w procesie co najmniej półautomatycznym, celem zmniejszenia wszelkiego ryzyka związanego z bezpieczeństwem, a operatorzy potrzebują specjalistycznego szkolenia obsługi. Wyszuszony pył osadowy stanowi również problem związany z zagrożeniem wybuchem.

Technologie suszenia można podzielić na cztery grupy, w zależności od sposobu dostarczania energii do osadu:

- Suszarki konwekcyjne lub bezpośrednie,
- Suszarki przewodzące lub kontaktowe lub pośrednie,
- Suszarki radiacyjne (solarne),
- Systemy kombinowane (konwekcja i przewodzenie w tej samej suszarce) i systemy hybrydowe (suszarki konwekcyjne i przewodzące ustawione seriami).

W tabeli 6. zaprezentowano zużycie energii przez poszczególne suszarki.

Tabela 6. Szybkość suszenia i zużycie energii w różnych systemach suszenia (Arlabosse i in., 2011).

Rodzaj suszarki	Określona szybkość suszenia ($\text{kg m}^{-2} \text{godz.}^{-1}$)	Określone zużycie energii (KWh ton^{-1})
Suszarka taśmowa	5 – 30	700 - 1140
Suszarka z bębnem bezpośrednim	3 – 8	900 – 1100
Suszarka pneumatyczna	0,2-1	1200 - 1400
Suszarka dyskowa	7-12	855 - 955
Suszarka łopatkowa	15 - 20	800 - 885
Suszarka cienkowarstwowa	25 - 35	800 - 900
Suszarki solarne - szklarniowe		30-200
Systemy połączone i hybrydowe		700 -900

W celu poprawy efektywności energetycznej procesu suszenia należy wziąć pod uwagę:

- odwadnianie osadu do najwyższej zawartości s.m. w celu zmniejszenia zapotrzebowania na energię suszenia w kolejnych etapach,
- monitorowanie stanu osadu w celu optymalizacji kontroli procesu,
- wstępne podgrzewanie osadów z wykorzystaniem ciepła odpadowego z procesów dostępnych na miejscu,
- jeżeli osad jest spalany po suszeniu, ciepło spalania można wykorzystać do suszenia doprowadzanego osadu lub wstępnego podgrzewania powietrza do spalania.

4.6. Nowe projektowane oczyszczalnie ścieków

Optymalizacja konfiguracji

Przy projektowaniu oczyszczalni ścieków (nowych lub modernizowanych) należy uwzględnić sposób minimalizacji wysokości podnoszenia ścieków oraz przepływów powrotnych i recyrkulacyjnych. Wybierając inteligentną konfigurację, można zminimalizować straty energii hydraulicznej (zminimalizować opory przepływu).

Transport grawitacyjny

W przypadku nowo wybudowanych oczyszczalni ścieków, konstrukcja powinna zmierzać do jak największego wykorzystania transportu grawitacyjnego. Takie rozwiązanie zmniejsza zużycie energii przez przepompownie. W zależności od konkretnej sytuacji opcją może być konstrukcja (częściowo) podziemna, co pozwoli na zoptymalizowanie wysokości linii wodnej. Wyższe koszty (w tym koszty użycia pompy wody gruntowej podczas budowy) należy rozważyć w odniesieniu do niższych kosztów zużycia energii w przypadku urządzeń w dłuższym okresie użytkowania.

Optymalizacja systemu transportowego

Poprzez optymalizację kontroli procesu nad przepompowniami w systemie transportowym, na przykład poprzez Real Time Control (kontrolę czasu rzeczywistego), dostarczanie ścieków do oczyszczalni może odbywać się bardziej równomiernie. Ma to dodatni wpływ na zużycie energii w całym procesie oczyszczania.

Zaawansowane oczyszczanie wstępne

Poprzez zastosowanie drobnych sit/filtrów zamiast osadnika wstępnego można usunąć więcej BZT ze ścieków i przekształcić go w biogaz na drodze fermentacji. Należy pamiętać, że w ściekach musi pozostać wystarczająca zawartość BZT w celu efektywnego przeprowadzenia procesu usuwania związków azotu. Ulepszenie procesu fermentacji przenosi się na wzrost ładunku azotu w odciekach; w tym przypadku można zastosować zaawansowane metody oczyszczania strumienia odciekowego.

Upflow Sludge Blanket Filtration (USBF).

Proces USBF oparty jest na technice rozdziału osadu/cieczy i konstrukcji opartej na kształcie litery V. W konfiguracji tej nie jest wymagany zgarniacz, a pompa osadu recykulowanego wymaga niskiej wysokości podnoszenia w porównaniu z konwencjonalnymi osadnikami. Obie różnice pozwalają na niższe zużycie energii, ale należy dokonać dokładnego porównania z konwencjonalnymi osadnikami.

Sekwencyjne reaktory biologiczne (SBR).

Poprzez zastosowanie sekwencyjnego oczyszczania ścieków można oszczędzać energię w odniesieniu do systemów recyrkulacyjnych. Ten tryb pracy dotyczy tylko systemów przepływu w warunkach suchych lub systemów o bardzo niskim przepływie deszczu do współczynnika przepływu suchego powietrza. Systemy SBR można budować modułowo, a w przypadku większych oczyszczalni ścieków liczba modułów się zwiększa.

Wymiana energii

Temperatura ciepłych strumieni bocznych może być wykorzystywana do ogrzewania lub chłodzenia budynków biurowych lub ścieków w oczyszczalniach. W przypadku oczyszczalni ścieków można podnieść temperaturę ścieków wpływających. Efekt podniesienia temperatury

na wlocie na zużycie energii zależy od konkretnych okoliczności w danej oczyszczalni ścieków.

Oczyszczanie beztlenowe

Większość z powyższych propozycji obejmuje wdrożenie lepszej kontroli istniejących procesów. Byłoby to wykonalne w stosunkowo krótkim czasie i przy stosunkowo niskich kosztach. Bardziej radykalną propozycją o większych potencjalnych korzyściach jest zastąpienie obecnych procesów tlenowych procesami beztlenowymi w niskiej temperaturze. Stephenson i Aunger, 2009 stwierdzają, że nastąpi rewolucja w obsłudze głównych procesów używanych w oczyszczalniach ścieków. Istotnym osiągnięciem będzie zastosowanie procesów beztlenowych w głównym strumieniu. Wyższa temperatura w beztlenowym oczyszczaniu ścieków będzie możliwa dzięki zwiększeniu temperatury wpływającego strumienia ścieków przez ciepło pochodzące z osadów wytwarzanych na miejscu lub pobrane z dostarczonych z zewnątrz innych odpadów organicznych. Główną korzyścią będą obniżone koszty napowietrzania. Również inny autor Caffoor, 2010 sugeruje, że główną zmianą w oczyszczaniu ścieków będzie przejście na procesy beztlenowe w niskiej temperaturze i zastosowanie beztlenowych bioreaktorów membranowych.

Szacuje się, że do roku 2030 oczyszczanie tlenowe, które pochłania 0,15-0,7 kWh./m³, może zostać zastąpione przez procesy beztlenowe, wytwarzające 1,7 kWh./m³ (WssTP, 2011; GWRC, 2010).

Wett i in., (2007) proponuje zastosowanie następujących rozwiązań: zintensyfikowane oczyszczanie wstępne z zastosowaniem polimeru organicznego w celu zwiększenia produkcji osadu wstępnego, proces osadu czynnego z krótkim czasem zatrzymania osadu i hydraulicznym w celu adsorpcji koloidalnego i rozpuszczalnego ChZT dla większej produkcji biogazu, dynamiczna kontrola napowietrzania i pH, termiczna obróbka osadu przed fermentacją, generatory wysokiej sprawności lub ogniwo paliwowe do wytwarzania energii elektrycznej oraz zastosowanie Anammox dla wód odciekowych (patrz rozdział 4.4) w strumieniu bocznym.

Chociaż przejście na oczyszczanie beztlenowe jest główną propozycją dla niskoemisyjnego oczyszczania ścieków, alternatywne podejście zostało zasugerowane przez Hofmana i in., 2009. Propozycja składa się z zoptymalizowanego etapu wstępnej obróbki, w tym odzyskiwania P, a następnie zastosowaniu dynamicznego reaktora membranowego, a następnie nitytacji i filtrów piaskowych (Liu i in., 2009). Osad ściekowy byłby suszony za pomocą ciepła odpadowego i wykorzystywany jako źródło paliwa do spalania lub współspalania (na przykład) w piecu cementowym. Ten projekt nie został jeszcze przetestowany w praktyce.

5. Przykłady poprawy efektywności energetycznej w oczyszczaniu ścieków

5.1. Przejście od mezofilowej fermentacji beztlenowej (MAD) do termofilowej fermentacji beztlenowej (TAD)

Fermentacja beztlenowa jest jedną z najpowszechniej stosowanych metod stabilizacji osadów ściekowych. Zmniejsza ona całkowitą masę osadów i ułatwia ich dalsze zagospodarowanie. Dodatkowo, produkcja biogazu powoduje, że cały proces może być opłacalny. Fermentacja beztlenowa jest procesem, w którym mikroorganizmy rozkładają biodegradowalny materiał organiczny bez obecności tlenu. Mezofilowa fermentacja beztlenowa (MAD) przebiega w temperaturze 35-40°C wewnątrz komory fermentacyjnej, podczas gdy termofilowa

fermentacja beztlenowa (TAD) to ten sam proces, ale przebiegający w temperaturze $\geq 50^{\circ}\text{C}$. Jeśli celem procesu jest również higienizacja osadu (dezaktywacja patogenów), ponieważ temperatura wynosi $\geq 55^{\circ}\text{C}$.

Produkcja biogazu i stopień przefermentowania osadów

Podczas fermentacji beztlenowej 40 do 60% stałych związków organicznych jest przekształcanych w biogaz zawierający około 60-70% metanu. Biogaz może być używany do produkcji ciepła lub elektryczności (lub obu nośników energii) lub też może być uszlachetniony do biometanu i wykorzystany jako paliwo do pojazdów lub wprowadzony do sieci dystrybucyjnej gazu ziemnego. Zastosowanie procesu TAD zwiększa stopień rozkładu substancji organicznej w osadach i w konsekwencji zwiększa produkcję biogazu. Co więcej, osiąga się zmniejszenie ilości osadów, która ma być zutylizowana. Zastosowanie procesu termofilowego w istniejących komorach fermentacyjnych zwiększa ich przepustowość, a także pozwala na zmniejszenie pojemności nowo budowanych komór fermentacyjnych.

Wydajność procesu i doświadczenie eksploatacyjne.

Dane eksploatacyjne zostały zebrane z instalacji TAD w USA, Norwegii, Czechach, Szwecji, Danii i Niemczech pracujących w szeroki, zakresie warunków roboczych. Większość zakładów została przemodernizowana z instalacji mezofilowych na termofilowe, a wiele zakładów w USA oraz w Norwegii wykorzystuje tryb pracy wsadowej (*draw-and-fill*) w celu poprawy dezaktywacji patogenów i osiągnięcia kontrolowanej higienizacji.

W porównaniu do procesu MAD, technologia TAD może zwiększyć redukcję zawartości substancji organicznych o około 20% i zwiększyć w ten sposób produkcję biogazu o ~20%. Całkowita objętość substancji stałych (TS) pozostających do zagospodarowania można w ten sposób obniżyć o 10-15% w porównaniu z technologią MAD, a dzięki zwiększonej zawartości substancji stałych w odwodnionych (osuszonych) osadach (poprawa stopnia odwodnienia) całkowita ilość osadów, które trzeba zagospodarować, można zmniejszyć o 25 – 30% w porównaniu do technologii MAD. Procent redukcji ilości lotnych substancji stałych można jeszcze bardziej obniżyć poprzez wstępną obróbkę osadów przed rozpoczęciem fermentacji termofilowej, obejmującą:

- dezintegrację osadu nadmiernego,
- wstępną obróbkę enzymatyczną i/lub termiczną,
- hydrolizę chemiczną i/lub termiczną.

Dla wielu z zaproponowanych metod wstępnej przeróbki ciągle brak jest wiarygodnych danych pochodzących z instalacji pracujących na pełną skalę.

Poprawa stopnia odwodnienia oraz obniżone pienienie się osadów można było zaobserwować w większości zakładów stosujących technologię TAD. Stabilność procesu nie jest problemem w przypadku dobrej kontroli procesu (częste analizy zawartości lotnych kwasów tłuszczowych (VFA) oraz zasadowości).

Silny odór jest normalną cechą osadów fermentujący przy zastosowaniu technologii TAD. W związku z tym przed dalszą obróbką konieczne jest schłodzenie osadów, a pierwszym etapem powinna być wymiana ciepła pomiędzy gorącym, przefermentowanym osadem a chłodnym surowym osadem podawanym do komory fermentacyjnej. Ten zabieg poprawia również bilans energetyczny całego procesu.

Zwiększona zawartość wody w biogazie pochodzącym z instalacji TAD może wymagać poprawy efektywności odwadniania (usuwania wody), w zależności od sposobu wykorzystania gazu.

Oszacowanie kosztów w porównaniu do technologii MAD

Jest niewiele danych dotyczących kosztów inwestycyjnych dla nowych instalacji TAD, lecz takie koszty nie powinny się za bardzo różnić od kosztów inwestycyjnych dla podobnych instalacji MAD. Przejście z technologii MAD na TAD zazwyczaj wiąże się z dosyć niskimi kosztami inwestycyjnymi, związanymi głównie z wymiennikami ciepła, kotłami, pompami osadów, pewnymi modyfikacjami orurowania, zaworami, itp. Koszty operacyjne pozostaną prawie niezmiennie, jeśli ilość oczyszczanego osadu będzie taka sama. Zwiększone zużycie energii jest zrównoważone przez zwiększoną produkcję biogazu (pod warunkiem wykorzystania całego wyprodukowanego gazu) i zmniejszoną objętość osadów pozostającą do odwodnienia i ostatecznego zagospodarowania.

Zastosowanie

USA

W USA jest wiele instalacji, które w ciągu ostatnich lat zostały przebudowane z technologii mezofilowej na termofilową, między innymi:

Oczyszczalnia ścieków Hyperion w Los Angeles, Oczyszczalnia Ścieków Terminal Island w Los Angeles, Oczyszczalnia ścieków Columbus w Columbus
Oczyszczalnia ścieków Blue Plains Advanced w Waszyngtonie, Dystrykt Columbia (D.C.)

Głównym celem przebudowy jest zapewnienie zgodności ze standardami dla Klasy A w zakresie kontroli patogenów w osadzie (bioosady). W tym celu opracowano wiele zmian w konfiguracji procesów zachodzących w komorze fermentacyjnej, m.in. kombinację procesów równoległych i szeregowych, a także kombinacje procesów termofilowych i mezofilowych.

Czechy (Republika Czeska)

W ciągu ostatnich 10 lat komory fermentacyjne trzech oczyszczalni ścieków w Czechach zostały przebudowane na proces termofilowy. Największą z nich jest centralna oczyszczalnia ścieków w Pradze (5,8 m³/s) posiadająca 12 komór beztlenowych, każdy o pojemności 4 800 m³ (6 komór do fermentacji wstępnej i 6 do fermentacji wtórnej), przy czym tylko komory do fermentacji wstępnej są podgrzewane do 55°C. Główne cele termofilowej technologii zastosowanej w tym kraju są następujące:

- Zwiększenie wydajności istniejących fermentatorów,
- Wzrost produkcji biogazu dla zwiększenia kogeneracji ciepła i energii elektrycznej.

Norwegia

W pięciu oczyszczalniach ścieków w Norwegii pracują instalacje termofilowe, a „nowa” oczyszczalnia ścieków Bekkelaget dla Miasta Oslo (maksymalna wydajność 3,0 m³/s) została od razu zaprojektowana do wykorzystania technologii termofilowej i oddana do użytku 10 lat temu z dwoma fermentatorami, każda jednostka o pojemności 8 000 m³.

Jeszcze kilka innych oczyszczalni ścieków znajduje się w fazie planowania bądź realizacji przebudowy ich fermentatorów z technologii mezofilowej na termofilową. Główne cele przebudowy są następujące:

- Zgodność z podobnymi standardami dotyczącymi patogenów zawartych w osadzie, jak standardy w USA.
- Wzrost produkcji biogazu w celu zwiększenia produkcji ciepła i elektryczności, a także w celu produkcji biopaliwa dla pojazdów.

Technologia termofilowa fermentatorów beztlenowych pozwala osiągnąć efektywną higienizację osadów ściekowych i znacząco zwiększa stopień rozkładu substancji organicznej w osadach, co prowadzi do zmniejszenia ilości osadów, które trzeba ostatecznie zagospodarować. W trakcie trwania tego procesu można osiągnąć wyższą produkcję biogazu, dzięki czemu proces staje się bardziej opłacalny. Technologia termofilowa jest stosowana w wielu krajach na całym świecie, a można też zaobserwować wzrastające zainteresowanie tą metodą. W szczególności, bardzo często wykonuje się przebudowę instalacji z mezofilowej na termofilową, gdyż wymaga ona niewielkich kosztów i jest łatwa do wykonania.

5.2. Pompowanie recykulowanego osadu czynnego (RAS)

Poniżej przedstawione jest studium przypadku (case study) dla oczyszczalni ścieków w Hendon, Wielka Brytania, gdzie zmniejszono intensywność (prędkość) pompowania zawracanego osadu czynnego z wyższej stałej wartości na niższą stałą wartość, co pozwoliło osiągnąć oszczędność energii na poziomie 320 kWh/dobę.

Tabela 7. Wzrost efektywności energetycznej dzięki obniżeniu intensywności pompowania recykulowanego osadu czynnego (RAS) w oczyszczalni ścieków w Hendon (źródło: Brandt i in., 2010).

Lokalizacja:	Hendon, Wielka Brytania
Sektor:	Oczyszczalnia ścieków
Wielkość	225 205 PE
Właściciel lub operator zakładu:	Northumbrian Water
Dostawca energii:	Koszt 0,066 GBP/kWh
Proces:	Biologiczny
Komponent	Instalacja osadu czynnego
Konkretny problem energetyczny:	Koszt pompowania rec. osadu czynnego (RAS)
Zmiany w procesie technologicznym/instalacji:	Stała intensywność pompowania RAS została obniżona z 1 330m ³ /dobę do 660m ³ /dobę
Zysk na wydajności energetycznej:	Oszczędność 320 kWh/dobę
Analiza kosztów /korzyści	Oszczędność 9 000 GBP/rok (ok. 42 000 PLN/ rok)

5.3. Zagęszczanie/odwadnianie osadu

Tabela 8 przedstawia dane dotyczące poprawy sprawności (efektywności energetycznej) osiągniętej przez zastąpienie wirówek zagęszczaczami taśmowymi w oczyszczalni ścieków Hapert w Holandii. Zagęszczacze taśmowe, cechujące się wyższą sprawnością, pozwoliły zaoszczędzić 230 000 kWh energii na rok.

Tabela 8. Modernizacja i poprawa sprawności w oczyszczalni ścieków w Hapert

Lokalizacja:	Holandia
Sektor:	Oczyszczalnia ścieków
Właściciel lub operator zakładu	Waterboard De Dommel
Wielkość	71 000 PE, 14 500 m ³ /dobę, 1 000 ton osadu ściekowego/rok
Proces	Biologiczny
Komponent	Wymiana wirówek na zagęszczacze taśmowe w procesie zagęszczania osadu
Konkretny problem energetyczny:	Niska sprawność energetyczna zagęszczaczy

Zmiany budowlane /fizyczne:	Poprawa zagęszczania przy niższym zapotrzebowaniu na energię
Ryzyko i zależności	Doświadczenie z innych oczyszczalni ścieków stwarza obawy, że wyniki mogą się pogorszyć
Wprowadzone zmiany:	Dwa dekantery zostały zastąpione przez dwa zagęszczacze taśmowe
Uzysk sprawności (wydajności energetycznej): kWh & kWh/m	Poprawa – obniżenie zapotrzebowania na energię w procesie zagęszczania z 250 do ok. 100 kWh/tonę osadu ściekowego SS; oszczędność 230 000 kWh/rok.
Porównanie zapotrzebowania na energię	wirówka: 246 121 kWh; Zagęszczacz taśmowy: 94 617 kWh
Jednostkowe zapotrzebowanie na energię	wirówka: 256 kWh/tonę osadów ściekowych; Zagęszczacz taśmowy: 97 kWh/tonę osadów ściekowych;
Analiza koszt /korzyści:	Koszt inwestycji: 223 000 euro
Inne korzyści	Wzrost zawartości suchej masy z 4,8% do 6%.

5.4. Systemy napowietrzania

Dane ze Stanu Nowy Jork wskazują, że wyeliminowanie grubopęcherzykowych oraz mechanicznych urządzeń napowietrzających i zainstalowanie drobnopęcherzykowych systemów na oczyszczalniach ścieków z osadem czynnym, może pozwolić na oszczędności od 300 milionów do 500 milionów kWh energii elektrycznej na rok.

Obniżenie wieku osadu od 12 do 3 dni mogłoby pozwolić zaoszczędzić rocznie od 100 mln do 200 mln kWh. Instalacja sterowania systemem napowietrzania automatycznie dopasowującego wydajność dmuchaw powietrza lub kompresorów w reakcji na stężenie rozpuszczonego tlenu w zbiornikach napowietrzania mogłoby dodatkowo zmniejszyć zużycie energii elektrycznej o wielkość od 100 mln do 150 mln kWh na rok.

5.5. System napowietrzania i sterowania 1

Oszczędności energii po zastosowaniu nowego systemu sterowania napowietrzaniem są przedstawione dla średniej wielkości oczyszczalni ścieków w Szwecji.

W niniejszej pracy badano, ile energii i pieniędzy można by zaoszczędzić dzięki wdrożeniu nowych urządzeń do napowietrzania i sterowania napowietrzaniem w oczyszczalni ścieków w Sternö.

Oczyszczalnia ścieków Sternö została zbudowana 1997 i zaprojektowana dla równoważnej liczby mieszkańców (RLM) na poziomie 26 000 osób. Zakład ma dwa równoległe ciągi z oczyszczaniem biologicznym i wstępną denitryfikacją. W czasie badań jeden z ciągów był używany jako linia testowa, na której zamontowano nowe urządzenia do napowietrzania oraz nowy system sterowania. Drugi ciąg był używany jako linia referencyjna, na której urządzenia do napowietrzania i sterowanie były eksploatowane jak w dotychczasowy sposób.

Nowe urządzenia do napowietrzania zainstalowane do obsługi linii testowej obejmowały dmuchawę produkcji AtlasCopco, niskociśnieniowe dyfuzory produkcji Sanitaire do wytwarzania drobnych pęcherzyków oraz urządzenia pomiarowe. Przebadano dwie strategie sterowania: sterowanie poziomem tlenu i sterowanie poziomem azotu amonowego.

Wyniki pokazują, że 35% całkowitej obniżki zużycia energii zostało osiągnięte dzięki nowej dmuchawie śrubowej. Dyfuzor pozwolił zaoszczędzić kolejne 21%, a dzięki precyzyjnej

regulacji sterowników, pomiarom stężenia tlenu i ciśnienia powietrza można było zaoszczędzić jeszcze dodatkowo 9% energii. Sterowanie na podstawie stężenia amoniaku nie dało żadnych oszczędności, gdyż najniższy dopuszczalny punkt ustawień rozpuszczonego tlenu (DO) wynoszący 0,7 mg/litr utrzymywał poziom azotu amonowego na odpływie poniżej punktu ustawień dla amoniaku wynoszącego 1 mg/litr. Ostatecznie, całkowita oszczędność energii dla badanej linii wyniosła $65 \pm 2\%$.

Każda modernizacja urządzeń do napowietrzania zwiększała oszczędność energii o następujące wartości:

- Dmuchawa 35 %.
- Dyfuzory 32 %.
- Sterowanie na podstawie poziomu tlenu ze zmniejszonym stężeniem rozpuszczonego tlenu (DO) i ciśnienia powietrza – 21%.

Ostateczne oszczędności odpowiadały 13% całkowitego zużycia energii przez oczyszczalnię ścieków Sternö. Te oszczędności odpowiadają rocznym oszczędnościom 178 MWh, co pozwala na zmniejszenie kosztu energii o 200 000 koron (SEK) na rok. Okres zwrotu inwestycji w modernizację systemu napowietrzania i sterowania wyniósł 3,7 roku (Larsson, 2011).

5.6. System napowietrzania i sterowania 2

W 2009 roku w oczyszczalni ścieków 'Dębogórze' (równoważna liczba mieszkańców – RLM: 450 000) w Gdyni w Polsce zainstalowano nowy, skomputeryzowany system sterowania i nadzoru. Sieć informatyczna obejmuje cały system AKPiA składający się z 21 sterowników obiektowych oraz z 4 stanowisk operatorskich SCADA. Każdy sterownik obsługuje jeden wydzielony obszar urządzeń technologicznych. Każdy sterownik jest wyposażony w interfejs graficzny, który pozwala operatorowi na:

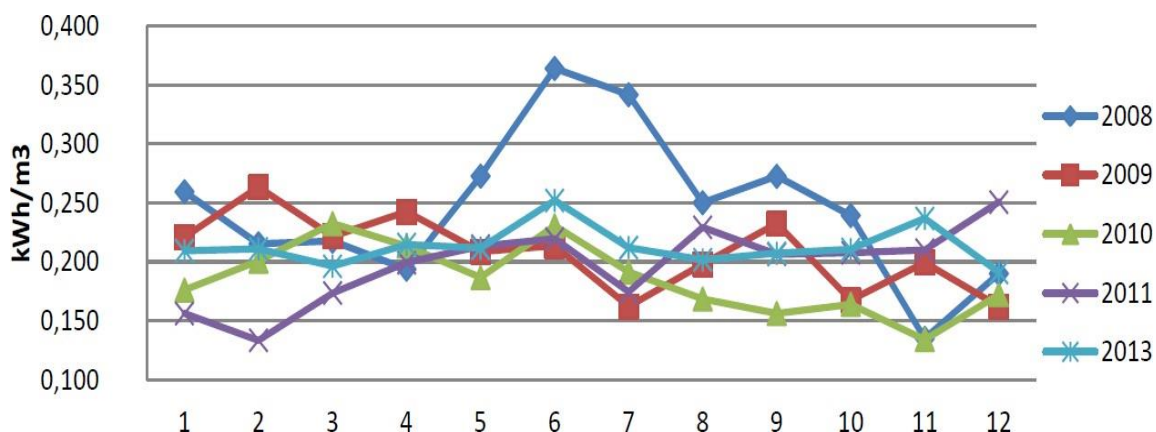
- ciągłą obserwację parametrów technologicznych i stanu urządzeń technologicznych,
- dokonywanie zmian nastaw,
- miejscowe sterowanie ręczne,
- diagnostykę uszkodzeń.

Automatyzacja i sterowanie systemem napowietrzania reaktorów biologicznych obejmuje:

- kontrolę prawidłowości przebiegu procesu nityfikacji na podstawie wskazań urządzeń pomiarowych zawartości azotu amonowego zainstalowanych na kanałach wylotowych z poszczególnych bloków reaktorów,
- automatyczną regulację poziomu natleniania w zależności od stężenia azotu amonowego na odpływie z bloków reaktorów - system sterowania nadrzędnego zadaje wielkość stężenia tlenu, które powinno być utrzymywane w poszczególnych strefach tlenowych reaktorów.
- automatyczną regulację właściwego poziomu tlenu w poszczególnych sekcjach tlenowych zapewniają sondy pomiarowe tlenu - ilość powietrza dostarczanego do poszczególnych stref regulowana jest przy pomocy przepustnic elektrycznych, natomiast układ sterowania nadrzędnego zapewnia właściwą wydajność stacji dmuchaw.

Strategia sterowania pozwala dmuchawom pracować z prędkością, która odpowiada rzeczywistym potrzebom procesowym i zapobiega niepotrzebnemu przetlenieniu ścieków w okresach zmniejszonego zapotrzebowania na tlen. To pozwala osiągnąć lepszą wydajność procesu denityfikacji i w efekcie jeszcze bardziej obniżyć zapotrzebowanie na tlen. Dzięki tej

nowej strategii sterowania napowietrzaniem zaobserwowano obniżenie energochłonności o około 15-25% w porównaniu do lat sprzed modernizacji (2009) (Remiszewska, 2014). Rysunek 6. przedstawia zużycie energii w kolejnych latach.



Rys 6. Zużycie energii na napowietrzanie, rok 2008 – przed modernizacją oraz lata 2009-2013 – po modernizacji, Oczyszczalnia ścieków Dębogórze (Remiszewska, 2014).

Tabele 9 i 10 prezentują zużycie energii w kolejnych latach po instalacji nowego systemu sterowania napowietrzaniem. Można zobaczyć, że wraz z upływem czasu i rosnącą równoważną liczbą mieszkańców obserwuje się tylko niewielki wzrost energochłonności napowietrzania, podczas, gdy jednostkowa energochłonność napowietrzania pozostaje prawie na tym samym poziomie.

Tabela 9. Całkowite zużycie energii i energia na napowietrzanie w kWh/dzień i kWh/RLM/dzień w oczyszczalni ścieków Dębogórze, Polska (dane udostępnione przez Wodociągi Gdynia).

rok	2013	2014	2015	2016
RLM	427 600	444 000	476 000	463 000
Energia w kWh/dzień				
Całkowita	35 888	36 865	38 967	39 497
Napowietrzanie	11 969	11 912	12 733	13 257
Energia w kWh/RLM/dzień				
Całkowita	0,084	0,083	0,082	0,085
Napowietrzanie	0,028	0,027	0,027	0,029

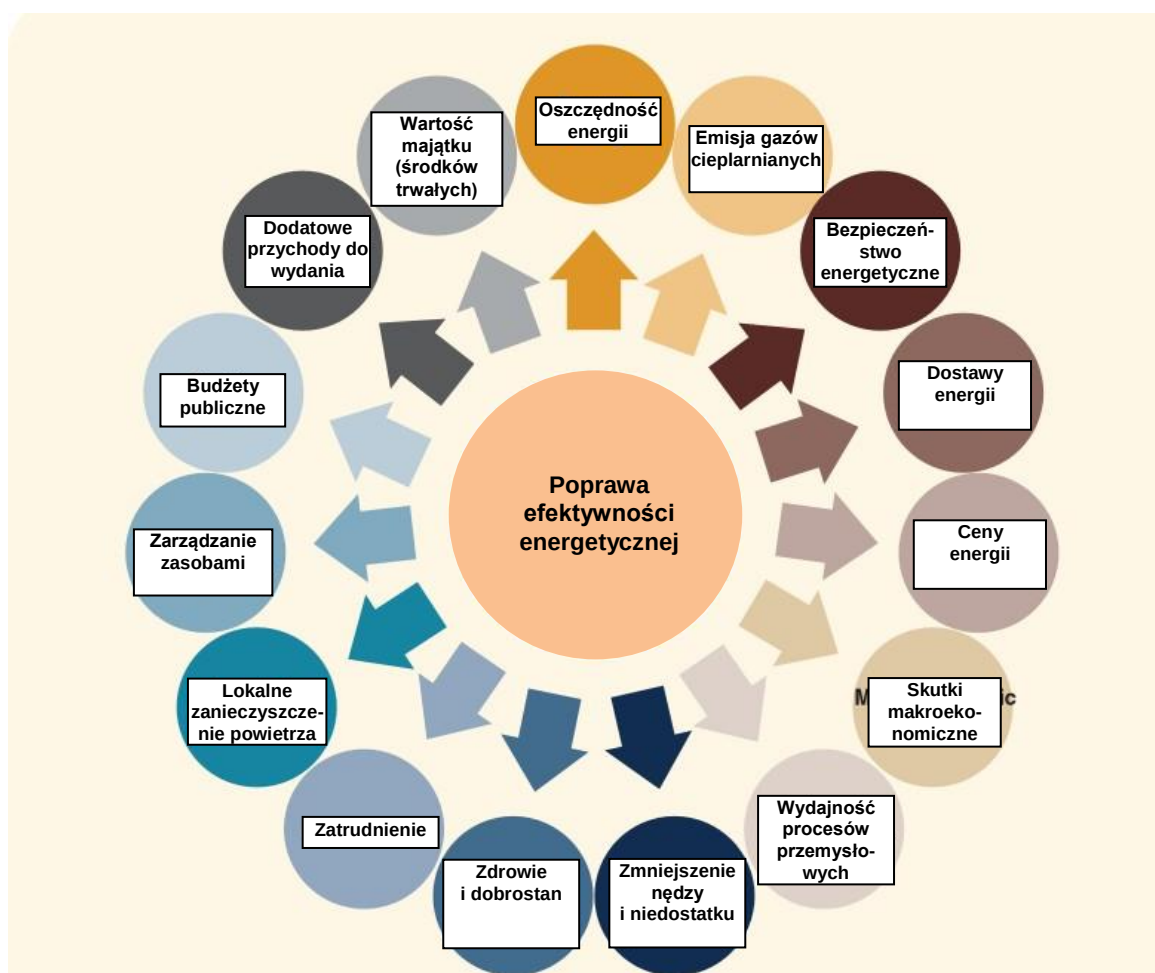
Tabela 10. Całkowite i jednostkowe zużycie energii w oczyszczalni ścieków Dębogórze, Polska (dane udostępnione przez Wodociągi Gdynia).

	2013		2014		2015		2016	
	zużycie energii w kWh/rok	jednostkowe zużycie energii	zużycie energii w kWh/rok	jednostkowe zużycie energii	zużycie energii w kWh/rok	jednostkowe zużycie energii	zużycie energii w kWh/rok	jednostkowe zużycie energii
całkowite	13 396	0,65 kWh/m ³ 7,98 kWh/kgN usun 1,53 kWh/kgBOD usun	13 456	0,68 kWh/m ³ 8,07 kWh/kgN usun 1,44 kWh/kgBOD usun	14 223	0,71 kWh/m ³ 8,22 kWh/kgN usun 1,50 kWh/kgBOD usun	14 456	0,69 kWh/m ³ 8,26 kWh/kgN usun 1,57 kWh/kgBOD usun
napowietrzanie	4 369	0,21 kWh/m ³ 2,6 kWh/kgN usun 0,50 kWh/kgBOD usun	4 347	0,22 kWh/m ³ 2,6 kWh/kgN usun 0,47 kWh/kgBOD usun	4 648	0,23 kWh/m ³ 2,7 kWh/kgN usun 0,49 kWh/kgBOD usun	4 852	0,23 kWh/m ³ 2,8 kWh/kgN usun 0,53 kWh/kgBOD usun

6. Korzyści wynikające z poprawy efektywności energetycznej

Poprawa efektywności energetycznej w instalacjach oczyszczalni ścieków może zapewnić cały wachlarz korzyści środowiskowych, ekonomicznych i innych, m.in.

- Zmniejszenie zanieczyszczenia powietrza i obniżenie emisji gazów cieplarnianych. Poprawa sprawności energetycznej w instalacjach uzdatniania wody i oczyszczania ścieków może pomóc w obniżeniu emisji gazów cieplarnianych i zanieczyszczeń powietrza dzięki zmniejszeniu zużycia energii produkowanej z paliw kopalnych.
- Obniżenie kosztów energii. Lokalne władze mogą osiągnąć znaczące oszczędności wydatków poprzez zwiększenie sprawności np. pomp i urządzeń do napowietrzania w oczyszczalniach ścieków. Zakłady mogą również zastosować inne sposoby w celu obniżenia kosztów energii, jak np. przesunięcie szczytowego poboru energii z godzin maksymalnego zapotrzebowania na energię na okresy czasu, gdy energia elektryczna jest tańsza albo też wykorzystanie systemów skojarzonych (CHP) do produkowania własnej energii elektrycznej i ciepła z biogazu.
- Wsparcie rozwoju gospodarczego poprzez tworzenie miejsc pracy i rozwój rynku. Inwestycje w efektywność energetyczną mogą stymulować lokalną gospodarkę i dać impuls do rozwoju rynków usług poprawiających sprawność energetyczną. Co więcej, zakłady obniżające swoje koszty energii poprzez poprawę sprawności i wydajności mogą wydać zaoszczędzone środki na cokolwiek, często wnoszą wkład w lokalną gospodarkę.
- Zademonstrowanie wiodącej roli i wskazanie innym przykładu do naśladowania. Poprzez wdrażanie projektów ukierunkowanych na efektywność energetyczną w oczyszczalniach ścieków, lokalne władze mogą nie tylko pokazać oszczędność pieniędzy, lecz także skojarzone korzyści dla środowiska uzyskiwane dzięki zmniejszeniu zużycia energii (np. zastosowanie bardziej wydajnych pomp). Można też ułatwić szersze podejmowanie takich technologii i strategii przez prywatny sektor – w szczególności, gdy przedsiębiorstwa komunalne publikują dane o ekonomicznych i środowiskowych korzyściach z podjętych działań.
- Poprawa bezpieczeństwa energetycznego. Poprawa sprawności energetycznej w zakładach oczyszczalni ścieków zmniejsza zapotrzebowanie na energię elektryczną, pozwala uniknąć ryzyka ograniczeń lub całkowitego wstrzymania dostaw w okresach najwyższego zapotrzebowania na energię elektryczną i pomaga uniknąć konieczności budowy nowych elektrowni.
- Przedłużenie żywotności infrastruktury/urządzeń. Urządzenia o wyższej sprawności energetycznej mają zazwyczaj dłuższy okres eksploatacji i wymagają mniej serwisowania i remontów, niż stare technologie o niższej sprawności.
- Ochrona zdrowia publicznego. Poprawa sprawności energetycznej w oczyszczalniach ścieków może zmniejszyć zanieczyszczenie powietrza i wody przez zakłady energetyczne dostarczające elektryczność do tych zakładów, co skutkuje poprawą czystości powietrza i korzyściami dla ludzkiego zdrowia. Modernizacja wyposażenia może również pozwolić zakładom na zwiększenie ich przepustowości w zakresie oczyszczania ścieków lub poprawić wydajność i skuteczność procesu oczyszczania, zmniejszając potencjalny wpływ na wzrost poziomu mórz, awarie urządzeń oczyszczających oraz ryzyko chorób przenoszonych przez wodę.



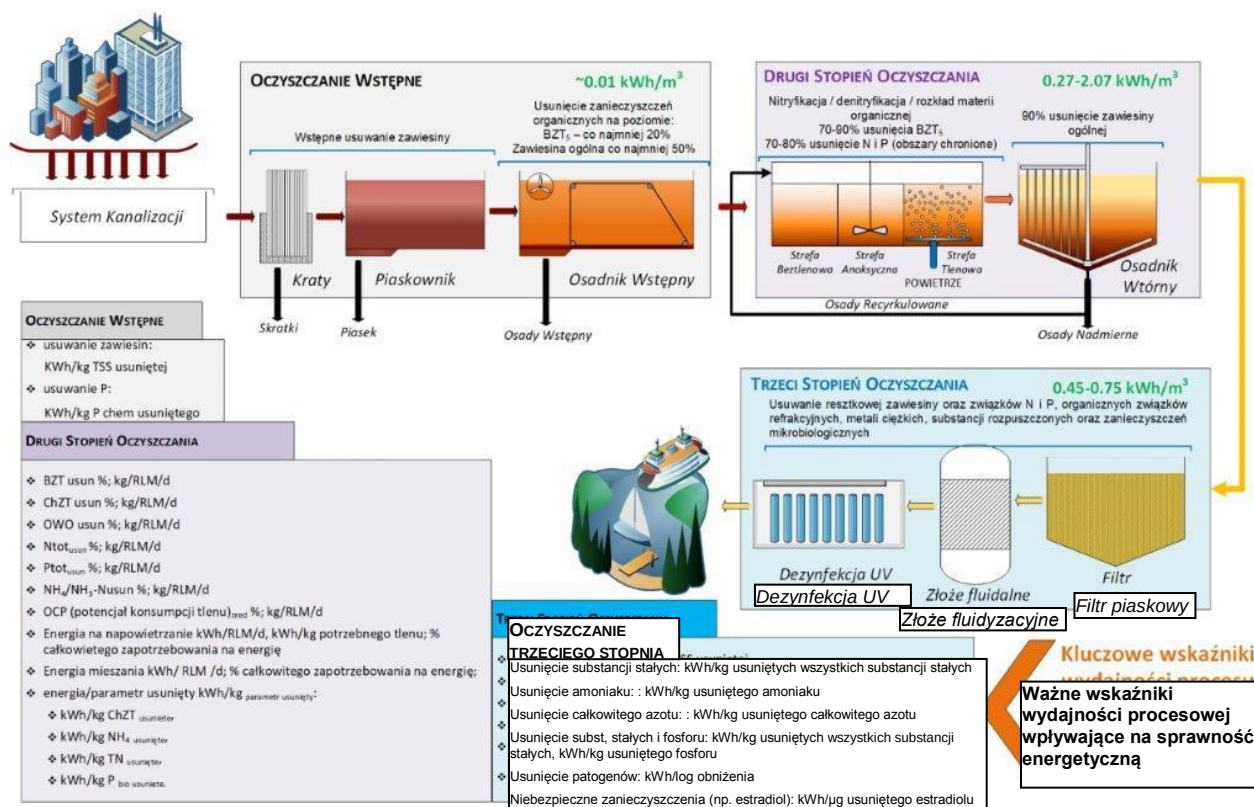
Rysunek 7. Korzyści wynikające z poprawy efektywności energetycznej (EPA, 2013).

7. Wnioski

Dla efektywnego i skutecznego zarządzania energią w oczyszczalniach ścieków podstawowym instrumentem pozwalającym na wdrożenie optymalizacji zużycia energii jest prawidłowo zbudowany plan działań. W niniejszym raporcie wskazano siedem głównych kroków, które powinno podjąć kierownictwo zakładu w celu opracowania strategii ukierunkowanej na stworzenie programu zarządzania energią skupionego na nieustannej poprawie efektywności energetycznej.

Niniejszy raport wskazuje, że potencjał dla odzysku i oszczędności energii jest ogromny. Można go wykorzystać do opracowania pomysłów rozwiązań poprawiających sprawność energetyczną instalacji istniejących lub dla nowo projektowanych, użyć go jako listy kontrolnej w celu oceny, czy działania ukierunkowane na sprawność energetyczną są w wystarczającym stopniu włączone w zakres projektu.

Systemy tlenowego oczyszczania ścieków to obszar, gdzie można znaleźć największy potencjał dla wzrostu sprawności energetycznej. Dla takich systemów tlenowego oczyszczania ścieków można uzyskać prosty wzrost efektywności, nawet do 50%, poprzez dostosowanie parametrów kontrolnych sterowania do wymogów jakości odpływu. W ściekach komunalnych jest zawarta wystarczająca ilość energii, by zapewnić pracę całej oczyszczalni ścieków. Samowystarczalność energetyczna oczyszczalni ścieków komunalnych w niedalekiej przyszłości nie jest nieosiągalna. Rewolucyjny postęp w sprawności energetycznej zależy od rozwoju nowatorskich technologii, np. beztlenowego usuwania azotu w głównym ciągu technologicznym.



Rys. 8. Zużycie energii i wskaźniki wydajności procesów wpływające na sprawność energetyczną w trzech krokach procesu technologicznego na oczyszczalniach ścieków z osadem czynnym.

8. Literatura

- Ainger C., Butler D., Caffor I., Crawford-Brown D., Helm D., Stephenson T., 2009, A low carbon water industry in 2050. Report SC070010/R3, Environment Agency, Bristol.
- Arlabosse P., Ferrasse J.-H., Lecomte D., Crine M., Dumont Y., Leonard A., 2011, Efficient sludge thermal processing: from drying to thermal valorization – Modern drying vol 4, edited by E. Tsotsas&A. Mujumdar, 2011, Wiley, 295-330, ISBN: 978-3-527-31559-8.
- Brandt M. J., Middleton R. A., Wang S., 2010, Energy efficiency in the water industry: a compendium of best practices and case studies, global report. Report Ref. No. 10/CL/11/3. Global Research Coalition.
- Bodik I., Kubaska M., 2013, Energy and sustainability of operation of a wastewater treatment plant. Environmental Protection Engineering 2013, 39(2), 15-24.
- Caffor I., 2010, Perspective: a vision of a low-carbon water sector in 2050. Proceedings of the ICE – Engineering Sustainability, 163, 9-14.
- Cao Y. S., 2001, Mass flow and energy efficiency of municipal wastewater treatment plants. IWA Publishing (August 25, 2011), ISBN-13: 978-1843393825.
- Cantwell J., King W.R., Lorand R.T., 2010, Overview of State Energy Programs and Guidelines for the Wastewater Sector, Water Environmental Research Foundation, IWA Publishing: London, UK, 2010.
- EPA, 2013, Energy Efficiency in Water and Wastewater Facilities, A guide to developing and implementing greenhouse gas reduction programs., U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY 2013.
- ESMAP, 2012, A primer on energy efficiency for municipal water and wastewater utilities, Technical report 001/1,

<http://documents.worldbank.org/curated/en/256321468331014545/pdf/682800ESMAP0WP0WWU0TR0010120Resized.pdf>.

Frijns J., 2014, Intervention concepts for energy saving, recovery and generation from the urban water systems D45-1. KWR Watercycle Research Institute.

Guerrini A., Roamno G., Indipendenza A., 2017. Energy efficiency drivers in wastewater treatment Plants: a double bootstrap DEA analysis, *Sustainability*, 9, 1126.

Heidrich E. S., Curtis T. P. & Dolfing J., 2011, Determination of the internal chemical energy of wastewater. *Environ. Sci. Technol.* 45, 827–832.

Global Water Research Coalition, 2010, An energy and carbon footprint neutral urban water cycle by 2030. Workshop on water and energy, PUB WaterHub, Global Water Research Coalition: Singapore, 2010,

http://www.waterrf.org/resources/Lists/SpecialReports/Attachments/2/GWRC_report_water_energy_workshop.pdf.

Jetten M., Cirpus I, Kartal B, van Niftrik L, van de Pas-Schoonen KT, Sliekers O, Haaijer S, van der Star W, Schmid M, van de Vossenberg J, Schmidt I, Harhangi H, van Loosdrecht M, Gijs Kuenen J, Op den Camp H, Strous M., 2005, 10 years of research on the anaerobic oxidation of ammonium. *Biochem. Soc. Trans* pp. 119 – 123.

Jędrzejewski C., Dobiegała E, 2012, GOŚ Debogórze koło Gdyni - nowoczesne technologie oczyszczania ścieków oraz kompleksowa gospodarka osadami", *Forum Eksploatatora* 3/2012(60), str. 32-38, ISSN 1640-8624, Wydawnictwo Seidel Przywecki.

Kalnin I.M., 1994, Prospects for the development of heat pumps, *Refrigeration*, 1 (1994), pp. 26-29.

Larsson V., 2011, Energy savings with a new aeration and control system in a mid-size Swedish wastewater treatment plant. <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:485284/FULLTEXT01.pdf>.

Leong, L.Y.C., J. Kuo, and C Tang. 2008. Disinfection of Wastewater Effluent- Comparison of Alternative Technologies. Water Environment Research Foundation (WERF), Alexandria, VA.

Mizuta K., Shimada M., 2010, Benchmarking energy consumption in municipal wastewater treatment plants in Japan, *Water Sci. Tech.* 2010, 62(10), 2256.

Parsons D., Cabrera Marcet E., Jeffrey P., 2012, Carbon sensitive urban water future. D 21.1, trust.

Pacific Gas and Electric Company (PG&E). 2001. Energy Benchmarking Secondary Wastewater Treatment and Ultraviolet Disinfection Processes at Various Municipal Wastewater Treatment Facilities. San Francisco, CA. Available online at <http://www.cee1.org/ind/mot-sys/www/pge2.pdf>.

Plappally A.K., Lienhard V., 2012, Energy production for water production, treatment, end use, reclamation, and disposal, *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 2012, 16, 4818.

Remiszewska A., 2014, Napowietrzanie w bioreaktorach jako główny konsument energii w oczyszczalni. Porównanie rozwiązań, sposoby optymalizacji. In *Proceedings of „Efektywność energetyczna oczyszczalni ścieków – możliwości optymalizacji kosztów eksploatacyjnych”*, Gdańska Fundacja Wody, 14-25.04.2014.

Singh P., Carliell-Marquet C., Kansal A., 2012, Energy pattern analysis of a wastewater treatment plant, *Applied Water Science* 2012, 2, (3), p 221–226.

Tchobanoglous G., Burton F.L., Stensel H.D., 2006, *Wastewater Engineering, Treatment and rescue*, Metcalf and Eddy, 4th ed, McGraw Hill Companies: New York, NY, USA, 2006.

Water Environment Federation, *Energy conservation in water and waste water facilities*, 1st Ed WEF Press, McGraw Hill, New York 2009, 400.

Zaborowska E., Czerwionka K., Makinia J., 2017, Strategies for achieving energy neutrality in biological nutrient removal systems – a case study of the Słupsk WWTP (northern Poland). *Water. Sci. Tech.*, 2017, 75 (3), 727 – 740.

Van Haandel A., Van der Lubbe J., 2007, Handbook Biological Waste Water Treatment - design and optimisation of activated sludge systems. ISBN 978-90-77983-22-5. 2007, The Netherlands.

Wennerholm E., 2014, Performance indicator analysis as a basis for process optimization and energy efficiency in municipal wastewater treatment plants. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:694836/FULLTEXT01.pdf>.

Wett B., 2007, Development and implementation of a robust deammonification process. Wat. Sci. & Technol., 56 (7), 81-88.

WssTP, 2011, Water and energy: strategic vision and research needs. The Water Supply and Sanitation Technology Platform.

Yang L., Zeng S., Chen J., He M., Yang W., 2010, Operational energy performance assessment system of municipal wastewater treatment plants. Water. Sci. Tech., 2010, 62(6), 1361.



O projekcie:

Celem projektu ETV4Water jest promowanie Weryfikacji Technologii Środowiskowych (ETV) jako narzędzia ułatwiającego wprowadzanie na rynek nowych technologii poprawiających sprawność energetyczną oczyszczalni ścieków komunalnych. Projekt jest ukierunkowany na budowanie potencjału dla małych i średnich przedsiębiorstw, przede wszystkim z Polski i Norwegii, lecz również z innych krajów, aby wspólnie opracowywać i oferować innowacyjne technologie w dziedzinie ochrony środowiska dla sektora zaopatrzenia w wodę i oczyszczania ścieków, a także spowodować, by takie technologie były wiarygodne dla nabywców dzięki przejściu przez proces weryfikacji prowadzony w ramach unijnego programu ETV oraz odpowiadały rzeczywistym potrzebom użytkowników.

Kontakt w Polsce



Izabela Ratman-Kłosińska
Jednostka Weryfikująca Technologie Środowiskowe
Instytut Ekologii Obszarów Uprzemysłowionych
tel: +48 691 566 888
e-mail: i.ratman-klosinska@ietu.pl

Więcej informacji:

www.etv.ietu.pl/o-projekcie-etv4water/

Kontakt w Norwegii



Renata Tomczak-Wandzel
Aquateam COWI AS
tel.: +47 488 50 433
e-mail: retw@cowi.com

Więcej informacji:

www.aquateamcowi.no/nyheter/etv4-water-project/

Partnerzy projektu



Jednostka Weryfikująca Technologie Środowiskowe
Instytut Ekologii Obszarów Uprzemysłowionych
www.etv.ietu.pl



Aquateam COWI AS Norway www.aquateam.no



Gdańska Fundacja Wody

Gdańska Fundacja Wody
Poland
www.gfw.pl

© Copyright by ETV4Water 2017 Wszystkie prawa zastrzeżone.

Prawo własności do niniejszego dokumentu należy do konsorcjum ETV4Water. Powielanie jest dozwolone pod warunkiem podania źródła. Odpowiedzialność za zawartość spoczywa na autorach, treść dokumentu niekoniecznie odzwierciedla opinię organizacji finansujących.