ACTA INNOVATIONS
SERIA WYDAWNICZA
ISBN 978-83-63704-20-9

# INNOWACYJNE ROZWIĄZANIA W ZAKRESIE ZAGOSPODAROWANIA ODPADÓW NA CELE ENERGETYCZNE DLA PRZEMYSŁU MLECZARSKIEGO

Realizacja:
Centrum Badań i Innowacji
Pro-Akademia

Recenzenci:
prof. nzw. dr hab. inż. Dorota Chwieduk - Politechnika Warszawska
prof. dr hab. inż. Janusz Lewandowski - Politechnika Warszawska
dr Edyta Kiedrzyńska - Uniwersytet Łódzki
dr Dariusz Trzmielak - Uniwersytet Łódzki
dr Iwona Wagner - Uniwersytet Łódzki

Redakcja naukowa:
dr Ewa Kochańska - Centrum Badań i Innowacji Pro-Akademia

Korekta: dr Marlena Kowalczyk

Projekt, skład i redakcja techniczna:
dr inż. Ryszard Gałczyński

Wykonawstwo poligraficzne:
Agencja MAGA, Łódź.

© Copyright by Centrum Badań i Innowacji Pro-Akademia, 2014.
CBI Pro-Akademia ISBN 978-83-63704-13-1

Poglądy zawarte w publikacji odzwierciedlają poglądy autorów i nie muszą być tożsame z poglądami wydawcy i grantodawcy.
Niniejsza publikacja została przygotowana jako rezultat pracy zespołu ekspertów polskich w ramach projektu pt. ”Naukowcy dla gospodarki województwa łódzkiego" oraz "Naukowcy dla gospodarki Mazowsza", realizowanych przez Centrum Badań i Innowacji Pro-Akademia.

Publikacja bezpłatna

Łódź 2014

# SPIS TREŚCI


| | STRONA |
|---|---|
| WPROWADZENIE,<br>*Ewa Kochańska* | 4 |
| DETERMINANTY ROZWOJU I OBSZARY INNOWACYJNOŚCI PRZEMYSŁU MLECZARSKIEGO,<br>*Ewa Kochańska* | 5 |
| WPŁYW PRZEMYSŁU MLECZARSKIEGO NA ŚRODOWISKO. STANDARDOWE METODY ZAGOSPODAROWANIA ODPADÓW I ŚCIEKÓW POPRODUKCYJNYCH,<br>*Marcin Bizukojć, Karina Michalska, Anna Pazera* | 18 |
| INNOWACJE DLA BRANŻY MLECZARSKIEJ - BIOGAZOWNIE PRZYZAKŁADOWE,<br>*Karina Michalska, Anna Pazera, Marcin Bizukojć* | 32 |
| ALTERNATYWNE METODY OCZYSZCZANIA ŚCIEKÓW MLECZARSKICH. HYDROFITOWE OCZYSZCZALNIE,<br>*Zdzisława Romanowska-Duda, Wiktor Pszczółkowski, Wojciech Wolf, Mieczysław Grzesik* | 55 |
| BIOGAZ POCHODZENIA ORGANICZNEGO JAKO PALIWO DLA WĘGLANOWYCH OGNIW PALIWOWYCH,<br>*Jarosław Milewski* | 75 |
| WYKORZYSTANIE INSTALACJI FOTOWOLTAICZNYCH WARUNKIEM POPRAWY NIEZALEŻNOŚCI ENERGETYCZNEJ MLECZARNI, WYPOSAŻONEJ W REAKTOR BIOGAZOWY,<br>*Maciej Sibiński* | 86 |

Ewa Kochańska

# WPROWADZENIE

Branża mleczarska ma szczególne znaczenie dla rozwoju społeczno-gospodarczego wielu regionów europejskich i polskich. Doniosłość branży mleczarskiej jest uwarunkowana kilkoma elementami:

- produkcja mleka występuje na obszarach o niewielkich możliwościach gospodarczych;
- produkcja mleka często jest jedyną formą działalności produkcyjnej w regionie;
- przemysł mleczarski wpisuje się w nurt dynamicznie rozwijających się badań naukowych, wykorzystujących biotechnologie;
- jednym z atutów przemysłów biotechnologicznych jest możliwość efektywnego zagospodarowania własnych odpadów na cele energetyczne.

Niniejsza monografia jest rezultatem kilkuletniej pracy zespołu specjalistów z różnych dziedzin nauki: nauk technicznych, biologicznych oraz społeczno-ekonomicznych. Zaprezentowano w niej problematykę rozwoju mikro-technologii produkcji biogazu z wykorzystaniem odpadów biodegradowalnych, powstających w średniej wielkości przedsiębiorstwie mleczarskim. Prezentowana koncepcja opiera się na innowacyjnym połączeniu technologii produkcji biogazu w mikroskali pojedynczego przedsiębiorstwa mleczarskiego. Koncepcja jest oparta na zastosowaniu reaktora biogazowego, wkomponowanego w linię produkcyjną przedsiębiorstwa oraz ogniwa paliwowego, zasilanego metanem, przy jednoczesnym wykorzystaniu hybrydowych urządzeń optoelektronicznych. Dopełnieniem rozwiązań technicznych i procesowych, jest biologiczny system oczyszczania ścieków mleczarskich, wykorzystujący makrofity o właściwościach fitoremediacyjnych.

Opisana problematyka zagospodarowania odpadów mleczarskich na cele energetyczne może być przykładem innowacyjnych rozwiązań biotechnologicznych. Stanowić też ona może innowację organizacyjną i marketingową, nie tylko w odniesieniu do średnich i małych przedsiębiorstw mleczarskich, ale i rolno-spożywczych.

Innowacje w branży mleczarskiej, stanowiące przedmiot rozważań niniejszej monografii, dobrze wpisują się w cele i priorytety rozwojowe Unii Europejskiej na lata 2014-2020. Zaprezentowane zaś rezultaty i rozwiązania dowodzą, że współpraca przedsiębiorstw mleczarskich i instytutów naukowych może zaowocować wypracowaniem pan-europejskich projektów, zorientowanych na aktualne i przewidywane globalne wyzwania, stojące przed branżą mleczarską.

Ewa Kochańska

- doktor, Centrum Badań i Innowacji Pro-Akademia, ul. Piotrkowska 238, 90-360 Łódź, ewa.kochanska@proakademia.eu

Ewa Kochańska
Maksymilian Kochański

# DETERMINANTY ROZWOJU I OBSZARY INNOWACYJNOŚCI PRZEMYSŁU MLECZARSKIEGO

Streszczenie

W artykule podjęto próbę zaprezentowania sytuacji i prognoz zmian na światowym rynku produktów mleczarskich. Wspomniana sytuacja i prognozy wynikają z dokonujących się zmian demograficznych w krajach najbardziej rozwiniętych, w tym w Unii Europejskiej i w Polsce oraz z rosnącego popytu na przetwory mleczne na rynkach rozwijających się. Zdiagnozowane obszary problemowe potraktowano jako szanse rozwojowe dla branży mleczarskiej, stwarzane dzięki wprowadzeniu innowacji technologicznych, marketingowych, logistycznych oraz społecznych.

Abstract

This article attempts to present situation and forecasts of changes in the global dairy market, taking place due to the demographic changes in most developed countries, including the European Union and Poland, and the growing demand for processed milk in developing markets. At the same time diagnosed problem areas were treated as opportunities for development of the dairy industry, based on various types of innovation: technological, marketing, logistics and social innovations.

Słowa kluczowe

branża mleczarska, odpady biodegradowalne, gospodarka bezodpadowa, łańcuch dostaw, innowacje w branży mleczarskiej

Keywords

dairy industry, biodegradable wastes, zero-waste, supply chain, innovations in dairy market

Ewa Kochańska
- doktor, Centrum Badań i Innowacji Pro-Akademia, ul. Piotrkowska 238, 90-360 Łódź, ewa.kochanska@proakademia.eu.

Maksymilian Kochański
- inżynier, Centrum Badań i Innowacji Pro-Akademia, ul. Piotrkowska 238, 90-360 Łódź, maksymilian.kochanski@proakademia.eu.

## Uwarunkowania społeczne rozwoju branży mleczarskiej na świecie

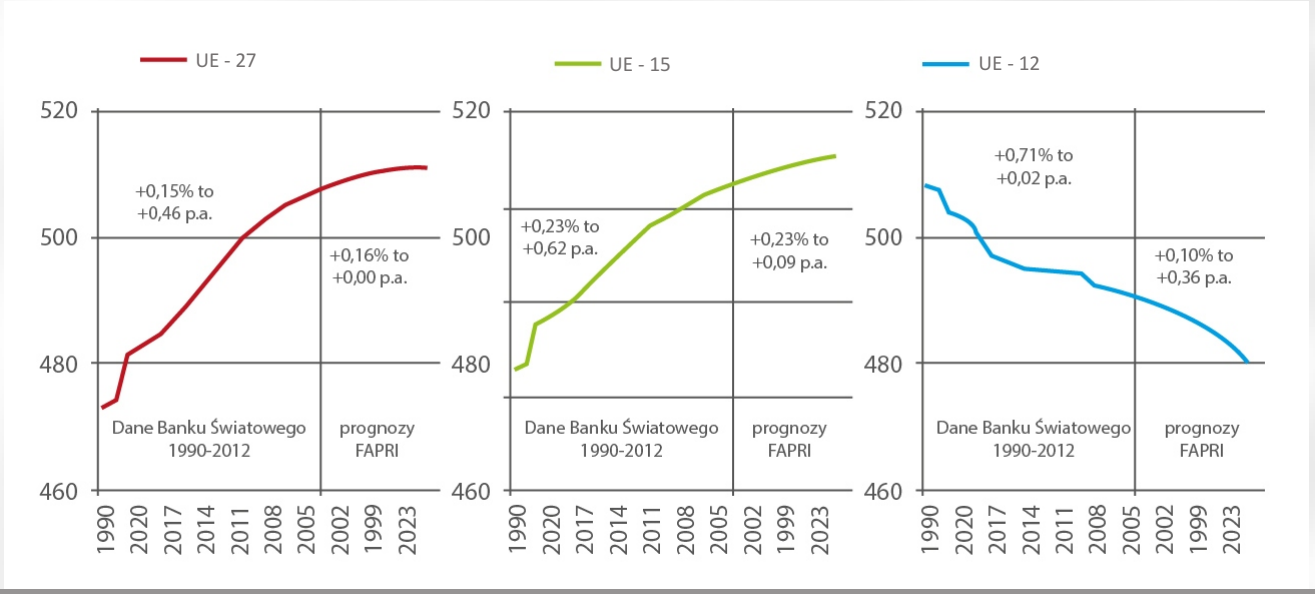
Mleko i produkty mleczne są traktowane jako podstawa diety w większości krajów świata. Najwyższy poziom konsumpcji mleka oraz przetworów mlecznych występuje w krajach zachodnich i północnych UE. Wynosi on od 280 do 300 kilograma na mieszkańca. Średnia unijna wynosi około 243 kg na mieszkańca i jest bardzo podobna do poziomu w Stanach Zjednoczonych i Kanadzie.

W państwach członkowskich, które przystąpiły do Unii Europejskiej w roku 2004, w tym w Polsce, poziom konsumpcji mleka i produktów mlecznych ma charakter wzrostowy. Wynosi on obecnie około 200 kg na mieszkańca.

Potencjał do rozszerzenia rynku mleka i przetworów mlecznych w UE jest mały: konsumpcja mleka i produktów mleczarskich w UE jest niemal w stagnacji. Średni wzrost produkcji w ciągu ostatnich lat nie przekraczał 0,3% w skali roku.

Wielu analityków rynku mleka wiąże jego rozwój z kwestiami demograficznymi. Ukazuje się wprost, że niski wskaźnik urodzeń i starzenie się społeczeństw krajów rozwiniętych, przekłada się na zmniejszającą się liczbę konsumentów produktów spożywczych.

Biorąc pod uwagę trendy demograficzne w krajach Unii Europejskiej jako całości UE-27 oraz w podziale na kraje „Starej Unii" UE-15 i „Nowe kraje członkowskie" UE-12, Bank Światowy (World Bank) oraz Instytut Badań nad Żywnością i Polityką Rolną (Food and Agricultural Policy Research Institute (FAPRI)) prognozują zróżnicowaną sytuację ludnościową, a tym samym różny popyt na produkty mleczarskie.




**Wykres 1. Sytuacja demograficzna w krajach Unii Europejskich.**
***Źródło: CBI Pro-Akademia na podstawie [1].***

Spadek populacji w krajach <<Nowej Unii>> oznacza z jednej strony starzenie się społeczeństwa w tych krajach, ale z drugiej strony wzrost zamożności i zmianę upodobań żywnościowych. W całej Europie widoczne są następujące zmiany w konsumpcji mleka i przetworów mlecznych, związane z demografią i wzrostem stopy życiowej:

## Trend 1: Wzrost cen żywności i oszczędzanie

W ostatnich latach zarejestrowano podwyżkę cen żywności na całym świecie, spowodowaną głównie klęskami żywiołowymi i zmianami klimatu. Można spodziewać się dalszego wzrostu cen żywności, ze względu na warunki środowiskowe oraz wyższe koszty produkcji (wzrost cen energii, paliw, paszy, opakowań).

## Trend 2: Starzenie się społeczeństw w krajach najwyżej rozwiniętych - czas „baby boomers"[2]

„Baby Boomers" oznacza pokolenia ludzi, którzy narodzili się czasie tzw. „baby boom" po II wojnie światowej, czyli jako wyż demograficzny w latach 1946-1964. W USA jest to 76 mln konsumentów, po 60. roku życia, którzy będą kontrolować 52% z 706 mld USD wydatków na artykuły spożywcze do 2015r. W Unii Europejskiej struktura wiekowa społeczeństwa jest podobna. Przewiduje się, że w 2060r. populacja będzie nieco liczniejsza (517 mln, w porównaniu z 502 mln w 2010 r.) oraz znacznie starsza (30% Europejczyków będzie miało 65 lat lub więcej) [3].

Grupa osób starszych stanowi więc najpoważniejszą grupę nabywców żywności, poszukujących posiłków przede wszystkim zdrowych i wygodnych. Wspólnymi cechami dla tej grupy bez względu na poziom dochodów są czynniki sentymentalne, nawyki, niska podatność na reklamę, przywiązanie do marki i sklepu.

## Trend 3: Obniżanie się ilości odpadów spożywczych

W związku ze zwyżką cen żywności z jednej strony i starzeniem się społeczeństw krajów rozwiniętych, w tym europejskich z drugiej zauważalny jest trend rozważnego dokonywania zakupów żywności, a w konsekwencji obniżania się ilości odpadów organicznych pochodzących z gospodarstw domowych i sklepów handlujących żywnością. Jednocześnie, wiele przedsiębiorstw rolno-spożywczych optymalizując produkcję, w ramach modelu biznesowego, prowadzi efektywną gospodarkę odpadami oraz systemy zarządzania produkcją, stanem magazynów i zapasami.

## Trend 4: Prowadzenie gospodarki zero-odpadowej „Zero Waste"

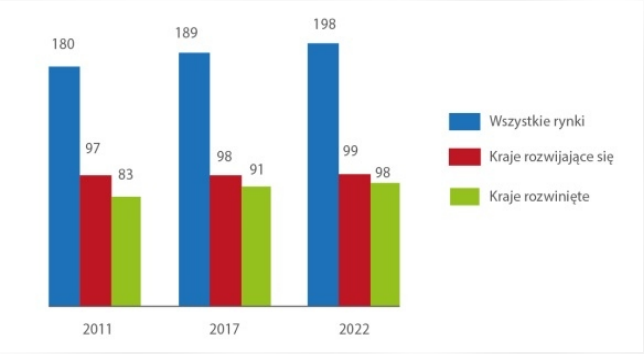
Gospodarka zero-odpadowa „Zero Waste" jest bardziej filozofią, a nie nazwą procesu czy technologii. Z pewnością jednak w tym podejściu kryje się potencjał dla poszukiwania nie tylko innowacji technologicznych, ale też organizacyjnych i społecznych. „Zero Waste" jest zbiorem zasad etycznych i ekonomicznych. Prowadzi do zmiany stylu życia i zrównoważonych praktyk, naśladujących naturalne cykle, w których wszystkie zużyte materiały powinny stawać się ponownie zasobami. Z tych ostatnich zaś można ponownie i wielokrotnie korzystać. „Zero odpadów" oznacza, że już na etapie projektowania oraz zarządzania produktami i procesami dąży się do systematycznego unikania, a także wyeliminowania objętości i toksyczności odpadów oraz materiałów. Celem jest recykling i re-using zamiast zrzutów do gleby, wody lub powietrza.

## Trend 5: Zarządzanie łańcuchem dostaw żywności „Z pola na stół”

Współczesny konsument produktów spożywczych, w tym mleczarskich, jest coraz bardziej zainteresowany pełną informacją o pochodzeniu żywność. Oczekiwana jest żywność regionalna, nieprzetworzona, o sprawdzonych recepturach, a jednocześnie nowocześnie opakowana. Trendowi temu sprzyja polityka ochrony klimatu, promująca skracanie tras dostaw żywności i okresów przechowywania.

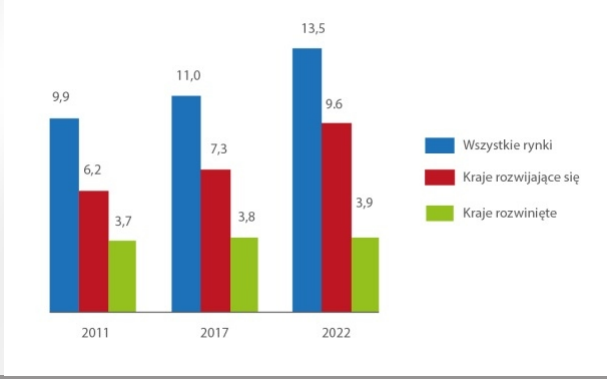
## Prognozy popytu na produkty mleczarskie

Powyższe trendy będą więc powodować zmiany na rynku produktów mleczarskich, zarówno po stronie produkcji, jak i konsumpcji produktów mleczarskich. Na wykresach 2-6 zaprezentowano prognozy, opracowane przez zespół profesora Holgera D. Thiele z Fachhochschule Kile.

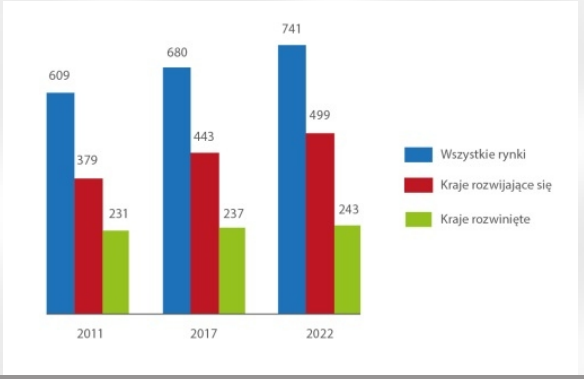



Wykres 2. Prognoza popytu na wszystkie produkty mleczarskie do 2020 r.
*Źródło: CBI Pro-Akademia na podstawie [1].*

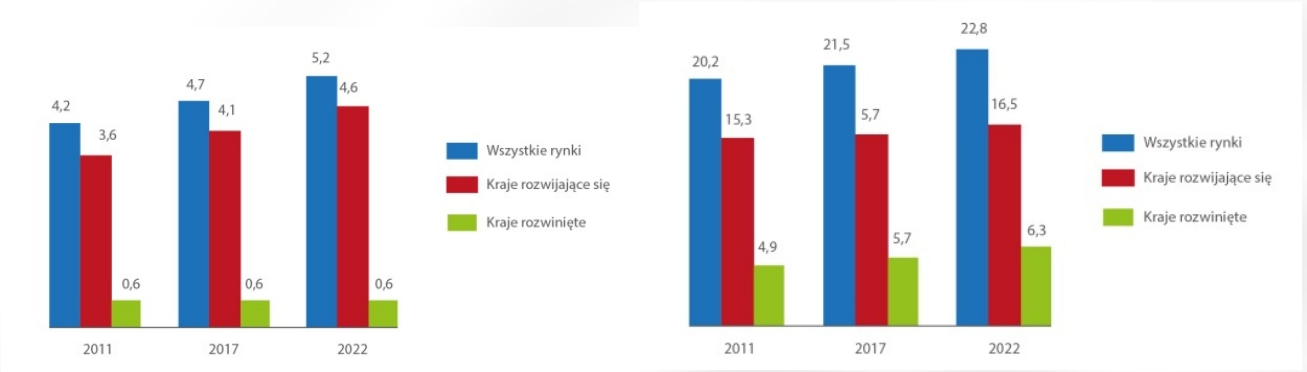
Z przytoczonych analiz wynika, że popyt na produkty mleczarskie będzie wzrastał. Jednak jeśli tempo wzrostu w krajach rozwiniętych na przestrzeni 11 lat wyniesie zaledwie 5%, to w krajach rozwijających się będzie na poziomie prawie 32%. Prognozy dla poszczególnych produktów mleczarskich przedstawiają wykresy 3-6.




**Wykres 3. Prognoza popytu na płynne mleko.**
*Źródło: CBI Pro-Akademia na podstawie [1].*




**Wykres 4. Prognoza popytu na masło.**
*Źródło: CBI Pro-Akademia na podstawie [1].*




Wykres 5. Prognoza popytu na pełne mleko w proszku.
*Źródło: CBI Pro-Akademia na podstawie [1].*

Wykres 6. Prognoza popytu na sery.
*Źródło: CBI Pro-Akademia na podstawie [1].*

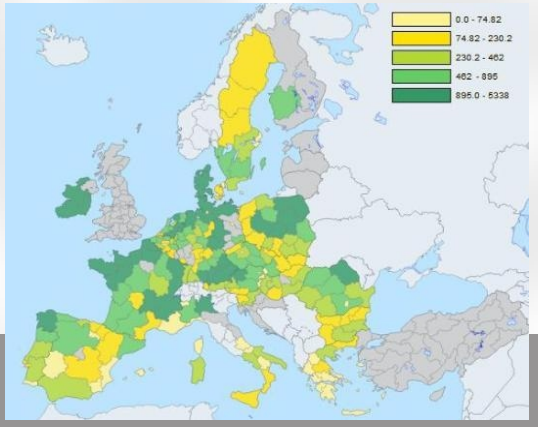
W krajach wysoko rozwiniętych prognozowany jest stosunkowo coraz mniejszy popyt na mleko w formie płynnej oraz całkowita stagnacja w przypadku mleka w proszku. Przewiduje się natomiast wzrost zainteresowania spożyciem sera.

W krajach rozwijających się spodziewane jest niemal 8-krotnie wyższe spożycie mleka w proszku i ogromny, prawie 60% wzrost popytu na mleko w formie płynnej. Jednocześnie w odróżnieniu od społeczeństw w bogatych państwach europejskich - w USA, Kanadzie, czy Japonii - mieszkańcy krajów rozwijających się będą konsumować znacznie mniej serów.

Branża mleczarska w Unii Europejskiej jest mocno zróżnicowana. Różnice te obserwowane są nie tylko na poziomie państw członkowskich, ale na poziomie regionów.

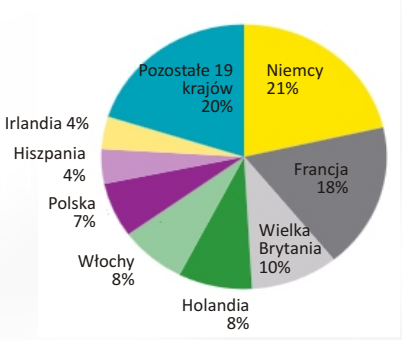
## Prognozy podaży produktów mleczarskich w Unii Europejskiej i w Polsce

Branża mleczarska ma szczególne znaczenie dla rozwoju społeczno-gospodarczego i intensywności ochrony środowiska w Unii Europejskiej z uwagi na fakt, że produkcja mleka występuje na obszarach o niewielkich możliwościach gospodarczych często jest to jedyna forma działalności gospodarczej w regionie.




**Mapa 1. Produkcja mleka krowiego w roku 2011 (w 1.000 t).**
***Źródło: CBI Pro-Akademia na podstawie [7].***

Hodowla bydła mlecznego i produkcja mleka są specjalizacją wielu europejskich regionów. Największe farmy mleczne zlokalizowane są w Niemczech, Francji, Polsce, Wielkiej Brytanii, Holandii, Włoszech, Polsce, Hiszpanii i Irlandii. Obrazuje to mapa 1.




Wykres 7. Producenci mleka krowiego w UE w 2011 r.
*Źródło: CBI Pro-Akademia na podstawie [7].*

W ocenie Dyrekcji Generalnej d/s Rolnictwa i Rozwoju Obszarów Wiejskich Komisji Europejskiej, sektor mleka będzie przyczyniać się do wzrostu gospodarczego i tworzenia miejsc pracy tylko w ograniczonej liczbie regionów. Nie oczekuje się istotnych zmian po usunięciu kwot mlecznych w 2015 r. i zasadniczych zmian trendów rozwojowych. Prawdopodobnie będzie kontynuowany proces, który trwa w Europie od kilkunastu lat i polega na koncentrowaniu i rozbudowywaniu stad, tworzeniu większych oraz bardziej wydajnych hodowli. Komisja Europejska dostrzega jednocześnie fakt, że produkcyjny charakter hodowli stanowi zagrożenie dla środowiska naturalnego.

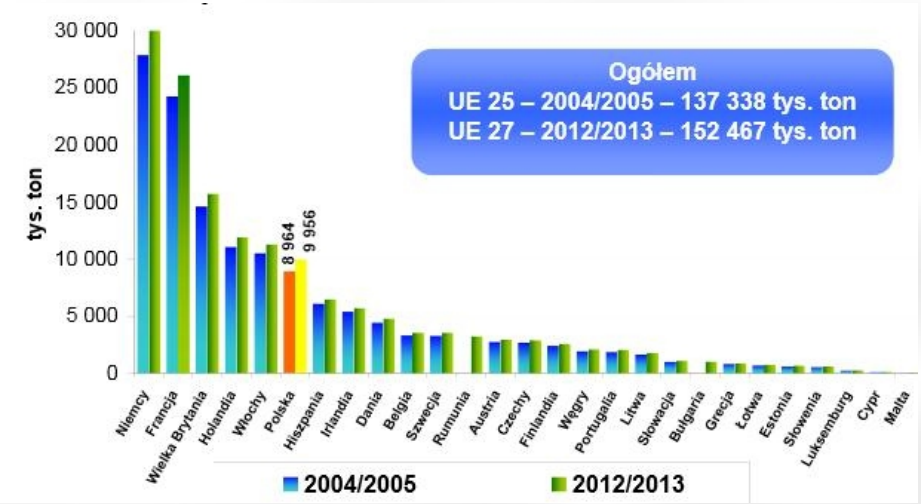
Niemniej jednak, porównując statystyki, dotyczące wielkości farm mlecznych, liczby krów oraz produkcji mleka, można zauważyć, że rankingi producentów mleka i wielkości stad, nie zawsze są ze sobą zbieżne. Dla przykładu Polska jest na trzecim miejscu pod względem wielkości posiadanych stad mlecznych, ale tylko na szóstym, pod względem ilości produkowanego mleka.

Branża mleczarska w Unii Europejskiej jest mocna zróżnicowana również pod względem specjalizacji w zakresie asortymentu produkcji. Występuje duża różnorodność produktów mlecznych: serów, masła, pełnotłustego mleka w proszku (PMP), odtłuszczonego mleka w proszku (OMP) i serwatki (w stanie ciekłym lub skoncentrowanym, w postaci proszku lub w blokach).

Na wzrost produkcji mleczarskiej w Unii Europejskiej mają bezpośredni wpływ kwoty mleczne. Każdemu państwu członkowskiemu przypisana jest krajowa kwota produkcji, którą dystrybuuje wśród swoich rolników. Jeśli państwo członkowskie przekroczy swoją kwotę, musi zapłacić karę (tzw. „super levy", dodatkowy podatek). Ta kara jest z kolei finansowana przez kary nałożone na tych rolników, którzy przekroczyli swoje indywidualne kwoty. Wysokość opłaty na poziomie kraju wynosi 27,83 euro za 100 kg mleka wprowadzonego do obrotu ponad krajową kwotę mleczną. Natomiast ostateczna jednostkowa wysokość opłaty, jaką jest zobowiązany uiścić dostawca za każdy kilogram przekroczenia jego kwoty indywidualnej jest ustalana po zakończeniu danego roku kwotowego, na podstawie wykorzystania kwot indywidualnych wszystkich rolników[1].

Zgodnie z rozporządzeniem Rady (WE) nr 72/2009/22, państwa członkowskie UE uzyskały prawo do zwiększania kwot krajowych - o 1% rocznie - do roku kwotowego 2013/2014. Wobec powyższego kwota przysługująca Polsce na rok 2011/2012 wynosiła 9 857 658 tys. kg. Polska dysponowała szóstym co do wielkości limitem w UE (po Niemczech, Francji, Wielkiej Brytanii, Holandii i Włoszech).

*1) Komentarz do informacji prasowej Komisji Europejskiej nt. przekroczenia kwot mlecznych przez pięć państw członkowskich UE w roku kwotowym 2012/2013, Ministerstwo Rolnictwa i Rozwoju Wsi, 10.01.2014.*




Wykres 8. Krajowe kwoty mleczne przysługujące państwom członkowskim UE w latach kwotowych 2004 / 2005 i 2012 / 2013.

*Źródło: Agencja Rynku Rolnego, 2013, na podstawie danych Komisji Europejskiej, DG Agriculture and Rural Development, 2013.*

Tabela 1. Produkcja produktów mlecznych w UE.

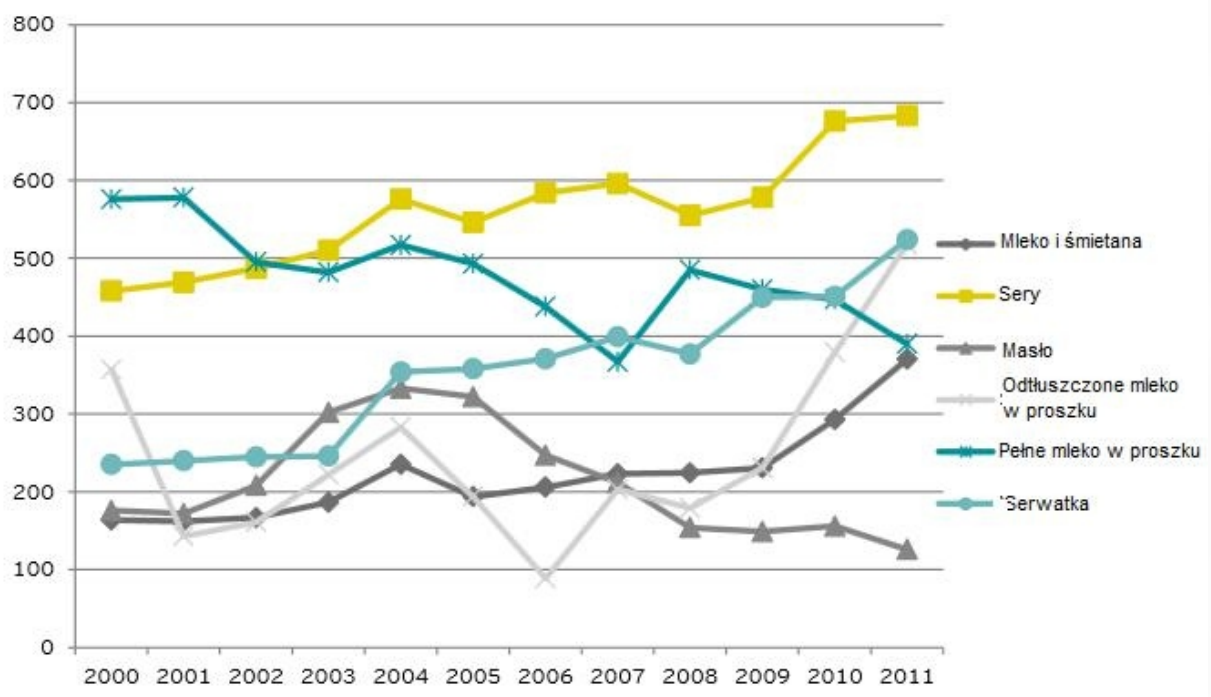
| Produkcja (1000 t) | Mleko krowie | Sery | Masło | PMP | OMP | Serwatka |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 2000 | 129 663 | 7 492 | 1 335 | 547 | 981 | 32 149 |
| 2001 | 130 789 | 7 833 | 1 394 | 514 | 877 | 32 930 |
| 2002 | 130 787 | 8 014 | 1 512 | 514 | 1 098 | 31 809 |
| 2003 | 132 366 | 8 129 | 1 512 | 504 | 1 073 | 32 527 |
| 2004 | 132 009 | 8 227 | 1 494 | 528 | 957 | 37 045 |
| 2005 | 133 500 | 8 333 | 1 383 | 553 | 966 | 37 976 |
| 2006 | 132 641 | 8 540 | 1 396 | 503 | 863 | 38 845 |
| 2007 | 132 840 | 8 534 | 1 401 | 457 | 830 | 43 205 |
| 2008 | 134 346 | 8 542 | 1 499 | 519 | 801 | 42 807 |
| 2009 | 133 194 | 8 574 | 1 287 | 436 | 922 | 38 702 |
| 2010 | 136 266 | 8 785 | 1 276 | 429 | 888 | 40 598 |
| 2011 | 138 921 | 8 837 | 1 321 | 351 | 1 020 | 40 754 |

*PMP Pełne Mleko w Proszku, *OMP Odtłuszczone Mleko w Proszku

*Źródło: CBI Pro-Akademia na podstawie [7].*

W 2009r. UE, przy pomocy reformy „Health Check" zadecydowała, że kwoty narodowe powinny wzrastać o 1% każdego roku. Tak więc ich wartość powoli ulegnie erozji. To powinno przygotować przemysł mleczarski na rok 2015, w którym kwoty mleczne zostaną całkowicie zniesione, a produkcja zliberalizowana. Można więc się spodziewać, że uwolnienie produkcji mleka w Unii Europejskiej przyczyni się do wystąpienia ostrej konkurencji pomiędzy głównymi producentami produktów mlecznych oraz zdywersyfikowanie i unowocześnienie oferty.

Poniżej zamieszczony wykres obrazuje poważne zmiany w unijnym eksporcie produktów mleczarskich, zaistniałe w ciągu ostatnich 10 lat.




Wykres 9. Eksport głównych produktów mleczarskich Unii Europejskiej w latach 2000-2011 (w tys. t.).
*Źródło: CBI Pro-Akademia na podstawie [7].*

Flagowym produktem branży mleczarskiej w Unii Europejskiej są sery. UE jest największym producentem i eksporterem serów na świecie. Eksport europejskich serów ustawicznie wzrasta, podobnie jak eksport serwatki, mleka i odtłuszczonego mleka w proszku jednak udział tych ostatnich produktów w globalnym eksporcie branży mleczarskiej jest stosunkowo niewielki. Spada natomiast eksport masła i pełnego mleka w proszku. W 2011 r. wartość eksportu produktów mleczarskich UE wyniosła 8.121 mln Euro, co oznacza 14 % wzrost w stosunku do roku poprzedzającego i generalny wzrost o 66% w latach 2000-2011.

Branża mleczarska w Polsce rozwija się bardzo dynamicznie. Ogólnie przemysł spożywczy należy do najważniejszych i najszybciej rozwijających się dziedzin gospodarki w Polsce. Jego udział w wartości sprzedaży

całego przemysłu wynosi blisko 24% i jest ok. 9 punktów procentowych wyższy niż w 15 krajach Unii Europejskiej, w których wynosi średnio 15%. W 2010 r. sprzedaż na rynku spożywczym wyniosła 240 mld zł, o 3% więcej niż w roku 2009, w 2012 r. ok. 280 mld zł.

Do 16% wzrostu rynku spożywczego w największym stopniu przyczynia się rynek wewnętrzny i segment sklepów dyskontowych. Jednak elastyczność popytu na podstawowe artykuły żywnościowe, w tym na produkty mleczarskie jest niska i wynosi około 0,2%. W przypadku mleka pełnego o zawartości tłuszczu powyżej 3,2% ma wartość ujemną, co oznacza spadkową tendencję popytu.

Dane o wielkości spożycia artykułów mleczarskich nie potwierdzają „przestawienia się" Polaków na zalecaną zdrową dietę, zbliżoną do śródziemnomorskiej. Wzrasta spożycie tłuszczów roślinnych, twarogu i serów twardych, drobiu, a ostatnio także ryb i przetworów rybnych. Nadal rejestruje się jednak bardzo małe spożycie owoców i warzyw oraz stałe obniżanie konsumpcji mleka płynnego.

Według szacunku Instytutu Ekonomiki Rolnictwa i Gospodarki Żywnościowej w 2012 r., bilansowe spożycie mleka w Polsce łącznie z mlekiem przeznaczonym na przetwory, bez mleka zużytego do produkcji masła, wyniosło 196 litrów na mieszkańca i było o 1% większe niż w 2011 r.

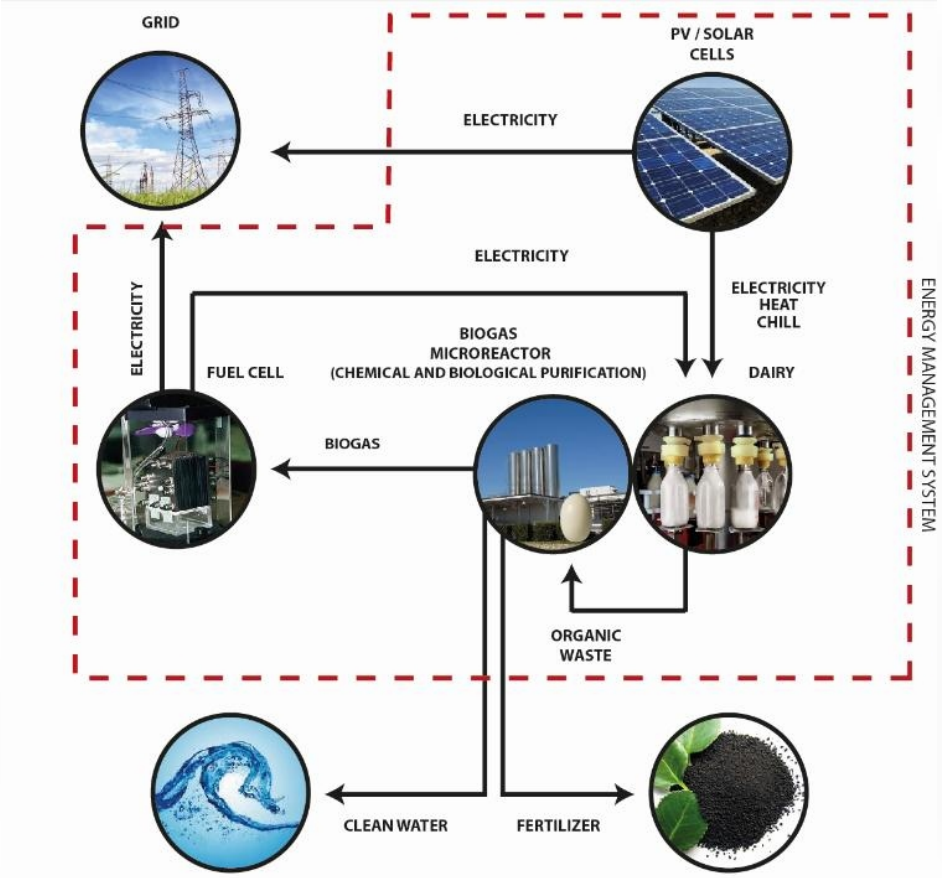
Głównym problemem związanym z funkcjonowaniem branży mleczarskiej w Polsce jest regulowany dostęp do podstawowego surowca mleka. Brak surowca uwarunkowany jest kwotowaniem i niską produktywnością krów. Jest on odczuwany szczególnie w północno-wschodnich regionach kraju, w których zlokalizowana jest przeważająca liczba największych producentów. Obserwowana jest konsolidacja branży - tworzą się klastry i powiązania kooperacyjne, grupy producenckie i sieci dostawców, skupione wokół większych zakładów produkcyjnych. Polskie zakłady mleczarskie produkują głównie na rosnący rynek krajowy, eksport stanowi średnio około 20-30% produkcji.

## Innowacje w branży mleczarskiej

Rozwój przemysłu mleczarskiego wiąże się z poszukiwaniem nowych metod i technologii produkcji, organizacji pracy, optymalizacji logistyki, unowocześniania opakowań. Jest on związany także z maksymalnie efektywnym wykorzystywaniem wszelkich dostępnych produktów na cele energetyczne, w tym z zagospodarowaniem odpadów i ścieków biodegradowalnych powstających w procesach.

Przykładem innowacyjnego podejścia do zagospodarowania odpadów mleczarskich może być technologia produkcji biogazu, opracowana przez zespół naukowców z Politechniki Łódzkiej, Uniwersytetu Łódzkiego, Politechniki Warszawskiej, Instytutu Włókiennictwa oraz Centrum Badań i Innowacji Pro-Akademia. Koncepcja zakłada wykorzystanie ogniwa paliwowego, zasilanego metanem powstającym w procesach biogazowych oraz hybrydowych urządzeń optoelektronicznych i biologicznego systemu oczyszczania ścieków mleczarskich, z zastosowaniem makrofitów o właściwościach fitoremediacyjnych. Problematyka rozwoju mikrotechnologii produkcji biogazu na bazie odpadów mleczarskich może być przykładem innowacyjnego rozwiązania biotechnologicznego. Jest to także innowacja organizacyjna i marketingowo-edukacyjna odpowiednia dla średnich i małych mleczarni.

Schemat 1 obrazuje powiązania funkcjonalne, zbudowane wokół procesów produkcji biogazu z odpadów mleczarskich, wraz z komponentami produkcji energii elektrycznej i sterowanym przez informatyczny system zarządzania procesami, w powiązaniu z zawodową siecią energetyczną.




Schemat 1. Zintegrowany system mikrotechnologii produkcji biogazu na bazie odpadów poprzemysłowych w przedsiębiorstwie mleczarskim.

*Źródło: CBI Pro-Akademia na podstawie [8].*

W dniu 11 grudnia 2013 r., Komisja Europejska zaprosiła do składania wniosków w pierwszych konkursach nowego programu Horyzont 2020 na lata 2014-20, finansującego badania naukowe i innowacje, zwłaszcza te, które mają potencjał demonstracyjny, aplikacyjny i rynkowy.

Program Horyzont 2020 jest największym, zarówno na świecie jak i w historii Unii Europejskiej, programem ramowym na rzecz badań naukowych i innowacji. Jego łączny, siedmioletni budżet wynosi blisko 80 mld euro. W budżecie na pierwszy rok funkcjonowania programu przewiduje się finansowanie w wysokości ok. 7,8 mld euro.

W ramach budżetu będą finansowane projekty, wpisujące się w trzy główne filary programu Horyzont 2020:

I. Doskonała baza naukowa: ok. 3 mld euro, w tym 1,7 mld na granty Europejskiej Rady ds. Badań Naukowych dla najlepszych badaczy oraz 800 mln euro na stypendia dla młodych badaczy w ramach programu Maria Skłodowska-Curie.

II. Wiodąca pozycja w przemyśle: 1,8 mld euro na ugruntowanie wiodącej pozycji przedsiębiorstw europejskich w takich branżach przemysłu jak: technologie informacyjno-komunikacyjne, nanotechnologia, zaawansowana produkcja przemysłowa, robotyka, biotechnologia i przemysł kosmiczny.

III. Wyzwania społeczne: 2,8 mld euro na realizację priorytetów strategii „Europa 2020".

W ramach III filaru programu Horyzont 2020 oczekiwane są projekty w następujących 6 dziedzinach:

- Zdrowie zmiany demograficzne i dobrostan.
- Bezpieczeństwo żywnościowe, zrównoważone rolnictwo, badania morskie oraz gospodarka morska.
- Bezpieczna, czysta i efektywna energetyka.
- Inteligentny, ekologiczny i zintegrowany transportu.
- Działania w dziedzinie klimatu, efektywna gospodarka zasobami i surowcami.
- Integracyjne, innowacyjne i bezpieczne społeczeństwo.

Innowacje w branży mleczarskiej, stanowiące przedmiot analiz niniejszego artykułu, dobrze wpisują się w cele i priorytety programu Horyzont 2020. Przedsiębiorstwa mleczarskie i instytuty naukowe mają szanse na wypracowanie wspólnych projektów, zorientowanych na aktualne i przewidywane wyzwania, stojące przed branżą mleczarską oraz skorzystać z unijnego wsparcia dochodzącego do 100% kosztów kwalifikowanych. Obowiązuje wymóg udziału minimum 3 partnerów z 3 różnych krajów należących do UE. Ważne, aby partnerzy reprezentowali różne grupy interesariuszy: środowiska naukowe, przedsiębiorstwa, organizacje społeczne i administrację samorządową. Ponadto, w projektach oczekuje się interdyscyplinarności, wykorzystania dostępnych zasobów i wiedzy z różnych dziedzin, technologii i dyscyplin, w tym nauk społecznych i humanistycznych [9].

## Podsumowanie

Branża mleczarska zajmuje szczególne miejsce w rozwoju regionalnym wielu europejskich regionów. Z uwagi na specyfikę środowiska w jakim działają, przedsiębiorstwa mleczarskie będą poszukiwać nowych metod i technologii produkcji, odpowiadających zmieniającym się upodobaniom konsumentów na rynku wewnętrznym. Rosnące możliwości eksportu niektórych produktów mleczarskich będą zachęcać do wprowadzania innowacyjnych rozwiązań w zakresie organizacji pracy i logistyki, aby skutecznie wchodzić na tak wymagające i odmienne rynki jak chiński czy indyjski.

Źródłem przewagi konkurencyjnej będzie unowocześnianie opakowań, a także maksymalnie efektywne wykorzystywaniem wszelkich dostępnych produkcyjnych na cele energetyczne.

Odrębnym obszarem problemowych, będącym jednocześnie ogromną szansą rozwojową dla przedsiębiorstw produkcyjnych są metody i technologie zagospodarowania odpadów poprodukcyjnych, głównie odpadów i ścieków biodegradowalnych do dalszego wykorzystania.

Trendy w konsumpcji i prognozy rozwojowe dla przedsiębiorstw mleczarskich, omówione w pierwszej części niniejszego artykułu, wyraźnie wskazują istnienie obszarów problemowych, które powinny być przyczynkiem do poszukiwania innowacji. Wspomniane przyczynki to:

- **Zmieniające się upodobania konsumentów w Unii Europejskiej i Polsce, wynikające z rosnącej siły nabywczej i przemian demograficznych.**

Bogate i starzejące się społeczeństwa oczekują, że produkty mleczarskie będą naturalne i zdrowe, jak najmniej przetworzone. Jednocześnie powinny być poddane najwyższym reżimom higienicznym, z długimi terminami przydatności do spożycia oraz nowocześnie opakowane. Pożądane są małe objętości i formy, ułatwiające podanie do bezpośredniej konsumpcji. W związku z faktem, że wśród Europejczyków pojawiło się nastawienie na konkursy i zabawy kulinarne, wspólne biesiadowanie, zainteresowanie egzotycznymi kuchniami (np. kuchnia tajska czy meksykańska) produkty mleczarskie powinny dobrze komponować się z owocami, sałatami, czy alkoholami.

Innowacji technologicznych w obszarze dostosowania asortymentu mleczarskiego do powyższych uwarunkowań, można poszukiwać na pograniczu medycyny, zdrowia i nauk powiązanych ze zdrowym stylem życia.

- **Wzrost popytu w krajach rozwijających się na produkty mleczarskie, które nie znajdują zainteresowania na rynkach europejskich i w Polsce.**

Rosnący w fantastycznym tempie 60 % popyt na niektóre produkty mleczarskie w takich krajach jak Chiny czy Indie jest wielką, rozwojową szansa dla przedsiębiorstw mleczarskich w Europie. Jednak zarówno wielkość rynków ponad miliardowe populacje potencjalnych klientów, jak i różnice klimatyczne, kulturowe oraz odległość, a także wymagania co do warunków transportu są prawdziwym wyzwaniem dla polskich i europejskich producentów. Aby temu sprostać, konieczne są wdrożenia innowacyjnych rozwiązań marketingowych, logistycznych i organizacyjnych, tworzenie pan-europejskich sieci kooperacji, handlu i dystrybucji.

- **Prowadzenie gospodarki zero-odpadowej „Zero Waste".**

Z raportu Gospodarka odpadami w Polsce 2011 wynika, że Polska jest największym w Europie producentem śmieci, w tym odpadów biodegradowalnych. W Polsce potrzeba pokolenia, aby osiągnąć poziom akceptacji społecznej dla technologii biogazowych, dla spalania czy recyklingu odpadów [5], jak w Europie północnej.

Istnieje oczywista interakcja pomiędzy gospodarką odpadami i produkcją gazów cieplarnianych. Przemysł mleczarski, jako producent odpadów biodegradowalnych może zająć pozycję ważnego uczestnika światowej walki o zmniejszenie emisji gazów cieplarnianych (GHG) i ograniczenia zmian klimatycznych.

W pierwszej kolejności producenci w branży mleczarskiej powinni rozważyć, czy warto wdrożyć rozwiązania optymalizujące gospodarkę wszelkimi zasobami, będącymi w posiadaniu przedsiębiorstwa. Szczególnym zasobem przedsiębiorstw mleczarskich są surowce naturalne i opakowania. Gospodarka „zero-waste" powinna nie tylko zapobiegać powstawaniu odpadów, ale także umożliwiać ponowne wykorzystanie (re-use) i odzyskanie odpadów w innej formie (recykling) np. opakowań.

Perspektywicznym obszarem wzrostu konkurencyjności przedsiębiorstwa poprzez prowadzenie gospodarki „Zero waste" jest wdrożenie technologii ICT w obszarach zarządzania produkcją i zapasami, w celu zminimalizowania zagrożenia zwrotem produktów z uwagi na ich niską jakość, bądź upływające terminy przydatności.

Sektor mleczarski może wdrożyć całą gamę sprawdzonych, praktycznych i opłacalnych technologii w zakresie gospodarki odpadami, które ograniczając emisję $CO_2$, mogą jednocześnie przyczynić się do oszczędności energetycznych i zwiększenia opłacalności produkcji. Do takich technologii zalicza się tlenowe i beztlenowe produkcje biogazu z wykorzystaniem mikroreaktorów biogazowych, włączanych w linie technologiczne małych i średniej wielkości zakładów produkcyjnych [8].

Produktami wykorzystania odpadów organicznych w mleczarniach są energia elektryczna i cieplną, z możliwością przekonwertowania ciepła w chłód, a także wartościowy nawozów.

Potencjał innowacyjny w gospodarce odpadami organicznymi z przemysłu mleczarskiego jest ogromny. Bez wątpienia procesom tym będzie sprzyjać polityka Unii Europejskiej, promująca odnawialne źródła energii, energetykę rozproszoną i zrównoważony rozwój oraz dotacje na technologie przyjazne środowisku w perspektywie finansowej UE na lata 2014-2020.

## Bibliografia


[1] Economic Analysis of EU Dairy Sector Development beyond 2015: Trade, Exports and World Market Integration, University of Applied Sciences Kiel, Faculty Agriculture, Osterrönfeld in Cooperation with Food Research Institute Kiel, wrzesień 2013.

[2] Robert Zawadzki, Forum Mleczarskie Handel 4/2012 (53), Trendy 2012:10 trendów w branży spożywczej 2012.

[3] http://ec.europa.eu/news/economy/120515_pl.htm, 06.01.2014

[4] Eurostat 2013.

[5] Deloitte, P. (2012). Gospodarka odpadami, Polska 2011. Warszawa, Deloitte Polska.

[6] Sprawozdanie roczne, Agencja Rynku Rolnego, 2013.

[7] AGRI-2012-C4-04-Analysis on future developments in the milk sector Prepared for the European Commission DG Agriculture and Rural Development, Ernst & Young, 19 September 2013.

[8] Kochańska, E (2013), Innowacje biotechnologiczne w branży rolno-spożywczej, Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź,

[9] Kochańska, E, redakcja naukowa, (2012), Mikrotechnologie Biogazowe jako innowacyjne narzędzia stymulowania rozwoju lokalnego, PAN, Warszawa.

[10] http://ec.europa.eu/programmes/horizon2020

Marcin Bizukojć
Karina Michalska
Anna Pazera

# WPŁYW PRZEMYSŁU MLECZARSKIEGO NA ŚRODOWISKO.

## STANDARDOWE METODY ZAGOSPODAROWANIA ODPADÓW I ŚCIEKÓW POPRODUKCYJNYCH

Streszczenie

W niniejszym opracowaniu skoncentrowano się na produkcji zakładów mleczarskich. Szczególną uwagę skupiono na wytwarzanych przez nie odpadach organicznych oraz ściekach. Skoncentrowano się głównie na sposobach postępowania z wyżej wymienionymi strumieniami odpadowymi. Przedstawiono tradycyjne sposoby zagospodarowania serwatki poprzez różne sposoby jej recyklingu. Uwagę skupiono także na zagadnieniach oczyszczania ścieków z zakładów mleczarskich w różnych układach technologicznych.

Abstract

Basic information concerning the production of dairy industry with the special attention paid to the waste stream generated by them was presented in this article. Much attention was also paid to the methods of the treatment of waste streams. The traditional methods of whey processing by means of recycling and selected issues of dairy wastewater treatment by means of various technologies were discussed.

Słowa kluczowe

mleczarnia, odpady organiczne, serwatka, oczyszczalnie ścieków, bioreaktor sekwencyjny

Keywords

dairy factory, organic waste, whey, wastewater treatment, sequencing batch bioreactor

Marcin Bizukojć

-doktor habilitowany inżynier, profesor nadzwyczajny PŁ, Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska, Politechnika Łódzka, ul. Wólczańska 213, 90-924 Łódź, marcin.bizukojc@p.lodz.pl

Michalska Karina

- magister inżynier, Zakład Naukowy Chemii Włókienniczej i Modyfikacji Wyrobów, Instytut Włókiennictwa, ul. Brzezińska 5/15, 92-103 Łódź, karina.michalska@iw.lodz.pl

Anna Pazera

- magister inżynier, Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska, Politechnika Łódzka, ul. Wólczańska 213, 90-924 Łódź, anna.pazera@p.lodz.pl

## Strumienie odpadowe typowego zakładu mleczarskiego i ich potencjalne oddziaływanie na środowiska

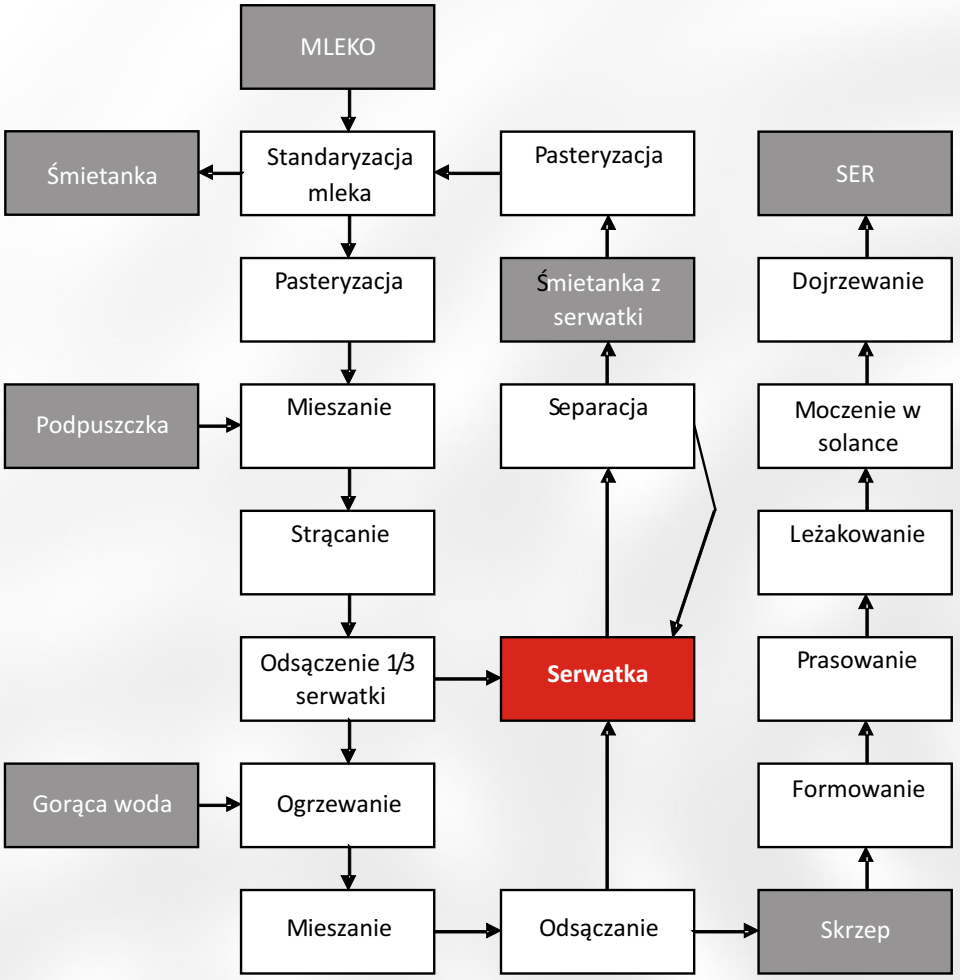
W zakładach mleczarskich, w wyniku procesów produkcyjnych, powstaje co najmniej kilka strumieni odpadów oraz ścieki. Odpady podlegają Ustawie z dnia 14.12.2012r. o odpadach. Aktem wykonawczym do wspomnianej Ustawy jest Rozporządzenie Ministra Środowiska w sprawie katalogu odpadów z 2001r. We wspomnianym katalogu, odpady z przemysłu mleczarskiego przyporządkowane są do grupy 02, jako pochodzące z przetwórstwa żywności. Oznaczone są kodem podgrupy 02 05, określone jako „Odpady z przemysłu mleczarskiego". Należą do nich surowce i produkty nieprzydatne do spożycia oraz przetwarzania oznaczone kodem 02 05 01. Są to: osady z zakładowych oczyszczalni ścieków (02 05 02), odpadowa serwatka (02 05 80) oraz inne niewymienione odpady (02 05 99).

Można odnieść złudne wrażenie, że przemysł mleczarski należy do tych grup przemysłu, które nie są zbyt szkodliwe dla środowiska. Odpady przemysłu mleczarskiego nie zawierają bowiem żadnych niebezpiecznych substancji i właściwości. Dlatego też żadna z wyżej wymienionych grup odpadów nie jest oznaczona gwiazdką, symbolizującą w katalogu odpadów odpady niebezpieczne. Jednak właściwości fizykochemiczne tych odpadów, a szczególnie duża zawartość biodegradowalnych substancji organicznych sprawia, że mogą być groźne po przedostaniu się do środowiska. Ich stosunkowo łatwy rozkład biologiczny wymaga zużycia dużych ilości tlenu. Może to zniszczyć życie biologiczne, szczególnie na poziomie wyższych organizmów w zbiorniku wód powierzchniowych. Szczególnie może mieć to miejsce w sytuacji przedostania się do wód powierzchniowych odpadów ciekłych, takich jak np. serwatka. Osady ściekowe z mleczarni, jak każde osady ściekowe z oczyszczalni ścieków komunalnych, są uciążliwe, szczególnie z uwagi na znaczną ich ilość, powstającą przy oczyszczaniu biologicznym wysokoobciążonych ścieków w warunkach tlenowych. Pomimo tego, iż zazwyczaj nie zawierają one żadnych substancji niebezpiecznych, to mleczarnie są uznawane za zakłady uciążliwe dla środowiska i są obiektem szczególnej kontroli służb ochrony środowiska. Zobrazować to może dokładna analiza strumieni odpadów wytwarzanych przez mleczarnie.

Mleczarnie wytwarzają technologiczne odpady w postaci ciekłej i stałej. Odpadem ciekłym jest maślanka (kod 02 05 99), będąca produktem ubocznym przetwarzania śmietany na masło. Skład chemiczny maślanki zależy od wykorzystywanego mleka. Przeciętnie maślanka zawiera 91-92% wody, 3,8-4,2% laktozy, 3-3,4% związków azotowych, 0,1-1% tłuszczu oraz około 0,7% innych związków mineralnych (w tym związków wapnia). Maślankę trudno jest traktować jako odpad uciążliwy. Może być ona wykorzystywana do wtórnego przerobu jako półprodukt do produkcji maślanki spożywczej lub niektórych rodzajów serów topionych [1-2]. Jest więc spożywana w różnych produktach.

Drugim głównym odpadem ciekłym przemysłu mleczarskiego jest serwatka (kod 02 05 80). Powstaje ona w wyniku przetwarzania mleka w sery. Serwatka wywołuje wiele kontrowersji. Jest odpadem, potocznie uznawanym za najgroźniejszy dla środowiska. Przykładowy schemat blokowy linii produkcyjnej mleczarni wytwarzającej sery półtwarde, ze szczególnym uwzględnieniem serwatki, przedstawiony jest na poniżej .

W przemyśle mleczarskim pojawiają się także odpady wtórne. Należą do nich wyżej wymienione osady ściekowe (kod 02 05 02). Do niech należy m.in. dość charakterystyczny dla tego przemysłu, osad z tłuszczowników w postaci silnie uwodnionej zanieczyszczonej substancji, przypominającej masło.




Schemat 1. Linia produkcyjna sera półtwardego z zaznaczaniem etapów, na których powstaje serwatka [3].
*Źródło: opracowanie własne.*

## Metody postępowania z serwatką

Serwatka jest produktem ubocznym powstającym przy wytwarzaniu każdego sera. Jej rodzaj i skład zależy od typu produkowanego sera. Najczęściej wyróżnia się trzy rodzaje serwatek. Ich głównym wyróżnikiem jest odmienne pH, na które wpływa sposób wytworzenia skrzepu z mleka. Są to:

- serwatka słodka (podpuszczkowa), która powstaje przy produkcji serów twardych, półtwardych, miękkich i kazeiny podpuszczkowej. Jej pH mieści się w przedziale 5,9-6,3;

- serwatka kwaśna, która powstaje przy produkcji twarogów. Jej pH mieści się w przedziale 4,3-4,6;
- serwatka kazeinowa, powstająca przy produkcji kazeiny o pH równym 4,6-4,7.

W przypadku serów twardych i miękkich (serwatka słodka) do wytrącenia skrzepu stosuje się enzym pochodzenia zwierzęcego: podpuszczkę. Serwatka kwaśna z produkcji twarogów jest efektem wytrącania skrzepu kwasem mlekowym, będącym produktem fermentacji bakterii mlekowych. Przy produkcji kazeiny stosuje się do strącania skrzepu mocne kwasy mineralne siarkowy i solny. Zawartość substancji organicznych w serwatkach mieści się w zakresie następujących wartości [1-2]:

- sucha masa 4,5-7,3%;
- tłuszcz 0,02-0,4%;
- białko 0,4-1,1%;
- laktoza 4-5%;
- składniki mineralne 0,4-0,8%.

Chemiczne zapotrzebowanie na tlen (ChZT) dla serwatki jest ogromne i może sięgać nawet 60 000 mg $O_2$ $l^{-1}$, $BZT_5$ 2000 mg $l^{-1}$, a azotu Kjeldahla (Nog) nawet 600 mg N $l^{-1}$. Szczegółowy skład różnego rodzaju serwatek podaje de Wit (2001) [3]. Zestawiono je w poniższej tabeli.

Tabela 1. Skład serwatki z produkcji różnych serów.

| Składnik serwatki Jednostka | Serwatka z produkcji kazeiny | Serwatka twarogowa | Serwatka z sera Gouda (ser twardy) | Serwatka z sera Camembert (ser miękki) |
|---|---|---|---|---|
| Sucha masa (g $l^{-1}$) | 65,0 | 65,0 | 65,0 | 65,0 |
| Białko (g $l^{-1}$) | 6,0 | 6,0 | 6,2 | 6,2 |
| Azot niebiałkowy (g $l^{-1}$) | 2,0 | 2,2 | 2,4 | 2,4 |
| Laktoza (g $l^{-1}$) | 47,0 | 40,0 | 47,0 | 45,0 |
| Tłuszcze (g $l^{-1}$) | 0,3 | 0,3 | 0,5 | 0,5 |
| Składniki mineralne jako popiół (g $l^{-1}$) | 7,9 | 7,9 | 5,3 | 5,6 |
| Wapń (g $l^{-1}$) | 1,6 | 1,6 | 0,6 | 0,6 |
| Fosfor (g $l^{-1}$) | 1,0 | 1,0 | 0,7 | 0,7 |
| Kwas mlekowy (g $l^{-1}$) | 0,2 | 0,6 | 0,2 | 0,3 |
| PH (-) | 4,7 | 4,5 | 6,4 | 6,0 |

*Źródło: [3].*

Jak wcześniej wspomniano, na mocy polskiego prawa, serwatka jest odpadem. Należy jednak pamiętać, że jest ona źródłem wielu składników odżywczych. Jej szczegółowy skład, na przykładzie serwatki z produkcji sera Gouda, przedstawiono w poniżej zamieszczonej tabeli.

Tabela 2. Szczegółowy skład serwatki z produkcji sera typu Gouda.

| Składniki główne | Ogólny skład suchej masy serwatki | Skład szczegółowy serwatki (związki chemiczne i pierwiastki śladowe) | |
|---|---|---|---|
| Woda (g $l^{-1}$) | - | - | 935 |
| Sucha masa | Węglowodany (g $l^{-1}$) | Laktoza | 47 |
| | Tłuszcz mleczny (g $l^{-1}$) | Trójglicerydy | 0,25 |
| | | Dwuglicerydy | 0,05 |
| | | Kwasy tłuszczowe | 0,05 |
| | | Fosfolipidy | 0,15 |
| | Składniki mineralne (g $l^{-1}$) | Wapń | 0,6 |
| | | Magnez | 0,1 |
| | | Fosfor | 0,7 |
| | | Potas | 1,5 |
| | | Chlorki | 1,1 |
| | | Sód | 0,5 |
| | Białka (g $l^{-1}$) | b-laktoglobuliny | 3,0 |
| | | a-laktalbuminy | 1,2 |
| | | Serum albumin | 0,4 |
| | | Immunoglobulina-G | 0,7 |
| | | Pepton kazeinowy | 0,6 |
| | | Inne białka | 0,3 |
| | Azot niebiałkowy (mg $l^{-1}$) | Mocznik | 80 |
| | | Aminokwasy | 25 |
| | | Cholina | 15 |
| | | Kwas orotowy | 12 |
| | Witaminy (mg $l^{-1}$) | B5 kwas pantotenowy | 4,0 |
| | | B2 (ryboflawina) | 1,5 |
| | | C (kwas askorbinowy) | 1,5 |
| | | B6 (pirydoksyna) | 0,5 |
| | Pierwiastki śladowe (mg $l^{-1}$) | Cynk | 1,5 |
| | | Żelazo | 0,6 |
| | | Jod | 0,5 |
| | | Miedź | 0,2 |
| | Inne białka (mg $l^{-1}$) | Immunoglobulina A | 50 |
| | | Laktoferryna | 45 |
| | | Laktoperoksydaza | 25 |
| | | Lizozym | 2 |

*Źródło: [3].*

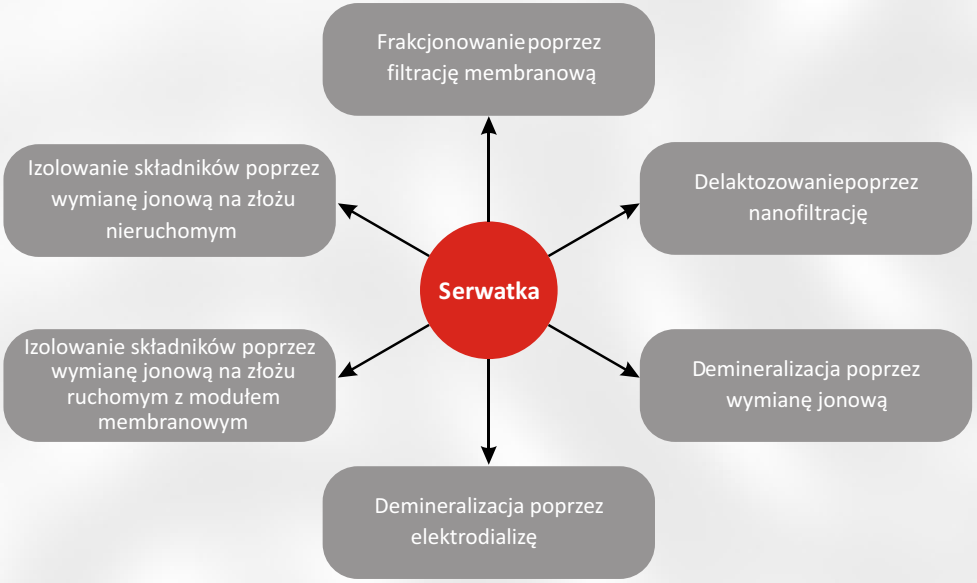
Skład serwatki, a szczególnie zawartość cennych składników sprawia, że tradycyjnym sposobem postępowania z jej przede wszystkim słodką odmianą, jest dalsze wykorzystanie w przemyśle spożywczym. Należy zwrócić uwagę na fakt, że takie postępowanie jest w pełni zgodne z hierarchią postępowania z odpadami. Zgodnie z nią, trzecim w kolejności sposobem postępowania z odpadami jest poddanie ich recyklingowi. Przedstawione poniżej technologie przetwarzania serwatki są zgodne z ustawową definicją recyklingu.

## Technologie przetwarzania serwatki

Technologie przetwarzania serwatki polegają na odzysku poszczególnych składników z serwatek, bądź też na oczyszczaniu ich z wybranych składników, które są niepożądane w dalszych zastosowaniach. Do metod tych należą:

- frakcjonowanie,
- delaktozowanie,
- demineralizacja,
- wydzielanie składników,
- zatężanie przez odparowanie,
- suszenie.

Obrazuje to poniżej zamieszczony schemat.




Schemat 2. Metody przetwarzania serwatki.

*Źródło: [3].*

Frakcjonowanie serwatki przeprowadza się przy wykorzystaniu technik membranowych. Umożliwiają one rozdzielenie składników serwatki o różnych masach cząsteczkowych. Z listy składników serwatki wynika, że zakres mas cząsteczkowych poszczególnych komponentów jest ogromny: od kilkudziesięciu Daltonów dla składników mineralnych, poprzez laktozę (342 Da), aż do białek o masie cząsteczkowej rzędu tysięcy Daltonów. Najczęściej stosuje się kilka membran o różnej wielkości porów i wartości cut-off (tzn. najmniejszej masy cząsteczkowej molekuły, zatrzymywanej w 90% przez membranę) oraz szeroki zakres ciśnień (tj. siły napędowej procesu filtracji membranowej). Dla oddzielenia tłuszczów i bakterii wystarczy mikrofiltracja. Oddzielenie białek wymaga ultrafiltracji, natomiast dla laktozy konieczne jest zastosowanie membran nanofiltracyjnych. Odwodnienie serwatki z jej jednoczesną demineralizacją to domena odwróconej osmozy. W tym przypadku w permeacie występuje wyłącznie woda, a retentatem są silnie zagęszczone pozostałe rozpuszczone składniki. Należy jednak pamiętać, że nie zawsze permeat czy retentat są użyteczne i niekiedy wymagają dalszego przetwarzania jako odpady wtórne, np. w procesach biodegradacji beztlenowej [4].

Demineralizację serwatki stosuje się ze względu na znaczący wpływ zawartych w niej soli, na jej smak. Najczęściej przeprowadza się ją poprzez wymianę jonową. Najpierw wprowadza się serwatkę na mocny kationit podstawiony jonami wodorowymi. W efekcie usunięte zostają kationy metali (głównie wapnia) zawarte w serwatce, a jej pH obniża się do 1,5. Następnie stosuje się mocny anionit podstawiony jonami wodorotlenowymi. Prowadzi to do poniesienia pH serwatki do poziomu 8 i usunięcia obecnych w niej anionów (np. chlorków czy siarczanów). Regenerację takich jonitów przeprowadza się roztworami mocnych mineralnych kwasów i zasad, co prowadzi do powstania ciekłych odpadów wtórnych z regeneracji żywic jonowymiennych. Opcjonalnie demineralizację można prowadzić z wykorzystaniem elektrodializy. W tym przypadku aparat jest wyposażony w membrany jonowymienne (anionitowe i kationitowe), a ruch jonów wymuszany jest poprzez przyłożenie do komory stałego prądu elektrycznego. W efekcie uzyskuje się odmineralizowaną serwatkę i solankę.

Białka zawarte w serwatce są często cenne z punktu widzenia ich zastosowań w zdrowym żywieniu czy medycynie. Oddzielenie ich od serwatki przeprowadzić można technikami filtracji żelowej i chromatografii preparatywnej. Techniki te są typowe dla rozdzielania mieszanin białek i pozwalają na bardziej selektywne oddzielenie pożądanych cząsteczek niż filtracja membranowa. Serwatkę przed rozdzieleniem chromatograficznym poddaje się najpierw mikrofiltracji w celu ochrony złóż kolumn chromatograficznych przed ich zapychaniem. Rozdział chromatograficzny może być prowadzony za pomocą chromatografii jonowymiennej (wykorzystuje się różne wartości punktów izoelektrycznych białek zawartych w serwatce) lub chromatografii powinowactwa (wykorzystuje się różnice hydrofobowości/hydrofilowości białek).

Składnikiem, który występuje w serwatce w największym stężeniu, jest laktoza. Jej odzysk prowadzony jest najczęściej poprzez krystalizację. Przeprowadza się ją z serwatki zatężonej albo z odbiałczanej (permeat po ultrafiltracji). Należy pamiętać, że usunięcie laktozy jest często niezbędne przed dalszym przetwarzaniem serwatki, szczególnie przy jej dalszym zagęszczaniu, czy odzysku niektórych składników. Wynika to ze słabej rozpuszczalności laktozy w wodzie (216 g $l^{-1}$). Jest to niewiele np. w porównaniu do innych disacharydów (np. sacharoza 2115 g $l^{-1}$). Zagęszczanie serwatki metodami ewaporacyjnymi i membranowymi grozi wytrącaniem się kryształów laktozy w postaci monohydratu i zapychaniem wrażliwych membran.

Ostatnim etapem przetwarzania serwatki jest jej suszenie. Jest to proces energochłonny.

## Serwatka w produktach spożywczych

Po przetworzeniu serwatkę lub jej składniki stosuje się w wielu produktach. Szeroki wachlarz zastosowań wraz z zastosowanymi wcześniej metodami jej przetwarzania, obrazuje poniższa tabela 3.

Tabela 3. Wykorzystanie serwatki do wzbogacania produktów spożywczych i farmaceutycznych wraz z zastosowanymi metodami jej przetwarzania.

| Składniki serwatki w wyrobach żywnościowych i farmaceutycznych | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Słodycze | Wyroby piekarnicze | Wyroby mięsne i rybne | Żywność dla dzieci | Żywność dietetyczna | Farmaceutyki | Nutraceutyk | Produkty mleczarskie |
| Czekolada | Chleb | Szynka | Preparaty dla noworodków | Preparaty odchudzające | Tabletki | Białka aktywne biologicznie | Jogurt |
| Ciastka | Herbatniki | Surimi | Preparaty dla niemowlaków | Preparaty żywnościowe dla osób chorych | Preparaty do inhalacji | Probiotyki | Napoje mleczne smakowe |
| Batoniki | Ciasta | Mielonki i inne rozdrobnione wędliny | Preparaty dla starszych dzieci | Preparaty żywnościowe dla osób starszych | Suplementy diety | Prebiotyki | Lody |

*Źródło: [11].*

Wiele z tych produktów zawiera znaczące ilości serwatki. Oto kilka przykładów. Polewa czekoladowa może zawierać nawet 18% serwatki słodkiej. Serwatka działa spulchniająco na pieczywo, a jej dodatek do herbatników podnosi w nich zawartość wybranych aminokwasów (szczególnie lizyny, leucyny i aminokwasów siarkowych). W wędlinach serwatka (2%) pełni funkcję stabilizującą i utrzymującą wilgotność. Natomiast preparaty farmaceutyczne, prebiotyczne i probiotyczne, są przykładem wykorzystania rzadkich składników odżywczych i mikroelementów zawartych w serwatce.

Oprócz wyżej przedstawionych technologicznie skomplikowanych metod przetwarzania serwatki, często w celu pozbycia się jej, stosuje się najprostsze rozwiązania. Na przykład może służyć ona jako dodatek do karmy dla zwierząt gospodarskich.

## Ścieki z zakładów mleczarskich

Ścieki w przemyśle mleczarskim pochodzą przeważnie z mycia instalacji do produkcji mleka i innych przetworów mlecznych. Charakter zanieczyszczeń (mleko, tłuszcz mleczny, śmietana) sprawiają, że ścieki te są wysoko obciążone substancjami organicznymi, w porównaniu do zwykłych ścieków komunalnych. Średnio na tonę przerobionego mleka, wytwarzane jest od 0,8 do 2,5 kg $BZT_5$, ChZT jest zazwyczaj równe 1,5 $BZT_5$. Oznacza to, że ścieki mleczarskie są bardzo łatwo biodegradowalne, choć wymagają dużej ilości tlenu do rozłożenia dużej ilości organicznych zanieczyszczeń. Poziom TSS (Total Suspended Solids, zawiesina ogólna) waha się od 100 do 1000 mg $l^{-1}$, zaś zakres stężeń fosforu ogólnego(TP - Total Phosphorus) waha się pomiędzy 10-100 mg $l^{-1}$, a poziom azotu ogólnego (TKN - Total Kjeldahl Nitrogen) wynosi najczęściej 6% poziomu $BZT_5$. Interesujące może być

porównanie, które ze składników ścieków mleczarskich przyczyniają się do określonego poziomu obciążenia organicznego. Według danych literaturowych 1 kg tłuszczu mlecznego to aż 3 kg ChZT, 1 kg laktozy odpowiada 1,13 kg ChZT, zaś 1 kg białka mlecznego to 1,36 kg ChZT [5]. Dodatkowo zapewnienie utrzymania higieny w zakładach mleczarskich, wiąże się z koniecznością stosowania silnych środków myjących, zawierających duże ilości środków powierzchniowo czynnych (zarówno anionowych jak i niejonowych). Biodegradowalność środków powierzchniowo czynnych nie zawsze jest wysoka, a charakter tych cząsteczek również przyczynia się do znacznego zwiększenia obciążenia tych ścieków substancjami organicznymi. Ponadto, środki powierzchniowo czynne mają również negatywny wpływ na żywotność mikroorganizmów odpowiedzialnych za rozkład zanieczyszczeń organicznych w ściekach. Szczegółowy skład ścieków mleczarskich zależnie od profilu produkcji przedstawiono w tabeli 4.

Tabela 4. Skład ścieków mleczarskich.

| Parametr | Jednostka | Rodzaj produkcji | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Mycie | Sery | Kazeina | Twarogi | Masło | Mleko w proszku | Sery topione | Spożywcze mleko |
| pH | | 9,6 | 7,0 | 6,4 | 6,6 | 7,5 | 7,6 | 7,2 | 7,2 |
| ChZT | mg $O_2$ $l^{-1}$ | 1200 | 3950 | 1360 | 3420 | 1055 | 2090 | 1450 | 2090 |
| $BZT_5$ | mg $O_2$ $l^{-1}$ | 515 | 1760 | 1300 | 1900 | 690 | 1135 | 875 | 1160 |
| Utlenialność | mg $O_2$ $l^{-1}$ | 290 | 500 | 480 | 1020 | 200 | 575 | 485 | 550 |
| Sucha pozostałość | mg $O_2$ $l^{-1}$ | - | 2020 | 1800 | 1920 | 1100 | 1090 | 3250 | 1460 |

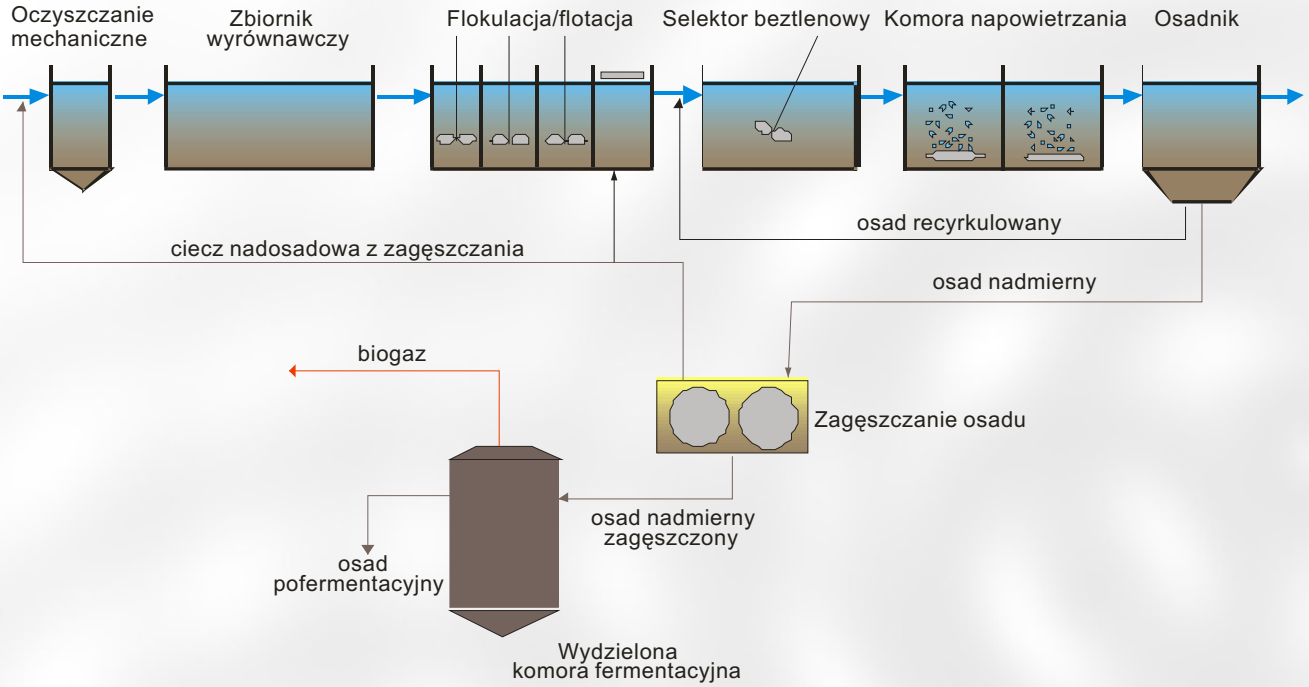
*Źródło: [6].*

## Oczyszczanie ścieków mleczarskich metodami konwencjonalnymi - układy przepływowe

Poniżej przedstawiono typowe metody oczyszczania ścieków mleczarskich. W dużych mleczarniach funkcjonują klasyczne układy przepływowe do oczyszczania ścieków mleczarskich. Obrazuje to schemat zamieszczony poniżej.

Należy zwrócić uwagę, że przy oczyszczaniu ścieków mleczarskich duży nacisk kładzie się na metody mechaniczne i chemiczne. Ścieki mleczarskie, oprócz substancji rozpuszczonych, zawierają emulsje (samo mleko jest emulsją) oraz zawiesiny, np. tłuszczów. W pierwszym etapie oczyszczania ścieków polegającym na destabilizacji emulsji, strącaniu i koagulacji, pH podnosi się do poziomu 8,5 oraz dodaje koagulant. W efekcie wytrącają się drobne kłaczki cząstek, które wcześniej tworzyły emulsję. Taka zawiesina w kolejnym etapie jest intensywnie mieszana z flokulantem polimerowym. Czyni się to w celu optymalnego wyrównania jego stężenia w całej objętości zbiornika. Następnie ścieki wchodzą do strefy wolnego mieszania, w której drobne kłaczki tworzą większe agregaty, zdolne do chwytania pęcherzyków powietrza. Rozpoczyna się wtedy etap DAF (Dissolved Air Flotation), czyli flotacji przy pomocy pęcherzyków powietrza. Proces ten polega na tym, że cząstki powiązane z pęcherzykami powietrza unoszą się do góry i są mechanicznie zbierane z powierzchni cieczy. Jednak, aby

ten proces przeprowadzić, oczyszczone ścieki wychodzące z komory napowietrzania, dodatkowo napowietrza się pod zwiększonym ciśnieniem. Następnie wprowadza się je do flotatora, w którym następuje szybkie obniżenie ciśnienia do poziomu ciśnienia atmosferycznego. Wówczas pęcherzyki ulegają powiększeniu i wędrują ku górze, przyczepiając się do skoagulowanych cząstek. Osad z DAF jest kierowany do odwodnienia w prasach filtracyjnych, aż do uzyskania 20-30% cząstek stałych. Po tej obróbce ścieki trafiają do bioreaktora w celu degradacji substancji rozpuszczonych [7].




Schemat 3. Typowy schemat oczyszczalni poprodukcyjnych ścieków mleczarskich.
*Źródło: opracowanie własne na podstawie różnych źródeł literaturowych.*

Etap biologiczny oczyszczania to selektor beztlenowy, którego zadaniem jest polepszenie właściwości osadu czynnego. Na tym etapie szczególnie istotne jest zapobieganie nadmiernemu rozwojowi niektórych bakterii nitkowych, które mogą powodować puchnięcie osadu i pogorszenie jego właściwości sedymentacyjnych. W komorze napowietrzania zachodzi usuwanie związków węgla oraz proces nitryfikacji. W osadniku oczyszczone ścieki oddzielane są od osadu. Wysokie obciążenie związkami organicznymi sprawia, że oczyszczalnie ścieków mleczarskich generują dużą ilość osadu nadmiernego. Z tego powodu bardzo ważnym elementem jest odpowiednia gospodarka osadami ściekowymi. W najbardziej klasycznym układzie, osad po zagęszczeniu jest kierowany do wydzielonych komór fermentacyjnych (WKF), w celu wytworzenia biogazu. Takie rozwiązanie podobne jest do standardowego postępowania z osadami ściekowymi pochodzącymi z dużych oczyszczalni

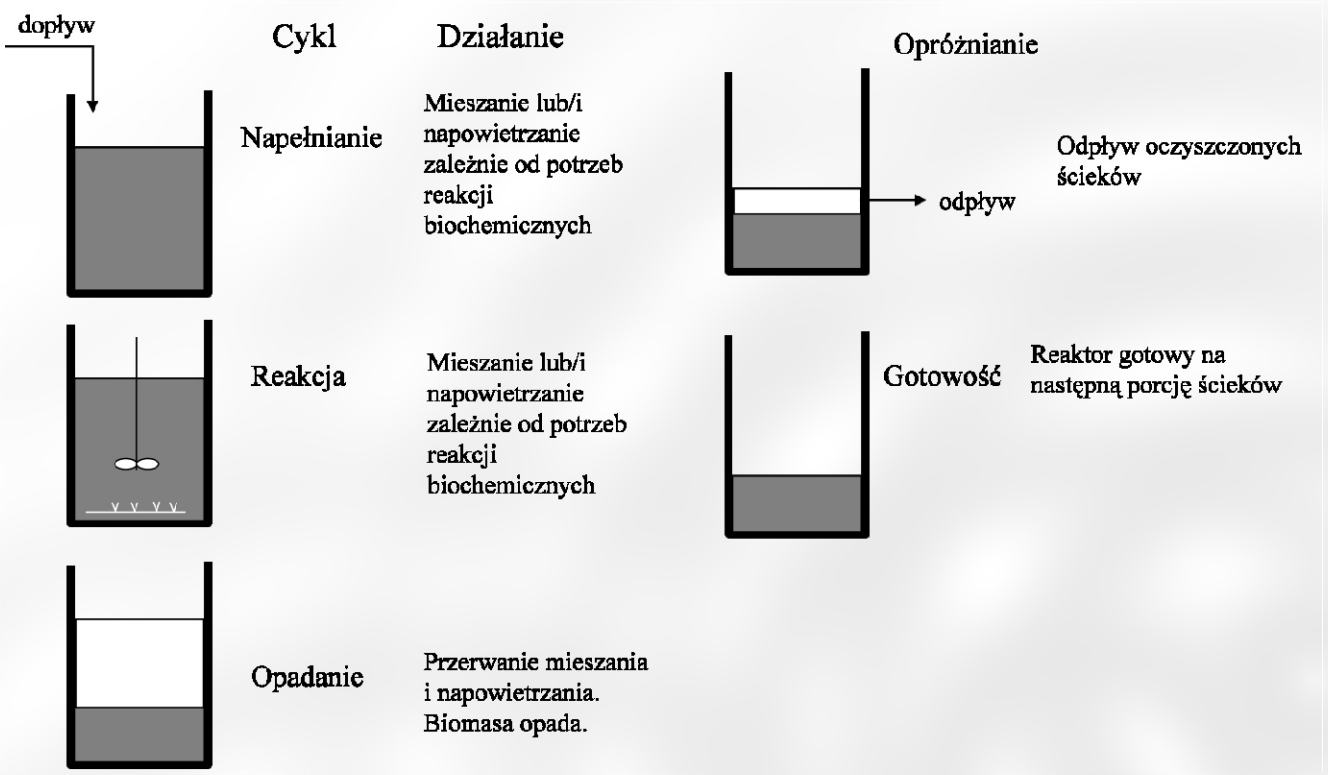
ścieków komunalnych. Odciek z zagęszczania osadu jest zawracany do ciągu oczyszczania ścieków, powodując korzystne ich rozcieńczenie. Ostateczną kwestią do rozwiązania jest zagospodarowanie osadu pofermentacyjnego. Po odwodnieniu i stabilizacji, np. chemicznej albo biologicznej (tlenowej) może on stanowić cenny nawóz. Jego wykorzystanie jest znacznie efektywniejsze i bezpieczniejsze niż osadów pochodzących z oczyszczania ścieków komunalnych. Osady takie są wolne od zanieczyszczeń metalami ciężkimi. Co więcej, nawet surowe osady ściekowe z oczyszczania ścieków mleczarskich są stosunkowo ubogie w mikroorganizmy chorobotwórcze, będące jednym z największych zagrożeń powodowanych przez osady ściekowe z oczyszczania ścieków komunalnych.

## Oczyszczanie ścieków mleczarskich metodami konwencjonalnymi - bioreaktor SBR

W przypadku wytwarzania mniejszych ilości ścieków mleczarskich, a tym samym mniejszych ich przepływów, nie ma potrzeby stosowania złożonych układów oczyszczania o działaniu ciągłym. Dla małych i średnich mleczarni, dla których koszt budowy układów przepływowych byłby zbyt wysoki, można je zastąpić bioreaktorami typu SBR (Sequencing Batch Reactor), zwanymi bioreaktorami porcjowymi. Są to bioreaktory okresowe, w których oczyszczanie ścieków przeprowadza się poprzez zastosowanie sekwencji określonych etapów pracy.

Pierwszy etap oczyszczania polega na napełnianiu bioreaktora ściekami i ich mieszaniu w celu uzyskania optymalnej reakcji między ściekami, a osadem czynnym w nim zawartym. Czas trwania tego etapu zależy od natężenia przepływu wypływania ścieków z instalacji produkcyjnej i objętości bioreaktora. Drugi etap stanowi reakcja biologiczna, czyli biodegradacja zanieczyszczeń zawartych w ściekach. W celu usunięcia związków węgla, zawartość bioreaktora jest intensywnie napowietrzana i mieszana. Uzyskane warunki tlenowe sprzyjają usuwaniu związków węgla oraz procesowi nitryfikacji. Po fazie reakcji wyłączane jest mieszanie i napowietrzanie, a osad ulega sedymentacji. Wówczas tworzą się warunki dla denitryfikacji ścieków. Denitryfikacja polega na usunięciu związków azotu ze ścieków w postaci azotu cząsteczkowego. W bioreaktorach tego typu może być ona utrudniona, z uwagi na wymagane wyłączenie napowietrzania i odpowiednie stężenie azotanów (co nie stanowi problemu) oraz obecność niewielkich ilości organicznego źródła węgla (którego brak spowolni denitryfikację). Czas odpadania powinien być jak najkrótszy. Jest on uzależniony od prawidłowego ukształtowania kłaczków osadu czynnego. Czas trwania cyklu bioreaktora SBR trwa od 6 do 8 godzin, zaś całkowity czas zatrzymania ścieków, czyli HRT (Hydraulic Retention Time) wynosi od 1 do 4 dób. Bioreaktor SBR w zastosowaniach do ścieków mleczarskich pozwala na uzyskanie wysokiego stopnia usunięcia związków węgla, nawet przy początkowym poziomie ChZT równym 10 000 mg $l^{-1}$, wynoszącego około 80%. W przypadku usuwania azotu Kjeldahla, stopień usunięcia waha się w granicach od 38 do 75%.

Szczegółowy sposób pracy bioreaktora SBR do oczyszczania ścieków mleczarskich przedstawili Wu i in. (2008) [8]. Całkowity czas cyklu to 8 godzin, z czego proces anaerobowy (tylko mieszanie) trwa 1 godzinę, 3 godziny zajmuje proces aerobowy (napowietrzanie i mieszanie), następne 2 godziny trwa proces anoksyczny (tylko mieszanie, denitryfikacja), a kolejną godzinę zajmuje proces aerobowy (dla usunięcia resztek węgla). Po tych etapach następuje etap sedymentacji osadu (50 minut), a następnie etap odprowadzenia ścieków (10 minut). Zatem HRT w tym przypadku wynosi 5,3 doby, a SRT (Sludge Retention Time) 40 dób. W takich warunkach, przy obciążeniu osadu ładunkiem zanieczyszczeń na poziomie 0,125 kg ChZT $kg^{-1}$ osadu $d^{-1}$, można uzyskać usunięcie ChZT na poziomie 99% (poniżej 55 mg $O_2$ $l^{-1}$ na wylocie z bioreaktora) oraz stopnie usunięcia dla azotu Kjeldahla, azotu amonowego, fosforu ogólnego i fosforu rozpuszczonego równe odpowiednio 96,7%, 92,4%, 95,9% i 94,0%.



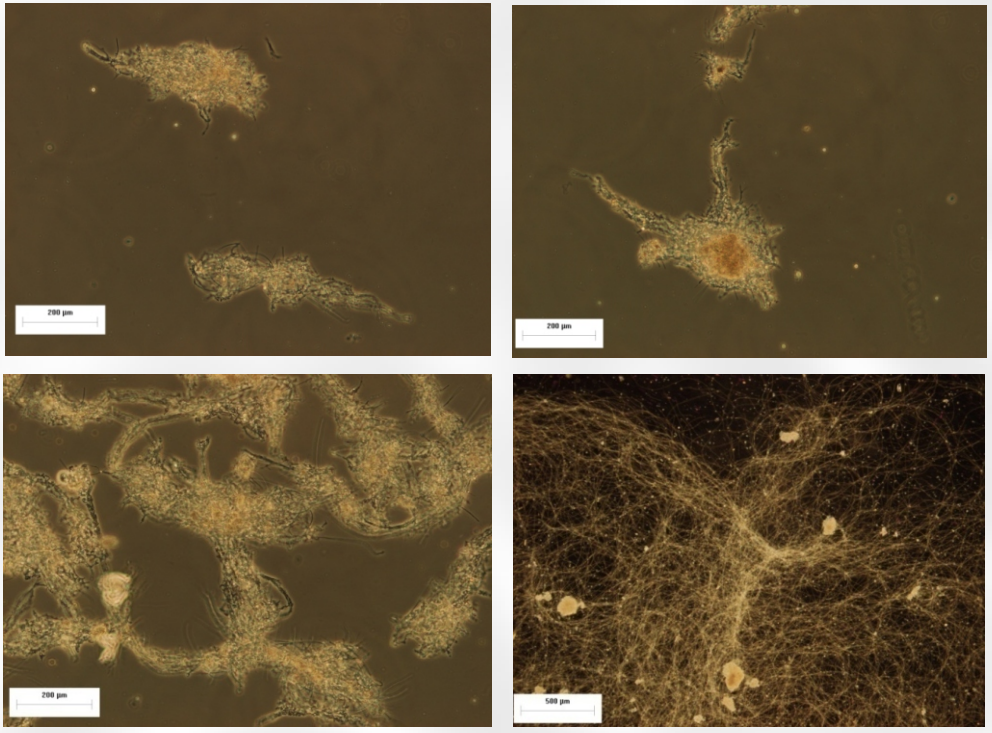

Schemat 4. Zasada działania bioreaktora typu SBR do oczyszczania ścieków.
*Źródło: opracowanie własne.*

Problemem bioreaktorów SBR, podobnie jak w układach przepływowych, mogą być zakłócenia w opadaniu kłaczków. Jest to związane z rozwojem niepożądanych gatunków bakterii nitkowych.

W bioreaktorach typu SBR do oczyszczania ścieków mleczarskich można wykorzystywać osad granulowany [9]. Kuliste cząstki takiego osadu mają zwykle średnią średnicę około 2,5 mm, z czego powierzchniowa warstwa o grubości 65-95 µm jest warstwą tlenową. Gęstość takich granul to około 40 kg SS $m^{-3}$ (SS suspendedsolids, zawiesina). Zależnie od utrzymywanego w bioreaktorze poziomu stężenia tlenu, grubość warstwy tlenowej osadu granulowanego może być zmienna. W ten sposób można manipulować osadem w kierunku efektywniejszego usuwania związków węgla poprzez silne napowietrzenie, czy związków azotu poprzez denitrifikację podczas słabszego napowietrzania. Przy stosowaniu takiego osadu całkowity cykl bioreaktora SBR może wynosić między 360-480 minut, przy założeniu obciążenia ściekami wyższego od 4,5 kg ChZT $m^{-3}$ $d^{-1}$ dla uzyskania optymalnych warunków usuwania związków węgla i azotu. Zwiększenie obciążenia węglem sprzyja wtedy pełnemu usunięciu azotu. Inni autorzy podają, że przy zastosowaniu osadu granulowanego 90% całkowitego stężenia ChZT, 80% azotu Kjeldahla oraz 67% fosforu ogólnego może być usunięte przy 50%

wymianie ścieków w bioreaktorze SBR i przy 8 godzinnym cyklu pracy bioreaktora [10]. Należy podkreślić, że stosowanie osadu granulowanego wydatnie ułatwia oddzielanie go ze ścieków i pozwala uniknąć negatywnych efektów puchnięcia osadu.

Rozwinięciem technologii bioreaktorów typu SBR jest bioreaktor MBBR (Moving Bed Biofilm Reactor reaktor z ruchomym złożem biologicznym). Jest to wysokowydajna technologia oczyszczania ścieków, dobrze sprawdzająca się w oczyszczaniu ścieków mleczarskich. Proces MBBR opiera się na wykorzystaniu błony biologicznej, czyli biofilmu, który narasta na specjalnie zaprojektowanych elementach z tworzywa, zanurzonych w całej objętości reaktora wykonanego z polietylenu wysokiej gęstości (PEHD). Elementy MBBR zostały zaprojektowane tak, by zapewniały jak największą powierzchnię czynną (od 200 do 1200 $m^2$ $m^{-3}$) dla błony biologicznej i optymalne warunki do życia dla różnych kultur mikroorganizmów. Z hydrodynamicznego punktu widzenia działanie tego bioreaktora niczym nie różni się od bioreaktora SBR. Różnicę stanowi brak występowania fazy opadania osadu, na stałe związanego z podłożem wewnątrz bioreaktora. Taka technologia minimalizuje produkcję osadu nadmiernego. Obecnie w ponad 40 krajach na całym świecie istnieje około 450 dużych oraz około 110 000 małych i średnich oczyszczalni, bazujących na technologii z wysokowydajną błoną biologiczną.



Fotografia 1. Obrazy osadu czynnego z bioreaktora SBR do oczyszczania ścieków z mleczarni; zdjęcia górne osad dobrze sedymentujący, zdjęcia dolne osad źle sedymentujący ze względu na rozwój niekorzystnych bakterii nitkowych.

*Źródło: materiały własne.*

## Podsumowanie

Odpady ciekłe (serwatka, maślanka) i ścieki przemysłu mleczarskiego są niewątpliwie uciążliwe dla środowiska. Nie wynika to z faktu, iż zawierają substancje niebezpieczne, lecz z powodu wysokiego stężenia rozpuszczonych substancji organicznych. Substancje organiczne, jeśli przedostaną się do środowiska, będąc jednocześnie substancjami łatwo biodegradowalnymi, pozbawiają zbiorniki wodne tlenu. Może to prowadzić do całkowitego wyginięcia wyższych form życia biologicznego. Wysokie obciążenie ścieków mleczarskich substancjami organicznymi oraz silnymi detergentami z mycia instalacji, stwarza wiele problemów przy oczyszczaniu ścieków metodami klasycznymi. Chociaż ścieki można bez problemu oczyścić metodami tlenowymi, to wydatek energetyczny na ich napowietrzanie jest stosunkowo wysoki. W przypadku serwatki nie było by to w ogóle możliwe bez jej rozcieńczenia. W tym przypadku zatem, znacząca rolę odgrywają metody recyklingu, czyli przetwarzania do ponownego wykorzystania, bądź uzyskania z serwatki cennych składników odżywczych. Postępowanie to jest korzystne z punktu widzenia mleczarni, bowiem serwatka posiada pewną wartość handlową. Na ścieki i serwatkę można jednak spojrzeć z innej perspektywy, proponując alternatywne przetworzenie zawartej w nich materii organicznej w źródło energii odnawialnej, czyli biogaz.

## Bibliografia


[1] S. Ziajka, 1997. Mleczarstwo zagadnienia wybrane. Wydawnictwo AR-T, Olsztyn.

[2] E. Jurczak, 2003. Mleko, produkcja, badanie, przerób. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.

[3] J.N. de Wit, 2001. Lecturer's handbook on whey and whey products. European Whey Products Association. Bruksela, Belgia.

[4] M. Zieliński, M. Dębowski, M. Krzemieniewski, 2007. Możliwość beztlenowej biodegradacji zanieczyszczeń zawartych w permeacie po nanofiltracji serwatki kwaśnej. Rocznik Ochrony Środowiska, 9: 199-210.

[5] http://www.ecologixsystems.com/industry-dairy.php

[6] B. Bartkiewicz, K. Umiejewska, 2010. Oczyszczanie ścieków przemysłowych. PWN, Warszawa.

[7] http://www.hydroflotech.com

[8] X. Wu, J. Zhu, C. Miller 2008.Dairy Milking Wastewater Treatment Using a Lab-Scale Sequencing Batch Reactor (SBR) Transactions of the ASABE. 51(3): 1057-1065.

[9] M. Wichern, M. Lübken, H. Horn.2008.Optimizing sequencing batch reactor (SBR) reactor operation for treatment of dairy wastewater with aerobic granular sludge.Water Sci Technol 58(6):1199-206.

[10] N. Schwarzenbeck . J. M. Borges . P. A. Wilderer 2005. Treatment of dairy effluents in an aerobic granular sludge sequencing batch reactor. Appl Microbiol Biotechnol 66: 711-718.

[11] J.N. de Wit, Lecturer's handbook on whey and whey products (2001).

Karina Michalska
Anna Pazera
Marcin Bizukojć

# INNOWACJE DLA BRANŻY MLECZARSKIEJ - BIOGAZOWNIE PRZYZAKŁADOWE

Streszczenie

Przemysł mleczarski od wielu lat boryka się z problemem odpadów organicznych z procesów produkcyjnych (głównie serwatka) oraz z wysokoobciążonymi ściekami. Wysokie opłaty za zrzut tego typu zanieczyszczeń do kanalizacji czy oczyszczalni ścieków, prowadzą do upadku przedsiębiorstw. Przyszłość przemysłu mleczarskiego w Polsce w znacznej mierze zależy od rozwiązania tego problemu. Dlatego celem podjętych rozważań będzie ukazanie innowacyjnego rozwiązania mikroelektrowni biogazowej, działającej dzięki wykorzystaniu strumieni odpadów, wytwarzanych przez zakład mleczarski. Taka instalacja pozwoli na wytworzenie energii odnawialnej dla potrzeb firmy oraz na inne potrzeby lokalnej społeczności.

Abstract

Dairy industry has been grappling with the problem of organic waste generated in the production process for many years. It is one of the main reasons for the collapse of many companies in this industry, especially with regard to the quality of effluents discharged into sewage systems and treatment plants. The future of the dairy sector in Poland relies on the solutions of these problems. The authors of this article propose an innovative solution, which is an on-site micro-biogas plant installation. It is going to operate using organic waste materials supplied by the dairy company and generating energy for its own and local needs.

Słowa kluczowe

zakład mleczarski, odpady organiczne, biogazownia, biogaz, metan

Keywords

dairy factory, organic wastes, biogas plant, biogas, methane

Karina Michalska

- magister inżynier, Zakład Naukowy Chemii Włókienniczej i Modyfikacji Wyrobów, Instytut Włókiennictwa, ul. Brzezińska 5/15, 92-103 Łódź, karina.michalska@iw. lodz.pl

Anna Pazera

- magister inżynier, Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska, Politechnika Łódzka, ul. Wólczańska 213, 90-924 Łódź, anna.pazera@p.lodz.pl

Marcin Bizukojć

- doktor habilitowany inżynier, profesor nadzwyczajny PŁ, Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska, Politechnika Łódzka, ul. Wólczańska 213, 90-924 Łódź, marcin.bizukojc@p.lodz.pl

## Wstęp

Przemysł mleczarski od wielu lat boryka się z problemem zagospodarowania generowanych w procesie produkcyjnym odpadów organicznych. Stanowi to jedną z głównych przyczyn upadku wielu firm tej branży, zwłaszcza w odniesieniu do jakości ścieków zrzucanych do gminnych lub miejskich oczyszczalni. Obciążenia finansowe związane z przekraczanymi wskaźnikami zanieczyszczeń w ściekach (głównie związków azotu), stawiają zakłady mleczarskie na granicy opłacalności funkcjonowania. Podobnie duża energochłonność produkcji zwłaszcza w sezonie letnim, gdy wymagane jest chłodzenie instalacji znacznie podnosi koszty utrzymania przedsiębiorstwa, co również staje się dla zakładu ogromnym problemem.

Przyszłość branży mleczarskiej w Polsce zależy zatem od rozwiązania obu wspomnianych wyżej problemów. Obecnie producenci sektora mleczarskiego skupiają się na obniżeniu kosztów wyłącznie po jednej stronie, budując choćby przyzakładowe, tlenowe oczyszczalnie ścieków, pozostawiając problem energochłonności produkcji nierozwiązanym. Niemniej jednak, istnieje sposób zaspokojenia obydwu kluczowych potrzeb zakładów mleczarskich. Proponowane rozwiązanie, na terenie zakładu, umożliwia zagospodarowanie odpadów organicznych innych niż ścieki, poprzez rozbudowę istniejącego ciągu technologicznego o kilka nowych elementów. Tym innowacyjnym rozwiązaniem jest przyzakładowa mikroinstalacja biogazowa, działająca na bazie surowców organicznych dostarczanych przez przedsiębiorstwo i generująca energię na jego własne, lokalne potrzeby.

Bioreaktory beztlenowe, o których mowa, powinny być traktowane w dwojaki sposób tj.: zarówno jako mikro-elektrownia generująca znaczne ilości energii cieplnej i/lub elektrycznej, a także jako system zagospodarowania odpadów poprodukcyjnych. Wspomnieć należy, iż pojęcie „biogazownia" zmienia swe znaczenie, bowiem funkcja użytkowa instalacji zostaje rozszerzona o dodatkowy aspekt, jakim jest unieszkodliwianie odpadów. Proponowane rozwiązanie znajduje już szerokie zastosowanie choćby w Szwecji, która słynie z troski o środowisko przyrodnicze i znacznej konsumpcji energii ze źródeł odnawialnych (OZE) [1]. W przypadku Polski - od przedsiębiorstw mleczarskich zależy czy i na ile znajdzie ona zastosowanie, choć niewątpliwie jest nie tylko ogromną szansą na rozwój, ale również na podniesienie poziomu konkurencyjności na rynku.

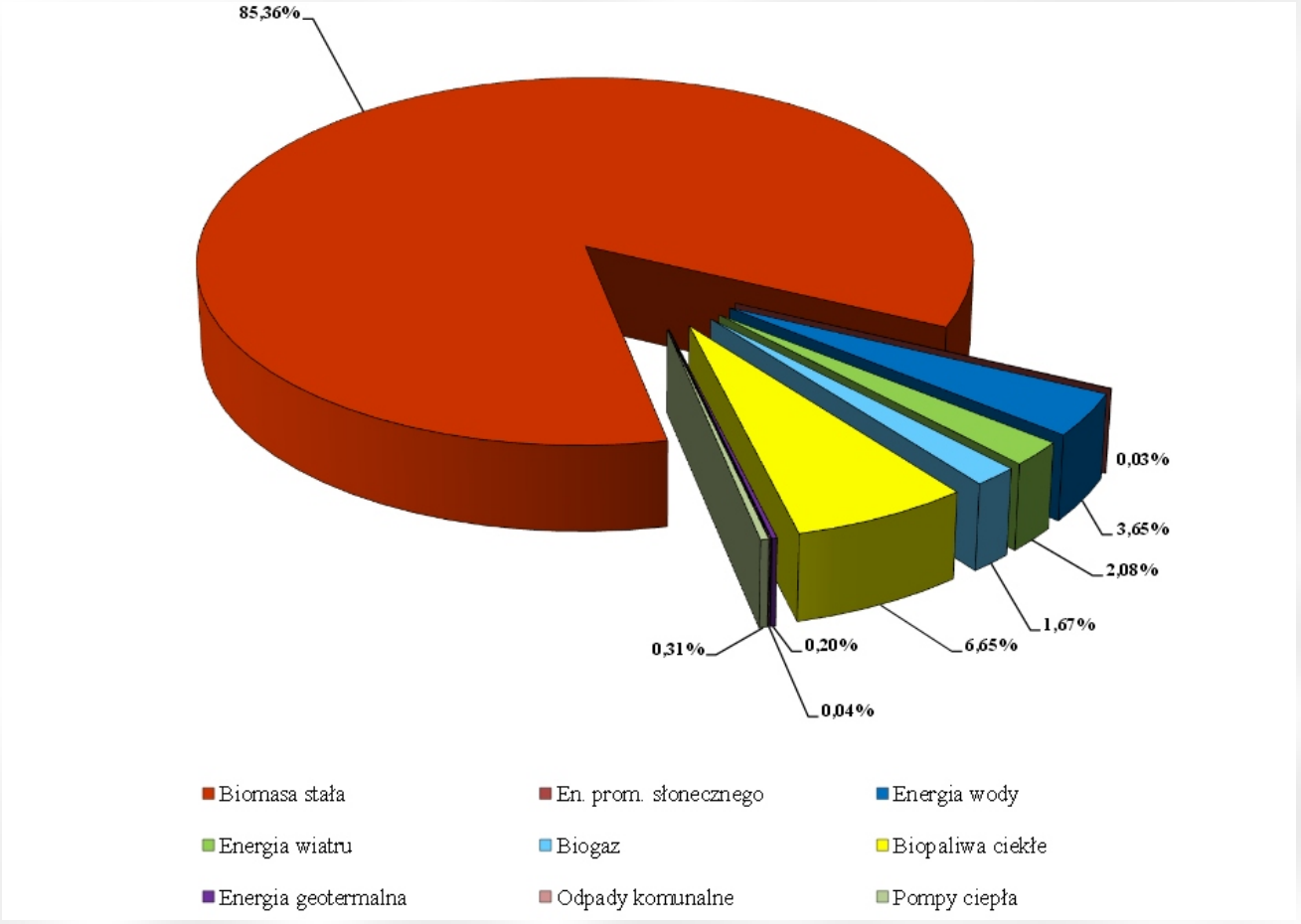
## Biogaz i fermentacja metanowa

W ostatnich latach w Polsce wyraźnie wzrosło zainteresowanie procesem fermentacji metanowej. Biogaz pozyskany w tym procesie należy do odnawialnych źródeł energii (OZE), które cieszą się dużym poparciem Unii Europejskiej. Polityka UE w zakresie OZE ściśle związana jest ze światową strategią przeciwdziałania zmianom klimatycznym oraz zmniejszania emisji $CO_2$ i innych gazów cieplarnianych do atmosfery. Niestety nadal w bilansie energetycznym kraju biogaz stanowi marginalny udział, choć odnotowuje się tendencję wzrostową. Przyczyn takiego stanu jest wiele od kwestii finansowych począwszy, poprzez przepisy, na aspektach społecznych skończywszy. Z tego powodu istotnym czynnikiem jest edukacja i promocja pozyskiwania energii elektrycznej oraz ciepła w skojarzeniu z biomasą, jako ważnego elementu polskiej gospodarki.

Duże zainteresowanie procesem fermentacji metanowej, wynika przede wszystkim z jej zalet w porównaniu z metodami tlenowymi. Jako główne zalety, wymienia się:

- przekształcanie energii zawartej w płodach rolnych i innych odpadach przemysłu spożywczego w użyteczne paliwo (biogaz);

- recykling odpadów organicznych w stabilne polepszacze gleby, cenny płynny nawóz i energię;
- obniżenie niekorzystnego oddziaływania na środowisko [2];
- oszczędności energetyczne związane z mniejszym zapotrzebowaniem na energię urządzeń służących do wytwarzania biogazu;
- około 6. do 10. razy mniejsza produkcja osadów nadmiernych, które nie tracą swojej biologicznej aktywności, nawet po długim okresie przechowywania;
- możliwość pracy urządzeń przy wysokich obciążeniach hydraulicznych oraz wysokich obciążeniach substancjami organicznymi [3].



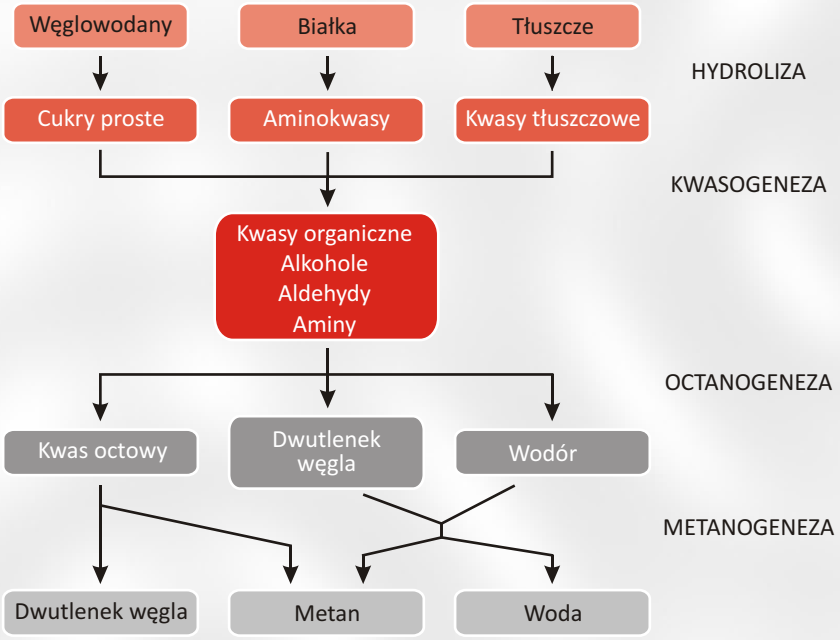

Wykres 1. Udział nośników energii odnawialnej w łącznym pozyskaniu energii ze źródeł odnawialnych w *2010r.*
*Źródło: [28].*

Technologie prowadzenia procesu fermentacji metanowej są intensywnie rozwijane, wiele firm wprowadza własne, innowacyjne modyfikacje sposobu i warunków prowadzenia procesu, by uczynić go bardziej efektywnym i opłacalnym. Obecnie fermentacja metanowa jest stosowana w czterech sektorach przerobu odpadów:

- osadów powstających podczas aerobowego oczyszczania ścieków miejskich;
- odpadów rolnych (gnojowicy);
- ścieków z przemysłu spożywczego i fermentacyjnego;
- przerobu organicznej frakcji stałych odpadów komunalnych [3].

Fermentacja metanowa jest złożonym procesem biochemicznym. Substancja organiczna zbudowana jest z wielkocząsteczkowych składników: białek, tłuszczów, węglowodanów, które w wyniku ścisłej współpracy różnych grup bakterii (hydrolizujące, fermentujące, acetogenne, homoacetogenne, redukujące siarczany i metanogenne) ulegają rozkładowi do prostych związków chemicznych. Głównymi produktami takiego rozkładu są metan ($CH_4$) i dwutlenek węgla ($CO_2$).

Cechą charakterystyczną przemian substancji organicznych w komorach fermentacyjnych jest ich beztlenowość. Każdy etap charakteryzuje się określonymi szybkościami przemian, warunkami fizyko-chemicznymi oraz biochemicznymi. Współzależność przemian obrazuje poniższy schemat.




Schemat 1. Proces fermentacji metanowej.
*Źródło: [13].*

- **Faza I hydrolityczna (hydroliza)** - obejmuje ona rozkład związków organicznych (białek, węglowodanów i tłuszczów), przy udziale zewnątrzkomórkowych enzymów. Białka ulegają hydrolizie do aminokwasów, wielocukry do cukrów prostych, tłuszcze do alkoholi wielowodorotlenowych i kwasów tłuszczowych.
- **Faza II acidogenna (kwasogeneza)** - w fazie tej następuje rozkład produktów hydrolizy i przetwarzanie ich do krótkołańcuchowych kwasów organicznych (w 76%) do lotnych kwasów tłuszczowych (mrówkowego, octowego, propionowego, masłowego, walerianowego, kapronowego), do alkoholi (etanolu, propanolu, butanolu, a także dioli), aldehydów i ketonów (aldehydu octowego, acetonu, acetoiny) oraz produktów gazowych $CO_2$ i $H_2$. Reszta produktów jest biodegradowana do octanów (ok. 20%). Mikroorganizmy prowadzące kwasogenezę należą do względnych i bezwzględnych beztlenowców z rodzaju *Aerobacter, Clostridium, Escherichia, Streptococcus, Micrococcus*.
- **Faza III acetogenna (octanogeneza)** - podczas tej fazy następuje przetwarzanie etanolu oraz lotnych kwasów tłuszczowych do octanów oraz $CO_2$ i $H_2O$. Przemiana ta prowadzona jest przez bakterie acetogenne z rodzaju *Syntrophobacter i Syntrophomonas*. Czas namnażania ich komórek jest długi (84 godz.), dlatego może decydować o przebiegu biodegradacji. Produktami ich aktywności metabolicznej są wodór i kwas octowy. Zahamowanie aktywności tych bakterii prowadzi do akumulacji innych lotnych kwasów organicznych, a w konsekwencji do obniżenia odczynu pH. Wówczas ujawniają swoją działalność bakterie homoacetogenne, produkujące octany ze związków organicznych, ale nie wydzielające wodoru, umożliwiając lepszy rozwój bakterii acetogennych i metanogennych.
- **Faza IV metanogenna (metanogeneza)** - stanowi ją produkcja metanu (ok. 2/3 powstaje z octanów oraz dwutlenku węgla i wodoru) przy udziale bakterii metanowych z rodzaju *Methanobacterium, Methanococcus, Methanogenium oraz Methanosarcina*. Mikroorganizmy te są bardzo czułe na zmiany temperatury i odczynu.

Proces produkcji biogazu wymaga kontroli określonych warunków prowadzenia procesu, tj. utrzymania stałej temperatury, zapewnienie niezbędnych składników pokarmowych, stałego odczynu pH (6,5-7,5) i ciągłości procesu oraz zapewnienia warunków beztlenowych [4]. Optymalne zakresy temperatur, w zakresie produkcji biogazu przedstawiają się następująco [5]:

- 20-25°C zakres aktywności bakterii psychrofilnych;
- 35-37°C zakres aktywności bakterii mezofilnych;
- 55-60°C zakres aktywności bakterii termofilnych.

Każdy rodzaj bakterii biorących udział w fermentacji metanowej, wymaga innej temperatury prowadzenia procesu. Przekroczenie zakresu temperatur może prowadzić do zahamowania wzrostu.

Kolejnym ważnym czynnikiem wpływającym na stabilność procesu produkcji metanu jest neutralny odczyn pH. Optymalny odczyn pH dla bakterii hydrolizujących i kwasotwórczych zawiera się w przedziale 4,5÷6,3, natomiast w przypadku bakterii produkujących kwas octowy i metan, odczyn pH mieści się w przedziale 6,8÷7,5.W innych warunkach wartości odczynu pH, aktywność tych bakterii znacząco maleje [6].

Istotnym elementem jest zapewnienie bakteriom niezbędnych do życia składników pokarmowych i śladowych pierwiastków tj.: żelaza, niklu, kobaltu, selenu, molibdenu i wolframu. Na stabilny przebieg procesu fermentacji metanowej wpływa stosunek C/N podłoża. Zbyt wysoki stosunek może prowadzić do niepełnej przemiany węgla, a w konsekwencji do zmniejszonej produkcji biogazu. Nadmiar zawartości azotu wpływa na wzrost szkodliwego dla procesu amoniaku. Optymalny stosunek C/N powinien kształtować się na poziomie 10÷30.

Wymieszanie zapewnia dobry kontakt bakterii i podłoża. Brak mieszania może doprowadzić do rozwarstwienia fermentującego substratu oraz powstania warstwy utrudniającej przepuszczanie gazów.

Inhibitory, z kolei, działają toksycznie na bakterie i zakłócają proces rozkładu. Można je podzielić na:

- substancje szkodliwe wprowadzone bezpośrednio z substratem (np. związki mineralne, w tym również metale ciężkie), związki pochodzenia organicznego (głównie pestycydy i antybiotyki) oraz substancje powierzchniowo czynne;
- produkty pośrednie procesu fermentacji (amoniak i siarkowodór oraz szkodliwy dla bakterii acetogennych wodór).

Toksyczność tych związków jest zależna od stężenia, jakie osiągają, a także od wartości pH. Hamujące działanie na mikroorganizmy ma stężenie amoniaku od 0,15 g/l, a siarkowodoru powyżej 0,05 g/l.

Podsumowując, biogaz jest gazem powstającym w wyniku fermentacji beztlenowej związków pochodzenia organicznego, np. biomasy, odchodów zwierzęcych, odpadów przemysłu rolno-spożywczego, osadów ściekowych, biodegradowalnych stałych odpadów komunalnych.

Głównym składnikiem biogazu jest metan, najprostszy węglowodór nasycony. Drugim składnikiem biogazu pod względem ilościowym jest dwutlenek węgla, będący bezbarwnym, bezwonnym i niepalnym gazem. Biogaz zawiera również siarkowodór. Jego ilość jest bezpośrednio uzależniona od rodzaju wykorzystywanego substratu. Z biomasy pochodzenia roślinnego wydziela się bardzo mała ilość $H_2S$, natomiast fermentacja odpadów białkowych i melasy powoduje wzrost jego zawartości do 3 %. W biogazie znajdują się także śladowe ilości azotu, pary wodnej, tlenu i wodoru. W poniższej tabeli przedstawiono procentową zawartość poszczególnych składników biogazu.

Tabela 1. Podstawowa zawartość składników biogazu.

| Składnik | Zawartość | |
|---|---|---|
| | Zakres (%) | Średnio (%) |
| Metan | 42-85 | 65 |
| Dwutlenek węgla | 14-48 | 34,8 |
| Siarkowodór | 0,08-5,5 | 0,2 |
| Wodór | 0-5 | Substancja śladowa |
| Tlenek węgla | 0-2,1 | Substancja śladowa |
| Azot | 0,6-7,5 | Substancja śladowa |
| Tlen | 0-1 | Substancja śladowa |

Źródło: [7].

Biogaz będąc doskonałym paliwem odnawialnym, może być wykorzystywany na wiele sposobów, podobnie jak gaz ziemny. Z 1 kg substancji organicznej otrzymuje się ok. 0,4 $m^3$ biogazu o wartości opałowej 16,8-23 $MJ/m^3$. Energia zawarta w 1 $m^3$ takiego biogazu odpowiada energii zawartej w 0,93 $m^3$ gazu ziemnego, w 1 $dm^3$ oleju napędowego, 1,25 kg węgla lub odpowiada 9,4 kWh energii elektrycznej [8].

Otrzymany w procesie fermentacji biogaz może zostać wykorzystany:

- do produkcji energii elektrycznej w silnikach iskrowych lub turbinach;
- do produkcji energii cieplnej w przystosowanych kotłach gazowych;
- do produkcji energii elektrycznej i cieplnej w jednostkach skojarzonych;
- do dostarczania uzdatnionego biometanu do sieci gazowej;
- jako paliwo w silnikach trakcyjnych;
- w procesach technologicznych.

## Produkcja biogazu z odpadów z branży mleczarskiej

Branża mleczarska, jak już wcześniej wspomniano, generuje całe spektrum odpadów organicznych. Znaczną część z nich można wykorzystać na cele energetyczne, rozwiązując jednocześnie problem ich unieszkodliwiania a tym samym ponoszenia dodatkowych kosztów. W zależności od rodzajów odpadów powstających w cyklu produkcyjnym zakładu, zastosowane technologie obróbki odpadów mogą się znacznie różnić. Optymalizacja wydajności procesu, a więc maksymalizacja produkcji biogazu i zawartości metanu w biogazie, uzależniona będzie od wzajemnych proporcji wykorzystywanych surowców odpadowych i ich całkowitej objętości przypadającej na objętość bioreaktora.

Najczęściej powstającym odpadem ciekłym w mleczarniach są różnego rodzaju ścieki. Szacunkowo ich ilość stanowi nawet do 90% wody wykorzystywanej w przedsiębiorstwach mleczarskich [9]. Największą uciążliwością i największym ładunkiem zanieczyszczeń charakteryzują się ścieki pochodzące z mycia i czyszczenia urządzeń ciągu technologicznego, gdyż poza obecnością surfaktantów, w ich składzie zaobserwować można również serwatkę, mleko czy pozostałości serów. Ścieki takie zwierają znaczne ilości białek, tłuszczów i cukrów, są bogate w związki azotu pochodzenia białkowego oraz wapń. Wysoka wartość wskaźnika ChZT (3500-6000 mg $O_2/dm^3$), a $BZT_5$ na poziomie około 3000 mg $O_2/dm^3$ wskazywać mogłaby na stosunkowo łatwą biodegradowalność ścieków. Nie jest to jednak do końca prawdą, głównie z powodu obecności detergentów anionowych i niejonowych, będących inhibitorami procesów biologicznego oczyszczania ścieków. W przypadku procesów beztlenowych, wykorzystujących ścieki mleczarskie jako jedyny substrat do produkcji biogazu fermentacja metanowa zostaje zakłócona i niemal natychmiast zahamowana. Stąd też, w technologiach biogazowych dla zakładów branży mleczarskiej zalecana jest kofermentacja odpadów, a więc wykorzystanie więcej niż jednego substratu do produkcji energii.

Kofermentacja odpadów mleczarskich nie powinna stanowić dla przedsiębiorstwa większego problemu, gdyż obok ścieków w procesie produkcyjnym powstają inne odpady organiczne, będące doskonałymi surowcami dla procesów produkcji biogazu. Jednym z nich jest serwatka, produkt uboczny produkcji serów, twarogów i kazeiny. W zależności od stosowanej w zakładzie technologii obróbki mleka, może powstawać serwatka kwaśna, słodka i kazeinowa (różniące się między sobą głównie odczynem pH). Serwatka charakteryzuje się ekstremalnie wysoką wartością wskaźnika ChZT (około 50000 mg $O_2/dm^3$) i azotu [(azotu Kjeldahla ($N_{og}$) 600 mg $N/dm^3$, azotu azotanowego ($N\text{-}NO_3$-) 2,5 mg/$dm^3$, $N\text{-}NH_4^+$ 60 mg/$dm^3$)]. Zatem, mimo wysokiego potencjału biogazowego, szacowanego na 55 $m^3/t$ [10], nie zaleca się wykorzystywania serwatki jako jedynego substratu w procesie fermentacji metanowej, głównie z uwagi na zbyt niski stosunek C/N wymagany dla prawidłowego przebiegu procesu.

Trzecim, istotnym z punktu widzenia surowców dla przyzakładowych biogazowni odpadem organicznym, powstającym na terenie mleczarni, jest odpadowy tłuszcz. Ten rodzaj odpadu powstaje zwłaszcza w przedsiębiorstwach posiadających własne oczyszczalnie ścieków wyposażone w tłuszczowniki (flotatory). Jest to właściwie zanieczyszczone masło, a więc odpadowy tłuszcz mleczny, charakteryzujący się jednym z najwyższych potencjałów biogazowych (około 800-1100 $m^3$/t) [11]. Nie mniej jednak, również i ten odpad nie jest pożądany w przypadku fermentacji jednosubstratowej. Wynika to z dwóch powodów:

- fermentacja tłuszczów przebiega bardzo długo, a więc wymagane są ogromne objętości bioreaktorów;
- pożądany stosunek C/N jest w takim przypadku znacznie wyższy od optymalnego.

Ostatnimi z najczęściej występujących w zakładach mleczarskich odpadów organicznych, są osady ściekowe z istniejących, przyzakładowych, tlenowych oczyszczalni ścieków. Są to najczęściej osady nadmierne, złożone z biomasy mikroorganizmów nadmiernie przyrastającej w komorach osadu czynnego. Mikroorganizmy tlenowe namnażają się wielokrotnie szybciej niż formy beztlenowe, wobec czego występuje konieczność ich regularnego usuwania z osadników. Najczęściej osady - po wcześniejszym odwodnieniu i stabilizacji tlenowej deponuje się na tzw. lagunach [12]. Jest to jednak kłopotliwe rozwiązanie w przypadku, gdy przedsiębiorstwo nie dysponuje wolną powierzchnią gruntów przeznaczonych na laguny. Wariantem korzystniejszym, coraz chętniej wykorzystywanym w dużych oczyszczalniach ścieków, jest zagospodarowanie osadów w fermentorze do produkcji biogazu.

Przedstawiona charakterystyka czterech najczęściej spotykanych rodzajów odpadów organicznych generowanych w przedsiębiorstwach mleczarskich, powinna skłaniać właścicieli zakładów do podjęcia radykalnych zmian w gospodarowaniu nimi, z ukierunkowaniem na wykorzystanie ich jako kosubstratów w procesie fermentacji metanowej. O tym, iż jest to technologia rentowna i pożyteczna dla przedsiębiorstw powinny świadczyć poniżej przytoczone wyniki prac eksperymentalnych.

## Produkcja biogazu z odpadów z branży mleczarskiej - badania własne

Efektywność produkcji biogazu z organicznych odpadów mleczarskich badano z wykorzystaniem metody BMP (Biochemical Methane Potential). W badaniach wykorzystano następujące rodzaje odpadów:

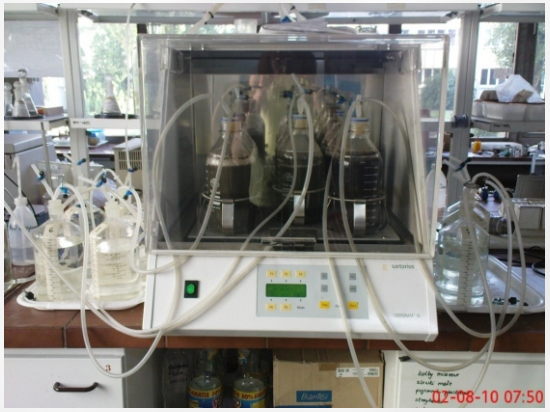
- ścieki poprodukcyjne;
- serwatka kwaśna;
- tłuszcz odpadowy;
- osad nadmierny z bioreaktora tlenowego.

Odpady te pozyskano z zakładu mleczarskiego zlokalizowanego w woj. łódzkim. Badania prowadzono w skali laboratoryjnej, w temperaturze 37°C, pod ciśnieniem atmosferycznym. W badaniach jako inokulum wykorzystano osad przefermentowany z instalacji WKF w Grupowej Oczyszczalni Ścieków w Łodzi. Jako substrat w procesie fermentacji metanowej wykorzystano mieszaniny odpadów w różnych proporcjach i o różnym składzie. Dobową produkcję biogazu, określano z wykorzystaniem metody wyporu roztworu solanki przez produkowany biogaz. Skład powstałego biogazu określano za pomocą chromatografii gazowej. Stanowisko badawcze przedstawia poniższa fotografia.

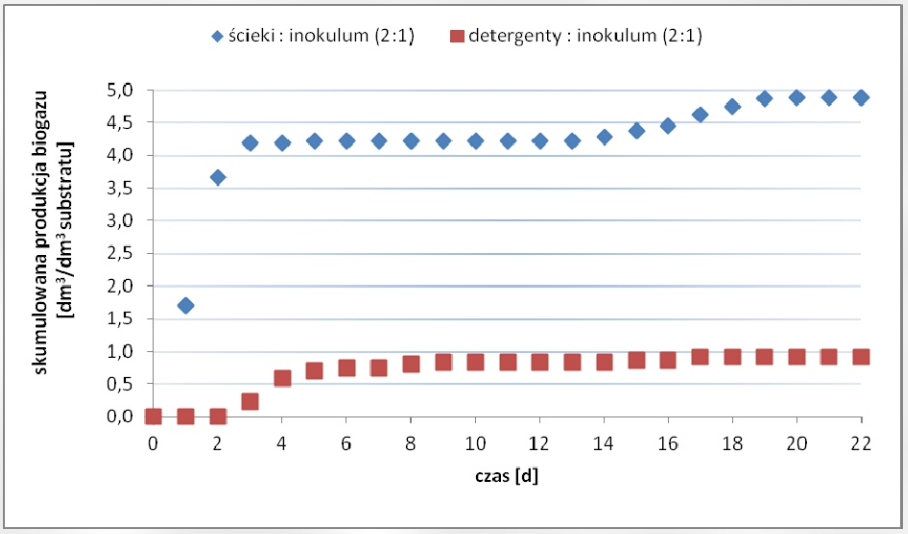
Celem prowadzonych badań było określenie wpływu:

- wzajemnych proporcji wykorzystywanych w procesie ko substratów, na wydajność produkcji biogazu;
- proporcji substrat: inokulum na wydajność produkcji biogazu.

Uzyskane wyniki pozwalają określić przybliżoną moc przyzakładowej mikroelektrowni biogazowej oraz wielkość reaktora beztlenowego.




Fotografia 1. Stanowisko badawcze do analiz BMP (Biochemical Methane Potential).
*Źródło: materiały własne.*



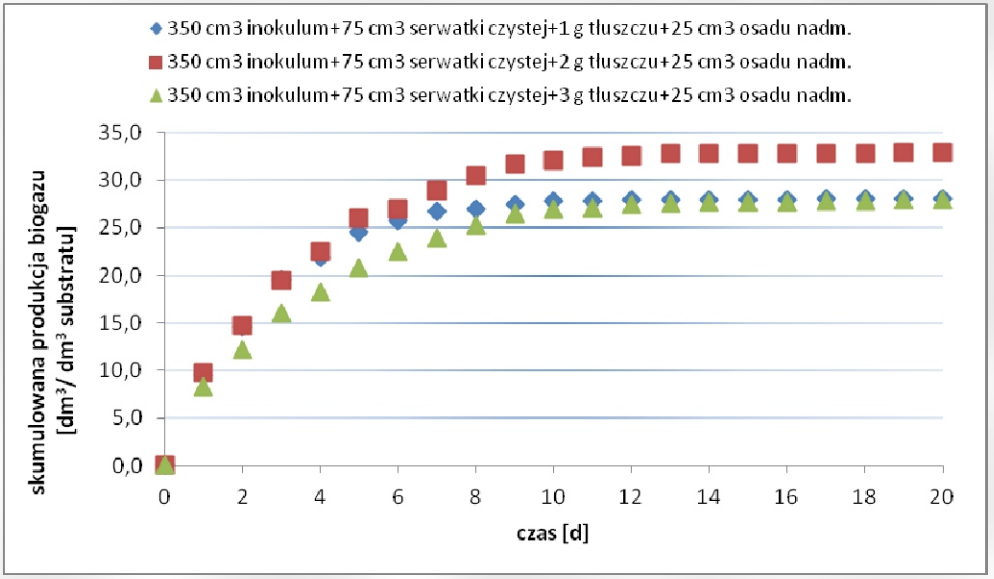

Wykres 2. Produkcja biogazu z wykorzystaniem roztworu detergentów oraz ścieków mleczarskich.
*Źródło: materiały własne.*

W pierwszym etapie badań określono wydajność fermentacji metanowej z wykorzystaniem ścieków jako jedynego substratu. Dodatkowo, w celach porównawczych zbadano wpływ detergentów obecnych w ściekach na efektywność produkcji biogazu. Roztwór detergentów sporządzono zgodnie z recepturą kąpieli myjącej wykorzystywanej w przedsiębiorstwie, z którego pozyskiwano próbki odpadów i na bazie stosowanych przez ten zakład środków powierzchniowo czynnych. Wyniki badań eksperymentalnych obrazuje powyższy wykres.

Analiza otrzymanych wyników badań, wskazuje na silną toksyczność stosowanych w zakładzie detergentów, w odniesieniu do mikroorganizmów fermentacyjnych. Produkcja biogazu zahamowana została w zasadzie już po czterech dobach prowadzenia procesu. Jak wynika z analizy wykresu obecność detergentów w ściekach ma kluczowe znaczenie dla wydajności procesu fermentacji metanowej. Produkcja biogazu jest widocznie inhibitowana, a zawartość metanu na poziomie 36 % zdecydowanie wyklucza stosowanie takiego wariantu fermentacji. Zasadnym wydają się w takiej sytuacji dwa warianty kofermentacji:

- z wykorzystaniem pozostałych odpadów organicznych z wyłączeniem ścieków;
- wszystkich odpadów organicznych, łącznie ze ściekami, w celu ich maksymalnego rozcieńczenia.

W kolejnym etapie badań eksperymentalnych określano wpływ wzajemnych proporcji kosubstratów na wydajność produkcji biogazu. W eksperymentach nie wykorzystywano ścieków, jako substratu potencjalnie niebezpiecznego dla procesu fermentacji metanowej (wariant pierwszy rozwiązania). W badaniach, objętość stosowanej w procesie serwatki i osadu nadmiernego pozostawała bez zmian, manipulowano natomiast ilością dodawanego tłuszczu odpadowego. Wyniki badań obrazuje poniższy wykres.



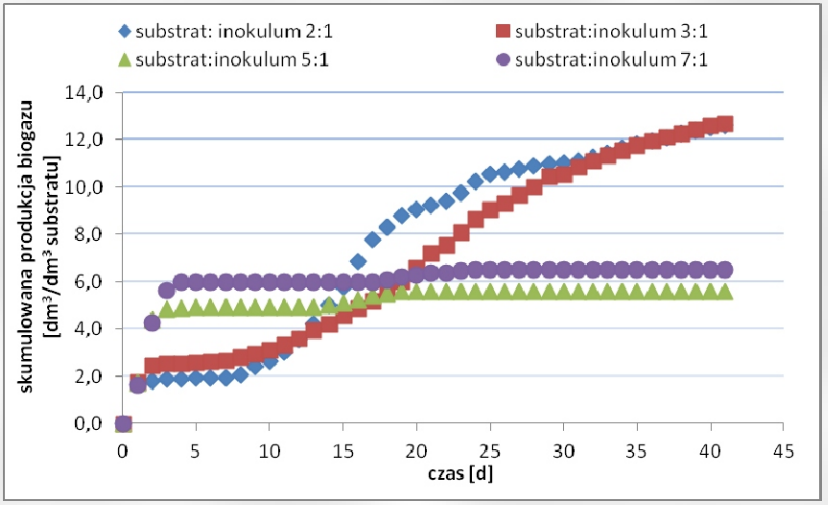

Wykres 3. Produkcja biogazu przy różnych proporcjach stosowanych kosubstratów.
*Źródło: materiały własne.*

Analiza otrzymanych danych eksperymentalnych wskazuje na dość znaczący wpływ ilości dodawanego tłuszczu odpadowego na wydajność produkcji biogazu, co jest zgodne z literaturą [12]. Przy braku ścieków jako kosubstratu to właśnie tłuszcz jest podstawowym źródłem węgla organicznego dla bakterii fermentacyjnych. Jego nadmiar, jak i niedomiar, w stosunku do pozostałych kosubstratów spowalnia szybkość procesu oraz zmniejsza wydajność produkcji biogazu. W optymalnym przypadku (2 g tłuszczu na 100 $cm^3$ mieszaniny serwatki i osadu nadmiernego) zawartość metanu w biogazie przekraczała 68 %. Taki sposób prowadzenia fermentacji metanowej na bazie odpadów mleczarskich staje się już ekonomicznie uzasadniony i wart rozważenia.

Ostatnim etapem badań eksperymentalnych było ustalenie optymalnego stosunku kosubstratów do inokulum w aspekcie maksymalizacji produkcji biogazu, przy jednoczesnej minimalizacji wielkości bioreaktora. W tym etapie badań wykorzystano wariant drugi kofermentacji, z wykorzystaniem ścieków poprodukcyjnych. Z uwagi na fakt, iż w przedsiębiorstwach mleczarskich objętość generowanych ścieków i serwatki znacznie przekracza objętości powstającego tłuszczu odpadowego i osadu nadmiernego, a z założenia zasadniczym celem budowy przyzakładowej mikroelektrowni biogazowej jest racjonalna gospodarka odpadami przyjęto, iż optymalny skład mieszaniny kosubstratów to:

- ścieki + serwatka w stosunku 1:1 (90 % mieszaniny);
- tłuszcz i osad nadmierny w stosunku 1:1 (10 % mieszaniny).

W badaniach skład mieszaniny pozostawał niezmieniony. Zmieniano wyłącznie proporcje pomiędzy mieszaniną, a wykorzystywanym inokulum. Uzyskane wyniki eksperymentalne przedstawiono na poniższym wykresie.




Wykres 4. Produkcja biogazu przy różnych proporcjach kosubstratów do inokulum.
*Źródło: materiały własne.*

Analiza otrzymanych wyników wskakuje na duży wpływ zastosowanej proporcji objętości substratu do inokulum, na wydajność produkcji biogazu. Przy największych proporcjach (5:1 i 7:1) zaobserwowano wyraźne

zahamowanie procesu, co wiąże się ze zbyt wysokim obciążeniem komór fermentacyjnych ładunkiem zanieczyszczeń. Mniejsze obciążenie komór skutkowało znacznym wzrostem wydajności produkcji biogazu, przy jednoczesnym wzroście ilości metanu w otrzymywanym biogazie (72% i 75% dla stosunku substrat: inokulum 2:1 i 3:1, odpowiednio). Kluczowym elementem przebiegu procesu staje się zatem odpowiedni i właściwy dobór proporcji substratu do inokulum, od niego bowiem zależy opłacalność całej inwestycji.

Choć przedstawione na wykresie wyniki wskazują na nieco wyższą produkcję biogazu w przypadku zastosowania proporcji 3:1 w porównaniu z proporcją 2:1, należy mieć na uwadze dodatkowy aspekt. Maksymalny udział metanu w produkowanym biogazie nastąpił dla proporcji 2:1 już po 12 dobach, natomiast dla proporcji 3:1 dopiero po 34 dobach. Niewiele większa produkcja biogazu przy wyborze wariantu 3:1 negatywnie wpłynie na wielkość mikroelektrowni, z uwagi na wymagany długi czas zatrzymania substratu (HRT Hydraulic Retention Time). W takim wypadku rozsądny jest wybór proporcji 2:1, mimo nieco niższej produkcji biogazu, a więc energii, bowiem ponoszone koszty z tytułu inwestycji i eksploatacji wariantu 3:1 mogą okazać się większe, niż przychody z nadwyżki wyprodukowanej energii.

Dodatkowym aspektem przemawiającym za wyborem wariantu z proporcją substrat: inokulum 2:1 jest znaczne obniżenie wartości wskaźnika ChZT mieszaniny substratu po procesie fermentacji metanowej (50% dla wariantu 2:1 i jedynie 24% dla wariantu 3:1). Jest to istotne z punktu widzenia inwestora, gdyż substrat po procesie traktowany jest jak ścieki i należy go poddać oczyszczeniu w warunkach tlenowych. Im niższa wartość wskaźnika ChZT na wlocie do komór osadu czynnego, tym mniej energii zużywa układ do napowietrzania tych komór. Tym samym, energochłonność przyzakładowej instalacji do tlenowego oczyszczania ścieków będzie tym mniejsza, im większy ładunek zanieczyszczeń zostanie zdegradowany w mikroinstalacji biogazowej.

Kluczową, dla potencjalnego przedsiębiorcy inwestującego w instalację biogazową na terenie własnej mleczarni, jest ilość wyprodukowanej energii. Przyjmując za optymalny wariant z proporcją substratu: inokulum 2:1 zysk energetyczny z biogazu wyniesie 0,07 MJ energii z porcji substratu o objętości nieco ponad 600 $cm^3$. To bardzo niewielkie ilości substratu, biorąc pod uwagę rzeczywistą skalę produkcji odpadów w przedsiębiorstwach, bo jeśli przyjąć, że do fermentora wprowadzać będzie się substrat w ilościach nie 600 $cm^3$, a 600 $dm^3$ - to ilość energii wyprodukowanej z biogazu wzrośnie do 70 MJ, czyli około 5,5 kWh.

Powyższe przykłady eksperymentalne wskazują na ogromny potencjał energetyczny odpadów mleczarskich. Ich racjonalne zbywanie w elektrowniach przyzakładowych ukierunkowanych na produkcję biogazu zaspokaja dwie kluczowe potrzeby przedsiębiorstw branży mleczarskiej: obniżenie kosztów ponoszonych z tytułu unieszkodli-wiania odpadów oraz niezależność energetyczną zakładu. W przypadku tej drugiej koszty mogą zamienić się w zysk. Jeśli bowiem ilość produkowanej w mikroinstalacji energii przewyższać będzie zapotrzebowanie zakładu na ciepło bądź energię elektryczną ich nadwyżkę przedsiębiorca może sprzedać lokalnym odbiorcom. To z kolei powinno przełożyć się na wzrost konkurencyjności firmy na lokalnym rynku, a więc na wzrost sprzedaży. Zyski z takiej instalacji można rozpatrywać nie tylko w kategoriach finansowych, ale i prestiżowych, co powinno okazać się bodźcem do działań dla przedsiębiorstw.

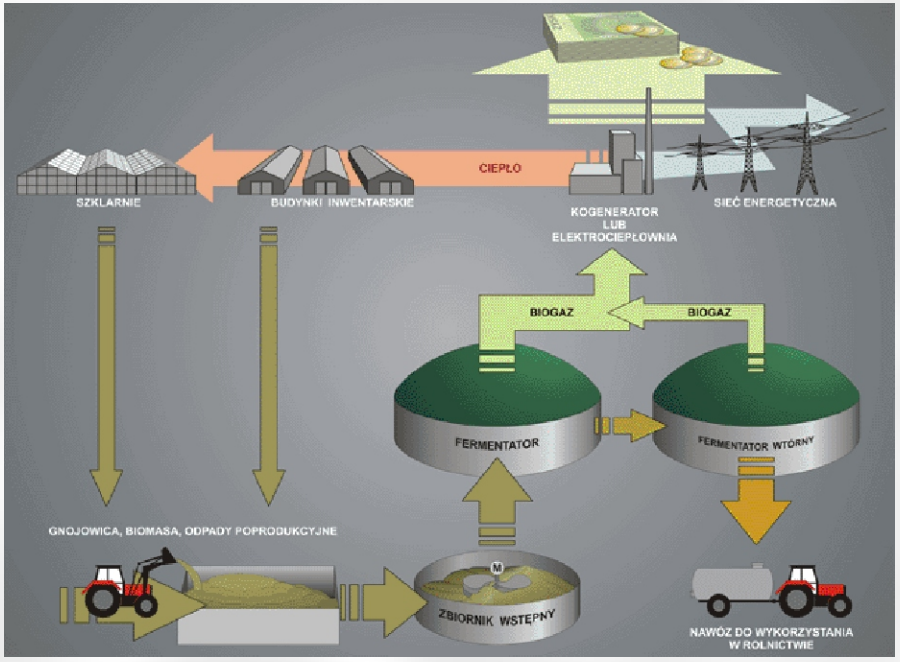
## Bioreaktory do produkcji biogazu z odpadów branży mleczarskiej

Instalacja do produkcji biogazu, jak każda inna instalacja, składa się z kilku elementów. W zależności od stopnia zaawansowania technologii i oczekiwanej wydajności procesu fermentacji metanowej, część elementów jest

pomijana lub zastępowana innymi. Nie mniej jednak każda elektrownia biogazowa, bez względu na rodzaj stosowanego substratu, wyposażona jest w kilka podstawowych komponentów. Są to:

- zbiorniki wstępne na odpady (zbiorniki magazynujące);
- fermentory przykryte szczelną membraną;
- zbiorniki pofermentacyjne lub laguny;
- układy do konwersji biogazu w energię cieplną i/lub elektryczną (układy kogeneracyjne, piece, turbiny);
- system sterujący;
- podłączenia do sieci cieplnej i/lub energetycznej;
- pochodnia awaryjna.

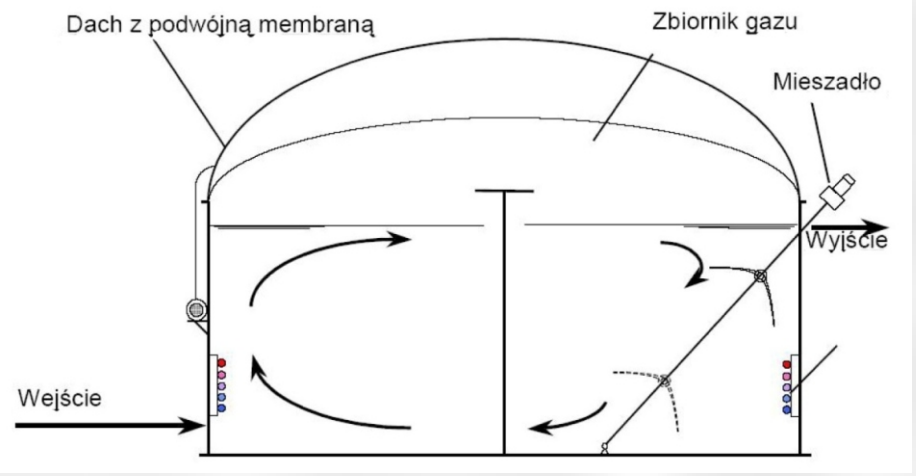
Świadomość tego, jak bardzo rozbudowany może być układ technologiczny takiej instalacji, jest niezwykle pożyteczna. Każdy przedsiębiorca podejmujący decyzję o budowie mikroelektrowni biogazowej na terenie swojego zakładu musi liczyć się z koniecznością zapewnienia odpowiedniej infrastruktury oraz areału pod budowę instalacji. Dla biogazowni dużych, o mocy 2 MW, zapotrzebowanie na teren wynosi zazwyczaj około 3 ha [13]. W przypadku mikroinstalacji przyzakładowych powierzchnia ta będzie proporcjonalnie mniejsza. Schemat najprostszej instalacji biogazowej przedstawiono poniżej.




Schemat 2. Uproszczony schemat instalacji mikrobiogazowej.
*Źródło: [29].*

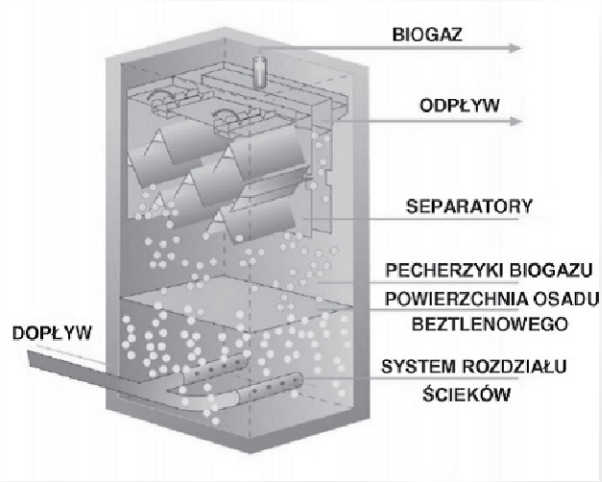
Podstawowym i obowiązkowym elementem każdej instalacji biogazowej jest zbiornik fermentacyjny, a więc bioreaktor beztlenowy. W zależności od rodzaju i uwodnienia stosowanych w instalacji odpadów oraz zastosowanej technologii, zbiornik ten charakteryzował się będzie innym kształtem, powierzchnią, wyposażeniem dodatkowym i sposobem działania. Najpowszechniej stosowanym, zwłaszcza w rolnictwie, jest zbiornik pionowy o kształcie walca, wyposażony w mieszadła o różnej konstrukcji. Taki bioreaktor nazywany jest reaktorem z pełnym wymieszaniem (CSTR Continuous Stirred Tank Reactor) i stosowany jest gównie do fermentacji odpadów płynnych, o zawartości suchej masy (s.m.) od 8 do 12%.

Bioreaktory typu CSTR to komory zbudowane ze stali lub betonu, przy czym beton stosuje się do budowy dna, natomiast stal do ścian. Zbiorniki tego typu mogą być częściowo lub całkowicie wbudowane w podłoże lub też, co jest częściej praktykowane, stawiane bezpośrednio na powierzchni gruntu. Cały zbiornik pokrywa się gazoszczelną membraną, uniemożliwiającą odpływ wyprodukowanego biogazu do atmosfery. Zawartość zbiornika jest intensywnie mieszana, co pozwala na bezpośredni kontakt między mikroorganizmami, a substratem organicznym [14].




Schemat 3. Typowy fermentor.
*Źródło: [30].*

Bioreaktory typu CSTR znajdują zastosowanie w przypadku odpadów branży mleczarskiej. Pewnym jednak ograniczeniem dla ich wykorzystania może okazać się dość wysoki czas zatrzymania odpadów (HRT). Zatrzymanie na długi okres odpadów, zwłaszcza generowanych dobowo w znacznych ilościach i wysoko obciążonych ładunkiem zanieczyszczeń, może skutkować koniecznością budowy zbiornika fermentacyjnego o ekstremalnie dużej objętości. To z kolei oznacza wysokie koszty inwestycyjne, eksploatacyjne i zwiększenie zapotrzebowania na powierzchnię pod inwestycję. Dodatkowo, przy stałej produkcji odpadów również i zbiorniki wstępne muszą charakteryzować się większą pojemnością. W związku z powyższym, rozwiązaniem dedykowanym zwłaszcza dla mikroelektrowni biogazowych przeznaczonych na odpady mleczarskie staje się inny typ bioreaktora - reaktor typu UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket).




Schemat 4. Bioreaktor typu UASB.
*Źródło: [31].*

Reaktor UASB to reaktor przepływowy ze złożem biomasy w formie granulowanej, zawieszonym w przestrzeni zbiornika. Bioreaktor taki składa się z dwóch części: przepływowej oraz sedymentacyjnej, dzięki czemu możliwe jest odprowadzanie sklarowanych odcieków z fermentora bez wymywania żywej biomasy. Substrat przepływa przez reaktor z dołu do góry, a zlokalizowane w górnej części zbiornika separatory zapewniają rozdzielenie fazy stałej i ciekłej od gazowej. Istotnym jest, iż w reaktorach tego typu, czas zatrzymania osadu (SRT Sludge Retention Time) jest dużo wyższy, niż w konwencjonalnych reaktorach typu CSTR (w nich HRT = SRT). Dzięki temu szybkość usuwania mikroorganizmów fermentacyjnych jest dużo niższa niż szybkość ich wzrostu, co istotnie podnosi wydajność produkcji biogazu i pozwala na obniżenie HRT, a w rezultacie pozwala kilkukrotnie zmniejszyć objętość reaktora, w porównaniu ze zbiornikiem typu CSTR [14,15].

Reaktory typu UASB znakomicie sprawdzają się w przypadku zastosowań do odpadów branży mleczarskiej, w których wymagany HRT, zapewniający wydajną produkcję biogazu, przekracza 10 dni. Pomimo podstawowej wady, jaką jest długi okres wpracowywania (przystosowania mikroorganizmów osadu do nowych warunków) cieszą się coraz większą popularnością. Należy jednak mieć na uwadze jeden fakt, a mianowicie ostrożnie dawkować do ich wnętrza wszelkiego rodzaju tłuszcze. Zbyt duża ich ilość może uniemożliwić swobodny przepływ substratu w górę bioreaktora, jak również stanowić barierę pomiędzy mikroorganizmami, a dopływającym substratem. Właściwe prowadzenie procesu fermentacji powinno zniwelować takie niebezpieczeństwo i skutkować efektywną produkcją biogazu.

## Przykłady instalacji

### ■ Biogazownia w Chodzieży (woj. wielkopolskie, powiat chodzieski)

Dnia 1 lutego 2012r. Okręgowa Spółdzielnia Mleczarska z Czarnkowa wybudowała nowoczesną biogazownię w swoim zakładzie produkcyjnym w Chodzieży, pozwalającą na ekologiczne pozbywanie się odpadów

produkcyjnych i generowanie biogazu. OSM Czarnków należy do czołowych producentów artykułów mleczarskich w Polsce, posiadających najnowszy park maszynowy oraz 100 % kapitału polskiego. Spółdzielnia posiada dwa zakłady produkcyjne w Czarnkowie i Chodzieży, które całkowicie dostosowane są do obecnych wymogów UE. Spółdzielnia skupuje i przetwarza rocznie ponad 60 mln litrów mleka, pochodzącego z ponad 600 gospodarstw rolnych. Uprzednio, w okresie wzmożonej produkcji, mleczarnia produkowała dużo pozostałości po przerobie mleka i duże ilości zwykłych ścieków. Obecnie produkowany jest z nich biogaz, który mleczarnia wykorzystuje na własne potrzeby. Zakłady tej spółdzielni mleczarskiej zużywają około 6 000$m^3$ gazu na dobę, z tego gazownia może dostarczyć prawie połowę tj. 3 000 $m^3$. Biogazownia dziennie może przerobić do 500. $m^3$ ścieków oraz dodatkowo do 100. $m^3$ kwaśnej serwatki [17]. Produktem końcowym jest gaz oraz oczyszczone ścieki, które mogą być bez szkody dla środowiska, wprowadzone do obiegu przyrodniczego.

W przypadku opisanej biogazowni produkcja gazu nie była celem priorytetowym. Nadrzędnym celem było pełne oczyszczenie ścieków serwatkowych, powstających przy produkcji mleczarskiej. Ta nowatorska i skierowana w przyszłość, a nie nastawiona na zysk inwestycja, pozwala na lepsze wykorzystanie mocy przerobowych i uniezależnia produkcję od odbioru serwatki przez rolników, przy jednoczesnej dbałości o środowisko [16]. Biogazownia w Chodzieży kosztowała ponad 7,5 mln zł i została dofinansowana w wysokości 3,2. mln zł z funduszy UE w ramach Programu Rozwoju Obszarów Wiejskich [18].

Fotografia 2. Biogazownia w OSM Czarnków.
*Źródło: [32].*

### ■ Biogazownia w Siedliszkach (woj. lubelskie, gm. Piaski)

Jedną z pierwszych biogazowni w południowo-wschodniej Polsce jest instalacja w Siedliszkach, zlokalizowana w pobliżu spółdzielni mleczarskiej OSM Piaski, z której pobiera substrat potrzebny do produkcji biogazu. Od lutego 2012 r., biogazownia działa z pełną mocą wytwarzając 23,9 MWh energii elektrycznej na dobę [19]. Poza serwatką do produkcji biogazu, wykorzystywana jest sieczka kukurydziana skupowana od okolicznych rolników. Biogaz produkowany jest w dwóch zbiornikach fermentacyjnych oraz jednym pofermentacyjnym. Następnie, spalany jest w generatorach o mocy 1 MW. Ciepło trafia do Okręgowej Spółdzielni Mleczarskiej Piaski, a odbiorcą energii elektrycznej jest Polska Grupa Energetyczna. Dodatkowo, bogata w azot ciecz pofermentacyjna jest doskonałym nawozem wykorzystywanym przez rolników. Biogazownia w Siedliszkach jest dobrym przykładem współpracy z zakładem mleczarskim dostarczającym tani substrat.

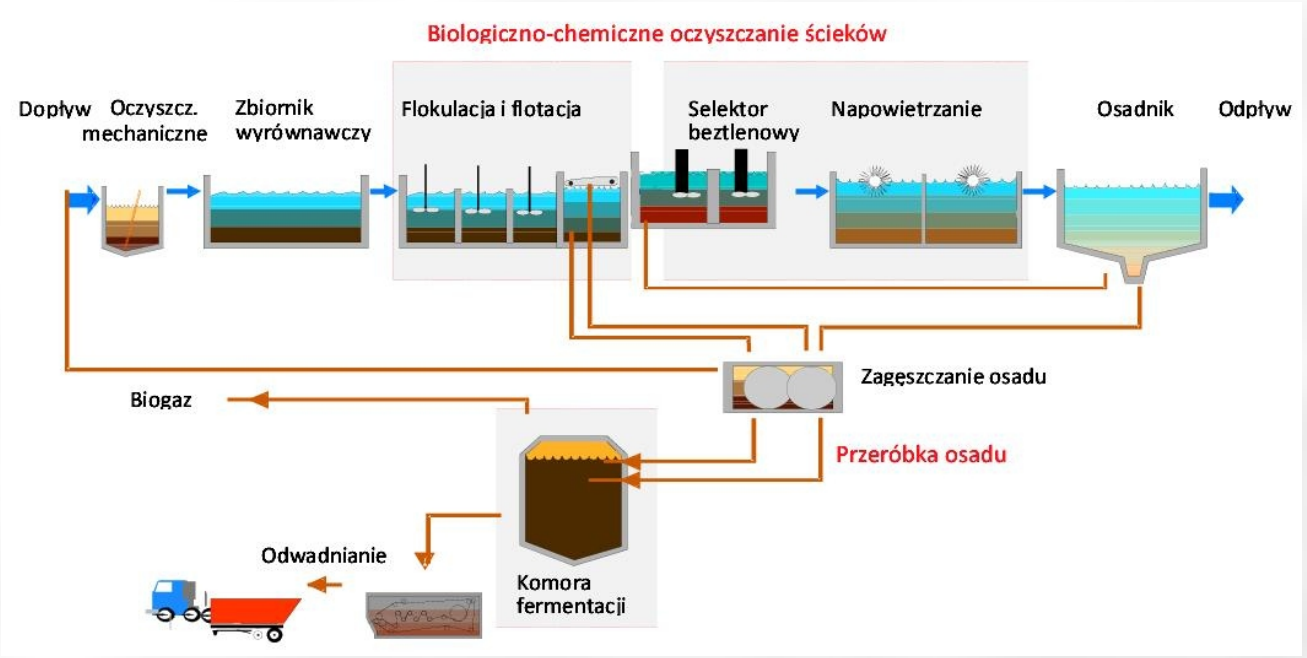
Fotografia 3. Biogazownia w Siedliszkach.
*Źródło: [33].*

## ■ Biogazownia w SM Mlekovita (woj. podlaskie, powiat wysokomazowiecki)

Największe firmy z sektora przetwórstwa rolno-spożywczego w Polsce zaczynają inwestować w biogazownie. Mlekovita, numer jeden w branży mleczarskiej w Polsce, zakończyła w br. modernizację i rozbudowę oczyszczalni ścieków przy swej głównej mleczarni w Wysokiem Mazowieckiem. W efekcie, na terenie oczyszczalni powstała biogazownia o mocy 1,6 MW [20]. W ramach modernizacji do wstępnego podczyszczania strumienia ścieków mleczarskich o przepływie 5 000 $m^3$/d i ładunku ChZT 30 000 kg $O_2$/d został zastosowany proces flotacji ciśnieniowej. Powstające w procesie flotacji osady, wraz z osadem nadmiernym z procesu osadu czynnego i serwatką odpadową, kierowane są do nowej instalacji fermentacji osadów tj. reaktora Biobulk [21]. W procesie fermentacji produkowany jest biogaz. Biogaz jest wykorzystywany jako paliwo w agregatach kogeneracyjnych do produkcji energii.

Wyprodukowana energia elektryczna wykorzystywana jest na potrzeby własne oczyszczalni ścieków, zaś jej nadwyżki kierowane są do sieci energetycznej. Energia cieplna wykorzystywana jest w technologii oczyszczania oraz do ogrzewania budynków administracyjnych i technologicznych. Dzięki zastosowanemu rozwiązaniu zmodernizowana oczyszczalnia ścieków zapewnia niezawodność i prostotę eksploatacyjną, a poprzez produkcję biogazu, również zysk z produkcji energii elektrycznej i ciepła.

Fotografia 4. Instalacja do beztlenowego oczyszczania ścieków w SM Mlekovita.
*Źródło: [34].*



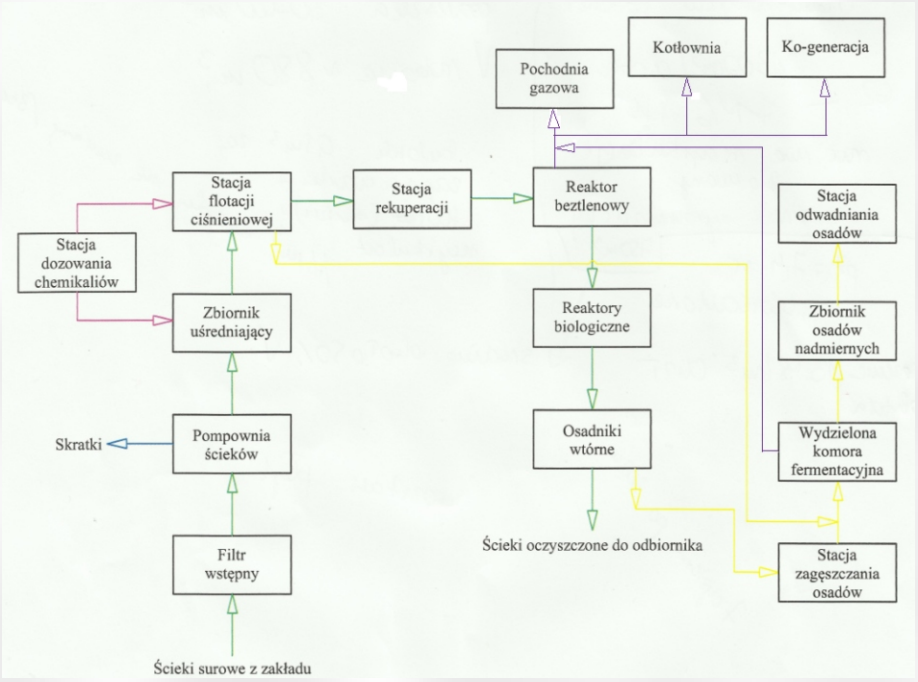

Schemat 5. Tlenowo-beztlenowe oczyszczanie ścieków w SM Mlekovita.
*Źródło: [35].*

## ■ Biogazownia w SM ROTR w Rypinie (woj. kujawsko-pomorskie, powiat rypiński)

Zwiększone moce przerobowe w Spółdzielni Mleczarskiej ROTR zadecydowały o konieczności rozbudowy, przestarzałej, bo budowanej według technologii z lat 60., oczyszczalni ścieków. Nowo wybudowany obiekt opiera się na nowoczesnych rozwiązaniach technologicznych. Ścieki są oczyszczane dwuetapowo, metodą beztlenowo-tlenową gwarantującą wysoką wydajność oraz skuteczność oczyszczania ścieków. Dodatkowo, wybór takiej technologii umożliwia perspektywiczną rozbudowę oczyszczalni. Zgodnie z założeniami, etap beztlenowy zapewnia redukcję ładunków w ściekach przed skierowaniem ich na część tlenową [22]. W pierwszym etapie ścieki kierowane są na sito bębnowe, w którym oddzielane są większe zanieczyszczenia. Następnie, w zbiorniku wyrównawczo-uśredniającym są ujednolicane i kierowane do flokulatora, a następnie do flotatora. Tutaj zachodzi rozdział ścieków i zawartych w nich zawiesin. Ścieki z komory flotacji kierowane są do bloku oczyszczania beztlenowego, a powstały flotat kierowany jest do dalszej obróbki. Oczyszczanie beztlenowe zachodzi w reaktorze beztlenowym IC (Internal Circulation), składającym się z dwóch części: dolnej wysoko obciążonej oraz górnej nisko obciążonej. Wyróżniającą cechą tego bioreaktora jest uzyskiwanie biogazu na dwóch poziomach. Produkowany biogaz przepuszczany jest barbotażowo przez stos bioreaktora powodując mieszanie się oczyszczanych ścieków z granulkami osadu, wywołując efekt tzw. podnośnika gazowego i dalsze zwielokrotnione powstawanie biogazu. W górnej części bioreaktora IC biogaz oddzielany jest od ścieków

Fotografia 5. Zbiornik IC i zbiornik WKF w ROTR Rypin.
*Źródło: [36].*

i przekazywany do systemu biogazu, natomiast podczyszczone ścieki kierowane są do dalszego tlenowego oczyszczania. Reaktory biologiczne składają się z dwóch komór: mieszania i napowietrzania. Flotat ze stacji flotacji kierowany jest do wydzielonej komory fermentacji, do której trafia również osad nadmierny powstały wskutek oczyszczania tlenowego. W wydzielonej komorze fermentacji zachodzi proces fermentacji metanowej. Osady ściekowe, po procesie fermentacji są ustabilizowane i odpływają do zbiornika osadu nadmiernego [25]. Osady okresowo trafiają do stacji odwadniania, a następnie na prasę i dalej do gospodarczego wykorzystania, na cele rolnicze (obecnie osady z oczyszczalni są higienizowane wapnem i odwadniane na wirówce, a potem przekazywane do dalszego zagospodarowania rolniczego). Powstający podczas fermentacji beztlenowej biogaz jest dostarczany rurociągiem do pochodni i tam spalany. Po przepracowaniu pełnego sezonu, kiedy będzie można określić ilość i jakość produkowanego biogazu zostanie rozważona możliwość przetwarzania biogazu na energię elektryczną lub cieplną [23]. Nowa oczyszczalnia jest w stanie przyjmować 1650 $m^3$ ścieków/dobę. Surowe ścieki po przejściu przez wszystkie etapy procesu oczyszczania ostatecznie trafiają do rzeki Rypienicy.




Schemat 6. Schemat blokowy oczyszczalni ścieków w SM ROTR w Rypinie.
*Źródło: [37].*

## Biogazownia w Umeä, Szwecja (region Västerbotten, gmina Umeä)

Norrmejerier w Umeä jest pierwszą mleczarnią w Szwecji, która połączyła swój obieg produkcyjny z własną instalacją biogazową. W biogazowni ścieki z Mleczarni Umeä są oczyszczane razem z serwatką pochodzącą z Mleczarni Burträsk. Przetwarzanie tak dużych ilości serwatki stanowiło duży problem. Dlatego też, po przes tudiowaniu nowych technologii w mleczarniach w Niemczech, Szwajcarii i Belgii kadra zarządzająca w Norrmejerier zdecydowała o wykorzystaniu ultra-filtracji serwatki [24]. Przy zastosowaniu tej metody, większość białka z serwatki jest usuwana w wyniku filtracji [24]. Białka te są wartościowym surowcem w procesie wytwarzania nowych produktów żywnościowych. Z pozostałej części serwatki, ścieków i innych odpadów w procesie beztlenowym produkuje się biogaz. Skutkuje to niższym zużyciem ropy, ograniczoną emisją gazów cieplarnianych i niższymi kosztami transportu [25].

Fotografia 6. Mleczarnia Norrmejerier w Umeä.
*Źródło: [37].*

Surowce z dwóch mleczarni (Umeä i Burträsk), przed przepompowaniem do bioreaktora, przechodzą przez komorę hydrolizy (800 $m^3$). Następnie, usuwane są tłuszcze w procesie separacji flotacyjnej, które później rozkładane są w dwóch oddzielnych mezofilnych reaktorach (35$^oC$), każdy po 100 $m^3$ objętości. Pozostały materiał jest rozkładany w „procesie bezpośrednim" w dwóch reaktorach o łącznej objętości 5 000 $m^3$. Odcieki z osadu pofermentacyjnego są zawracane do bioreaktora (sedymentacja w odstojniku). Takie rozwiązanie pomaga utrzymać odpowiednie zagęszczenie bakterii w bioreaktorze i skrócić czas retencji (3,6 dnia) bez ryzyka strat w kulturach bakterii [24].

Łącznie w procesie fermentacji wytwarzane jest 35 000 kWh energii dziennie i 10 000 MWh biogazu w skali roku, z dodatkowymi 7 000 MWh generowanymi przez pompy ciepła. Osad, który idzie do odstojnika po procesie fermentacji, jest następnie ochładzany w pompie ciepła do temperatury 15$^oC$, a następnie składowany. Jest on później wykorzystywany do produkcji palet mułowych, materiału wypełniającego przy budowie dróg.

Biogazownia zmniejszyła roczną konsumpcję ropy przez Norrmejerier's o 2 500 $m^3$ oraz zredukowała roczną emisję $CO_2$ o 9 500 ton i tlenku azotu oraz dwutlenku siarki odpowiednio o 9,3 i 3,9 ton [1,24].

## Biogazownia w Wels, Austria (Land Górna Austria, powiat Wels-Land)

Obecnie mleczarnia Berglandmilch jest jednym z wiodących producentów twarogu w Europie i liderem rynku produktów mlecznych w Austrii [26]. Każdego roku mleczarnia generuje ok. 50 mln litrów serwatki, którą wcześniej oddawała na cele paszowe. W 2004 r. postanowiono wykorzystać tą pozostałość jako źródło energii i zastąpić gaz ziemny biogazem.

Pomimo wysokich kosztów inwestycyjnych (ok. 2 mln Euro), instalacja zwróciła się w ciągu 5 lat. Mleczarnia zaoszczędziła na kosztach transportu serwatki, poza tym produkuje ponad jedną trzecią własnego zapotrzebowania na energię cieplną [27]. Dodatkowo dochodzi zysk ze sprzedaży zielonych certyfikatów za energię wprowadzaną do sieci elektro-energetycznej. Biogazownia jest zaprojektowana tak, że każdego dnia do reaktora trafia około180 000 l serwatki i 180 000 l wody procesowej. Oznacza to, że codziennie generowane jest do12 MWh energii elektrycznej i 14 MWh energii cieplnej. Dzięki tej inwestycji, mleczarnia Berglandmilch trwale rozwiązała problem unieszkodliwiania serwatki. Dodatkowo okoliczni rolnicy otrzymują wysokiej jakości nawóz organiczny będący pozostałością po produkcji biogazu.

Fotografia 7. Biogazownia przy mleczarni w Wels.
*Źródło: [38].*

## Podsumowanie

Przedstawione wyniki badań eksperymentalnych, jak i przykłady istniejących instalacji mikrobiogazowych dedykowanych przedsiębiorstwom mleczarskim w pełni uzasadniają wykorzystanie procesu fermentacji metanowej, w celach racjonalnej gospodarki odpadami poprodukcyjnymi. Konkurencyjność tej metody zagospodarowania odpadów polega przede wszystkim na uzyskaniu dwóch wymiernych strumieni zysków przez zakład produkcyjny: oszczędności finansowych z tytułu samodzielnego przekształcania organicznych uciążliwości poprodukcyjnych oraz zysku energetycznego, z łatwością przekładającego się na dalszy zysk finansowy. Koncepcje rozwoju i rozbudowy takiej technologii o dalsze elementy, zależą wyłącznie od postawionych przez przedsiębiorcę celów.

Podstawowym kryterium efektywności proponowanego rozwiązania jest odpowiedni dobór substratów, a więc wyselekcjonowanie z całego wolumenu odpadów pozostałości, charakteryzujących się znaczną wartością energetyczną i dość łatwo ulegających biodegradacji na drodze przemian beztlenowych. Dalszy rozwój koncepcji związany jest przede wszystkim z doborem odpowiedniej technologii i projektem samego bioreaktora, co ma bezpośredni związek z rodzajem substratu poddawanego fermentacji.

Przykłady zarówno z Polski, jak i Europy pokazują, jak rentowna może być to inwestycja i jak wiele problemów może rozwiązać. Widać wyraźną ekspansję tego typu przedsięwzięć i wyraźne zainteresowanie technologiami

biogazowymi przeznaczonymi do unieszkodliwiania odpadów organicznych. Ostrożne kalkulacje wskazują, że popyt na przyzakładowe mikroelektrownie biogazowe będzie stale wzrastać, na skutek wzrastającego wciąż wolumenu produkowanych odpadów organicznych. Dla istniejących w Polsce mleczarni to ogromna szansa nie tylko na rozwój, ale i ekspansję poza rynki krajowe.

## Bibliografia


[1] K. Michalska, A. Kacprzak, Szwedzki model rozwoju innowacyjnych technologii biogazowych oparty na zarządzaniu odpadami, w: Acta Innovations, Nowy Paradygmat Innowacji Technologicznych, CBI Pro-Akademia, PAN, Łódź, 2013, ss. 39-70.

[2] S. Ledakowicz, L. Krzystek, 2005. Wykorzystanie fermentacji metanowej w utylizacji odpadów przemysłu rolno-spożywczego. Biotechnologia, 3 (70) 165-183.

[3] A. Kacprzak, K. Michalska, Z. Romanowska-Duda, M. Grzesik, Rośliny energetyczne jako cenny surowiec do produkcji biogazu. Kosmos 61, 2 (295), 281-293.

[4] A. Grzybek, Możliwości i technologia produkcji biogazu rolniczego, Czysta energia, nr 10(36), Poznań 2004, s. 36.

[5] E. Głodek, Pozyskiwanie i energetyczne wykorzystanie biogazu rolniczego, Wyd. Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych, Opole 2007, s.18-34.

[6] K. Miksch, J. Sikora, Biotechnologia ścieków, Wydawnictwo Naukowe PWN, 2010.

[7] L. Janecka, W. Kalinowski, A. Weszler, T. Garus, J. Kościanowski, Pozyskiwanie i energetyczne wykorzystanie biogazu rolniczego, Wydawnictwo Instytut Śląski, Opole 2007.

[8] W. M. Lewandowski, Proekologiczne odnawialne źródła energii, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2010.

[9] Z. Zander, F. Dajnowiec, Gospodarka wodą w zakładzie mleczarskim, Agro Przemysł 3 (2009) 50-52.

[10] M. Jędrzejewska-Cicińska, K. Kozak, Przetwarzanie permeatów powstających podczas filtracji membranowej serwatki do paliw gazowych, Przegląd Mleczarski 1 (2007) 16-18.

[11] J. Cebula, L. Latocha, Biogazownie rolnicze elementem gospodarczego wykorzystania pozostałości z produkcji rolniczej oraz rozwoju rozproszonej energetyki odnawialnej. Materiały Seminarium Biogazownie rolnicze elementem gospodarczego wykorzystania pozostałości z produkcji rolniczej, ochrony środowiska naturalnego oraz rozwoju rozproszonej energetyki odnawialnej, Mikołów, 2005.

[12] M. Gazda, A. Rak, M. Sudak, Badania kofermentacji osadów ściekowych z tłuszczami odpadowymi w oczyszczalni ścieków w Brzegu, w Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich 3, PAN, Oddział w Krakowie, 2012, ss.79-90.

[13] A. Kacprzak, K. Michalska, J. Felczak, Technologie biogazowe, w Mikrotechnologie biogazowe jako innowacyjne narzędzia stymulowania rozwoju lokalnego, CBI Pro-Akademia, PAN, Łódź, 2012, ss. 42-68.

[14] A. Jędrczak, Biologiczne przetwarzanie odpadów, PWN, 2007.

[15] P. Frassinetti, C. Catunda, A.C. van Haandel, Improved performance and increased applicability of waste stabilisation ponds by pretreatment in a UASB reactor, Water Science and Technology 33 (7) (1996) 147-156.

[16] http://www.forummleczarskie.pl/NEWS/2312/

[17] http://www.farmer.pl/energia/oze/spoldzielnia-mleczarska-w-chodziezy-ma-biogazownie,34255.html

[18] http://gramwzielone.pl/bioenergia/1246/nowa-biogazownia-w-wielkopolsce

[19] http://ioze.pl/energetyka-biogazowa/aktualnosci/wikana-ma-dotacje-na-biogazownie-w-piaskach

[20] http://chronmyklimat.pl/7-aktualnosci/15990-mlekovita-zainwestowala-w-biogazownie

[21] http://www.veoliawaterst.pl/media/aktualnosci/2011-02-01,4153.htm

[22] A. Gajewska, Zwiększą produkcję z większą oczyszczalnią, Agro przemysł, 2012, Vol.3, 48-52.

[23] http://www.agro.e-bmp.pl/zwieksza-produkcje-z-wieksza-oczyszczalnia,5309,art.html

[24] J. Held, A. Mathiasson, A. Nylander, Raport: Biogaz z nawozu i odpadów szwedzkie stadium przypadku, 2008 Sztokholm.

[25] www.afprojects.pl

[26] http://www.chp-goes-green.info/

[27] http://www.cogeneurope.eu/challenge/Downloadables/Best%20Practice%20factsheets/Austria/CC_BP%20Factsheet_biogas%20plant%20Landfrisch%20creamery.pdf

[28] http://www.stat.gov.pl/cps/rde/xbcr/gus/se_energia_zrodla_odnawialne_2010.pdf

[29] http://www.mutag.pl/page16.php

[30] http://rener.pl/?page_id=611

[31] M. Szyprowska, P. Wichowski, P. Stępień Badania procesów beztlenowego oczyszczania ścieków na przykładzie ścieków z przemysłu farmaceutycznego [w:] Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich 7, PAN, Oddział w Krakowie, 2011, ss. 155-168.

[32] http://chodziez.naszemiasto.pl/tag/biogazownia-osm-czarnkow.html

[33] http://www.bpp.lublin.pl/news1/fot/11.10.07/03.jpg

[34] http://www.bpp.lublin.pl/news1/fot/11.10.07/03.jpg

[35] http://www.bpp.lublin.pl/news1/fot/11.10.07/03.jpg

[36] http://www.agro.e-bmp.pl/galeria_big.php?nr_fo=5084&gal_nr=443

[37] www.afprojects.pl

[38] http://www.cogeneurope.eu/challenge/Downloadables/Best%20Practice%20actsheets/Austria/CC_BP%20Factsheet_biogas%20plant%20Landfrisch%20creamery.pdf

Zdzisława Romanowska-Duda, Wiktor Pszczółkowski, Wojciech Wolf, Mieczysław Grzesik.

# ALTERNATYWNE METODY OCZYSZCZANIA ŚCIEKÓW MLECZARSKICH.
## HYDROFITOWE OCZYSZCZALNIE

Streszczenie.

Przemysł mleczarski w Polsce generuje około 92000 $m^3$ ścieków mleczarskich na dobę. Dla oczyszczania tego typu ścieków stosowane są konwencjonalne instalacje, takie jak bioreaktory membranowe. Efektywną metodą w oczyszczaniu ścieków, może być naturalna technologia oczyszczalni hydrofitowej, skojarzona ze strategią fitoremediacji. Jest to proces biologiczny zachodzący we współpracy z mikroorganizmami heterotroficznymi oraz roślinami. Oczyszczalnie hydrofitowe posiadają zdolność usuwania substancji organicznych, azotu, fosforu oraz innych zanieczyszczeń w tym metali ciężkich. Metoda hydrofitowa może stanowić alternatywę dla zaawansowanych i kosztownych technologii w oczyszczaniu ścieków mleczarskich.

Abstract.

The dairy industry in Poland produces about 92,000 $m^3$ of dairy sewage a day. For treatment of this type of contamination conventional treatment systems, such as membrane bioreactors, are used. Natural wetland technology associated with phytoremediation strategy is the most effective method in the treatment of wastewater. It is a biological process in which heterotrophic microorganisms and plants are involved. CWs are capable of removing organic matter, nitrogen, phosphorus and other pollutants including heavy metals. Wetland method may provide an alternative to costly advanced dairy sewage treatment technologies.

Słowa kluczowe: ścieki mleczarskie, oczyszczalnie hydrofitowe, fitoremediacja, rośliny wodne

Keywords: waste dairy, constructed wetlands, phytoremediation, aquatic plants

Zdzisława Romanowska-Duda - doktor habilitowany, profesor nadzwyczajny UŁ, Wydział Biologii i Ochrony Środowiska, Uniwersytet Łódzki, Banacha 12/16, 90-231 Łódź, romano@biol.uni.lodz.pl

Wiktor Pszczółkowski - magister, Wydział Biologii i Ochrony Środowiska, Uniwersytet Łódzki, Banacha 12/16, 90-231 Łódź, wiktorpszczolkowski@gmail.com

Wojciech Wolf - profesor doktor habilitowany inżynier, Wydział Chemiczny, Politechnika Łódzka, ul. Żeromskiego 116, 90-924 Łódź, wojciech.wolf@p.lodz.pl

Mieczysław Grzesik - profesor doktor habilitowany, Instytut Ogrodnictwa, 3 Maja 1/3, 96-100 Skierniewice, mieczyslaw.grzesik@inhort.pl

## Ścieki źródłem zanieczyszczeń wód w Polsce

Jednym z podstawowych źródeł zanieczyszczających wody w Polsce, są miejskie ścieki komunalne i przemysłowe oraz spływy powierzchniowe z miast, pól uprawnych i obszarów nieskanalizowanych. Producentami generującymi istotne ilości ścieków są: przemysł górniczy, metalurgiczny, włókienniczy, chemiczny, paliwowo-energetyczny, celulozowy, garbarski i rolno-spożywczy. Do ostatniego z wymienionych, zalicza się m. in. zakłady mleczarskie. Skład chemiczny ścieków jest bardzo zróżnicowany, a jego masę depozytową stanowią związki organiczne i nieorganiczne, w tym metale ciężkie.

Przemysł mleczarski należy do głównych przemysłów spożywczych w Polsce. W latach 2000-2010 wystąpił wzrost wartości produkcji mleka o 58,9%. W kraju produkuje się rocznie prawie 12 mld litrów mleka. Przyjmując wskaźnik ilości powstających ścieków na jednostkę produkcji na poziomie 3,5 $m^3/m^3$ przerabianego mleka, można oszacować, że w Polsce powstaje około 92000 $m^3$ ścieków mleczarskich na dobę [1]. Według danych G.U.S. z 2008 roku, liczba podmiotów gospodarczych zajmujących się przetwórstwem mleka na terenie Polski wynosiła 224. W zależności od stosowanej technologii i produkcji asortymentu, jednostkowe zużycie wody wynosiło od 3 L /L przetwarzanego mleka w produkcji napojów mlecznych i mleka, aż do 20 L/L w procesie produkcji masła i serów żółtych [2]. Ścieki mleczarskie charakteryzują się znacznie wyższymi wartościami wskaźników zanieczyszczeń oraz zmiennością ładunku w porównaniu do ścieków komunalnych, co powoduje, że eksploatacja tych obiektów jest znaczne trudniejsza [3-5].

Generowanie ścieków mleczarskich jest spowodowane m. in. myciem urządzeń, rozlaniem mleka, maślanki, serwatki i in. Wspomniane generowanie ścieków, może negatywnie wpływać na środowisko ze względu na wysokie BZT5, ChZT, TSS (cząsteczki zawiesiny ogólnej) oraz składniki odżywcze, takie jak fosfor i azot, które powodują eutrofizację wód.

Do oczyszczania ścieków mleczarskich, zwykle stosowane są konwencjonalne instalacje, które powodują wiele problemów, są uciążliwe i nieopłacalne. W rzeczywistości, w sezonie powodziowym wymywanie ścieków powoduje nagły spadek lokalnego poziomu rozpuszczonego tlenu w wodzie rzek, co w konsekwencji może prowadzić do masowego śnięcia ryb [6-7]. Dodatkową niedogodność stanowią wahania ładunku zanieczyszczeń odprowadzanych z zakładów mleczarskich. Dlatego w kontekście ochrony środowiska wodnego, istotnym jest efektywne usuwanie zanieczyszczeń ze ścieków mleczarskich. Niezbędnym zaś elementem, powinien być stały monitoring parametrów jakości ścieków w całym profilu produkcyjnym oczyszczalni, umożliwiający korygowanie pracy urządzeń. Poszukiwanie opłacalnej i przyjaznej dla środowiska metody kontroli zanieczyszczenia wody, doprowadziło do ponownego zainteresowania oczyszczalniami hydrofitowymi.

Na terenach zakładów mleczarskich przepompowywanie mleka z cystern dostawczych odbywa się systemem rurociągu, który jest higienizowany wielokrotnie w ciągu doby. Stosowane środki w tej praktyce to roztwory kwasu azotowego, których zadaniem jest zapobieganie osadzaniu się osadów nieorganicznych oraz ług sodowy usuwający białka i tłuszcze. Powstające w ten sposób ścieki mają wspólną bazę we wszystkich typach zakładów mleczarskich, natomiast ilość i kondensacja ścieków poprodukcyjnych jest uwarunkowana profilem produkcji. Powyższe obrazują tabele 1, 2 i 3.

Oczyszczanie ścieków może być przeprowadzane z zastosowaniem naturalnych lub konwencjonalnych systemów. Każda technologia ma swoje zalety i wady. Konwencjonalne technologie takie jak bioreaktory membranowe, wymagają znaczącego udziału energii, podczas gdy naturalne technologie takie jak skonstruowane fitooczyszczalnie, uwzględniające proces fitoremediacji są uzależnione przede wszystkim od naturalnych źródeł energii, takich jak wiatr, promieniowanie słoneczne i magazynowanie biomasy [9].

Tabela 1. Ilość ścieków ($m^3$/1000 l mleka) w zależności od profilu produkcji.

| Produkcja | Ilość ścieków |
|---|---|
| Mleko w proszku | 1,5-3,0 |
| Twarogi | 5 |
| Sery twarde | 6 |
| Mleko spożywcze | 6 |
| Kazeina | 6 |
| Sery topione | 12 |
| Masło | 20 |

*Źródło: [8].*

Zakresy koncentracji zanieczyszczeń w ściekach ogólnych w zakładach mleczarskich podano w tabeli nr 2.

Tabela 2. Wartości koncentracji zanieczyszczeń w ściekach mleczarskich ogólnych.

| Oznaczenie | Wartość |
|---|---|
| $BZT_5$ | 500-2000 mg tlenu $L^{-1}$ |
| ChZT | 700-2800 mg $O_2$ /L |
| Azot ogólny | 30-150 g/$m^3$ |
| Fosfor ogólny | 20-100 g/$m^3$ |
| pH | |

*Źródło: [8].*

Tabela 3. Skład ścieków mleczarskich w zależności od rodzaju produkcji.

| | Rodzaj produkcji | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Oznaczenie** | **Sery** | **Kazeina** | **Twarogi** | **Masło** | **Mleko w proszku** | **Sery topione** | **Mleko spożywcze** |
| PH | 7,0 | 6,4 | 6,6 | 7,5 | 7,6 | 7,2 | 7,2 |
| Utlenialność, g $O_2$/$m^3$ | 500 | 480 | 1020 | 200 | 575 | 485 | 550 |
| ChZT g $O_2$/$m^3$ | 3950 | 1360 | 3420 | 1055 | 2090 | 1450 | 2090 |
| BZT g $O_2$/$m^3$ | 1760 | 1300 | 1900 | 690 | 1135 | 875 | 1160 |
| Ekstrakt eterowy g/$m^3$ | 150 | 31 | 100 | 75 | 32 | 375 | 60 |
| Zawiesiny w g/$m^3$ | 350 | 400 | 485 | 200 | 505 | 1980 | 205 |
| Sucha pozostałość g/$m^3$ | 2020 | 1800 | 1920 | 1100 | 1090 | 3250 | 1460 |

*Źródło: [8].*

Oczyszczanie ścieków może być przeprowadzane z zastosowaniem naturalnych lub konwencjonalnych systemów. Każda technologia ma swoje zalety i wady. Konwencjonalne technologie takie jak bioreaktory

membranowe, wymagają znaczącego udziału energii, podczas gdy naturalne technologie takie jak skonstruowane fitooczyszczalnie, uwzględniające proces fitoremediacji są uzależnione przede wszystkim od naturalnych źródeł energii, takich jak wiatr, promieniowanie słoneczne i magazynowanie biomasy [9].

## Właściwości fitoremediacyjne roślin

Szybki rozwój obszarów miejskich i wiejskich oraz przemysłu, często jest związany ze znacznym generowaniem ścieków poprodukcyjnych, wymagającymi procesu oczyszczania przez środowisko naturalne. W ostatnich latach rośliny stały się efektywnym narzędziem w przywracaniu równowagi zdegradowanego środowiska. W swoim cyklu życiowym w okresie wegetacyjnym wpływają na procesy fizyczne, chemiczne oraz biologiczne w otaczającym je środowisku. Z tego powodu chętnie wykorzystywane są m.in. w technologii oczyszczania ścieków oraz rekultywacji gleby i wychwytywaniu zanieczyszczeń gazowych z powietrza atmosferycznego. Metody oczyszczania środowiska, oparte na fitotechnologiach i inżynierii środowiskowej, zyskują coraz więcej zwolenników. Technologie te są proste w obsłudze, tanie, skuteczne i proekologiczne oraz mogą być prowadzone in situ.

**Fitoremediację** definiuje się jako proces usuwania lub detoksykacji zanieczyszczeń ze środowiska, za pomocą roślin wyższych. Technologia ta opiera się na zdolnościach pewnych gatunków i odmian roślin do tolerancji na wysokie stężenia związków toksycznych, pobierania, akumulacji i metabolizmu tych związków w dużych ilościach we własnych organach, bądź do ich przekształcenia w związki nietoksyczne. Rośliny mając aktywny wpływ na zachodzące w naturze procesy fizyczne, chemiczne i biologiczne, zmieniają je tak, aby umożliwić przebieg własnego cyklu życiowego. Ponadto, organizmy roślinne wyposażone są w mechanizmy obronne. Pobierając, metabolizując i/lub koncentrując we własnych tkankach substancje toksyczne oczyszczają środowisko z ksenobiotyków, które w większości posiadają własności kancerogenne.

Pierwsze udane próby wykorzystania fitoremediacji do rolniczego zagospodarowania ścieków komunalnych miały miejsce w Niemczech już na początku XIX wieku. Od dawna doceniana jest także rola roślin w oczyszczaniu powietrza wielkich aglomeracji miejskich. Największe jednak zainteresowanie tą metodą i pierwsze wdrożenia, zostały podjęte dopiero na początku lat osiemdziesiątych. Rezultaty badań naukowych pozwoliły na opracowanie podstaw biotechnologii środowiskowej, wykorzystującej rośliny do usuwania z gleby metali ciężkich i ksenobiotyków organicznych, powstałych w wyniku rozwoju różnych gałęzi przemysłu.

Technologie oparte na fitoremediacji umożliwiają:

- Redukcję zanieczyszczeń organicznych i nieorganicznych oraz ich koncentrację w zbieranych częściach roślin.
- Rozkład związków toksycznych przez symbiotyczny układ roślina-mikroorganizmy (strefa korzeniowa).
- Sorpcję zanieczyszczeń z wody i ścieków przez korzenie roślin.
- Obniżenie biodostępności i odparowanie zanieczyszczeń.

W procesie fitoremediacji można wyróżnić następujące kierunki technologiczne:

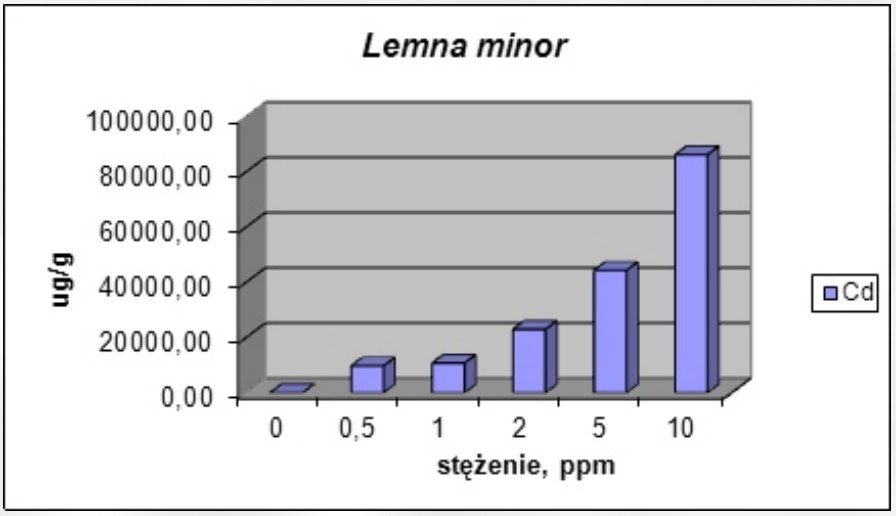
- **Fitodegradację** - pobieranie szkodliwych związków i ich transformowanie za pomocą kompleksów enzymatycznych i cyklu metabolicznego;

- **Fitoekstrakcję** - unieszkodliwienie niepożądanych substancji w tkance roślinnej;
- **Rizofiltrację** - sorpcję zanieczyszczeń z wody oraz ścieków przez korzenie roślin. Wykorzystuje się tu heterogenne warianty rizofiltracji, począwszy od mat pływających po powierzchni zbiorników i utrzymujących korzenie roślin w wodzie (słonecznik, *Helianthus annuus L*), przez rośliny wodne, takie jak: trzcina (*Pragmites australis*), pałka wodna (*Typha latifolia*), hiacynt wodny (*Eichhornia crassipes L.*) czy rzęsa wodna (*Lemna minor L.*), turzyca bagienna (*Carexlimosa*), sitowie leśne (*Scirpus sylvaticus*), aż do kultur korzeniowych in vitro;
- **Fitostabilizację** - detoksykację substancji poprzez unieruchomienie zanieczyszczeń w matrycy glebowej;
- **Fitowolatalizację** - neutralizację zanieczyszczeń, poprzez modyfikację, w postać gazową [10].

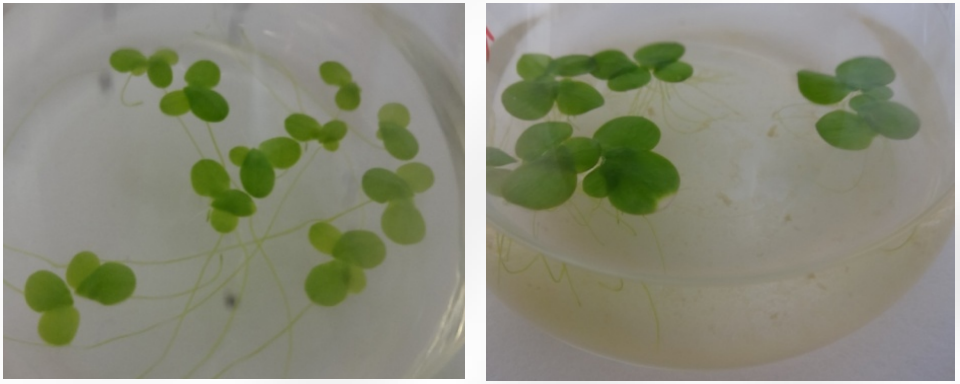
Skuteczność technologii zależy od doboru odpowiedniego gatunku roślin. Idealna roślina do procesu fitoremediacji, powinna charakteryzować się wysokim poziomem sorpcji oraz nad ekspresją naturalnych i zmodyfikowanych genów kodujących białka i enzymy, odpowiedzialnych za odporność na metale ciężkie. Ponadto, powinna wykazywać się:

- efektywną akumulacją toksycznych związków w częściach nadziemnych,
- wytrzymałością oraz tolerancją na zanieczyszczenia, w tym na kilka metali jednocześnie,
- dużym przyrostem biomasy i prostą uprawą.

Do tego typu technologii mogą być wykorzystywane rośliny wodne z rodziny *Lemnaceae (Lemna minor, Spirodela polyrrhiza, Spirodela oligorrhiza).*




Wykres 1. Absorpcja kadmu (Cd) przez rośliny *Lemna minor.* Stężenia w zakresie 0-10 ppm.
*Źródło: badania własne.*



Fotografia 1. *Lemna minor* i *Spirodela polyrrhiza* hodowane w kulturach *in vitro* z wykorzystaniem ścieków mleczarskich.
*Źródło: foto. Z. Romanowska-Duda.*

**Zaletą fitoremediacji** jest:

- szerokie spektrum działania,
- minimalna inwazyjność na środowisko,
- niewątpliwe walory estetyczne.

Jest ona wysoce efektywna w usuwaniu wybranych substancji i zapobieganiu erozji gleby oraz dyspersji zanieczyszczeń w środowisku. Jest to technika niskokapitałowa, w porównaniu z innymi metodami oczyszczania, przyjazna środowisku, społecznie akceptowana i stanowi przyszłościowy kierunek w biotechnologii środowiskowej. Dodatkowym atutem fitoremediacji jest możliwość uzyskania biogazu z roślin wykorzystanych w tej technologii [11].

**Wadą fitoteremediacji** jest: długi czas uzyskiwania efektów oczyszczania, który w przypadku metali ciężkich wynosi nawet 30 lat. Zakłada się, że powinien on trwać nie dłużej niż 5 lat, a w wyjątkowych przypadkach do 10 lat, ze względu na ograniczony okres wegetacyjny roślin. Przy bardzo wysokich stężeniach zanieczyszczeń, fitotechnologia ta może być trudna do realizacji i zwykle musi być uzupełniona o inne techniki remediacyjne. Istnieje również problem przemieszczania się zanieczyszczeń z gleby do powietrza, co wymusza konieczność utylizacji zanieczyszczonej biomasy. Fitoremediacja jest uzależniona od strefy penetracji korzeni i wrażliwości roślin na czynniki stresowe. Odmienną kwestią do rozwiązania jest deponowanie i usuwanie roślin akumulujących toksyczne zanieczyszczenia [10].

W ostatnich latach metoda oczyszczalni hydrofitowych, jest z powodzeniem wykorzystywana do oczyszczania odcieków ze składowisk odpadów komunalnych [12-19]. Działanie systemów hydrofitowych jest wzorowane na naturalnych ekosystemach podmokłych, tzw. wetlandach [20]. Systemy te, podobnie jak występujące w przyrodzie siedliska roślin bagiennych, mają zdolność do rozkładu i zatrzymywania zanieczyszczeń [21]. W przypadku małych oczyszczalni mleczarskich, ta niekonwencjonalna metoda może stanowić ekonomiczne rozwiązanie, szczególnie w porównaniu z dotychczas stosowanymi kosztownymi technologiami, opartymi na metodach fizycznych, chemicznych i biologicznych (lub ich kombinacji).

Główny podział oczyszczalni hydrobotanicznych uzależniony jest od kierunku przepływu ścieków oraz rodzaju zastosowanej w nich roślinności. Wyróżnia się:

- **Systemy z poziomym przepływem ścieków** - ścieki przepływają poziomo kilka centymetrów pod powierzchnią złoża (**HF-CW**; *horizontalflow constructedwetland*).
- **Systemy z pionowym przepływem ścieków** - ścieki rozprowadzane są nad złożem, następnie przepływają pionowo w dół, gdzie są zbierane drenażem rozsączającym, a materiał filtrujący jest ułożony w gradiencie od najdrobniejszej frakcji na powierzchni, do warstwy kamienistej na dnie (**VF-CW**; *verticalflow constructedwetland*).

**Systemy mieszane HF-CW i VF-CW.**

Jako podkategorie systemów HF- CW wyróżnia się:

- Systemy z powierzchniowym przepływem - ścieki przepływają nad powierzchnią gruntu, a sieć przegród hydraulicznych powoduje spowolnienie przepływu ścieków przez wydzielony teren.
- Systemy z podpowierzchniowym przepływem - poziom ścieków utrzymywany jest poniżej poziomu gruntu.

Kryterium innego podziału oczyszczalni stanowi, rodzaj zastosowanych roślin w systemie oczyszczania. W tym przypadku można wyróżnić oczyszczalnie:

- z roślinnością bagienną,
- z roślinnością wodną zakorzenioną,
- z roślinnością wodną pływającą
- wierzbowe.

Złoża o przepływie pionowym i poziomym mogą być zastosowane w III fazie oczyszczania ścieków mleczarskich, po etapie mechanicznego i biologicznego oczyszczania. Oczyszczalnie hydrofitowe, to typowe naturalne i środowiskowo przyjazne układy, wykorzystujące zakorzenione lub pływające rośliny, żwir i ziemię do masowego oczyszczania ścieków [9], [15]. Technologie obróbki w zielonych hydrofitowych oczyszczalniach mają unikalną zaletę- produkcji wyższej jakości ścieków, bez konieczności stosowania energii z paliw kopalnych, zmniejszając w ten sposób koszty eksploatacji [22-24]. Różnorodność procesów biochemicznych zachodzących w tych systemach zapewnia usuwanie nie tylko substancji organicznej i związków azotu, ale również zanieczyszczeń specyficznych, ze stabilną, wysoką skutecznością [25], [16], [19], [21].

Najczęściej stosowane rośliny naziemne w oczyszczalniach hydrofitowych to takie, które mają rozbudowany system kłączy i korzeni oraz charakteryzują się znaczną odpornością na zmienne warunki klimatyczne i zanieczyszczenia. Bardzo popularnymi i spełniającymi te wymagania są:

- trzcina (*Phragmites australis* Cav. Trin. ex Steudel),
- wiklina (*Salix viminalis* L.).

W krajach strefy umiarkowanej, do procesu oczyszczania odcieków stosowana jest mozga trzcinowa *Phalarisarundinacea.* Ma ona węższy zasięg występowania niż trzcina, jest rośliną wieloletnią, a raz wysiana może być wykorzystywana przez 10-12 lat. Natomiast, w ciepłych strefach klimatycznych Azji do oczyszczania ścieków stosuje się naturalnie występujące tam trawy, takie jak:

- miskant olbrzymi - *Miscanthus x giganteus*,
- wetiweria pachnąca - *Vetiveria zizanioides,*
- trzcina laskowa - *Arundo donax*.

Poza trawami testowane były inne rośliny zielne, jak:

- oczeret - *Schoenoplectus lacustris*,
- pałki - T*ypha latifoliai, T. angustifolia*,
- rośliny pływające:
  - rzęsa drobna - *Lemna minor, Spirodela intermedia,*
  - hiacynt wodny - *Eichhornia crassipes* [26].

W badaniach Basílico i wsp. (2013) [27] wykazali, że *Spirodela intermedia* może być stosowana do usuwania znacznych ilości amoniaku (TN; total nitrogen) i fosforu (TP; total phosphorus) ze ścieków. W przypadku użycia metody fitoremediacji *in situ* z wykorzystaniem roślin z rodziny *Lemnaceae*, należy rozważyć również regularne zbiory biomasy roślinnej w celu uniknięcia uwalniania fosforu. W tabeli 4 i 5 zamieszczono wartości współczynnika usuwania fosforu przez *Spirodela intermedia* w dwóch wariantach doświadczalnych: (A) w obecności roślin *Spirodela intermedia* i (B) bez roślin przy zmieniających się parametrach ładunków oraz wartości przyrostu świeżej i suchej biomasy roślin. Doświadczenia prowadzono w dwóch rodzajach okresowych reaktorów przez 6 dni.

Tabela 4. Współczynnik usuwania fosforu (%R ±SD) mierzony w wariancie (A) z *Spirodela intermedia* i (B), bez wykorzystania roślin ze zmieniającymi się parametrami ładunków.

| Zmienna | Traktowanie | %R | Fosfor (P) |
|---|---|---|---|
| N-NH4 | A<br>B | 98,1 ± 0,8<br>57,4 ± 11,4 | 0,002* |
| DIN | A<br>B | 53,0 ± 11,9<br>57,2 ± 11,4 | 0,344 |
| TP | A<br>B | 15,4 ±2,3<br>9,7 ± 2,7 | 0,016* |
| TOC | A<br>B | 67,9±11,6<br>60,5 ± 9,9 | 0,222 |
| DOC | A<br>B | 68,5 ± 12,7<br>50,0 ± 14,2 | 0,085 |
| POC | A<br>B | 67,5 ± 11,7<br>55,7 ± 17,2 | 0,208 |

N-NH4+- całkowity amon (total ammonium)
DIN - rozpuszczony azot nieorganiczny (dissolved inorganic nitrogen)
TP - totalny fosfor (total phosphorus)
TOC - całkowity węgiel organiczny (total organic carbon)
DOC - rozpuszczalny węgiel organiczny (dissolved organic carbon)
POC - cząstkowy organiczny węgiel (particulates organic carbon)

*Różnice pomiędzy % R, obydwu traktowań A i B ($p<0,05$); Student test.
*Źródło:[27].*

Dopływający tlen z powietrza atmosferycznego przez tkankę gazową - aerenchymę - do części podziemnych roślin, tworzy wokół korzeni i kłączy mikrostrefy tlenowe (z $O_2$), okolone mikrorejonami niedotlenionymi, (bez

$O_2$ i w obecności $NO_{3-}$), a w dalszej części mikroobszarami redukcyjnymi (bez $O_2$ i $NO_{3-}$). Takie warunki sprzyjają rozwojowi mikroorganizmów heterotroficznych, które są aktywne w procesach biochemicznych przemian zanieczyszczeń doprowadzanych w ściekach. Rośliny używane w fitooczyszczalniach charakteryzują się szybkim przyrostem biomasy, będącego wynikiem intensywnych procesów metabolicznych, powodowanych pobieraniem związków biogennych[21], [28], [29].

Tabela 5. Zmiany wartości przyrostu świeżej i suchej biomasy roślin *Spirodela intermedia*, traktowanej ściekami mleczarskimi (±SD).

| Warianty | Biomasa | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Inicjująca biomasa ($g/m^2$) | Finalna biomasa ($g/m^2$) | Przyrost biomasy ($g/m^2$) | Produkcja biomasy ($g/m^2$ dzień) | Współczynnik wzrostu (RGR ) (g/g dzień) |
| Świeża masa (FW) | 464±0 | 514±6 | 50±6 | 8±1 | 0.017 |
| Sucha masa (DW) | 35.6±0.4 | 37.9±0.7 | 2.2±0.7 | 0.4±0.1 | 0.010 |

*Źródło: [27] .*

Tabela 6. Efektywności oczyszczania dla obiektów hydrofitowych, oczyszczających odcieki ze składowisk odpadów wg danych literaturowych.

| Nazwa obiektu, kraj, literatura | Konfiguracja | Efektywność usuwania zanieczyszczeń [%] BZT 5 | ChZT | N | $N\text{-}NH_4^+$ |
|---|---|---|---|---|---|
| Esval, Norwegia | Laguna beztlenowa laguna napowietrzająca 2 równoległe złoża HSSF staw hydrofitowy doczyszczający | 91 | 88 | 83 | |
| Dragonja, Słowenia | Zbiornik wyrównawczy 2 równoległe złoża HSSF | 59 | 50 | | 50 |
| Perdido, Floryda, USA | Laguna napowietrzająca system FWS | 95 | 88 | | 99 |
| Lafleche, Ontario, Kanada | Zbiornik wyrównawczy filtr gruntowy o wypełnieniu torfowym złoże HSSF staw hydrofitowy | 93-99 | | 90-94 | 97-99 |
| Isatra, Szwecja | Zbiornik wyrównawczy reaktor SBRzbiornik wyrównawczy obszar zalewowy złoże HSSF | 82 | 40 | 77 | 99 |
| Órebro, Szwecja | Staw napowietrzający system 10 stawów hydrofitowych (FWS) | 95 | 68 | 91 | 94 |
| Chlewnica, Polska | VSSF-1+VSS-2+HSSF | 95* 95** | 87* 48** | 98* 86** | 99* 94** |

* Pierwszy rok eksploatacji,
** Drugi rok eksploatacji
*Źródło: [34].*

Przykładem istniejącej tego typu oczyszczalni ścieków mleczarskich jest obiekt znajdujący się w Wysokiem Mazowieckiem [2], [31], [32]. W technologii tej zastosowano układ hybrydowy, składający się z przepływu pionowego (VF-CW) i poziomego (HF-CW). W obiektach o przepływie podpowierzchniowym znacznie trudniej jest uzyskać wysoką skuteczność usuwania zanieczyszczeń. W tabeli 6 przedstawiono efektywności oczyszczania dla obiektów hydrofitowych oczyszczających odcieki ze składowisk odpadów pracujących w różnych krajach [33-34].

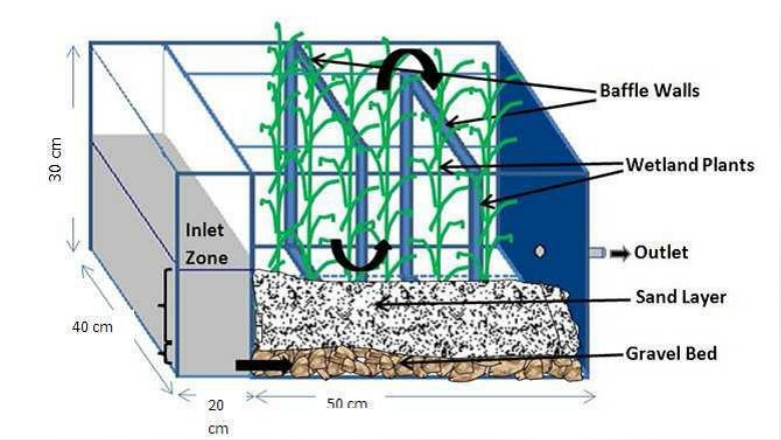
Różne rodzaje zanieczyszczeń (takich jak: azot, fosfor, związki organiczne, metale ciężkie i bakterie z grupy E. coli), można usunąć przez hydrofitowe oczyszczalnie jako kompleks powiązanych ze sobą systemów roślinnych, wody, mediów i populacji biomasy [35]. Usuwanie azotu i związków organicznych (ze ścieków) w takiej inżynierii ekosystemowej jest niezmiernie ważne, ze względu na często niekontrolowane odprowadzanie azotu do naturalnych zbiorników śródlądowych wodnych, co sprzyja ich eutrofizacji [36-37]. Dodatkowo, nieprzetworzona materia organiczna często wyczerpuje rozpuszczony tlen (DO), prowadząc do śmierci organizmów wodnych. Jakość ścieków poddawanych oczyszczaniu i doczyszczaniu w złożach roślinnych uległa znacznej poprawie. W pracy Lalke-Porczyk i in. 2010 [28] odnotowano zmniejszenie liczebności różnych grup bakterii. Należy jednak pamiętać, że nawet ścieki, w których liczebność bakterii wskaźnikowych została bardzo ograniczona, mogą być nadal źródłem drobnoustrojów patogennych [38-39]. Po zastosowaniu hydrofitowych oczyszczalni, liczebność bakterii heterotroficznych zdolnych do wzrostu w temperaturze 22°C malała średnio w 85,86% w oczyszczalni wierzbowej, a w 89,45% w oczyszczalni trzcinowej. Natomiast liczebność bakterii heterotroficznych zdolnych do wzrostu w temperaturze 37°C w tych oczyszczalniach malała odpowiednio w 88,46% i 90,22%. Z kolei spośród bakterii wskaźnikowych stanu sanitarnego, w najmniejszym stopniu została pomniejszona liczebność paciorkowców kałowych. W oczyszczalni wierzbowej, liczebność bakterii tej grupy została zredukowana średnio w 84,65%, a w oczyszczalni trzcinowej w 87,26%. Odnotowano, że w ciągu 8 m-cy trwania badań obydwie oczyszczalnie roślinne działały bezawaryjnie, przyczyniając się do znacznej eliminacji mikroorganizmów ze ścieków, również w miesiącach chłodniejszych, tj. listopadzie i grudniu [28].

## Mechanizmy przemian związków w systemach hydrofitowych

Oczyszczalnie hydrofitowe są wzorowane na systemach, określanych, jako „constructed Wetland" i są rozpowszechnione w Europie Zachodniej oraz USA. W znacznie mniejszym zakresie są rozpowszechnione w Polsce.

W przypadku małych obiektów oczyszczania ścieków, koszty skonstruowania „wetlandów" nie wymagają znacznych nakładów. Tereny projektowane są w systemach, które zostały przystosowane do wykorzystania naturalnych procesów roślin, gleby i mikroorganizmów przy oczyszczaniu skażonej wody. Niskie koszty utrzymania „wetlandów" powodują, że są przyjazne dla środowiska oraz posiadają zdolność do usuwania różnych zanieczyszczeń, w tym metali ciężkich, składników mineralnych i innych mikrozanieczyszczeń. Korzystny efekt działania tych konstrukcji odnotowano w wielu krajach, m. in. w Kanadzie (Ontario), Irlandii i Indiach [40-44].

Oczyszczalnia typu „constructed wetland" na ogół składa się z basenu lub kanału z zaporą wypełnionego medium na odpowiednią głębokość, aby zapobiec wyciekom z koryt. Medium w postaci ścieków zaopatruje korzenie roślinne w makro i mikroelementy. Dlatego w oczyszczalniach roślinnych stwarza się naturalne warunki, przez ok. 12 dni w celu wzrostu obsadzonych gatunków roślin, takich jak np. *Typha*, *Pistia* sp., *Eichhornia* sp., *Salvinia* sp., a także roślin wodnych z rodziny *Lemnaceae* [44].




Rysunek 1. Przykładowa konstrukcja „wetlandów" wg Sudarsan i wsp. (2012.).
*Źródło: [45].*

Zastosowanie tego typu fitotechnologii, spowodowało znaczną redukcję zawartości poszczególnych parametrów ścieków, w tym zmniejszenie BZT o 73%, azotu amonowego o 26%, substancji stałych 75-83% i fosforu o 75,7%. W tabeli 7 zamieszczono wartości parametrów określających redukcję zanieczyszczeń ścieków mleczarskich przy wykorzystaniu roślin *Typha latifolia*.

Tabela 7. Wartości parametrów (% redukcji) po zastosowaniu roślin *Typha latifolia* w procesie oczyszczania ścieków mleczarskich.

| **Dzień / Parametr** (% redukcji) | **Dzień - 0** | **Dzień - 12** |
|---|---|---|
| pH | 9.54 | 7.4 |
| BZT mg/l | 95 | 25 |
| ChZT mg/l | 365 | 270 |
| Całkowita zawartość substancji stałych mg/l | 583 | 113 |
| Łączna frakcja ciał stałych zawieszonych w wodzie (TSS) mg/l | 261 | 42 |
| Łącznie substancje rozpuszczone (TDS) mg/l | 376 | 94 |
| Łącznie ciała lotne (TVS) mg/l | 368 | 89 |
| Dostępny azot (AN) mg/l | 76 | 56 |
| Fosfor (P) mg/l | 2.14 | 0.52 |

*Źródło: [45].*

Dipu i wsp. (2010) [44] porównali efektywność 3 gatunków roślin z grupy makrofitów wodnych (*Typha* sp., *Eichhornia* sp., *Salvinia* sp. i *Pistia* sp.) w procesie fitoremediacji i wykazali ich wysoką wydajność w oczyszczaniu ścieków mleczarskich w zastosowanych oczyszczalniach hydrofitowych. Dowiedziono znaczną redukcję: biologicznego zapotrzebowania na tlen (BZT), chemicznego zapotrzebowania na tlen (ChZT), zmętnienia, zawartości składników odżywczych ($p < 0,01$) po zastosowaniu makrofitów wodnych, a zwłaszcza roślin Typha sp., w przypadku których system usuwania zanieczyszczeń ze ścieków był najbardziej skuteczny.

W badaniach podjęto ocenę porównawczą, efektywności chwastów wodnych jak *Typha* sp., *Eichhornia* sp., *Salvinia* sp. i *Pistia* sp. Ścieki próbek pobranych z systemu oczyszczającego analizowano okresowo, w celu sprawdzenia zmian ich właściwości fizyko-chemicznych spowodowanych przez wspomniane 3 gatunki roślin. Analizowano właściwości fizyczno-chemiczne próbek ścieków, w tym m.in. zmianę pH, mętność, przewodność, ogólną zawartość substancji stałych (sodu, potasu, azotu i azotanów), metali ciężkich, zasolenia, BZT oraz ChZT. Najważniejszym parametrem w procesie biosorpcji wydaje się być pH. Wpływa na ilość zaabsorbowanych metali ciężkich, działalność grup funkcyjnych w biomasie i konkurencji z jonami metali. Wartość pH próbek wody po zastosowaniu zespołów roślinnych: *Eichhornia* sp., *Salvinia* sp., *Pistia* sp., *Typha* sp. zmniejszyła się z alkalicznej na prawie neutralną. Można to zinterpretować następująco: obniżenie tego parametru było spowodowane absorpcją zanieczyszczeń przez rośliny [46, 47]. Proces fitoremediacji spowodował zmniejszoną mętność wody [48]. Gudekar i Trivedi [49] dowiedli redukcji 59,54% zmętnienia wody podczas oczyszczania odpadów przemysłu maszynowego przy wykorzystaniu hiacynta wodnego.

Okresowe zastosowanie 3 gatunków roślin, przyczyniło się do znacznego zmniejszenia we wszystkich frakcjach ścieków mleczarskich, całkowitej ilości substancji stałych. Maksymalna redukcja zanieczyszczeń w gęstych ściekach wynosiła 516,7%, a w rozcieńczonych w fitooczyszczalni z zastosowaniem Typha sp. 329,4% Wykazany spadek zanieczyszczeń był znacznie większy niż obserwowany przez Vymazal, [50] i Simon i Silhol, [51], w którym całkowita ilość cząstek stałych została obniżona do 50,64%, po 15 dniach traktowania roślinami. Maksymalne wykorzystanie azotanów w ilości 155,5% obserwowano w oczyszczalni bazującej również na Typha sp. [52]. Ghaly in. [53], i Simon i Silhol [51] stwierdzili, redukcję azotu azotanowego od 82,9% do 98,1% w ściekach przy zastosowaniu fitooczyszczalni. Pośród badanych pływających roślin (*Eichhornia* sp., *Salvinia* sp. i *Typha* sp.), stwierdzono, że najbardziej skuteczną w oczyszczaniu ścieków przemysłowych, a zwłaszcza w wychwytywaniu metali ciężkich, okazała się *Typha* sp. Wyniki badań sugerują, że znaczne zmniejszenie zawartości zanieczyszczeń w ściekach mleczarskich traktowanych roślinami wodnymi może być wynikiem wielu właściwości fitoremediacyjnych roślin. Rośliny wodne mają unikalną cechę transportu tlenu z nadziemnych części roślin do zanurzonych w wodzie [54]. Transfer tlenu przez rośliny wodne do strefy korzeniowej odgrywa istotną rolę we wspieraniu wzrostu bakterii tlenowych i w konsekwencji degradacji węgla w ściekach [55]. Obniżenie pH wzmaga działanie mikroorganizmów w rozkładzie BZT i ChZT. Zmniejszenie wartości ChZT i BZT może prowadzić do wzrostu stężenia rozpuszczonego tlenu w ściekach [20].

Podsumowując, można stwierdzić, że przyszłość fitoremediacji jest wciąż w fazie badań i rozwoju, a istnienie wielu barier technicznych, prowokuje do poszukiwania nowych rozwiązań. Zrozumienie mechanizmów i procesów rządzących usuwaniem zanieczyszczeń, zwiększa prawdopodobieństwo sukcesu aplikacji oczyszczalni roślinnych. Technologia „wetlandów" jest jedną z efektywnych metod w tym procesie. Oprócz poprawy jakości wody i oszczędności energii, fitooczyszczalnie mają także inne funkcje, związane z ochroną środowiska, takie jak wspieranie różnorodności biologicznej poprzez zapewnienie schronienia dla ptaków i gadów, działanie proklimatyczne (redukcja $CO_2$), funkcje hydrologiczne, biokumulacji i biometylacji metali ciężkich [56-57].

Hydrofitowa metoda oczyszczania ścieków jest procesem biologicznym zachodzącym we współpracy z mikroorganizmami heterotroficznymi oraz roślin wodnych i hydrofitów (wodolubnych). W procesie oczyszczania ścieków na skutek specyficznych warunków, a jednocześnie dogodnych do rozwoju hydrofitów, następuje intensyfikacja procesów utleniania i redukcji, które są wspomagane przez procesy sorpcji, sedymentacji i asymilacji - umożliwiają usuwanie znacznej części zanieczyszczeń ze ścieków. Do unikalnych zalet tego systemu oczyszczania można zaliczyć niski koszt eksploatacji i konserwacji, zastosowanie poziomej i pionowej deportacji ścieków oraz naturalny wygląd, umożliwiający ich łatwe wkomponowanie w istniejący krajobraz. Oczyszczalnie hydrofitowe w przeciwieństwie do konwencjonalnych systemów biologicznych nie wytwarzają wtórnych osadów ściekowych. Posiadają zdolność usuwania substancji organicznych i związków biogennych N i P oraz zanieczyszczeń takich jak metale ciężkie i niektórych mikrozanieczyszczeń organicznych. W tego typu systemach usuwanie zanieczyszczeń często opiera się na różnorodnych współistniejących fizycznych, chemicznych oraz biologicznych szlakach, które są niezwykle zależne od środowiska i licznych parametrów eksploatacyjnych [21], [29].

## Efektywność oczyszczania ścieków mleczarskich w systemach hydrofitowych

W latach 70-tych, na terenie Polski rozpowszechniła się technologia oczyszczania ścieków mleczarskich „Promlecz". Większość tego typu oczyszczalni wymaga niezbędnej modernizacji z powodu ich stanu technicznego i zmniejszonej możliwości wydajności oczyszczania, ze względu na wzrost produkcji w zakładach. To zaś generuje znacznie powiększoną ilość ścieków, osadów i odcieków. Nowoczesna technologia oczyszczania ścieków, to nie tylko wysokoefektywne lecz również niskoenergochłonne, metody usuwania zanieczyszczeń. Zmniejszenie zapotrzebowania na energię, niezbędną do oczyszczania ścieków osadem czynnym, można uzyskać prowadząc oddzielnie poszczególne fazy biologicznego oczyszczania, a więc adsorpcję zanieczyszczeń, biologiczny rozkład związków organicznych do związków prostych oraz przemiany związków azotowych [21], [29], [58-60].

Metoda hydrofitowa może stanowić alternatywę dla zaawansowanych i kosztownych technologii. Złoża o przepływie pionowym i poziomym mogą być wykorzystywane jako drugi stopień oczyszczania ścieków mleczarskich. Po ich wstępnym mechanicznym i biologicznym oczyszczeniu, także mogą być stosowane do oczyszczania odcieków generowanych w oczyszczalni mleczarskiej, które zawierają niemały ładunek związków biogennych [31], [32], [59-60]. Przykładem pomyślnego zastosowania systemów hydrofitowych, jest zaprojektowanie i wykonanie instalacji działającej na terenie oczyszczalni ścieków mleczarskich w Wysokiem Mazowieckiem [59-61]. W badaniach zastosowano układ hybrydowy składający się ze złoża o przepływie pionowym (VF-CW) oraz poziomym (HF-CW). Oczyszczaniu hydrofitowemu poddano ścieki uzyskane po komorze defosfatacji i komorze osadu wysokoobciążonego. W celu zidentyfikowania efektywności układu hybrydowego, dokonano pomiaru wartości wskaźników przed i po oczyszczaniu. Średnia wartość wynosiła: BZT5 (234,1 mg $O_2$ d-3), ChZT (332,8 mg $O_2$ d-3), azot mierzony metodą Kjeldahla (25,9 mg NTKN d-3), azot amonowy (13,9 mg N-NH4 d-3), fosfor całkowity (10,9 mg PT? d3). Zastosowanie złóż hydrofitowych pozwoliło na efektywny spadek wartości wskaźników: BZT5 o 84,8%, ChZT 85,3%, azotu mierzonego metodą Kjeldahla 81,0%, azotu amonowego 91,0% i fosforu ogólnego 39%. Zredukowane wartości wskaźników, stanowią dowód wysokiej przydatności metody hydrofitowej w oczyszczaniu ścieków mleczarskich, po stopniu mechanicznym i biologicznym oczyszczania tych ścieków [59-61].

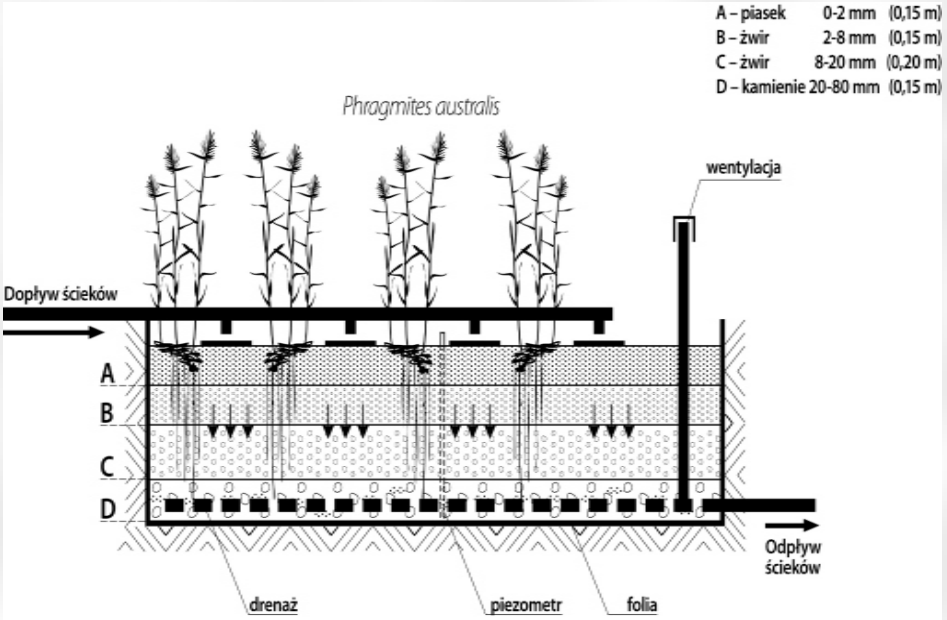
## Przykładowa charakterystyka instalacji badawczej w Wysokiem Mazowieckiem

W Wysokiem Mazowieckim zastosowano dwie instalacje ze złożami pionowymi oraz jedną instalację hybrydową.

**Złoże pionowe „A”**

- Powierzchnia: 10 $m^2$;
- Obciążenie ładunkiem: 55 g ChZT $m^2$ $d^{-1}$ ; 13 g $BZT_5$ $m^2$ $d^{-1}$; 0,8 g N-$NH_4$ $m^2$ $d^{-1}$;
- Obciążenie hydrauliczne: od 100 do 200 mm $d^{-1}$;
- Przepływ: od 1 do 2 $m^3$ $d^{-1}$;
- Głębokość wypełnienia: 0,65 m;
- Ilość warstw wypełnienia: -4;
- Złoże zasiedlone sadzonkami *Phragmitesaustralis* (gęstość 5 roślin/$m^2$, sadzonki 3- letnie).

Obrazuje to poniższy schemat.



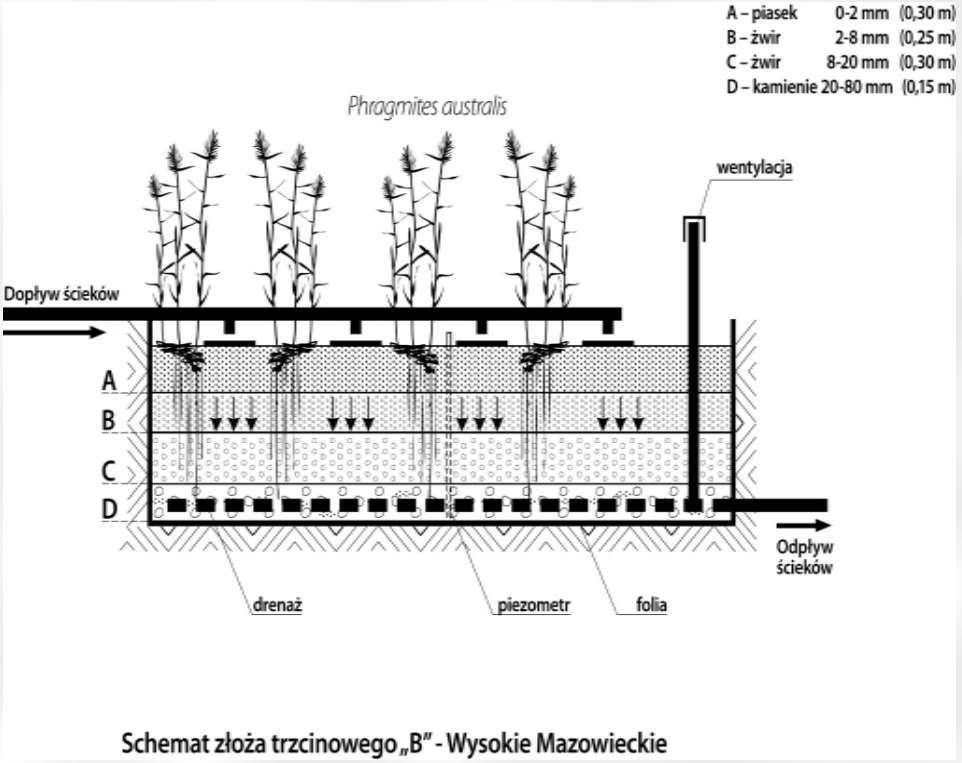

Schemat 1. Schemat złoża trzcinowego „A” w Wysokiem Mazowieckim.

*Źródło: [62].*

**Złoże pionowe „B”**

- Powierzchnia: 5 $m^2$;
- Obciążenie ładunkiem: 21 g ChZT $m^2$ $d^{-1}$; 6,5 g $BZT_5$ $m^2$ $d^{-1}$; 2,1 g $N\text{-}NH_4$ $m^2$ $d^{-1}$;
- Obciążenie hydrauliczne: od 100 do 200 mm $d^{-1}$;
- Przepływ: od 1 do 2 $m^3$ $d^{-1}$;
- Głębokość wypełnienia:- 1,00 m;
- Ilość warstw wypełnienia: - 4;
- Złoże zasiedlone sadzonkami *Phragmitesaustralis* (gęstość 5 roślin/m2,sadzonki 3-letnie).

Schemat złoża trzcinowego pionowego „A” i „B” z wykorzystaniem ***Phragmitesaustralis***, oraz efekty oczyszczania ścieków mleczarskich w zakładzie w Wysokiem Mazowieckim, zobrazowano poniżej.




Schemat 2. Schemat złoża trzcinowego pionowego „A” i „B” z wykorzystaniem Phragmitesaustralis, w Wysokiem Mazowieckim.
*Źródło: [62].*

Zestawienie wartości efektów oczyszczania ścieków mleczarskich w Wysokiem Mazowieckim, obrazuje tabela zamieszczona poniżej.

Tabela 8. Zestawienie wartości efektów oczyszczania ścieków mleczarskich w Wysokiem Mazowieckim.

| Parametr | Wlot | Out „A” | Out „B” | Efekt „A” | Efekt „B” |
|---|---|---|---|---|---|
| $BOD_5 mgO_2/l$ | **108** | **9,5** | **8,2** | **91%** | **92%** |
| COD $mgO_2/l$ | **211** | **69** | **57** | **67%** | **72%** |
| TOC mg C/l | **39** | **5** | **4** | **87%** | **89** |
| N-TKN mgN/l | **28** | **6,6** | **5,3** | **76%** | **81%** |
| $N\text{-}NH_4$ mg N/l | **20** | **1,7** | **1,9** | **91%** | **90%** |
| P-totalmg P/l | **7,4** | **5,0** | **4,6** | **32%** | **37%** |
| SS mg/l | **107** | **6,8** | **6,0** | **93%** | **94%** |

*Źródło: [62].*

## Oczyszczalnie ścieków typu LEMNA SYSTEM

Oczyszczalnia typu LEMNA SYSTEM powstała w 1985r. w Stanach Zjednoczonych. Posiada ona patent technologii innowacyjno-alternatywnej, wydany przez Agencję Ochrony Środowiska w USA [63]. Jest to nowa generacja oczyszczalni ścieków wykorzystująca energię słoneczną i rośliny wodne z rodziny *Lemnaceae*. W tej technologii główną rolę pełni rzęsa wodna (*Lemna minor*), w Polsce pospolicie nazywana kaczym zielem. Metoda ta została sprawdzona w zróżnicowanych szerokościach geograficzno-klimatycznych i umożliwia oczyszczanie ścieków, aż do osiągnięcia śladowych ilości zanieczyszczeń na odpływie, w tym metali ciężkich. W Polsce istnieją realizacje oczyszczalni hydrofitowych typu LEMNA SYSTEM. Prowadzony jest w nich proces oczyszczania ścieków. Oczyszczalnie te znajdują się w Świerklańcu, Dobrodzieniu, Pawonkowie oraz Kochcicach [21], [29], [64].

Jednym z wielu tego typu obiektów, oddanym do eksploatacji w Polsce jest oczyszczalnia ścieków LEMNA w Gomunicach. W oczyszczalni są wydzielone dwie części: mechaniczna i biologiczna. Część mechaniczna składa się z: kraty mechanicznej schodkowej gęstej, piaskownika wirowego oraz punktu zlewnego z kratą rzadką i pompowni ścieków surowych. W części biologicznej znajdują dwa stawy: napowietrzany oraz Lemna. Pomiędzy stawami zlokalizowano komorę nitryfikacyjną, zespoloną z komorą koagulacji z dozownikiem talicznego siarczanu glinu, używanym w okresie zimowym do strącania związków fosforu [65].

## Podsumowanie

Hydrofitowe oczyszczalnie ścieków mogą być użyteczne w oczyszczaniu ścieków mleczarskich. Podstawowym warunkiem ich użyteczności jest prawidłowe ich zaprojektowanie i poprawna eksploatacja. Przy projektowaniu, należy wziąć pod uwagę wielkość i oscylacje ładunku dopływającego, co determinuje powierzchnię złoża hydrofitowego i wytypowanie odpowiednich gatunków roślin. Przed wyborem metody oczyszczania, konieczny jest etap monitorowania składu odcieków (nie można opierać się wyłącznie na danych literaturowych z innych składowisk). Niezbędna jest ścisła współpraca inżynierów projektantów i wykonawców ze specjalistami w zakresie chemii i ekofizjologii roślin.

## Bibliografia


[1] J. Struk-Sokołowska, Wpływ ścieków mleczarskich na frakcje ChZT ścieków komunalnych. Inżynieria Ekologiczna 2011, Nr 24; s. 130-144.

[2] W. Dąbrowski, Efektywność złóż hydrofitowych w oczyszczaniu ścieków mleczarskich. Society of Ecological Chemistry and Engineering 2011a; A. Opole; Vo1. 18, No 2, s.175-183.

[3] A. M. Anielak, Gospodarka wodno ściekowa przemysłu mleczarskiego, Agro Przemysł 2008, 2, 57-59.

[4 ] B. Bartkiewicz i A. Umiejewska, Oczyszczanie ścieków przemysłowych, PWN. Warszawa 2010.

[5] W. Dąbrowski, J. Wiater 2013. Określenie możliwości zmniejszenia obciążenia oczyszczalni ścieków mleczarskich przez zastosowanie wydzielonego oczyszczania odcieków z przeróbki osadów. Rocznik Ochrona Środowiska, Tom 15. 823-834.

[6] S. Raudiansky, The Covenant of the Wild. New York: William Morrow and Company, Inc, 1992, pp.10-50.

[7] K. Maesoon N., Some problems associated with brewery and dairy water discharges, Environment International, 12(5): 563569, (1986).

[8] B. Bartkiewicz 2006. Oczyszczanie ścieków przemysłowych, PWN Warszawa, 2006.

[9 ] R.H Kadlec., R. L. Knight, 1996. Treatment wetlands. Boca Raton, FL, USA: Lewis CRC Press: 893.

[10] J. Kopcewicz, S. Lewak 2007. Fizjologia roślin. Wyd. PWN, Warszawa.

[11] V.K. Verma, Y.P. Singh, J.P.N. Rai 2007. Biogas production from plant biomass used for phytoremediation of industrial wastes. Bioresource Technology 98 (2007) 1664-1669.

[12] J. H. Peverly, J. M. Surface, T. Wang, Growth and trace metals absorption by Phragmitesaustralis in wetlands constructed for landfill leachate treatment. Ecological Engineering 1995, .5: pp. 21-35.

[13] P. Kowalik, F. M. Slater, P. Randerson,. Constructed wetlands for landfill leachate treatment. W: Thofelt L., Englund A. (eds.) Ecotechnics for a sustainable society. Proceeding from Ecotechnics 95 International Symposium on Ecological Engineering, 1996, chapter 16: pp. 189-200.

[14] Z. Ye, A. J. Baker, M. N. Wong, A. J. Willis,. Zinc, lead and cadmium tolerance, uptake and accumulation by the common reed, Phragmitesaustralis (Cav.) Trin. ex Steudel. Ann Bot, 1997: pp. 363-370.

[15] R. H. Kadlec,. Integrated natural systems for landfill leachate treatment, Wetlands nutrients, metals and mass cycling, Vymazal J, (Ed,) Backhuys Publishers, Leiden 2003: pp. 1-33.

[16] T. G. Bulc,. Long term performance of a constructed wetland for landfill leachate treatment. Ecological Engineering 2006, 26: pp. 365-374.

[17] A. E. Ghaly. and H. A. Farag, Phytoremediation of Anaerobic Digester Effluent for Water Purification and Production of Animal Feed. American Journal of Agricultural and Biological Science 2007, 2(1): 1-14.

[18] Bhavsar S., R. P. Vedavati, V. Diwan, Potential of Phytoremediation for dairy wastewater treatment. IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE); ISSN: 2278-1684 PP: 16-23. Second International Conference on Emerging Trends in Engineering (SICETE).

[19] E. Wojciechowska E., M. Gajewska, H. Obarska-Pempkowiak, Treatment of Lanfill Leachate by Constructed Wetlands: Three Case Studies, Polish J. of Environ. Stud.. 2010, 19 (3): pp. 643-650.

[20] H. Brix, Denmark. In Constructed wetlands for wastewater treatment in Europe. J. Vymazal, H. Brix, P.F. Cooper, M.B. Green and R. Haberl, (eds). 1998, Backhuys publ. Leiden, pp: 123-152.

[21] H. Obarska-Pempkowiak., M. Gajewska, E. Wojciechowska, 2010a. Hydrofitowe oczyszczalnie wód i ścieków. Wyd. PWN, Warszawa.

[22] C. H. Sim, M. K. Yusoff,, B. Shutes, S.C. Ho, M. Mansor,. Nutrient removal ina pilot and full scale constructed wetland, Putrajaya city, Malaysia. Journal of Environmental Management 2008, 88 (2), 307-317.

[23] S. Lee, M. C. Maniquiz, L. H. Kim, Characteristics of contaminants in water and sediment of a constructed wetland treating piggery wastewater effluent. Journal of Environmental Sciences, 2010 22 (6), 940-945.

[24] I. Bruch, J. Fritsche, D. Bänninger, U. Alewella, M. Sendelov, H. Hürlimann,, R. Hasselbach, C. Alewell, Improving the treatment efficiency of constructed wetlands with zeolite-containing filter sands. Bioresource Technology 2011, 102, 937-941.

[25] T. Maehlum, Wetlands for treatment of landfill leachates in cold climates. In: Mulamoottil, G., McBean, E.A., Rovers, F. (Eds), Proc. of the Constructed Wetlands for the Treatment of Landfill Leachates.CRC Lewis Publishers, NY, USA, 1998, pp. 33-46.

[26] T. Ozimek, Wykorzystanie roślin do oczyszczania odcieków z wysypisk odpadów. WiadomościEkologiczne, 2009, Tom LV, Zeszyt 2: s. 61-74.

[27] G. Basílico, L. de Cabo, A.Faggi. Impacts of composite wastewater on a Pampean stream (Argentina) and phytoremediation alternative with Spirodelaintermedia Koch (Lemnaceae) growing in batch reactors. Journal of Environmental Management 2013, 115: 53-59.

[28] E. Lalke-Porczyk, M. Swiątek-Brzezinska, W. Konderski, Rola oczyszczalni hydrobotanicznych w oczyszczaniu ścieków z terenów wiejskich. Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie; 2010: t. 10 z. 3 (31), s. 119-127.

[29] H. Obarska-Pempkowiak M. Gajewska, E. Wojciechowska,. Application of vertical flow constructed wetland for highly contaminated wastewater treatment: preliminary results. Water and Nutrient Management in Natural and Constructed Wetlands J. Vymazal (Ed), Springer Science+Busines Media B.V. 2010b chapter 4: pp. 37-51.

[30] W. Dąbrowski. Efektywność złóż hydrofitowych w oczyszczaniu ścieków mleczarskich. Society of Ecological Chemistry and Engineering; 2011a, A. Opole; Vo1. 18, No 2, s.175-183.

[31] W. Dąbrowski, Niskonakładowa i bezreagentowa metoda oczyszczania odcieków z przeróbki osadów w oczyszczalniach mleczarskich. Politechnika Białostocka, 2011b.

[32] W. Dąbrowski, Określenie zmian stężenia zanieczyszczeń w profilu oczyszczalni ścieków mleczarskich na przykładzie S.M. Mlekovita w Wysokiem Mazowieckiem. Inżynieria Ekologiczna 2011c, Nr 24: s 236-242.

[33] P. Bugajski, Hydrobotaniczne (hydrofitowe) oczyszczalnie ścieków. III Konferencja Naukowo-Techniczna „Błękitny San", Dubiecko 21-22. 04. 2006, s. 93-99.

[34] E. Wojciechowska, Doświadczenia z eksploatacji pilotowej hydrofitowej. Oczyszczalni odcieków ze składowiska odpadów komunalnych w zależności od reżimu hydraulicznego. Inżynieria Ekologiczna Nr 25, 2011, s. 176-188.

[35] M. Fountoulakis, S. Terzakis, A. Chatzinotas, H. Brix, N. Kalogerakis, T. Manios,. Pilot-scale comparison of constructed wetlands operated under high hydraulic loading rates and attached biofilm reactors for domestic wastewater treatment. Science of the Total Environment 2009, 407, 2996-3003.

[36] S. Xinshan, L. Qin, Y. Denghua, Nutrient removal by hybrid subsurface flow constructed wetlands for high concentration ammonia nitrogen wastewater. Procedia Environmental Sciences 2010, 2, 1461-1468.

[37] Y. Chen, Y. Wen, J. Cheng, C. Xue, D. Yang, Q. Zhou, Effects of dissolved oxygen on extracellular enzymes activities and transformation of carbon sources from plant biomass: implications for denitrification in constructed wetlands. Bioresource Technology 201, 1102, 2433-2440.

[38] Z. Filipkowska, Sanitary and bacteriological aspects of sewage treatment. Acta Microbiol. Polon. 2003, 52 s. 57-66.

[39] S. Jezierska-Tys, M. Frąc, Badania nad wpływem osadu z oczyszczalni ścieków mleczarskich na aktywność mikrobiologiczną i biochemiczną gleby. Acta Agrophysica 2008, .160 No 3: s 1-109.

[40] E. J. Dunn, N. Culleton, G. O'Donovan, R. Harrington and A. E. Olsen, An integrated constructed wetland to treat contaminants and nutrients from dairy farmyard dirty water, Ecological Engineering, 2005, .24( 3): 219-232.

[41] N. Gottschall, C. Boutin and A. Crolla., C. Kinsley and P. Champagne, The role of plants in the removal of nutrients at a constructed wetland treating agricultural (dairy) wastewater, Ontario, Canada Ecological Engineering, 2007, 29 (2): 154-163.

[42] Y. Arda and U. Aysenur, Comparison of horizontal and vertical constructed wetland systems for landfill leachate treatment, Bioresource Technology, 2009.100( 9): 2521-2526.

[43] S. G. Buchberger and G. B. Shaw, An approach toward rational design of constructed wetlands for wastewater treatment, Ecological Engineering, 1995, .4 (4) : 249-275.

[44] S. A. Dipu, V. A. Kumar and S. Gnana Thanga. Phytoremediation of Dairy Effluent by Constructed Wetland Technology Using Wetland Macrophytes. Global Journal of Environmental Research 2010, 4 (2): 90-100, 2010.

[45] J. S. Sudarsan, T. Deeptha, D. Ashutosh, Phytoremediation of dairy-waste water using constructed Wetland Int J Pharm Bio Sci 2012 July; 3(3): (B) 745-755.

[46] O. F. Abioye, Phytoremediation of arsenic-contaminated soil and groundwater, PhD Thesis. University of Florida, 2005, pp: 122-138.

[47] Q. Mahmood, P. Zheng, E. Islam, Y. Hayat, M.J. Hassan, G. Jilaniand R.C. Jin, Lab Scale Studies on Water Hyacinth (Eichhorniacrassipes Marts Solms) for Bio treatment of Textile Wastewater. Caspian J. Environmental Sci., 2005, 3: 83-88.

[48] S. Neralla, R.W. Weaver, T.W. Varvel and B.J. Lesikar, Phytoremediation and on-site treatment of septic effluents in sub-surface flow constructed wetlands. Environmental Technol., 2007, 20: 1139-1146.

[49] V. R. Gudekar, and R.K. Trivedi,. Effect of surface area covered by water hyacinth. Indian J. Environmental Protection, 1989, 19: 103-107.

[50] J. Vymazal, The use of sub-surface constructed wetlands for waste water treatment in the Czech Republic: 10 years experience: Ecological Engineering, 2002, 18: 633-646.

[51] C. Simon and M. Silhol, Purification of pisciculture waste through cultivation and harvesting of aquatic biomass. Water Sci. and Technol., 1987, 19: 113-121.

[52] B. M. Tegegne, J.J.A. Hans Van Bruggen, J. O'Keeffe and S.W. Wasala,. A Constructed Wetland for Wastewater Treatment Emphasis on Optimization of Nitrogen Removal. UNESCO-IHE Institute for water education. Watermill Working Paper Series, 2008, pp: 24-27.

[53] A. E. Ghaly and H. A. Farag 2007. Phytoremediation of Anaerobic Digester Effluent for Water Purification and Production of Animal Feed. American Journal of Agricultural and Biological Science 2007, .2(1): 1-14.

[54] M. C. Hartman and W. Eldowney, Pollution: Ecology and biotechnology. John Wiley and sons Inc. New York 1993., pp: 174-189.

[55] K. R. Reddy and T.A. Debusk,. Utilization of aquatic plants in water pollution control. Water Sci. and Technol., 1987, 19: 61-79.

[56] A. Dixon, M. Simon and T. Burkitt, Assessing the environmental impact of two options for small scale wastewater treatment: Comparing a reed bed and an aerated biological filter using a life cycle approach. Ecological Engineering, 2003, 20: 297-308.

[57] H. Azaizeh, N. Salhani, Z. Sebesvari and H. Emons, The potential of rhizosphere microbes isolated from a constructed wetland to biomethylate selenium. J. Environmental Quality, 2003, 32: 55-62.

[58] M. Mańczak, M. Balbierz., M. Szetela. Ochrona Środowiska 1987, 521/1 (31): s 29-31.

[59] Z. Sadecka, Ocena efektywności pracy wybranych oczyszczalni hydrobotanicznych.
Ochrona Środowiska: 2003, 25, (1): 13-16.

[60] Z. Sadecka, Weryfikacja danych do modernizacji oczyszczalni ścieków. Forum Eksploatatora 2011, 3: 58-62.

[61] W. Dąbrowski, Skuteczność oczyszczania ścieków mleczarskich w systemach hydrofitowych. II Ogólnopolska Konferencja Naukowa: Mokradła i Ekosystemy słodkowodne funkcjonowanie, zagrożenie i ochrona, Augustów 2009; s. 29-30.

[62] W. Dąbrowski, Zgłoszenie patentowe: Określenie przydatności złóż hydrofitowych do oczyszczania odcieków z tlenowej przeróbki osadów w oczyszczalniach ścieków mleczarskich, Politechnika Białostocka 2009.

[63] Patent US 4536988 A. Aquatic biomass containment barrier and method of assembling same; The Lemna Corporation; 27. 08. 1985.

[64] (http://www.rpm.com.pl/rpm/index.php?kolektory-sanitarne-i-oczyszczalnie-scieków,38

[65] P.U.H. Eko-Eksploatacja: Charakterystyka ilościowa i jakościowa osadów ze stawu napowietrzanego i Lemna oczyszczalni ścieków systemu „Lemna" w Gomunicach oraz możliwość jego usunięcia i zagospodarowania. Stare Miasto 2007.

Jarosław Milewski

# BIOGAZ POCHODZENIA ORGANICZNEGO, JAKO PALIWO DLA WĘGLANOWYCH OGNIW PALIWOWYCH

Streszczenie

W rozdziale zawarto analizę możliwości zastosowania biogazu pochodzenia organicznego, jako paliwa dla węglanowych ogniw paliwowych. Przedstawiono podstawy teoretyczne oraz wyniki modelowania ogniwa paliwowego zasilanego biogazem. Zaprezentowano wyniki badań doświadczalnych przeprowadzonych na stanowisku laboratoryjnym dla symulowanego składu biogazu. Określono perspektywy takich rozwiązań oraz zasugerowano kierunek dalszych badań w zakresie tematu.

Abstract

This chapter contains an analysis of the applicability of biogas as a fuel for molten carbonate fuel cells. The paper presents the theoretical basis and the results of modeling of a fuel cell powered by biogas. Chapter also includes the results of experimental studies conducted in the laboratory for the simulated biogas composition. Identified the prospects of such solutions and suggests directions for further research on the topic.

Słowa kluczowe

ogniwa paliwowe, biogaz, odpady organiczne, modelowanie matematyczne, badania doświadczalne

Keywords

fuel cells, biogas, organic waste, mathematical modeling, experimental studies

Jarosław Milewski

- doktor habilitowany inżynier, Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa, Instytut Techniki Cieplnej, Zakład Maszyn i Urządzeń Energetycznych, Politechnika Warszawska, ul. Nowowiejska 21/25, 00-665 Warszawa, jaroslaw.milewski@itc.pw.edu.pl.

# Wstęp

W obecnie rozważanych przyszłościowych układach generujących energię elektryczną za pomocą ogniw paliwowych głównym paliwem branym pod uwagę jest wodór bądź, traktowany przejściowo, gaz ziemny. Paliwa te wykazują stosunkowo dobre właściwości pod względem wyżej wymienionego zastosowania. Obecnie wodór nie jest produkowany na skalę pozwalającą na jego zastosowanie, jako paliwa w energetyce i nie zauważa się technologii pozwalającej w przyszłości na jego produkcję do tego celu. Gaz ziemny wydaje się być paliwem o wyczerpywanych zasobach i trudno go rozważać, w aspekcie paliwa perspektywicznego. Biopaliwa postrzega się jako alternatywę dla energetyki, opartej wyłącznie na energii elektrycznej, pochodzącej np. z elektrowni atomowych, posiadając jej zalety (głównie bezemisyjność).

Rosnące ceny paliw, wraz ze wzrostem zużycia energii elektrycznej, będą powodować konieczność wdrożenia coraz to bardziej sprawnych układów do jej produkcji. Klasyczne metody produkcji energii elektrycznej [1-4], oparte na obiegu czynnika roboczego, osiągnęły już maksymalny poziom sprawności i nie przewiduje się w tym zakresie znacznej poprawy osiągów. Ogniwa paliwowe przetwarzają energię chemiczną paliwa w energię elektryczną na drodze procesów elektrochemicznych, w związku z czym nie są ograniczone maksymalną sprawnością obiegu cieplnego. Dodatkowo wysokotemperaturowe ogniwa paliwowe - do których poza węglanowymi zalicza się również tlenkowe ogniwa paliwowe [5-9] - można w pewnym zakresie traktować, jako źródło ciepła dla tradycyjnych obiegów cieplnych [10-11], tworząc w ten sposób układy hybrydowe o potencjalnie ultra wysokiej sprawności (ponad 70 %), przy umiarkowanych ciśnieniach i temperaturach panujących tych układach. Węglanowe ogniwa paliwowe (ang. Molten Carbonate Fuel Cell - MCFC) uznawane są za przyszłościowe źródła energii elektrycznej, co związane jest z ich stosunkowo wysoką sprawnością produkcji energii elektrycznej. Obecnie budowane układy zawierające ogniwa paliwowe MCFC, posiadają moce od 250 kW do setek MW [12]. Urządzenia te stają się więc jednym z przyszłościowych alternatyw rozwoju energetyki. Ponadto, węglanowe ogniwa paliwowe można wykorzystywać do separacji $CO_2$ ze spalin pochodzenia energetycznego [13-14] - przy ich zasilaniu biopaliwem. Stanowi to idealne rozwiązanie dla technologii CCS (ang. Carbon Capture and Storage).

Obecnie głównymi paliwami rozważanymi do zastosowań w ogniwach paliwowych są wodór i przejściowo gaz ziemny (metan) [15]. Wodór, z punktu widzenia pracy ogniw paliwowych, jest paliwem idealnym [16]. Niestety, upowszechnienie wodoru stanowi trudność, związaną z jego:

- produkcją (nie występuje w stanie niezwiązanym na ziemi),
- dystrybucją (wielokrotnie mniejsza energia chemiczna spalania odniesiona do jednostki objętości),
- magazynowaniem (bardzo niska temperatura punktu krytycznego).

Gaz ziemny, traktowany, jako paliwo przejściowe ze względu na jego ograniczone zasoby, trudno jest uważać za paliwo przyszłości. Dlatego jednym z bardziej obiecujących scenariuszy, jest zastosowanie biomasy [17-18] lub utylizacja odpadów organicznych do produkcji gazu bogatego w metan i/lub wodór.

Określenie możliwości zastosowania biogazów pochodzenia organicznego oraz osiągów ogniw paliwowych, z punktu widzenia rodzaju zastosowanego paliwa, ma duże znaczenie. Zastosowanie biopaliw, jako paliwa w węglanowych ogniwach paliwowych oraz przykładowe wyniki symulacji i przeprowadzonych eksperymentów stanowi przedmiot analiz różnych opracowań [19-23], w których jako główne biopaliwo postrzega się biogaz pochodzący z oczyszczalni ścieków bądź zgazowarki. W wielu przypadkach, biopaliwo poddawane jest procesom reformingu do wodoru [24-25] i dopiero wówczas wodór jest dostarczany do ogniwa.

## Podstawy teoretyczne

Wyniki dotyczące zastosowania biopaliw zostały otrzymane przy wykorzystaniu opracowanego modelu matematycznego ogniwa paliwowego MCFC. Będzie to przedmiotem studiów tego fragmentu opracowania. Moduł ogniwa paliwowego MCFC składa się z równolegle i szeregowo łączonych ogniw. Moc elektryczna generowana przez cały moduł MCFC, określona jest następującym równaniem:

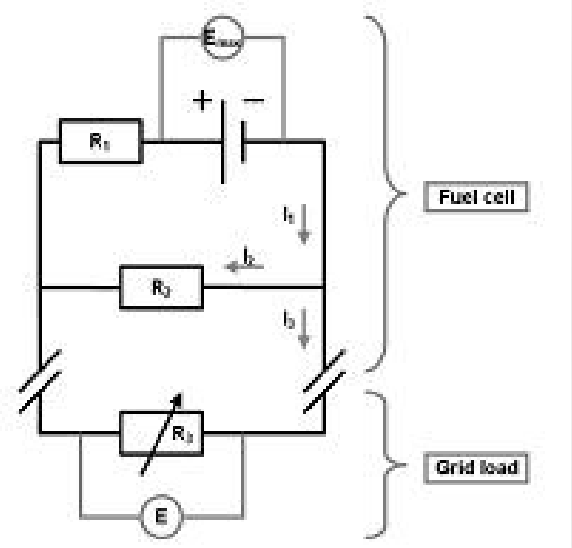
(1) $$P_{MCFC} = \sum_{j=1}^{m} \left( I_j \cdot \sum_{i=1}^{n} E_{MCFC,i,j} \right)$$

gdzie: i - kolejny numer ogniwa; n - ilość ogniw w stosie; j - numer stosu; m - ilość stosów module; I - prąd stosu; EMCFC - napięcie generowane przez pojedyncze ogniwo.

Prąd pobierany z ogniwa MCFC jest określony następującą zależnością:

(2) $$I = 2F \cdot \dot{n}_{CO_3^{2-}}$$

gdzie: F - stała Faradaya, [C/mol]; $\dot{n}_{CO_2,transferred}$ przepływ jonów węglanowych przechodzących ze strony katody do anody, [kmol/s].




Schemat 1. Zastępczy schemat elektryczny ogniwa.
*Źródło: opracowanie własne.*

Zastępczy schemat elektryczny pojedynczej celi ogniwa MCFC przedstawia schemat 1. W ogniwie występują dwa rodzaje oporów: opór jonowy $R_1$ (stawiany jonom $CO_3^{2-}$ przez elektrolit) oraz opór elektryczny ogniwa $R_2$. Opór oznaczony symbolem $R_3$ jest oporem przyłożonego do ogniwa obciążenia. Równanie na napięcie ogniwa MCFC wyraża się wzorem:

(3) $$E_{SOFC} = \frac{E_{\max} - \eta_f \cdot i_{\max} \cdot r_1}{\frac{r_1}{r_2} \cdot (1 - \eta_f) + 1}$$

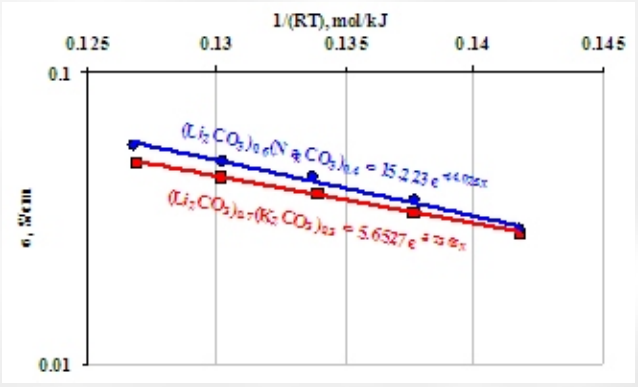
Odpowiednie wartości właściwego oporu elektrycznego zostały określone na podstawie dostępnych danych doświadczalnych [26], i wynoszą odpowiednio 0.6 A/cm$^2$ i 28 cm$^2$/S.

Napięcie maksymalne ogniwa określone jest następującą postacią równania Nernst'a:

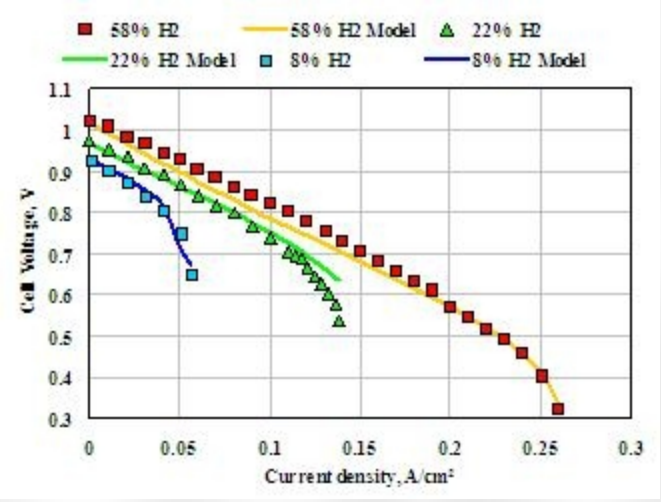
(4)
$$E_{\max} = \frac{RT}{4F} \ln \frac{p_{O2,cathode} \cdot p^2_{CO2,cathode}}{p_{O2,anode} \cdot p^2_{CO2,anode}}$$

gdzie: T - temperatura bezwzględna; R - stała gazu doskonałego; F - stała Faradaya; $p_{O2}$ - ciśnienie cząstkowe tlenu; $p_{CO2}$ - ciśnienie cząstkowe dwutlenku węgla; cathode - katoda; anode - anoda.

Ciśnienia cząstkowe były obliczane na bieżąco przy wykorzystaniu równania stanu Lee-KeslerPlockera oraz minimalizacji energii swobodnej Gibbsa [27].

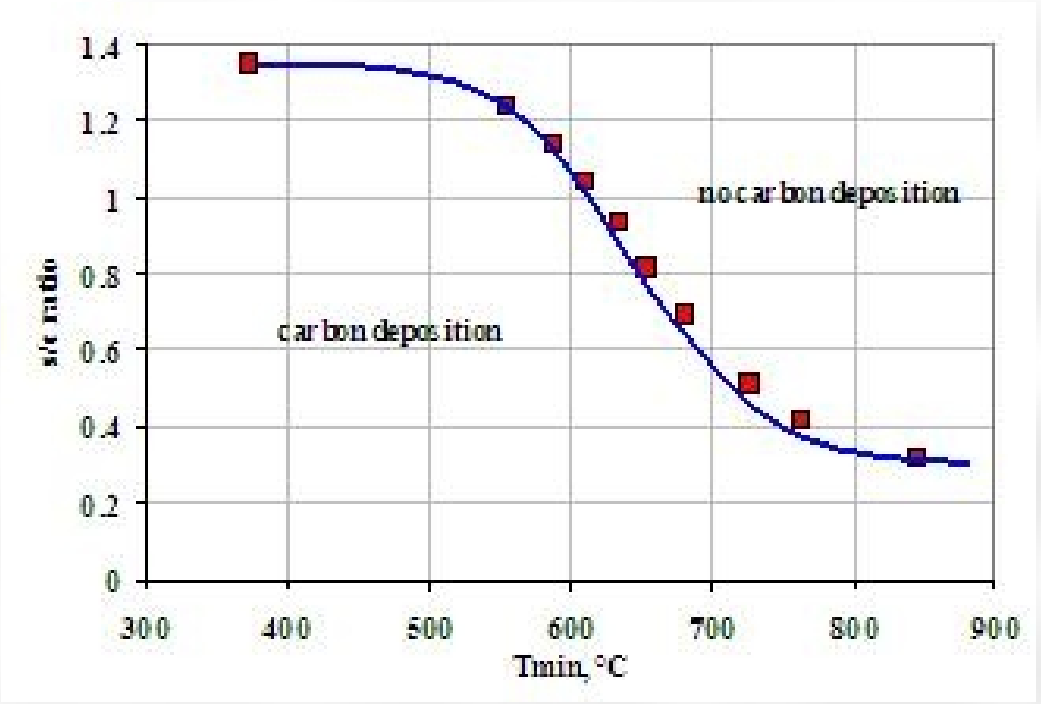



Wykres 1. Wpływ temperatury na przewodności jonowe ciekłych węglanów.
*Źródło: [28].*




Przewodność jonowa elektrolitu węglanowego jest funkcją temperatury, zależności te dla dwóch różnych elektrolitów przedstawiono na wykresie 1. Dokładność tak zbudowanego modelu została zweryfikowana na dostępnych danych doświadczalnych [26], a rezultaty przedstawiono na wykresie 2.

Wykres 2. Porównanie wyników uzyskanych za pomocą modelu z danymi doświadczalnymi.
*Źródło: [28].*



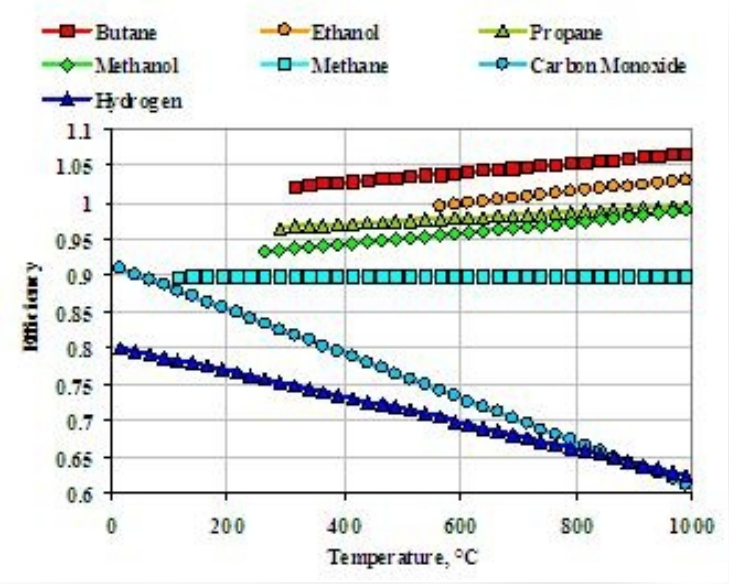

Wykres 3. Wartości współczynnika s/c ratio, przy których nie zachodzi odkładanie się węgla w postaci stałej na powierzchniach elektrod.
*Źródło: opracowanie własne.*

Dla uniknięcia osadzania się węgla w postaci stałej na powierzchni elektrod, konieczne jest dodanie do biogazu odpowiedniej ilości pary wodnej. Dodać należy, że poszczególne paliwa posiadają różne graniczne zawartości pary wodnej. Krzywą paliw zawierających metan i tlenek węgla przedstawiono na wykresie 3.

W przypadku ogniwa MCFC, współczynnik s/c na poziomie 0.8 zapobiega teoretycznie temu niekorzystnemu zjawisku. Zwyczajowo jest on jednak utrzymywany na poziomie 2 lub wyżej.

## Biogaz pochodzenia organicznego, jako paliwo dla ogniw paliwowych MCFC

Swoistość pracy ogniwa paliwowego MCFC, polega na konieczności podawania razem z utleniaczem dwutlenku węgla. W układach komercyjnych jest to realizowane poprzez recyrkulację strumienia spalin do przepływu katodowego ogniwa. Należy nadmienić, iż zawrócenie gorącego czynnika nie jest zagadnieniem trywialnym i stosowane są tutaj wysublimowane rozwiązania [29]. Zatem, do strumienia katodowego ogniwa podawana jest mieszanina powietrza i dwutlenku węgla tak, aby ich wzajemny stosunek odpowiadał proporcji, występującej pomiędzy tymi związkami podczas powstawania jonów węglanowych, tj. $CO_2/O_2 = 2$.




Wykres 4. Teoretyczna sprawność maksymalna ogniwa paliwowego w zależności od zastosowanego paliwa.
*Źródło: opracowanie własne.*

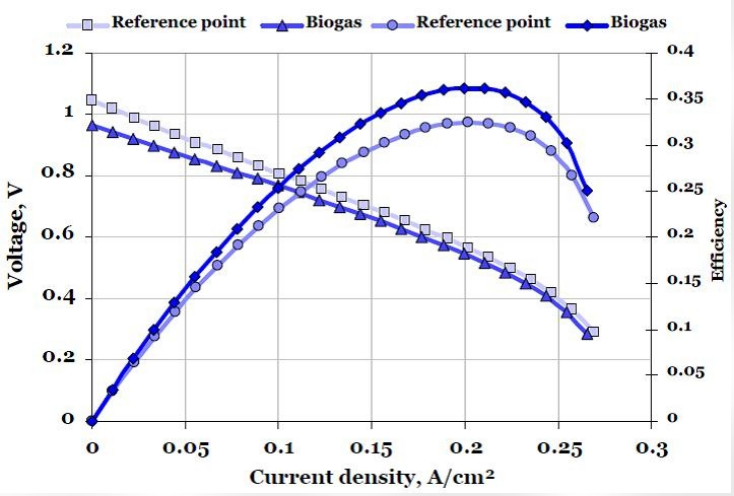
W ogniwach paliwowych zachodzą reakcje elektrochemiczne w wyniku, których następuje bezpośrednia przemiana energii chemicznej paliwa w prąd elektryczny. Rodzaj zachodzącej reakcji odgrywa tutaj kluczową rolę, ponieważ w zależności od jej przebiegu ogniwo może osiągnąć wyższą lub niższą sprawność. Ogólnie rzecz ujmując, reakcje chemiczne można podzielić na egzotermiczne i endotermiczne. Te pierwsze charakteryzują się tym, iż w trakcie ich przebiegu generowane jest ciepło oddawane do otoczenia, te drugie zaś wymagają dostarczenia ciepła z otoczenia. W definicjach sprawności ogniwa często uwzględnia się wyłącznie energię chemiczną dostarczoną w paliwie. Tak więc, ciepło dostarczone z otoczenia może powodować osiągnięcie wartości sprawności powyżej jedności. Z przedstawionych danych (wykres 4) wynika, iż biogaz posiadający w swoim składzie węglowodory o dłuższych łańcuchach powinien charakteryzować się stosunkowo wysokim potencjałem w zakresie sprawności. Z drugiej jednak strony - w ogniwie zachodzi wiele reakcji jednocześnie i jest generowane napięcie. Tak więc sprawność - będzie wypadkową tych reakcji.

Biogaz pochodzenia organicznego nie zawiera pary wodnej, którą należy dodać do paliwa w celu bezpośredniego wykorzystania tego gazu do zasilenia ogniwa paliwowego. Zadany współczynnik „s/c" był na poziomie 1.4 (skład biogazu przedstawiono w tabeli 1). Wyniki symulacji pracy ogniwa MCFC dla tego paliwa, na tle paliwa referencyjnego, przedstawiono na wykresie 5. Teoretycznie ogniowo MCFC pracujące na biogazie generuje napięcie powyżej 0.9 V przy otwartym obwodzie zewnętrznym. Maksymalna sprawność jaką osiąga ogniwo to ok. 50%. Jest to wynik zadowalający. W punkcie pracy przy maksymalnej sprawności utylizowane jest ponad 90 % paliwa dostarczanego do ogniwa.

Tabela 1. Zawartość biogazu użytego w symulacjach z MCFC.

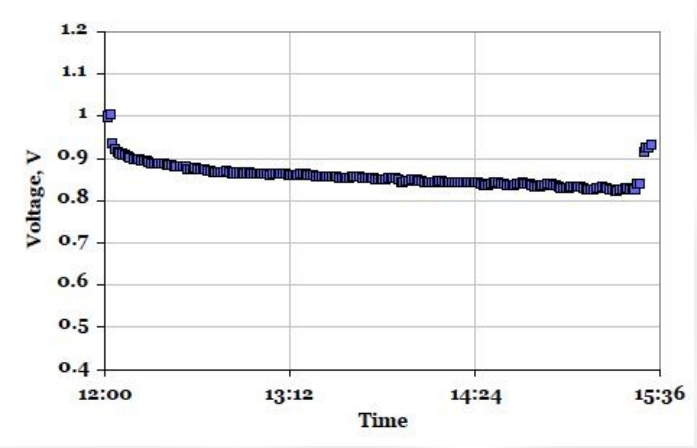
| Próbka | $O_2$ % | $N_2$ % | $CH_4$ % | $CO_2$ % | $H_2$ % | $H_2O$ % |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0.816 | 3.080 | 72.2 | 23.9 | -- | -- |
| 2 | 0.249 | 1.350 | 72.7 | 25.7 | -- | -- |
| 3 | 1.040 | 3.700 | 69.6 | 25.6 | -- | -- |
| 4 | 0.941 | 3.510 | 71.0 | 24.6 | -- | -- |
| 5 | 3.060 | 10.400 | 62.6 | 24.0 | -- | -- |
| 6 | 1.150 | 4.310 | 69.2 | 25.3 | -- | -- |
| 7 | 0.180 | 0.749 | 70.6 | 28.5 | -- | -- |
| 8 | 0.467 | 25.700 | 41.1 | 32.8 | -- | -- |
| Punkt referencyjny | -- | -- | -- | 23 | 69 | 8 |

*Źródło: [30].*



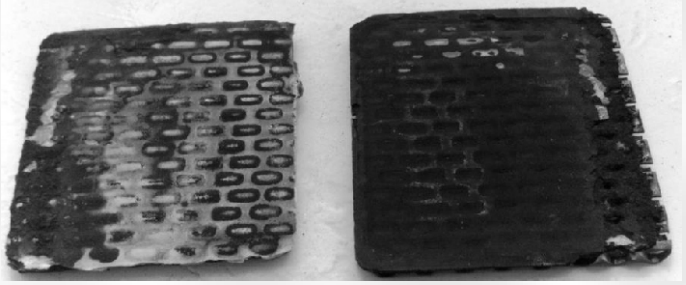

Wykres 5. Krzywe prądowo-napięciowe i gęstości mocy otrzymane dla ogniwa paliwowego MCFC pracującego na biogazie pochodzenia organicznego.
*Źródło: [30].*

Rozkład węglowodorów do wodoru zachodzący w obecności pary wodnej (oraz rozkład samej pary wodnej do wodoru) powinien skutkować wyższą sprawnością paliw zawierających węglowodory w stosunku do wodoru, ponieważ część energii cieplnej generowanej podczas pracy ogniwa jest zamieniane na energię chemiczną paliwa (wodór). Oznacza to de facto większą ilość dostarczanego paliwa. Wstępne badania doświadczalne nie potwierdzają jednak tych rezultatów. Po uzyskaniu stabilnej pracy na paliwie referencyjnym, do ogniwa został podany symulowany biogaz o następującym składzie: 58% metanu i 42% dwutlenku węgla zmieszanym z parą wodną, tak aby utrzymać wartość współczynnika s/c na poziomie 1.2, przy nie zmienianym składzie utleniacza.




Wykres 6. Wpływ biogazu pochodzenia mleczarskiego na napięcie węglanowego ogniwa paliwowego.
*Źródło: opracowanie własne.*

Na wykresie 6 przedstawiono zmiany napięcia ogniwa paliwowego po jego przełączeniu na symulowany biogaz. Zauważyć można, iż napięcie to spadło z 1 V do ok. 0.9 V w stosunkowo krótkim czasie. Później natomiast nadal systematycznie spadało, aż do osiągnięcia wartości lekko ponad 0.8 V. Czas po jakim ogniwo ustabilizowało swoją pracę wyniósł ok. 3 h.



Fotografia 1. Widok na ogniwo paliwowe po pracy na symulowanym biogazie.
*Źródło: opracowanie własne.*

Po przełączeniu paliwa z biogazu z powrotem na wodór, napięcie wzrosło do prawie 0.95 V, ale nie osiągnęło swojej pierwotnej wartości (ponad 1 V). Zarówno powolny spadek napięcia podczas pracy ogniwa jak i jego niższa wartość po powrocie do paliwa referencyjnego sugerują występowanie procesów degradacji ogniwa. W celu ich wstępnego zidentyfikowania, ogniwo zostało poddane analizie wzrokowej (fotografia 1). Zarówno na powierzchni ogniwa jak i kolektorze doprowadzającym gazy anodowe zauważono dużo czarnego osadu, sugerującego odkładanie się węgla w postaci stałej, pomimo stosowania odpowiedniego nadmiaru pary wodnej.

## Podsumowanie

Celem rozważań było zaprezentowanie analiz teoretycznych oraz odpowiadających im badań doświadczalnych, obrazujących wpływ bezpośredniego przełączenia paliwa dostarczanego do węglanowego ogniwa paliwowego, z wodoru na symulowany biogaz zmieszany z parą wodną. Dotychczasowe rezultaty badawcze sugerują porównywalne lub nawet wyższe osiągi ogniwa na biogazie w stosunku do wodoru i porównywalne do gazu ziemnego. Badania doświadczalne nie potwierdzają tych rezultatów, ponieważ po skokowej zmianie paliwa na biogaz, ogniwo stabilizowało swoją pracę po ok. 3 h. Odnotowano znaczny spadek napięcia generowanego przez ogniwo 0.8 V vs. 1 V (spadek o 20%). Zarejestrowano także trwałą degradację ogniwa (ok. 10%), która najprawdopodobniej była wywołana odkładaniem się atomowego węgla na powierzchni elektrod. Tezę tę potwierdza analiza wzrokowa przeprowadzona zaraz po doświadczeniu.

Zagadnienie wymaga dalszych badań i studiów w zakresie kinetyki reakcji oraz dostosowania konstrukcji ogniwa do innego paliwa (powiększenia kanału i czasu na reakcję).

## Bibliografia


[1] Ł. Bartela, A. Skorek-Osikowska, J. Kotowicz, Integration of a supercritical coal-fired heat and power plant with carbon capture installation and gas turbine, Rynek Energii 100 (3) (2012) 56-62.

[2] K. Janusz-Szymańska, Economicefficiency of anigcc system integreted with ccs installation [efektywność ekonomiczna układu gazowo-parowego zintegrowanego ze zgazowaniem węgla oraz z instalacją CCS], Rynek Energii 102 (5) (2012) 24-30.

[3] M. Kawabata, O. Kurata, N. Iki, C. Fushimi, A. Tsutsumi, Analysis of igfc with exergy recuperation and carbon dioxide separation unit, Vol. 3, 2012, pp. 441-448.

[4] M. Kawabata, O. Kurata, N. Iki, A. Tsutsumi, H. Furutani, Advanced integrated gasification combined cycle (A-IGCC) by exergy recuperation technical challenges for future generations, Journal of Power Technologies 2 (2012) 90-100.

[5] J. Milewski, A. Miller, Mathematical model of SOFC (Solid Oxide Fuel Cell) for power plant simulations, in: ASME Turbo Expo, Vol. 7, 2004, pp. 495-501.

[6] J. Milewski, Mathematical model of SOFC for complex fuel compositions, in: International Colloquium on Environmentally Preferred Advanced Power Generation, no. ICEPAG2010-3422, 2010.

[7] S. Bozorgmehri, M. Hamedi, Modeling and optimization of anode-supported solid oxide fuel cells on cell parameters via artificial neural network and genetic algorithm, Fuel Cells 12 (1) (2012) 11-23.

[8] H. Marzooghi, M. Raoofat, M. Dehghani, G. Elahi, Dynamic modeling of solid oxide fuel cell stack based on local linear model tree algorithm, International Journal of Hydrogen Energy 37 (5) (2012) 4367-4376.

[9] P. Pianko-Oprych, Z. Jaworski, Numerical modelling of the micro-tubular solid oxide fuel cell stacks [przegląd metod modelowania numerycznego mikrorurowych stało tlenkowych stosów ogniw paliwowych], Przemysł Chemiczny 91 (9) (2012) 1813-1815.

[10] G. De Lorenzo, P. Fragiacomo, Electrical and electrical-thermal power plants with molten carbonate fuel cell/gas turbine-integrated systems, International Journal of Energy Research 36 (2) (2012) 153-165.

[11] G. De Lorenzo, P. Fragiacomo, A methodology for improving the performance of molten carbonate fuel cell/gas turbine hybrid systems, International Journal of Energy Research 36 (1) (2012) 96-110.

[12] H. Jeong, S. Cho, D. Kim, H. Pyun, D. Ha, C. Han, M. Kang, M. Jeong, S. Lee, A heuristic method of variable selection based on principal component analysis and factor analysis for monitoring in a 300 kw mcfc power plant, International Journal of Hydrogen Energy 37 (15) (2012) 11394-11400.

[13] J. Milewski, J. Lewandowski, A. Miller, Reducing co2 emissions from a coal fired power plant by using a molten carbonate fuel cell, in: Proceedings of the ASME Turbo Expo, Vol. 2, 2008, pp. 389-395.

[14] G. Discepoli, G. Cinti, U. Desideri, D. Penchini, S. Proietti, Carbon capture with molten carbonate fuel cells: Experimental tests and fuel cell performance assessment, International Journal of Greenhouse Gas Control 9 (2012) 372-384.

[15] K. Chaichana, Y. Patcharavorachot, B. Chutichai, D. Saebea, S. Assabumrungrat, A. Arpornwichanop, Neural network hybrid model of a direct internal reforming solid oxide fuel cell, International Journal of Hydrogen Energy 37 (3) (2012) 2498-2508.

[16] G. Marban, T. Valdes-Solis, Towards the hydrogen economy?, International Journal of Hydrogen Energy 32 (2007) 1625-1637.

[17] W. Budzianowski, Negative carbon intensity of renewable energy technologies involving biomass or carbon dioxide as inputs, Renewable and Sustainable Energy Reviews 16 (9) (2012) 6507-6521.

[18] A. Sobolewski, Ł. Bartela, A. Skorek-Osikowska, T. Iluk, Comparison of the economic efficiency of chp plants integrated with gazela generator [porównanie efektywności ekonomicznej układów kogeneracyjnych z generatorem gazu procesowego gazela], Rynek Energii 102 (5) (2012) 31-37.

[19] R. Bove, P. Lunghi, Experimental comparison of mcfc performance using three different biogas types and methane, Journal of Power Sources 145 (2005) 588-593.

[20] M. Krumbeck, T. Klinge, B. Doging, First european fuel cell installation with anaerobic digester gas in a molten carbonate fuel cell, Journal of Power Sources 157 (2006) 902-905.

[21] K. Lobachyov, H. Richter, An advanced integrated biomass gasification and molten fuel cell power system, Energy Conversion Management 39 (1998) 1931-1943.

[22] T. Kivisaari, P. Bjornbom, C. Sylwan, Studies of biomass fuelled MCFC systems, Journal of Power Sources 104 (2002) 115-124.

[23] S. Trogisch, J. Hoffmann, L. Bertrand, Operation of molten carbonate fuel cells with different biogas sources: A challenging approach for field trials, Journal of Power Sources 145 (2005) 632-638.

[24] C. Sequeira, P. Brito, A. Mota, J. Carvalho, L. Rodrigues, D. Santos, D. Barrio, D. Justo, Fermentation, gasification and pyrolysis of carbonaceous residues towards usage in fuel cells, Energy Conversion and Management 48 (7) (2007) 2203-2220.

[25] M. R. Mahishi, D. Goswami, Thermodynamic optimization of biomass gasifier for hydrogen production, International Journal of Hydrogen Energy 32 (16) (2007) 3831-3840.

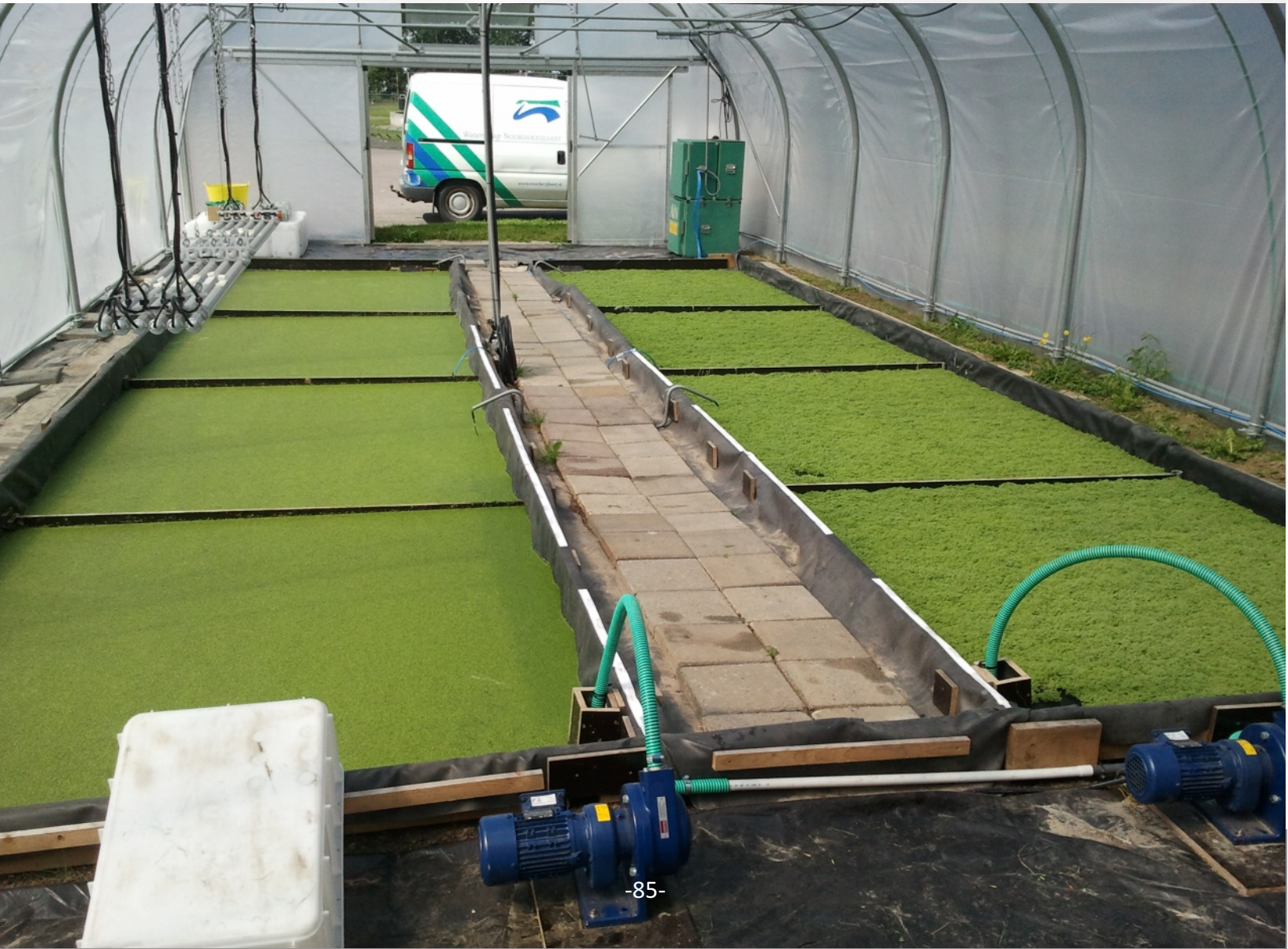
[26] E. Arato, B. Bosio, P. Costa, F. Parodi, Preliminary experimental and theoretical analysis of limit performance of molten carbonate fuel cells, Journal of Power Sources 102 (1-2) (2001) 74-81.

[27] Hyprotech Corporation, HYSYS.Plant Steady State Modelling (1998).

[28] H. Morita, M. Komoda, Y. Mugikura, Y. Izaki, T. Watanabe, Y. Masuda, T. Matsuyama, Performance analysis of molten carbonate fuel cell using a li/na electrolyte, Journal of Power Sources 112 (2) (2002) 509-518.

[29] D. A. Brunner, S. Marcks, M. Bajpai, A. K. Prasad, S. G. Advani, Design and characterization of an electronically controlled variable flow rate ejector for fuel cell applications, International Journal of Hydrogen Energy 37 (5) (2012) 4457-4466.

[30] J. Milewski, K. Michalska, A. Kacprzak, Dairy biogas as fuel for a molten carbonate fuel cell initial study, Journal of Power Technologies 93 (3) (2013) 161-168.



Maciej Sibiński

# WYKORZYSTANIE INSTALACJI FOTOWOLTAICZNYCH WARUNKIEM POPRAWY NIEZALEŻNOŚCI ENERGETYCZNEJ MLECZARNI, WYPOSAŻONEJ W REAKTOR BIOGAZOWY

Streszczenie

W artykule podjęto próbę zaprezentowania znaczenia instalacji fotowoltaicznych w poprawie niezależności energetycznej mleczarni wyposażonej w reaktora biogazowy. Skoncentrowano się na: rozwoju technologii fotowoltaicznych w kierunku szerszego wykorzystania ogniw słonecznych w przemysłowych instalacjach energetycznych, potencjale energetycznym instalacji fotowoltaicznych w Polsce, magazynowaniu i przetwarzaniu energii ze źródeł fotowoltaicznych. Podjęto też próbę analizy możliwości zaspokojenia potrzeb energetycznych zakładu mleczarskiego przy wykorzystaniu źródeł fotowoltaicznych.

Abstract

The article was meant to present role of photovoltaic installations in improvements of energy independency of a dairy factory, which is equipped with biogas reactor. The main elements of the article were: development of photovoltaic technologies to broader usage of solar cells in Poland, storage and conversion of photovoltaic sourced energy. There was also an attempt undertaken to analyse possibilities of fulfilment of energetic needs of dairy factory with usage of photovoltaic sources.

Słowa kluczowe

instalacje fotowoltaiczne, technologie fotowoltaiczne, magazynowanie i przetwarzanie energii ze źródeł fotowoltaicznych, zakłady mleczarskie

Keywords

photovoltaic installations, photovoltaic technologies, storage and conversion of energy from photovoltaic sources, dairy factories

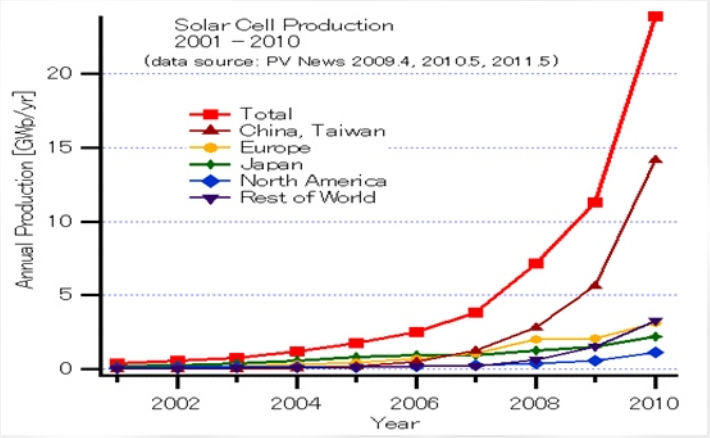
Maciej Sibiński

- doktor inżynier, Wydział Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki, Politechnika Łódzka, ul. B. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź, maciej.sibinski@p.lodz.pl

# Rozwój technologii fotowoltaicznych drogą do szerszego wykorzystania ogniw słonecznych w przemysłowych instalacjach energetycznych

Stale i dynamicznie rosnące zużycie energii, a szczególnie energii elektrycznej, w większości krajów świata zmusza do poszukiwań nowych rozwiązań technologicznych [1-2]. Jednocześnie dążenie do ochrony środowiska naturalnego oraz dążenie do dywersyfikacji źródeł zasilania, a przez to zapewnienie bezpieczeństwa energetycznego, powodują wzrost zainteresowania możliwościami wykorzystania energii odnawialnych [3]. Jedną z takich możliwości jest fotowoltaika, a energia elektryczna, otrzymywana na drodze konwersji fotowoltaicznej, podczas której nie powstają żadne odpady lub zanieczyszczenia, należy do grona energii ze źródeł odnawialnych, przyjaznych dla środowiska przyrodniczego [4]. Zestawy ogniw słonecznych nie powodują hałasu i nie są w inny sposób uciążliwe dla otoczenia, przez co można je budować w bezpośrednim sąsiedztwie siedzib ludzkich. Długoterminowa bezawaryjna praca ogniw słonecznych umożliwia ich eksploatację nawet do trzydziestu lat [5], natomiast wysoka dowolność, co do miejsca montażu pozwala zachować swobodę lokalizacji oraz umożliwia zasilanie odbiorników ruchomych, lub położonych w trudnych warunkach terenowych, w oddaleniu od sieci energetycznej [6-7]. Modułowa konstrukcja baterii ogniw umożliwia również łatwe dostosowanie wielkości instalacji do potrzeb energetycznych danego odbiornika.

W ciągu zaledwie kilku ostatnich lat fotowoltaika przeszła z obszaru zainteresowania naukowców i wstępnych prac wdrożeniowych do realnego wykorzystania w sektorze energetycznym większości krajów rozwiniętych. Warto zauważyć, iż ostatnio wzrost produkcji modułów fotowoltaicznych jak i zainstalowanej mocy elektrycznej, pochodzącej z tych modułów jest niespotykany i nieporównywalny z jakimkolwiek innym rodzajem generatorów. Tylko w latach 2008-2011, pomimo kryzysu gospodarczego odnotowano globalny wzrost zainstalowanej mocy, pochodzącej ze źródeł fotowoltaicznych równy ponad 1300% oraz wzrost produkcji modułów o 6000 % [8]. Z raportu Europejskiego Stowarzyszenia Przemysłu Fotowoltaicznego wynika, iż w 2011 r. moc zainstalowanych urządzeń fotowoltaicznych na świecie wyniosła ponad 64 GW, co jest prawie dwukrotnością wartości z 2010 r. Podobnie, wzrasta liczba firm działających w branży fotowoltaicznej, czemu towarzyszy wzrost zatrudnienia. Według przewidywań do 2030 r., fotowoltaika powinna zaspokoić 14% światowego zapotrzebowania na energię elektryczną [9].

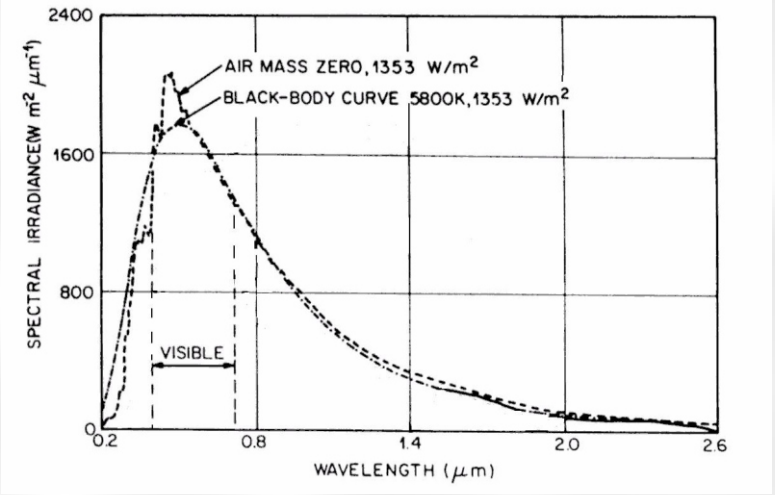



Wykres 1. Wzrost światowej produkcji modułów fotowoltaicznych w latach 2000-2010.
*Źródło: [10].*

Przytoczone fakty wskazują wyraźnie na ogromne znaczenie instalacji fotowoltaicznych dla współczesnych systemów energetycznych. Znajduje to również swoje odzwierciedlenie w wielu programach wspierania rozwoju tego rodzaju źródeł energii, szczególnie w krajach europejskich. W związku z unijnym planem rozwoju energii odnawialnych i zmniejszenia zanieczyszczenia środowiska, zwanym potocznie 3×20%, także Polska zobowiązana jest do intensywnego rozwijania energetyki przyjaznej środowisku [11]. Również nowe Prawo Energetyczne, według oczekiwań powinno ułatwić szerokie wprowadzanie instalacji fotowoltaicznych do Krajowej Sieci Energetycznej.

## Potencjał energetyczny instalacji fotowoltaicznych w Polsce

Podstawowym źródłem energii w naszym układzie słonecznym jest elektromagnetyczne promieniowanie Słońca. Również promieniowanie słoneczne docierające do powierzchni Ziemi jest właściwym źródłem energii elektrycznej powstającej w ogniwie fotowoltaicznym. Gęstość mocy emitowanej z powierzchni Słońca jest ogromna i wynosi 62,5 MW/m$^2$ natomiast do powierzchni atmosfery ziemskiej dociera 1350 W/m$^2$. Promieniowanie to pochodzi w przeważającej części od tak zwanej fotosfery, to znaczy zewnętrznej powierzchni warstwy gazowej Słońca. Temperatura fotosfery wynosi około 5780 K, zaś jej emisja to głównie promieniowanie elektromagnetyczne o widmie ciągłym. Maksimum rozkładu energii widma przypada na zakres światła widzialnego o długości około 460 nm, co odpowiada barwie niebiesko-zielonej. Fakt ten zachęca do modelowania rozkładu promieniowania słonecznego w oparciu o model ciała doskonale czarnego, zgodnie z prawem Stefana Boltzmana. Niestety, w rzeczywistości emisja słoneczna odbiega od idealnego rozkładu ciała doskonale czarnego, co obrazuje poniższy wykres.



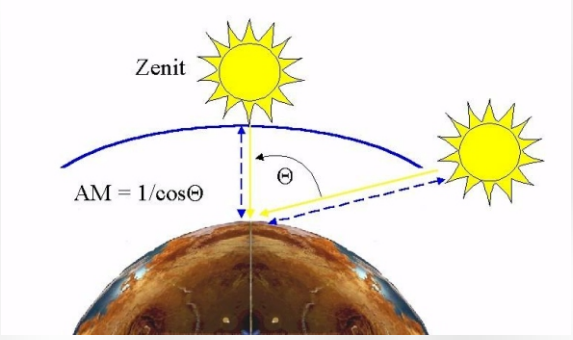

Wykres 2. Rozkład emisji ciała doskonale czarnego o temperaturze 578°K oraz rzeczywista emisja fotosfery słonecznej.
*Źródło: [12].*

Największe różnice pomiędzy obydwoma przebiegami występują w zakresie fal krótkich i wynikają z niejednorodnego składu Słońca, jednak różnice te nie są znaczące wobec zmian jakie wprowadza do tego rozkładu wpływ atmosfery ziemskiej. Wpływ ten powoduje nie tylko zmniejszenie mocy promieniowania, lecz również znaczną modyfikację jego rozkładu widmowego. Podstawowe zjawiska, jakie zachodzą w atmosferze, ważne z punktu widzenia wędrówki światła, to:

- Redukcja mocy promieniowania poprzez absorpcję, rozpraszanie i odbicie w atmosferze.
- Zmiana spektrum promieniowania poprzez większą absorpcję i rozpraszanie w niektórych zakresach długości fal.
- Wprowadzanie dodatkowego oświetlenia pochodzącego od promieniowania rozproszonego w atmosferze.
- Lokalne zmiany przejrzystości atmosfery: chmury, mgła, zapylenie.

Promieniowanie słoneczne docierające do powierzchni atmosfery ulega częściowemu odbiciu, co jest pierwszą przyczyną redukcji jego energii. Następnie część wiązki, która wniknęła w atmosferę jest częściowo rozproszona częściowo pochłonięta przez różne warstwy atmosfery. Ze względu na niejednorodny skład atmosfery, a w szczególności występowanie cząsteczek niektórych gazów silnie pochłaniających światło w wybranych zakresach długości fal rozkład promieniowania przenikającego przez atmosferę jest zmieniony i w dużym stopniu niejednorodny. Cześć rozproszona promieniowania widzialnego w dużym stopniu dociera jednak do powierzchni Ziemi wprowadzając dodatkową modyfikację charakterystyki światła. Dodatkowo atmosfera ziemska jest w dużym stopniu niejednorodna i w wyniku lokalnego zachmurzenia, zapylenia lub zamglenia oświetlenie może ulegać dużym fluktuacjom. Z tego względu rzeczywiste oświetlenie, jak i ilość energii słonecznej docierającej do konkretnego obszaru w jednostce czasu może być dosyć wysoce zróżnicowane ze względu na lokalne warunki atmosferyczne.

Wszystkie opisane zjawiska wpływają bezpośrednio na wielkość i rozkład energii docierającej do powierzchni naszej planety. Oczywistym jest, że zmiany te są tym większe im dłuższa jest droga wiązki światła w atmosferze. Dlatego dla celów porównawczych wprowadzono standardowe warunki oświetlenia STC, służące do określenia widma światła słonecznego widzianego na rożnych szerokościach geograficznych. Jednostką determinującą położenie odbiornika na powierzchni Ziemi, a więc również długość drogi światła przez atmosferę, zależną od szerokości geograficznej, jest współczynnik AM (ang: air mass). Do obliczenia jego wartości w konkretnym miejscu należy posłużyć się zależnością 1, objaśnioną na poniższym rysunku.

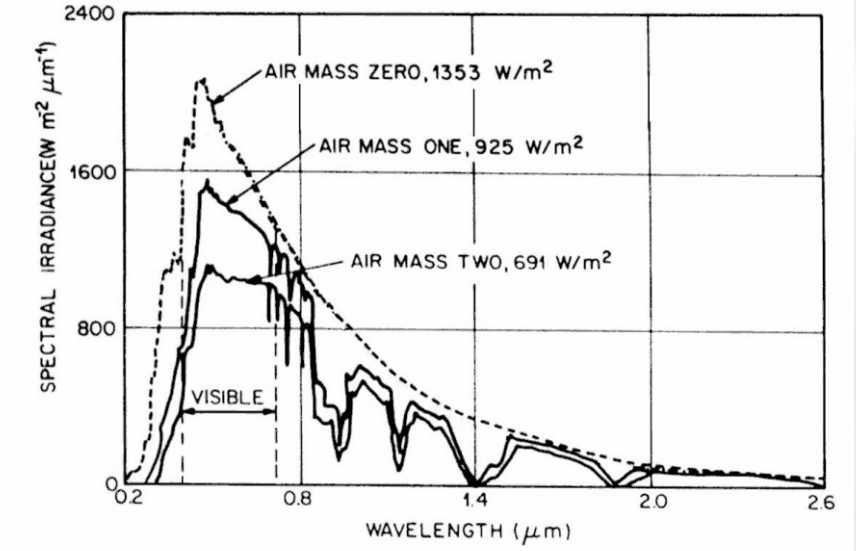



$$AM = 1/\cos\theta \qquad (1)$$

Gdzie: θ - minimalny kąt pomiędzy kierunkiem padania światła, a kątem normalnym

Rysunek 1. Sposób wyznaczania współczynnika AM w zależności od szerokości geograficznej.
*Źródło: opracowanie własne.*

Należy zaznaczyć, że kąt θ jest kątem minimalnym osiąganym na półkuli północnej w południe najdłuższego dnia w roku. Łatwo widać, że tak zdefiniowany współczynnik AM może osiągać wartości od jedności (równik) do nieskończoności (bieguny). Oprócz tych wartości wprowadzony został szczególny przypadek AM=0, opisujący warunki nasłonecznienia w przestrzeni kosmicznej. Współczynnik AM jest szeroko wykorzystywany w celach porównawczych dla rożnych urządzeń konwertujących energię słoneczną, przy czym jako wartość uniwersalną przyjęło się stosować AM=1,5, odpowiadającą szerokości geograficznej 48$^o$ która jest również typową dla Polski. Zmiany jakie wprowadza atmosfera ziemska w charakterystyce promieniowania słonecznego dla wysokich współczynników AM są bardzo duże, co przedstawia poniższy wykres.




Wykres 3. Charakterystyka promieniowania słonecznego dla różnych wartości współczynnika AM.
*Źródło: [13].*

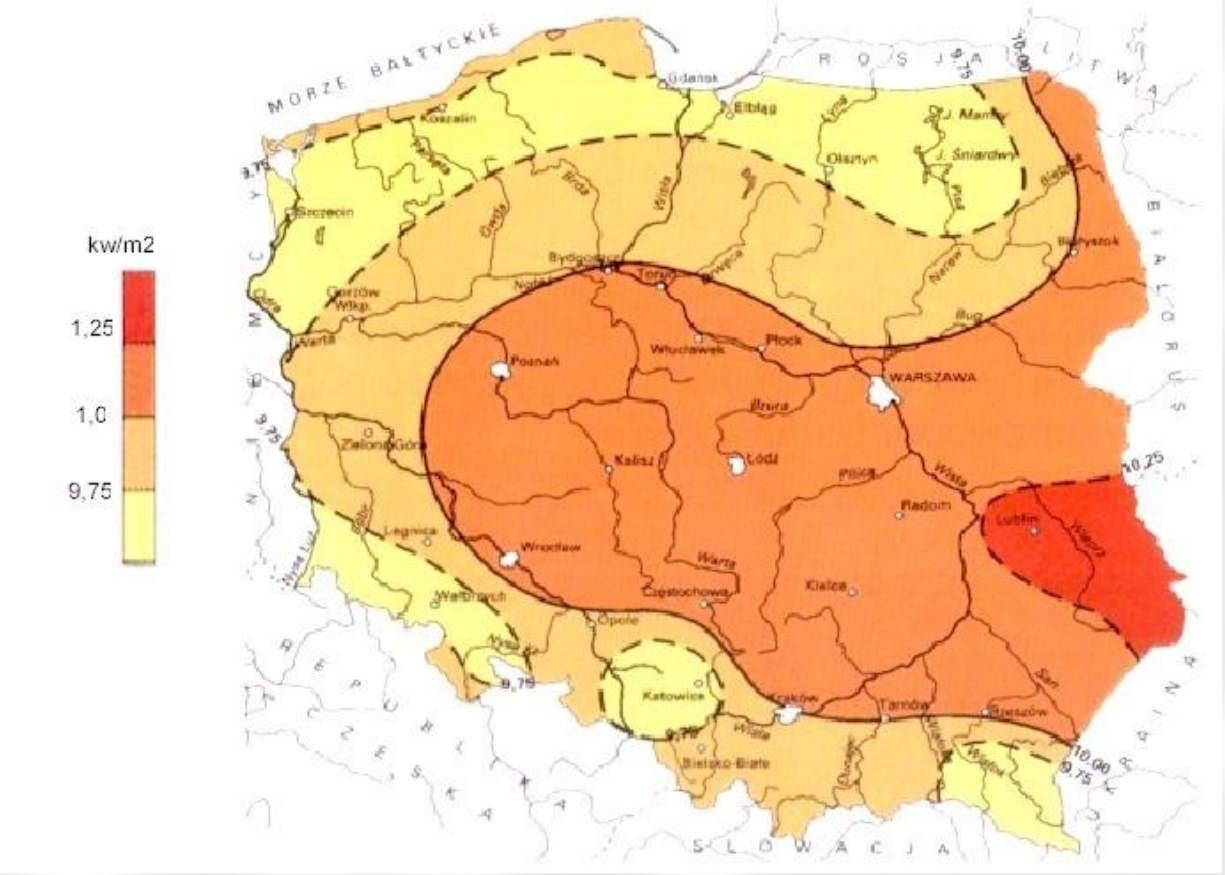
Oprócz znacznej redukcji mocy maksymalnej wprowadzone są liczne nieciągłości, których głównymi źródłami są takie składniki atmosfery jak: ozon (ultrafiolet), para wodna i woda (zakres widzialny i podczerwień), tlen i dwutlenek węgla (bliska i daleka podczerwień).

Reasumując, rzeczywiste warunki nasłonecznienia w Polsce, określone poprzez wartość współczynnika Air Mass, wynoszą średnio AM=1,65. W celu określenia realnej wartości usłonecznienia w danym regionie należy dodatkowo uwzględnić lokalne warunki wpływające na zmniejszenie przejrzystości atmosfery. Pomierzone wartości mocy promieniowania słonecznego, na podstawie badań Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej, przedstawia mapa 1.

Na podstawie przedstawionych wyników można oszacować ilość dostępnej energii słonecznej dla instalacji zlokalizowanej w regionie łódzkim. Analiza warunków lokalnych prowadzi do następujących wniosków:

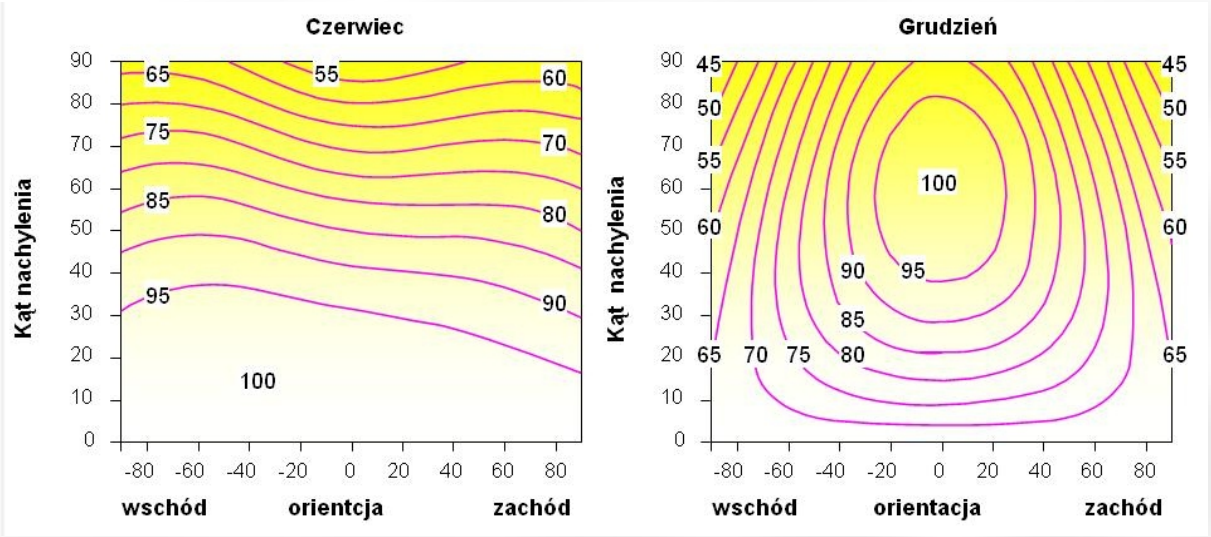
- Warunki AM dla Łodzi - na podstawie położenia ( 51.7 N, 19.4 E) wynoszą 1,61.

- Uwzględniając powyższe dane otrzymuje się sumaryczną gęstość mocy promieniowania słonecznego równą 1,01 kW/m$^2$ (przy wykorzystaniu promieniowania bezpośredniego i rozproszonego).
- Na podstawie pomiarów stwierdzono, że lokalne warunki atmosferyczne nie zmieniają w stopniu znaczącym wartości wyliczonej na podstawie danych geograficznych.
- Zakładając sprawność modułów słonecznych na poziomie 18 % (krzem polikrystaliczny) oraz sprawność łączną systemu na poziomie 15 % uzyskuje się odpowiednio całkowitą gęstości mocy użytecznej równą 181,8 W/m$^2$ oraz gęstość rzeczywistą wynoszącą 151,5 W/m$^2$.

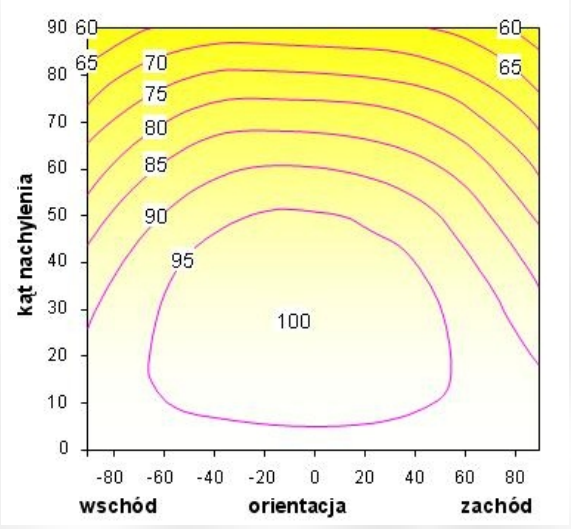



Mapa 1. Mapa warunków nasłonecznienia w Polsce.
*Źródło: [15].*

W celu doboru właściwej orientacji geograficznej oraz kąta nachylenia instalacji fotowoltaicznej należy przeprowadzić analizę wpływu orientacji na sprawność modułów w zależności od drogi pozornej tarczy słonecznej w różnych porach roku. Wyniki takiej analizy dla pory letniej i zimowej przedstawia wykres 4.




Wykres 4. Wpływ orientacji modułów słonecznych względem kierunków geograficznych oraz kąta ich nachylenia na względną sprawność energetyczną fotokonwersji dla Łodzi w okresie letnim i zimowym.
*Źródło: opracowanie własne.*




Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że w celu uzyskania najwyższej sprawności wykorzystania ogniw słonecznych w okresie letnim moduły powinny posiadać orientację południową, lub południowo-wschodnią, a kąt ich nachylenia powinien wynosić od 0o do 30°. W okresie zimowym najbardziej korzystny optymalny kąt nachylenia wynosi 60° natomiast najkorzystniejszą orientacją jest kierunek południowy.

Przy założeniu stałej orientacji systemu z przedstawionych danych należy wyliczyć średnioroczną, najbardziej korzystną optymalną orientację modułów. W tym celu należy uwzględnić oba rozważone powyżej przypadki w stosunku do ilości energii dostarczanej w okre-sie letnim i zimowym. Wyniki kalkulacji średniorocznej dla Łodzi przedstawia wykres 5.

Wykres 5. Średnioroczny wpływ orientacji modułów słonecznych względem kierunków geograficznych oraz kąta ich nachylenia na względną sprawność energetyczną fotokonwersji dla Łodzi.

*Źródło: opracowanie własne.*

Z przedstawionych obliczeń wynika, że najbardziej korzystna średnioroczna orientacja ogniw słonecznych w Łodzi może być uzyskana poprzez usytuowanie instalacji w kierunku południowym, pod kątem 30°. Takie zamocowanie modułów spełnia również warunek samooczyszczania za pomocą spłukiwania zanieczyszczeń przez opady atmosferyczne. Zwiększa to znacznie bezobsługowość i wpływa korzystanie na sprawność i czas życia instalacji.

Jednocześnie należy pamiętać, iż najważniejszym czynnikiem stymulującym wzrost wykorzystania odnawialnych źródeł energii jest możliwość obniżenia kosztów oraz czerpania zysków z energii wytworzonej w tych urządzeniach. Aby dowiedzieć się czy elektrownie fotowoltaiczne są opłacalne należy szczegółowo przeanalizować teoretyczny bilans zysków, skutkiem czego czas zwrotu tego typu inwestycji w konkretnym rejonie.

Pierwszym etapem jest wskazanie ceny budowy elektrowni słonecznej w Polsce. W tym celu zebrano i przeanalizowano dane, pochodzące ze stron internetowych wybranych dystrybutorów urządzeń fotowoltaicznych [15] zostały zamieszczone w tabeli 1. Jak widać ceny za jeden Wat urządzenia oscylują między 5 a 12 zł, a średnia z ukazanych danych to około 8 zł. Dla porównania, dzięki aktualnemu zestawieniu cen modułów fotowoltaicznych na świecie - w kwietniu 2012 wartości te wynosiły w Niemczech 0,99€, w Chinach 0,71€, a w Japonii 4,05 zł - 0,98€ za jeden Wat (średnia 3,68zł - 0,89€), co w przeliczeniu po kursie z dnia 24.10.2012, wynosi odpowiednio: 4,09 zł, 2,93 zł i 4,05 zł.

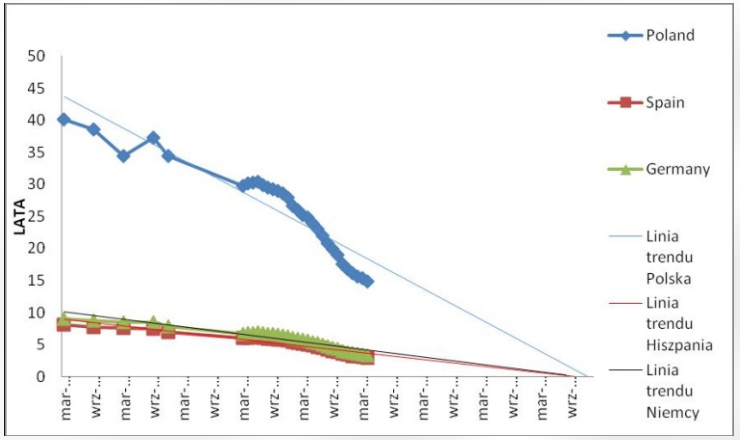
Tabela 1. Zestawienie cen modułów fotowoltaicznych w Polsce w 2012r.

| Nazwa firmy | Działalność | Typ modułu | Model | Cena za 1W w PLN |
|---|---|---|---|---|
| Renvolt | Dystrybutor | Polikrystaliczny | - | 5,24 |
| Eco Technologies | Dystrybutor | Polikrystaliczny | Moduł fotowoltaiczny YingliYL24QPT-29b, 2 40 W | 9,02 |
| Eco Solar | Dystrybutor | Polikrystaliczny | IBC PolySol 240MS, 240W | 8,66 |
| Solar Shop | Dystrybutor | Polikrystaliczny | Suntech Power, 120 W | 11,98 |
| Solar Systems | Dystrybutor | Polikrystaliczny | Bateria Słoneczna 230Wp German Solar Poly | 6,08 |
| | | | **Średnia cena** | **8,19** |

*Źródło: [16].*

Następnym etapem analizy jest kalkulacja przychodu jaki przyniesie rzeczywista instalacja fotowoltaiczna, zlokalizowana w przedsiębiorstwie na terenie kraju. Aby uzyskać tę wartość należy obliczyć rzeczywistą ilość energii wytwarzanej w elektrowni fotowoltaicznej w warunkach lokalnych. Z danych pogodowych oraz średniej wydajności krystalicznych modułów krzemowych można obliczyć, że z 1 kWp instalacji PV w Polsce uzyskuje się rocznie średnio 925 kWh [17]. Aktualnie cena jaką można uzyskać ze sprzedaży 1 kWh składa się z dwóch komponentów. Pierwszym z nich jest średnia cena energii na rynku z roku poprzedzającego (w 2011 - 195.32zł). Do tej kwoty należy dodać wartość ze sprzedaży zielonego certyfikatu (286,74zł). Sumując obydwie - cena skupu energii z odnawialnego źródła w 2012r. wynosi 482,06 zł/1MWh (w euro 111.59€) [18].

Na podstawie tych danych oraz w oparciu o okresy zwrotu instalacji fotowoltaicznych w innych krajach europejskich, opracowano analizę pokazującą zmiany realnego czasu zwrotu inwestycji fotowoltaicznej w Polsce, Hiszpanii i w Niemczech. Obrazuje to wykres 6.




Wykres 6. Zmiana okresu czasu zwrotu w instalacje fotowoltaiczne w Niemczech, Hiszpanii i Polsce w latach 2005-2014.
*Źródło: [15].*

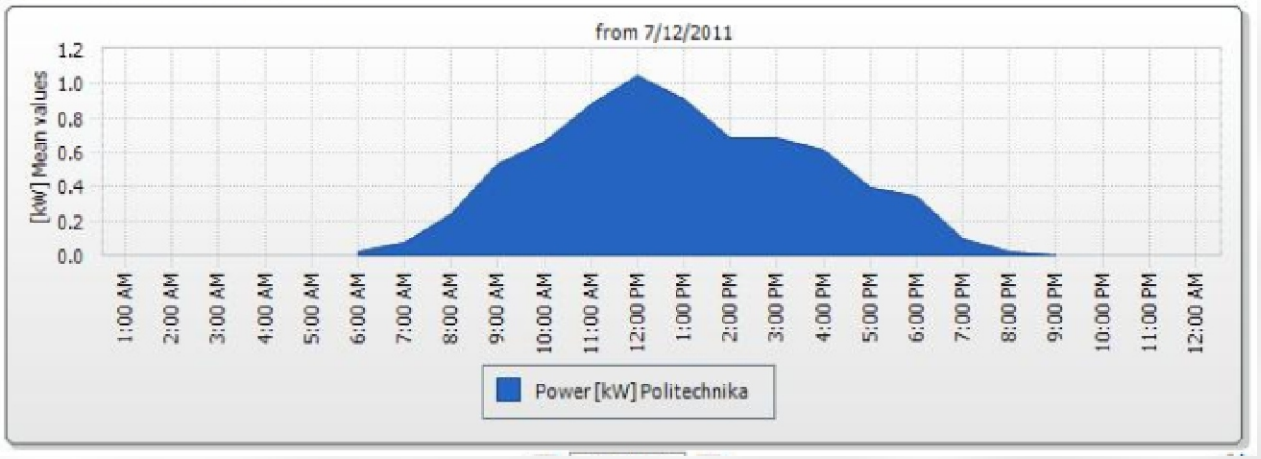
Na podstawie tak przeprowadzonej analizy można zauważyć, że chociaż wciąż zauważalne są znaczne różnice w czasie zwrotu inwestycji w instalacje fotowoltaiczne pomiędzy krajami Europy zachodniej i Polski to jednak warunki te z roku na rok ulegają wyrównaniu. Ze względu na spadek i wyrównanie cen, powszechną dostępność oraz coraz większą łatwość realizacji instalacje fotowoltaiczne w Polsce w ciągu zaledwie kilku lat powinny przynosić zyski zbliżone do instalacji w krajach zachodnich. Już w chwili obecnej czas zwrotu w inwestycję fotowoltaiczną jest nieomal dwukrotnie krótszy niż jej średni czas życia, co w dłuższej perspektywie czasowej gwarantuje zyski dla firm i inwestorów indywidualnych. Powyższa instalacja nie uwzględnia możliwych i spodziewanych w niedługim czasie zmian w uregulowaniach prawnych, działających dodatkowo na korzyść fotowoltaiki.

## Analiza możliwości zaspokojenia potrzeb energetycznych zakładu mleczarskiego przy wykorzystaniu źródeł fotowoltaicznych

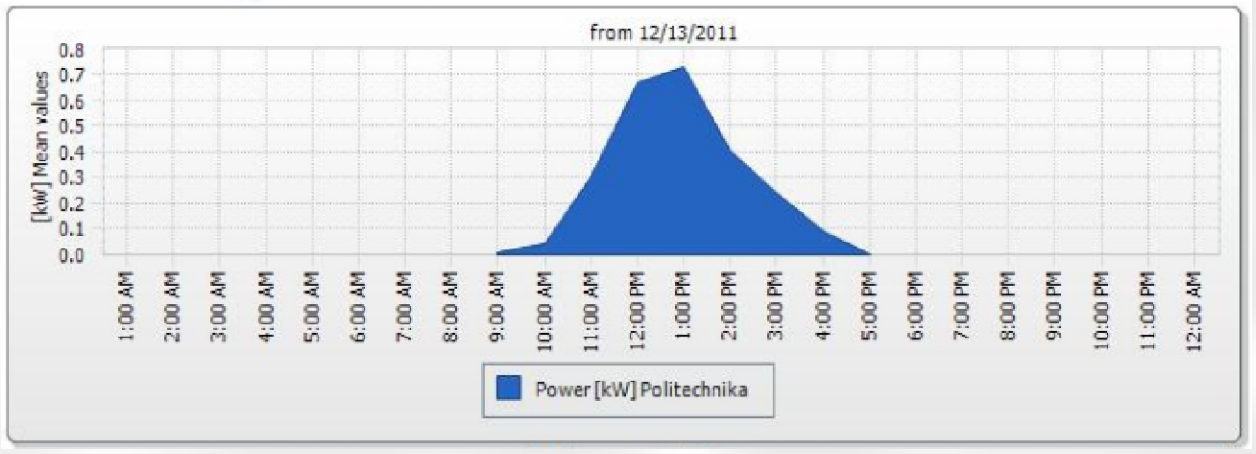
W świetle powyższych danych należy podkreślić unikalny profil produkcji typowej instalacji fotowoltaicznej, predestynujący ją szczególnie do zastosowań przemysłowych, w tym w przemyśle przetwórczym i mleczarskim. Ze względu na typowy dobowy przebieg oświetlenia w klimacie umiarkowanym instalacje fotowoltaiczne w sposób szczególnie korzystny wyrównują niedobory energii elektrycznej w cyklu dobowym, notując najwyższą produkcję w okresie tzw. „szczytu energetycznego". Badania przeprowadzone w Katedrze Przyrządów Półprzewodnikowych i Optoelektronicznych PŁ w latach 2005-2013, dla różnych typów ogniw słonecznych, potwierdzają korzystny rozkład produkcji energii elektrycznej ze źródeł fotowoltaicznych. Na podstawie pomiarów czterech typów modułów fotowoltaicznych złożonych z krzemu polikrystalicznego, krzemu wstęgowego, krzemu amorficznego oraz diselenku indowo-miedziowego stwierdzono występowanie najwyższej produkcji energii PV ze źródeł fotowoltaicznych między godzinami: 8:00 ÷ 18:00 w okresie letnim. Jest to okres tzw. szczytów energetycznych, w tym również zwiększonego zapotrzebowania w trakcie pracy większości zakładów

przetwórstwa spożywczego. Przykładowe wykresy rozkładu produkcji energii elektrycznej z instalacji fotowoltaicznej umieszczonej w regionie łódzkim, w okresie letnim przedstawia wykres 7a. W okresie zimowym obserwowany jest rozkład zbliżony do normalnego o wartości średniej przypadającej we wczesnych godzinach popołudniowych i znacznie mniejszej wariancji, co przedstawia wykres 7b.

a)




b)



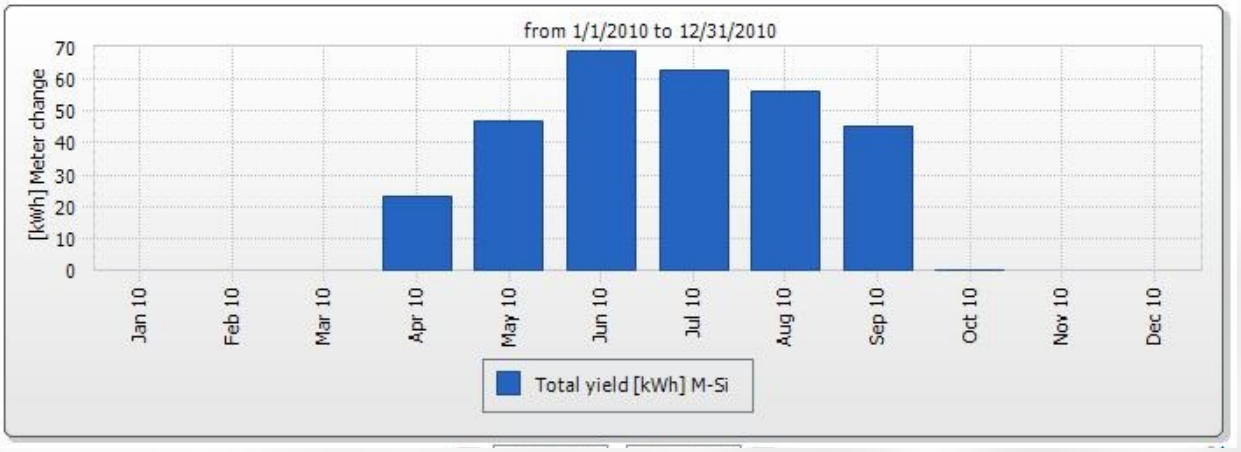

Wykres 7. Typowe przebiegi generacji energii fotowoltaicznej w cyklu dobowym w okresie letnim (lipiec) (a) [7] i zimowym (grudzień) (b)[2].

*Źródło: [7] oraz badania własne.*

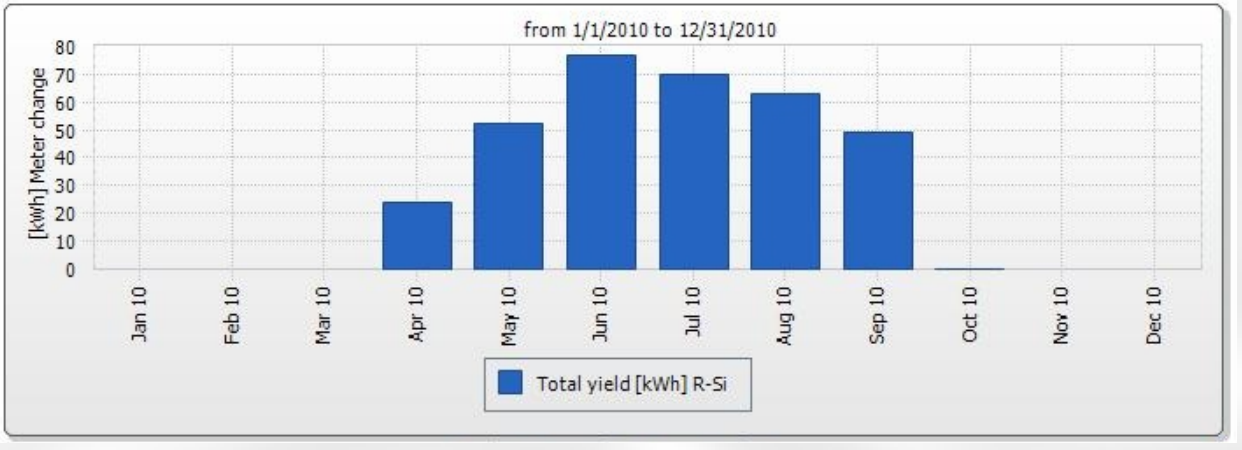
*2)Przedstawiono wyniki uśrednione dla czterech typów ogniw fotowoltaicznych: a-Si, c-Si, ribbon Si, CIS.*

Również produkcja energii ze źródeł fotowoltaicznych w cyklu rocznym, jest dopasowana do potrzeb zakładów, przetwórstwa spożywczego ze względu na zwiększone zużycie energii elektrycznej w okresie letnim, spowodowane uruchamianiem agregatów chłodniczych. Przykładowe, uśrednione rozkłady produkcji energii ze źródeł fotowoltaicznych dla wybranych typów instalacji fotowoltaicznych przedstawia wykres 8.

a




b

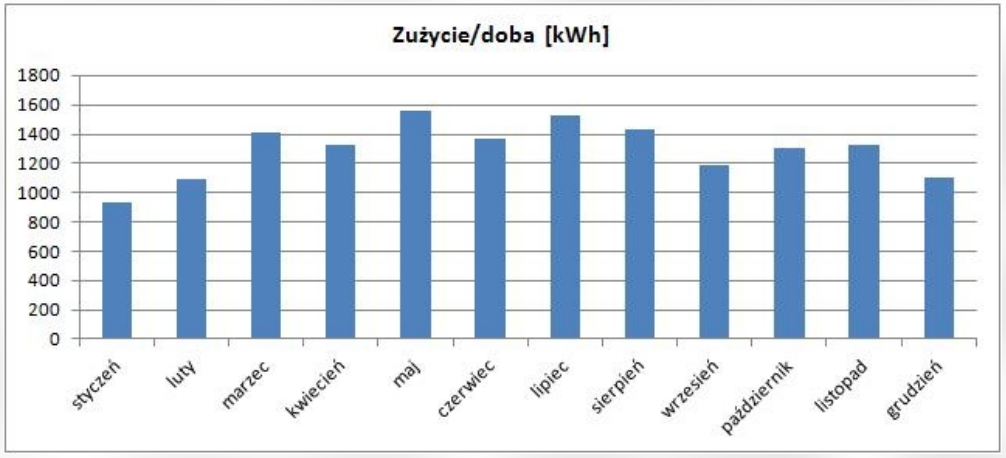



Wykres 8. Przykładowe wyniki generacji energii ze źródeł fotowoltaicznych opartych o krzem polikrystaliczny (a) oraz o krzem wstęgowy (b).
*Źródło: [7] oraz badania własne.*

Obserwując te zależności, jak również biorąc pod uwagę pozamiejską lokalizację, przy częstym oddaleniu od linii zasilających - rozważyć należy praktyczne wykorzystanie fotowoltaiki do zasilania zakładów przetwórstwa mleczarskiego. W tym celu zasadne jest zbadanie rzeczywistego zapotrzebowania energetycznego tych zakładów.

W wyniku przeprowadzonych badań stażowych uzyskano dane dotyczące rzeczywistego zużycia energii elektrycznej w poszczególnych porach roku, a także dokładnych rozkładów dobowych konsumpcji energii elektrycznej. Dane tego rodzaju, choć zazwyczaj trudne do uzyskania, są bardzo cennym źródłem dla analizy zużycia energii, a przez swoją dokładność dają szansę lepszego, potencjalnego dopasowania przygotowywanego projektu rzeczywistej instalacji fotowoltaicznej. Jednocześnie dzięki przekrojowemu charakterowi pomiarów uzyskać można informację na temat średniego zapotrzebowania przedsiębiorstw w danym sektorze co daje szansę opracowania uniwersalnych rozwiązań technologicznych, dopasowanych do rzeczywistych potrzeb energetycznych odbiorców.

Pierwszym etapem prowadzonych pomiarów było sprawdzenie średniorocznego rozkładu zużycia energii elektrycznej w średniej wielkości zakładach mleczarskich. Uzyskane w ten sposób dane obrazuje wykres 9.




Wykres 9. Rozkład zużycia energii elektrycznej średniej wielkości zakładu mleczarskiego w cyklu rocznym.
*Źródło: opracowanie własne.*

Uzyskane dane pozwoliły wstępnie potwierdzić charakter rozkładu konsumpcji energii elektrycznej ze szczytem w okresie wiosenno-letnim ze zmiennością roczną w wysokości ok. 40%. W celu uzyskania precyzyjnych wartości zapotrzebowania w całym badanym okresie konieczna była analiza statystyczna danych chwilowych pochodzących z rejestratorów energii elektrycznej. Na tej podstawie uzyskano dane wyjściowe do przygotowania projektu instalacji energetycznej opartej o źródła fotowoltaiczne. Przygotowanie właściwych komponentów systemu fotowoltaicznego, dopasowanie ich do potrzeb danego odbiorcy, sposób połączenia z siecią zasilającą, warunki dostarczania i poboru energii a wreszcie integracja z budynkiem lub inną konstrukcją nośną wpływają w zasadniczy sposób na parametry techniczne i ekonomiczne inwestycji. Z tego powodu pierwszym, koniecznym etapem inwestycji obejmującej wykonanie instalacji fotowoltaicznej, jest właściwy wieloetapowy proces projektowania.

Wstępnym założeniem było przygotowanie projektu instalacji energetycznej pokrywającej kompletne - 100 % zapotrzebowanie roczne na energię elektryczną w zakładzie mleczarskim, bez uwzględnienia potencjalnego

zużycia projektowanego reaktora biogazowego. Przyjęto następujące dane wyjściowe do wstępnego etapu projektu:

- Skumulowane roczne zużycie za rok 2012 (grudzień 2012 - aproksymacja): 481 MWh.
- Maksymalne miesięczne zużycie: 48,329 MWh (maj).
- Minimalne miesięczne zużycie: 28,892 MWh (styczeń).
- Rozrzut maksymalny: 39%.
- Rozkład: w/g rejestracji.
- Założenia: Lokalizacja region łódzki.
- Warunki nasłonecznienia: AM1,5.
- Przyjęta średnia moc promieniowania słonecznego 1000W/m$^2$.
- Proponowana moc systemu: 450 kWp.
- Technologia: Krzem polikrystaliczny.
- Sposób montażu: na gruncie pod kątem zoptymalizowanym względem wielkości produkowanej energii.

Na podstawie tak przyjętych założeń zwymiarowano wstępnie instalację fotowoltaiczną. Wymiarowanie instalacji jest jednym z najważniejszych etapów jej projektowania i powinno być wykonane przy użyciu profesjonalnych narzędzi CAD. Podstawowymi kryteriami wymiarowania instalacji fotowoltaicznej są oprócz położenia geograficznego i dostępnej powierzchni również warunki jej zacienienia, lub częściowego zacienienia, oraz uwarunkowania finansowe. Zakładana moc szczytowa i dostępna powierzchnia modułów służy zazwyczaj jako kryterium wyboru konkretnych modułów. W niektórych przypadkach preferowana technologia wykonania może również narzucić wybór konkretnych produktów. Poprzez wykorzystanie większych modułów uzyskuje się zazwyczaj obniżenie kosztów instalacji, jakkolwiek takie rozwiązanie może wpłynąć na ograniczenie możliwości montażowych. Generalnie łączna liczba modułów jest określana poprzez stosunek łącznej mocy wymaganej do szczytowej mocy modułu, przy uwzględnieniu całkowitych strat w systemie.

Tabela 2. Podstawowe dane instalacji PV - projekt PV GIS.

| Moc nominalna | 450kWp |
|---|---|
| Typ modułów | Krzem krystaliczny |
| Starty temperaturowe | 7,5% |
| Straty odbiciowe | 3% |
| Straty przetwarzania energii | 14% |
| Starty łącznie | 22,8% |
| Azymut | 0$^o$ |
| Nachylenie | 35$^o$ |

*Źródło: opracowanie własne.*

Tabela 3. Zestawienie podstawowych danych energetycznych projektu PV GIS.

| Miesiąc | $E_d$ [kWh] | $E_m$[kWh] | $H_d$[kWh/m$^2$] | $H_m$[kWh/m$^2$] |
|---|---|---|---|---|
| Styczeń | 427 | 13200 | 1,11 | 34,3 |
| Luty | 761 | 21300 | 2,02 | 56,6 |
| Marzec | 1130 | 35000 | 3,08 | 95,6 |
| Kwiecień | 1450 | 43400 | 4,13 | 124 |
| Maj | 1760 | 54400 | 5,22 | 162 |
| Czewiec | 1620 | 48700 | 4,89 | 147 |
| Lipiec | 1710 | 53000 | 5,18 | 161 |
| Sierpień | 1600 | 49700 | 4,81 | 149 |
| Wrzesień | 1190 | 35800 | 3,45 | 104 |
| Październik | 951 | 29500 | 2,66 | 82,3 |
| Listopad | 485 | 14500 | 1,30 | 38,9 |
| Grudzień | 307 | 9520 | 0,80 | 24,8 |
| Średnio rocznie | 1120 | 34000 | 3,23 | 98,2 |
| Łącznie | | 408000 | | 1180 |

$E_d$ - średnia dzienna produkcja energii,
$E_m$- średnia roczna produkcja energii,
$H_d$- średnie dzienne skumulowane oświetlenie na metr kwadratowy,
$H_m$- średnie roczne skumulowane oświetlenie na metr kwadratowy.

*Źródło: opracowanie własne.*

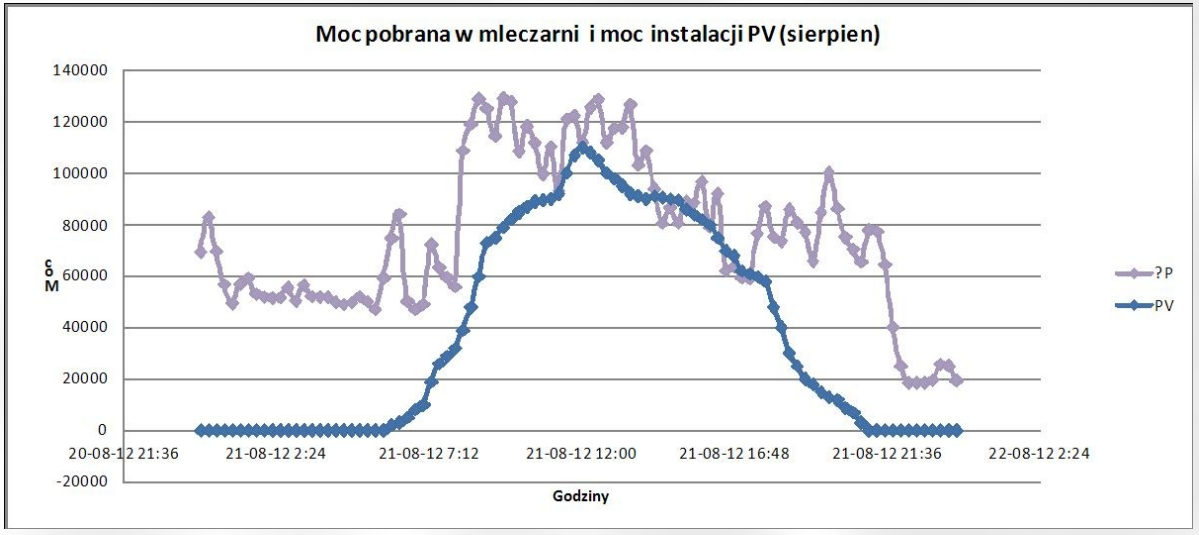
Do wstępnego zwymiarowania i oszacowania parametrów instalacji fotowoltaicznej wykorzystano europejską bazę meteorologiczną PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System Geographical Assessment of Solar Resource and Performance of Photovoltaic Technology). Jest to również program naukowy, demonstracyjny oraz narzędzie wspierania rozwoju OZE i idei rozproszonej generacji energii na bazie danych rzeczywistych, uzyskanych w jednostkach pomiarowych na terenie Europy i Afryki północnej. Za pomocą tego narzędzia, poprzez odpowiednie zwymiarowanie i przygotowanie projektu instalacji uzyskano dane o dużej zgodności z założeniami projektowymi (tabela 2), natomiast pełny rozkład energetyczny przygotowanego projektu przedstawia tabela 3.

Zaprojektowana w ten sposób instalacja pokrywa w całości roczne potrzeby energetyczne zakładu, jednak ze względu na okresowość produkcji nie jest dopasowana do rzeczywistego zużycia produkcyjnego. Z tego względu podjęto próbę dopasowania wielkości i struktury instalacji do zidentyfikowanego zużycia w celu jego maksymalnego zmniejszenia. Założeniem drugiej wersji projektu była wyłączna produkcja energii na potrzeby własne zakładu przy jak najlepszym dopasowaniu rozkładu do chwilowego zapotrzebowania wynikającego z obecnego profilu działalności. W tym celu przeprowadzono szereg symulacji na bazie danych rejestratorowych oraz danych meteorologicznych i obowiązujących przepisów prawnych. Obejmowały one:

- Obliczenie zapotrzebowania energetycznego odbiorników przy uwzględnieniu ich specyfiki, rozkładu dobowego, maksymalnego poboru chwilowego etc.
- Sprawdzenie lokalnych warunków nasłonecznienia z uwzględnieniem dostępności energii w różnych porach roku i cyklu dobowym. Na tym etapie należy uwzględnić orientację geograficzną budynku i jego powierzchni nośnych, a także ewentualne przeszkody terenowe, zacieniające projektowaną instalację.
- Sprawdzenie możliwości technicznych i opłacalności instalacji innych odnawialnych źródeł energii, w celu kogeneracji, lub warunków wykorzystania lokalnej sieci energetycznej.

- Sprawdzenie możliwości magazynowania energii elektrycznej.
- Sprawdzenie konieczności uzyskania odpowiednich pozwoleń budowlanych i warunków przyłącza energetycznego (jeśli planowane).
- Obliczanie wymaganej wielkości instalacji fotowoltaicznej (tak zwane wymiarowanie instalacji) przy uwzględnieniu powyższych punktów.

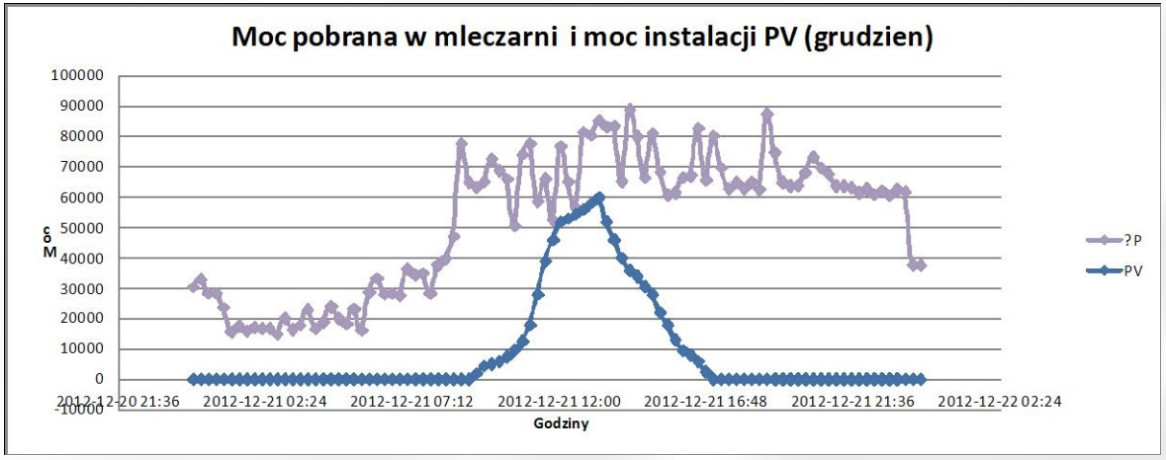
Zagadnienia współpracy instalacji z systemem utylizacji odpadów na bazie bioreaktora gazowego, jak również ewentualną możliwość magazynowania energii pochodzącej z instalacji fotowoltaicznej pozostawiono jako odrębną całość ostatniego etapu badań. W wyniku przeprowadzonych symulacji uzyskano wstępną architekturę systemu o mocy szczytowej trzykrotnie niższej od sprawdzanego wariantu wstępnego, zakładającego 100% pokrycia potrzeb energetycznych w bilansie rocznym. Z jej pomocą uzyskano bardzo dobre dopasowanie do krzywych zużycia energii zakładu zarówno w okresie letnim jak i zimowym, przy niemal zerowej nadprodukcji energii elektrycznej. Przykładowe wyniki symulacji dla okresu letniego przedstawiają wykresy 10 i 11.




Wykres 10. Moc pobrana w mleczarni i moc instalacji PV (sierpień).
*Źródło: opracowanie własne.*

Okres letni (dane na 21.08.2012r.). Zużycie (moc chwilowa czynna w W) mleczarni na podstawie danych z rejestratora. Symulacja instalacji PV o mocy 150kWp - symulacja na podstawie pomiarów własnych instalacji PV (K27 PŁ) oraz obliczeń komputerowych.

Otrzymane wyniki potwierdzają zasadność wykorzystania fotowoltaiki do zmniejszenia zużycia energii elektrycznej w zakładach o profilu mleczarskim. Uzyskano pokrycie zapotrzebowania na energię elektryczną zakładu na poziomie 77% w trakcie zmiany produkcyjnej w okresie letnim oraz na poziomie 30% w okresie zimowym.




Wykres 11. Moc pobrana w mleczarni i moc instalacji PV (grudzień).
*Źródło: opracowanie własne.*

Okres zimowy (dane na 21.12.2012r.). Zużycie (moc chwilowa czynna w W) mleczarni na podstawie danych z rejestratora. Symulacja instalacji PV o mocy 150 kWp - symulacja na podstawie pomiarów własnych instalacji PV (PŁ) oraz obliczeń komputerowych.

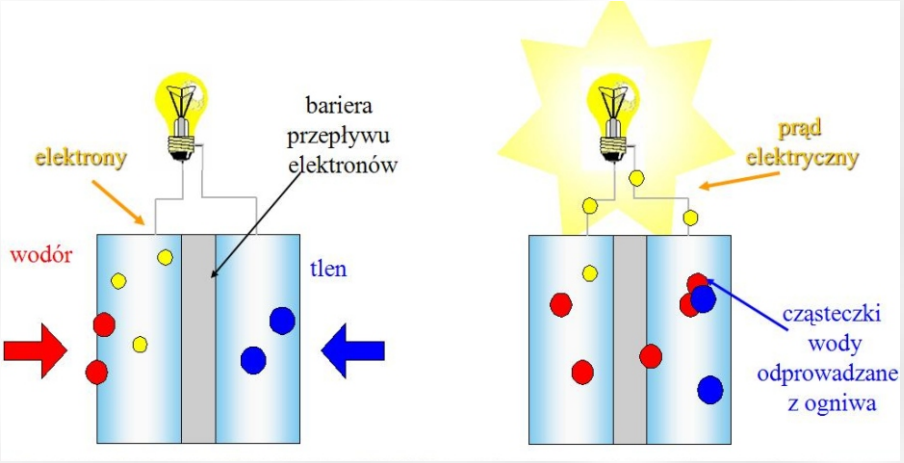
Należy podkreślić, że uzyskane rozwiązanie jest w pełni skalowalne w zależności od mocy maksymalnej, wykorzystywanej w określonym zakładzie. Przy wykorzystaniu instalacji na gruncie można też do pewnego stopnia sterować położeniem wartości średniej rozkładu opisującego produkcję energii w cyklu dobowym poprzez manipulację azymutalną modułów. Odchylenie od kierunku południowego nie powinno jednak przekraczać $15^{o}$ ze względu na łączną ilość produkowanej energii. Uzyskane wyniki posłużyć mogą do opracowania projektu optymalnej, skalowalnej instalacji fotowoltaicznej spełniającej warunki pracy w zakładzie o profilu mleczarskim, również przy wykorzystaniu innych alternatywnych źródeł energii.

## Magazynowanie i przetwarzanie energii ze źródeł fotowoltaicznych

Oddzielnym zagadnieniem jest możliwość wykorzystania do magazynowania energii wytworzonej w ogniwach słonecznych. W przypadku projektowania większych rozmiarów instalacji fotowoltaicznej nie da się uniknąć nadprodukcji energii w niektórych okresach pracy (np. dni wolne od pracy). Zakładając produkcję na potrzeby własne nie ma możliwości odsprzedaży nadwyżek energii do sieci zawodowej. Z tego powodu celowe jest rozważenie możliwości magazynowania energii i wykorzystania jej w okresach niedoboru produkcji ze źródeł fotowoltaicznych. Ze względu na dużą masę, małą gęstość energii, dodatkowe wymagania odnośnie bezpieczeństwa, a przede wszystkim krótki czas życia i związaną z nim konieczność wymiany akumulatorów kwasowych, ich wykorzystanie nie jest celowe w przygotowywanym rozwiązaniu. Akumulatory żelowe (z regulowanym zaworem), ze względu na jedynie nieco lepsze parametry eksploatacyjne również nie spełniają wymagań projektu.

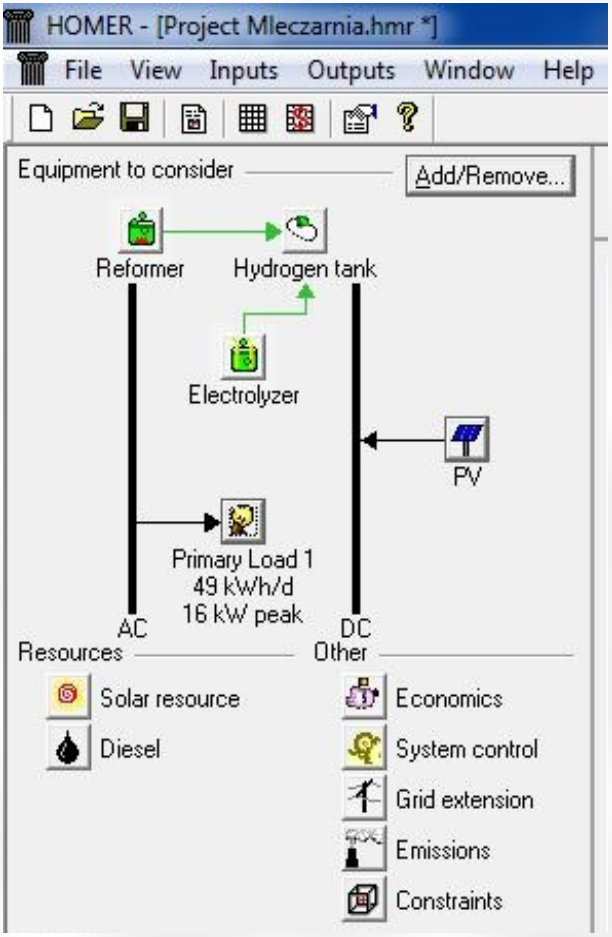
Nowoczesną i coraz bardziej popularną metodą wykorzystania biomasy jest produkcja biopaliw płynnych. Jednym z współcześnie wykorzystywanych nośników energii jest wodór. Produkcja wodoru może odbywać się na drodze elektrolizy wody, co jest metodą powszechnie znaną i łatwą do praktycznej aplikacji ze względu na prosty dostęp do substratu. Jest to jednak metoda energochłonna, a więc mało efektywna w systemach przetwarzania energii. Inną techniką jest produkcja wodoru z substancji organicznych, jakimi są np. węglowodory przetwarzane w procesie utylizacji odpadów mleczarskich. Wykorzystanie do tego celu specjalnego urządzenia reformera jest dużo bardziej efektywne energetycznie, a dodatkowo przyczynia się do poprawy wydajności utylizacji odpadów poprodukcyjnych. Uzyskany w ten sposób wodór może zostać wykorzystany do magazynowania energii wyprodukowanej w instalacji fotowoltaicznej i wykorzystywania jej w okresach mniejszej dostępności energii pochodzącej ze światła słonecznego. Do celu produkcji energii elektrycznej z wodoru przewidziana została w projekcie instalacja ogniwa paliwowego.

Ogniwo jest urządzeniem wytwarzającym energię elektryczną w sposób wydajny i całkowicie przyjazny dla środowiska. Zasadę jego działania paliwowego przedstawia schemat 1.




Schemat 1. Zasada działania ogniwa paliwowego.
*Źródło: opracowanie na podstawie [4].*

Produkcja energii elektrycznej w ogniwie paliwowym odbywa się wielostopniowo. W pierwszym kroku węglowodory (różne zależy od typu reakcji) $CH_2$, woda oraz tlen $O_2$ są przepuszczane przez substancję zwaną reformerem w celu uzyskania wodoru $H_2$, dwutlenku węgla, oraz tlenku węgla. Następnie do tych składników dodawana jest woda. Tlenek węgla jest zamieniany w dwutlenek węgla, powstaje woda. W ten sposób przygotowano wodór jako paliwo dla ogniwa, natomiast dwutlenek węgla jest utylizowany jako gaz odpadowy. W reakcji katalitycznej, zachodzącej w ogniwie paliwowym dwuatomowy wodór jest rozbijany na protony i elektrony. Protony przenikają przez barierę zanurzoną w elektrolicie wewnątrz ogniwa paliwowego, podczas gdy elektrony płynąc przewodem zewnętrznym generują prąd elektryczny. Następnie w drugiej części ogniwa elektrony i protony wodoru rekombinują z tlenem tworząc wodę. Produktami ubocznymi pracy ogniwa są zatem jedynie woda i ciepło. Jest zatem wysoce wskazane aby projektowaną instalację fotowoltaiczną uzupełnić o moduł




Schemat 2. Schemat systemu energetycznego mleczarni z wykorzystaniem źródeł fotowoltaicznych oraz instalacji fotowoltaicznej.
*Źródło: opracowanie własne.*

pozyskiwania wodoru i ogniwo paliwowe w celu poprawy jej efektywności, zwiększenia niezależności energetycznej zakładu a także usprawnienia procesu utylizacji odpadów mleczarskich.

Przykładowy system energetyczny mleczarni z wykorzystaniem instalacji fotowoltaicznej o mocy 150 kWp, reformera, elektrolizera, zbiornika wodoru oraz niezależnego obciążenia elektrycznego, skonstruowany w symulatorze HOMER (Hybrid Optimisation System) schemat 2.

## Podsumowanie

Zaprezentowane badania wskazują na dużą potencjalną użyteczność instalacji fotowoltaicznych w firmach produkcyjnych z branży mleczarskiej. W pracy rozważano udział instalacji fotowoltaicznych zarówno w charakterze dodatkowych źródeł energii, poprawiających efektywność energetyczną poprzez zmniejszenie zużycia własnego zakładu jak i elementu szerszego systemu energetycznego, obejmującego także utylizację odpadów mleczarskich. Na podstawie całorocznych badań profili rzeczywistego zużycia energii elektrycznej w zakładzie branży mleczarskiej określono zapotrzebowanie na energię elektryczną w zależności od wielu czynników związanych z eksploatacją urządzeń produkcyjnych i trybem pracy zakładu. Opracowano skalowalny model instalacji fotowoltaicznej, pracującej wyłącznie na potrzeby własne zakładu mleczarskiego i zaspokajającej do 77% jego zapotrzebowania w okresie produkcyjnym.

Dodatkowo zaproponowano pełniejszą integrację z systemem utylizacji odpadów mleczarskich nie tylko poprzez zaspokojenie ewentualnych potrzeb energetycznych tego systemu, lecz także poprzez wymianę energii chemicznej na elektryczną z wykorzystaniem węglowodorów pochodzących z rozkładu cząstek organicznych. Za pomocą instalacji ogniwa paliwowego, obejmującej układ produkcji wodoru, opisanej szerzej w odrębnym rozdziale monografii uzyskano możliwość efektywnego, długoterminowego magazynowania energii elektrycznej. W ten sposób zwiększono zarówno elastyczność systemu energetycznego zakładu, jak i popra-

wiono zagospodarowanie odpadów poprodukcyjnych. Rozważono również ewentualne włączenie systemu do ogólnej sieci energetycznej w perspektywie nowych uregulowań prawnych z zakresu odnawialnych źródeł energii.

## Bibliografia


[1] D. Chenneyi in Reliable, Affordable and Environmentally Sound Energy for America's Future Raport of the National Energy Policy Development Group U.S. Government 2001 ss. 1-170.

[2] World Bank Clean energy development: Towards an Investment Framework Development Committee of World Bank and International Monetary Found 2006 ss. 1-157.

[3] Comiss. ion of The European Communities Renewable Energy Road Map Summary of the Impact Assess. Ment Bruss. els 2007 ss. 1-7.

[4] S. M. Sze Physics of semiconductor devices John Wiley & Sons New York 1985 chapter 14 Solar Cells ss. 790-836.

[5] D. King M. Quintana, J. Kratochvil, D. Elliebee, B. Hansen Photovoltaic Module Performance and Durability Following Long-Term Field Exposure National Center for Photovoltaics Conference Denver 1998 ss. 1-21.

[6] M. Brown, A. Rosenthal Photovoltaic technical assistance to the Navajo tribal utility authority Raport of Sandia national Laboratories New Mexico 2002 ss. 1-3.

[7] W. Wallace, L Jingming, G. Shangbin The use of Photovoltaics for rural electrification in northwestern China National Renewable Energy Laboratory 1998 ss. 1-7.

[8] European Photovoltaic Industry Association: Market Report 2011.

[9] Connecting the sun, Solar photovoltaics on the road to large scale grid integration - European Photovoltaic Industry Assosiation, raport wrzesień 2012 ss. 1-21.

[10] http://www.pv-magazine.com/news/

[11] Rusztel M., Polska perspektywa Pakiet energetyczno-klimatycznego, Nowa Energia nr 4(10)/2009 ss. 5-8.

[12] S. M. Sze Physics of semiconductor devices John Wiley & Sons New York 1985 chapter 14 Solar Cells.

[13] Z. Jarzębski Energia słoneczna konwersja fotowoltaiczna PWN Warszawa 1990.

[14] http://www.imgw.pl/

[15] Sibiński Maciej, Jatczak Aleksandra, Wykorzystanie, rentowność i perspektywy rozwoju instalacji fotowoltaicznych w Polsce u progu wdrożenia nowego prawa energetycznego, Czysta Energia, 2012 nr 12, s. 25-28.

[16] http://re.jrc.ec.europa.eu

[17] Broszura branżowa: Słońce: Twój producent pieniędzy, Fotowoltaika Polska sp. z o.o., 2011, s. 4.

[18] http://www.ecofuss.com