

Politechnika Białostocka
Rozprawy Naukowe Nr 93

Lech Magrel

**Metodyka oceny efektywności
procesu fermentacji metanowej
wybranych osadów ściekowych**



Wydawnictwo Politechniki Białostockiej
Białystok 2002

Recenzenci:

dr hab. inż. Krzysztof Bartoszewski, prof. PWr.

prof. dr hab. inż. January Bień

© Copyright by Politechnika Białostocka
Białystok 2002

ISSN 0867-096X

Autor projektu okładki
Krystyna Krakówka

Skład i druk w Dziale Wydawnictw i Poligrafii Politechniki Białostockiej

Spis treści

Streszczenie polskie i angielskie	5
Wprowadzenie	7
1. Cel i zakres pracy	9
2. Charakterystyka procesów beztlenowych przeróbki osadów ściekowych	10
2.1. Fermentacja metanowa	10
2.2. Rodzaje modeli matematycznych kinetyki procesów fermentacji metanowej oraz modeli technologicznych	18
2.3. Podstawowe czynniki wpływające na proces fermentacji	21
2.3.1. Mieszanie	21
2.3.2. Odczyn	21
2.3.3. Temperatura procesu	23
2.3.4. Lotne kwasy tłuszczowe	26
2.3.5. Azot	26
2.3.6. Fosfor	28
2.4. Efektywność procesu fermentacji metanowej	29
3. Badania nad procesem fermentacji beztlenowej	31
3.1. Przedmiot i metoda badań	31
3.2. Metoda badań analitycznych	31
3.3. Metoda badań technologicznych	32
3.3.1. Opis modelu pierwszej komory fermentacyjnej	33
3.3.2. Opis modelu drugiego zestawu komór fermentacyjnych	35
3.4. Koncepcja badań	37
3.5. Wybór skali badań	37
3.6. Matematyczna interpretacja wyników badań	37
3.6.1. Analiza statystyczna wyników badań	37
3.6.2. Charakterystyka obiektu badań	38
4. Interpretacja wyników badań	45
4.1. Gnojowica	45
4.2. Osady z mleczarskich oczyszczalni ścieków	45
4.3. Osady z komunalnych oczyszczalni ścieków	46
4.4. Osady zmieszane	46
4.5. Wyniki badań (układ nieprzepływowy)	57

4.5.1. Substancje organiczne	57
4.5.2. Formy azotu	58
4.5.3. Lotne kwasy tłuszczowe, odczyn, kwasowość i zasadowość ...	61
4.5.4. Pozostałość po prażeniu, sucha pozostałość i straty po prażeniu	64
4.5.5. Biogaz	66
4.5.6. Zależności pomiędzy wskaźnikami zanieczyszczeń	67
4.6. Wyniki badań (układ przepływowy)	77
4.6.1. Substancje organiczne	77
4.6.2. Formy azotu	79
4.6.3. Lotne kwasy tłuszczowe i odczyn	81
4.6.4. Pozostałość po prażeniu, sucha pozostałość i straty po prażeniu	82
4.6.5. Biogaz	84
4.7. Ocena wyników badań	85
5. Opracowanie indeksu efektywności procesu stabilizacji beztlenowej osadów ściekowych	88
Podsumowanie	102
Wnioski	105
Piśmiennictwo	106
Spis rysunków	113
Spis tabel	117

Streszczenie

W pracy zaprezentowano wyniki badań nad procesem beztlenowej biodegradacji wybranych rodzajów osadów ściekowych i gnojowicy. Zwrócono w niej uwagę na wskaźniki decydujące o efektywności procesu. Stwierdzono, że istnieje możliwość wspólnej fermentacji metanowej osadów ściekowych pochodzących z oczyszczania ścieków komunalnych i mleczarskich oraz gnojowicy. Opracowany indeks efektywności procesu stabilizacji beztlenowej osadów ściekowych umożliwia określenie – za pomocą pomiaru czterech podstawowych wskaźników: azotu amonowego, lotnych kwasów tłuszczowych, zasadowości oraz chemicznego zapotrzebowania na tlen, oznaczonego metodą nadmanganianową, cieczy nadosadowej – stopnia stabilizacji beztlenowej mieszaniny osadów, oczekiwanego efektu stabilizacji w założonym dniu i określenie czasu, w którym zostanie osiągnięty założony efekt procesu.

METHODOLOGY OF EVALUATION OF METHAN FERMENTATION EFFECTIVENESS OF THE SELECTED SEWAGE SLUDGE

Abstract

The paper presents the results of researches on anaerobic biodegradation of chosen sludge. It also presents the analyze of liquid manure treatment and sewage treatment in municipal and dairy waste water treatment plants located in the north eastern part of Poland. The main parameters for effectiveness of anaerobic digestion were indicated. The possibility of common methane digestion of liquid manure and municipal and dairy sewage sludge was proved. The indicator rate of anaerobic biodegradation velocity was working out. It is important indicator showing the expected time of anaerobic digestion to obtain decomposition of organic substances in combined sewage and liquid manure sludge.

Wprowadzenie

Osady ściekowe stanowią średnio 2–3% objętości ścieków dopływających do oczyszczalni i są normalnym produktem oczyszczania. Ich przeróbka i unieszkodliwianie to nieodłączna część procesów w oczyszczalni ścieków. Do głównych procesów stabilizacji osadów należą procesy biologiczne (tlenowe i beztlenowe), chemiczne oraz termiczne.

Stabilizacja tlenowa jest procesem wystarczająco efektywnym, ale bardzo energochłonnym. W ostatnich dwudziestu latach nastąpił znaczący postęp w technologii fermentacji beztlenowej (metanowej) osadów ściekowych. Stosuje się ją coraz powszechniej do stabilizacji osadów ściekowych, a także do oczyszczania silnie stężonych ścieków organicznych. Opóźnienie w zakresie wiedzy o osadach w stosunku do wiedzy o ściekach wynosi trzydzieści lat [1].

Fermentacja metanowa jest najczęściej stosowanym procesem stabilizacji osadów w średnich i dużych oczyszczalniach ścieków. Stosuje się ją w oczyszczalniach ścieków obsługujących jednostki osadnicze liczące ponad 15 000 mieszkańców, o przepustowości minimum 5 000 m³/d [2].

Ilość osadów ściekowych powstających w oczyszczalniach ścieków komunalnych i oczyszczalniach ścieków bytowo-gospodarczych w województwie podlaskim szacuje się na około 20 000 ton suchej masy w ciągu roku [3]. W Polsce – około 2 200 000 ton suchej masy osadów w ciągu roku [4]. Ilość osadów, powstających podczas oczyszczania ścieków mleczarskich szacuje się: w województwie podlaskim na około 2 000 ton suchej masy w ciągu roku [5], w Polsce – na około 10 000 ton suchej masy w ciągu roku.

Ilość gnojowicy pochodzącej z ferm tuczu trzody chlewnej i bydła oraz z gospodarstw o obsadzie powyżej 30 sztuk (bydła lub trzody chlewnej) w województwie podlaskim szacuje się na około 20 000 ton suchej masy w ciągu roku (dane na podstawie ankiet), w Polsce – 330 000 ton suchej masy w ciągu roku.

Stabilizację beztlenową osadów w regionie północno-wschodnim Polski prowadzi tylko pięć oczyszczalni ścieków oczyszczających ścieki komunalne i bytowo-gospodarcze. Z wykonanego bilansu ilości osadów wynika, że w regionie tym procesowi fermentacji, dla uzyskania produktu nadającego się do zagospodarowania, może być poddawane około 24 000 ton suchej masy.

Zagospodarowany może być jedynie osad ustabilizowany. Amerykańska Agencja Ochrony Środowiska (EPA) dzieli procesy stabilizacji na dwie grupy:

- procesy dające daleko idącą stabilizację i higienizację osadu – najwyższej jakości – **Klasy A**, kwalifikującej osad do aplikacji powierzchniowej w rolnictwie,
- procesy dające stabilizację i częściową higienizację osadu – **Klasy B**, kwalifikującej osad do iniekcji dogłębowej lub do zdeponowania na składowisku [6].

W pracy przedstawiono wyniki badań* własnych nad procesem stabilizacji beztlenowej z udziałem osadów pochodzących z oczyszczania ścieków komunalnych, mleczarskich i gnojowicy, występujących szczególnie w regionach rolniczo-przemysłowych. Nerozwiązanym problemem w procesie fermentacji osadów ściekowych jest jednak opracowanie metody oceny stopnia stabilizacji osadu. Na ten aspekt zwrócono szczególną uwagę.

1. Cel i zakres pracy

Zmiany ekonomiczne i prawne, które nastąpiły w ostatnich latach dwudziestego wieku, spowodowały inne podejście do zagadnienia przeróbki i unieszkodliwiania osadów ściekowych pochodzących z oczyszczalni ścieków miejskich, bytowo-gospodarczych oraz przemysłowych (zwłaszcza przemysłu mleczarskiego), a także osadów z gnojowicy. Racjonalne i bezpieczne, z punktu widzenia ochrony środowiska, wykorzystanie osadów powstających w oczyszczalniach ścieków jest jednym z ważniejszych współczesnych problemów gospodarki ściekowej. Wraz ze wzrostem ilości i stopnia oczyszczenia ścieków rośnie także ilość powstających osadów ściekowych.

W kontekście powyższych stwierdzeń celem naukowym pracy jest **opracowanie sposobu wyznaczania indeksu, który pozwoli ocenić efektywność procesu stabilizacji beztlenowej osadów w zależności od ich rodzaju i stopnia zmieszania.**

Celem praktycznym jest opracowywanie indeksu efektywności procesu, który pozwala kontrolować proces fermentacji beztlenowej.

Tezy pracy brzmią:

- **Możliwa jest łączna fermentacja osadów otrzymanych z oczyszczania ścieków mleczarskich, komunalnych i gnojowicy.**
- **Możliwe jest opracowanie indeksu efektywności procesu służącego do oceny stopnia przefermentowania osadu.**
- **Wartość indeksu efektywności procesu fermentacji można wykorzystać do oceny przebiegu procesu i możliwości stosowania procesu fermentacji metanowej.**

Przy tak określonych celach i tezach pracy należało dokładnie poznać skład fizyczno-chemiczny oraz charakter wybranych rodzajów osadów ściekowych i zbadać możliwości obniżenia wartości podstawowych wskaźników zanieczyszczeń tych osadów metodami biodegradacji beztlenowej.

Na przykładzie różnych obiektów – oczyszczalni ścieków komunalnych, mleczarskich, ferm tuczu trzody chlewnej i bydła zlokalizowanych w regionie północno-wschodniej Polski, przeprowadzono również analizę gospodarki osadami oraz gnojowicą.

* Fragmentaryczne wyniki badań były prezentowane na konferencjach naukowych krajowych i międzynarodowych i w innych publikacjach [8, 25-55].

2. Charakterystyka procesów beztlenowych przeróbki osadów ściekowych

2.1. Fermentacja metanowa

W czasie stabilizacji beztlenowej (fermentacji metanowej) osadów następują zmiany w zawartości i właściwościach ciał stałych oraz zmiany w ilości rozpuszczonych gazów. Celem stabilizacji beztlenowej jest:

- zmniejszenie suchej masy organicznej,
- zmniejszenie objętości,
- zmniejszenie wartości czasu ssania kapilarnego,
- zmniejszenie oporu właściwego osadu,
- pozbycie się zdolności osadu do zagniwania,
- zmniejszenie zawartości w osadach organizmów patogennych.

Fermentacja metanowa może być prowadzona w warunkach psychrofilowych (temperatura $\leq 20^{\circ}\text{C}$), mezofilowych (temperatura = $30\text{--}38^{\circ}\text{C}$) lub termofilowych (temperatura = $45\text{--}55^{\circ}\text{C}$). Stabilizacja beztlenowa osadów ściekowych w temperaturze 35°C (mezofilowa) stosowana jest powszechnie (od pięćdziesięciu lat) w oczyszczalniach ścieków o przepustowości powyżej $15\,000\text{ m}^3/\text{d}$ [16].

Fermentacja osadów ściekowych jest beztlenowym biologicznym procesem rozkładu (mineralizacji) złożonych wysokocząsteczkowych substancji organicznych, prowadzącym do ustabilizowania właściwości osadów. Zasadniczym produktem reakcji jest biogaz złożony głównie z metanu i dwutlenku węgla. Głównym celem fermentacji jest przemiana hydrofilowego, silnie uwodnionego, cuchnącego, o dużej lepkości i niebezpiecznego pod względem sanitarnym osadu ściekowego w łatwo odwadniający się, o małej lepkości, ziemisty osad [7].*

Proces fermentacji osadów jest procesem wielofazowym. Obecnie dzieli się go na cztery fazy:

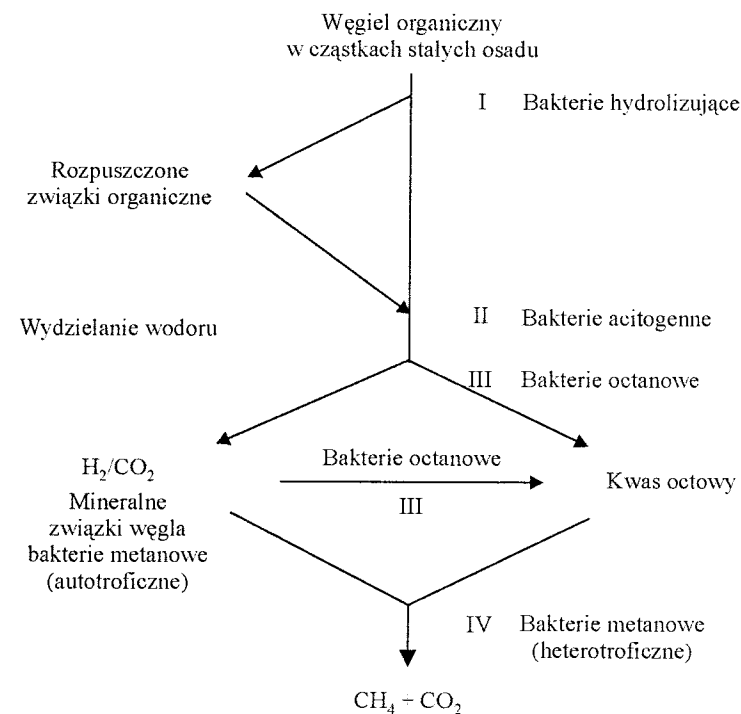
Faza I – hydroliza wielkocząsteczkowych związków organicznych.

Faza II – rozkład zhydrolizowanych substancji do kwasów organicznych (acidogeneza).

Faza III – rozkład kwasów organicznych do kwasu octowego (octogeneza).

Faza IV – rozkład octanów i kwasu octowego do metanu i bezwodnika kwasu węglowego (metanogeneza), [2].

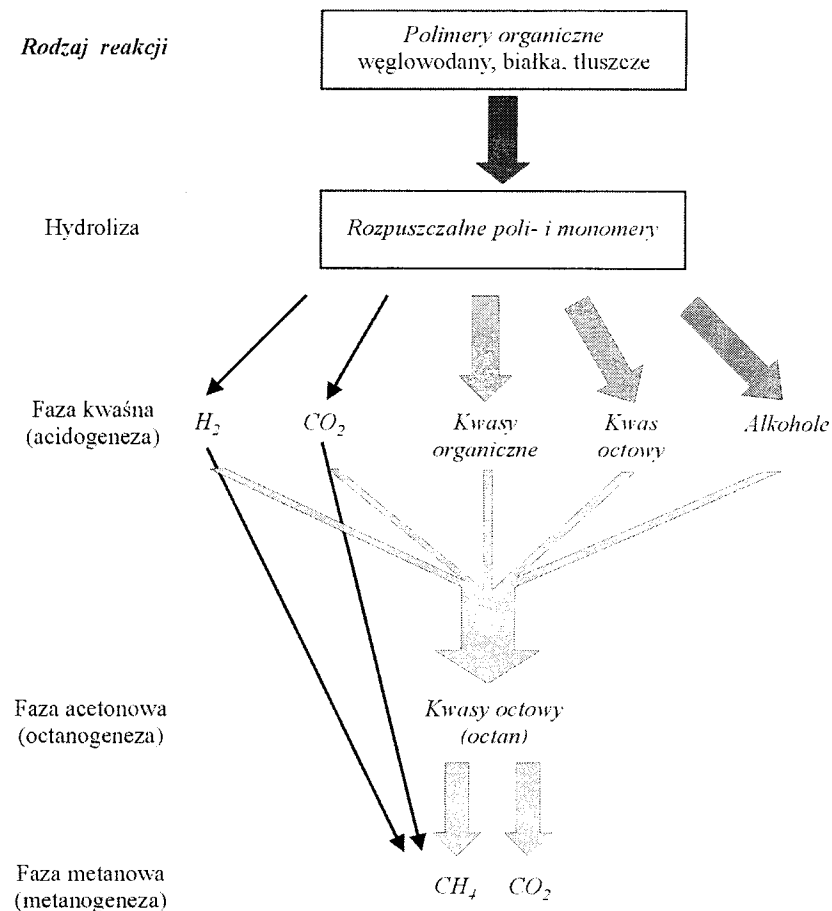
Fazy rozkładu związków organicznych zostały przedstawione na rysunkach 2.1 i 2.2.



Rys. 2.1. Fazy rozkładu cząsteczkowego

Źródło: [8]

* W ostatnich latach procesowi fermentacji osadów ściekowych poświęcono wiele prac badawczych. Pozwalają one dokładnie poznać mechanizmy procesu, a także stworzyć modele matematyczne przydatne do jego optymalizacji [10, 11, 12].



Rys. 2.2. Rozkład związków organicznych
Źródło: [8]

Przy fermentacji metanowej występują dwie główne drogi pozyskania metanu: **biologiczny rozkład** CH_3COOH – za pomocą metanowych bakterii heterotroficznych oraz **redukcja** CO_2 – za pomocą bakterii autotroficznych [10]. Przedstawiają to równania [2-1] i [2-2].

- dla bakterii heterotroficznych



- dla bakterii autotroficznych



Złożone substancje organiczne w procesie hydrolizy są rozkładane przez mikroorganizmy hydrolityczne, przede wszystkim na cukry proste, kwasy tłuszczowe i aminokwasy. Dalszy rozkład tych substancji przez bakterie kwasogenne prowadzi do powstania lotnych kwasów organicznych i alkoholi. Faza metanowa fermentacji nie jest w stanie przetworzyć wszystkich substancji metanogennych w gaz pofermentacyjny, zatem część produktów fazy kwaśnej przechodzi i zostaje w cieczy nadosadowej, powodując zwiększenie jej zanieczyszczenia związkami organicznymi.

Problemem tym zajmowali się między innymi następujący badacze:

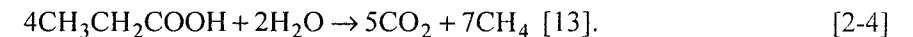
- Tarvin i Buswell, prowadząc badania nad rozkładem podczas fermentacji glukozy, wykazali obecność w cieczy nadosadowej kwasów: masłowego, propionowego i octowego [9],
- Keefer i Urtes stwierdzili, że rozkład niższych kwasów organicznych następuje jedynie w 61-82,1%, z czego wynika, że pozostała ich część zostaje w cieczy nadosadowej [9],
- Heukelekin i Müller stwierdzili, że rozkład kwasów organicznych w czasie fermentacji do metanu następuje w 70-90% [9],
- Buraczewski stwierdził, że w czasie fermentacji gnojowicy z niższych kwasów organicznych uzyskuje się tylko 10-15% gazu [18].

Przykładem fermentacji lotnych kwasów tłuszczowych (LKT) może być rozkład kwasu masłowego i propionowego według reakcji [2-3] i [2-4]:

- kwas masłowy:

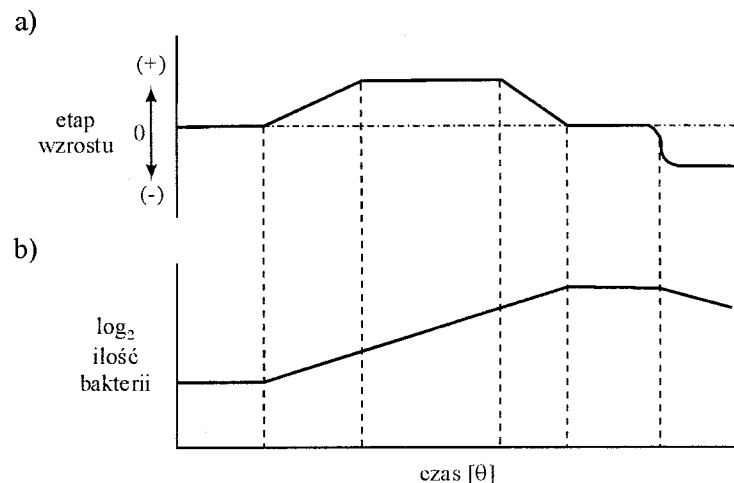


- kwas propionowy:

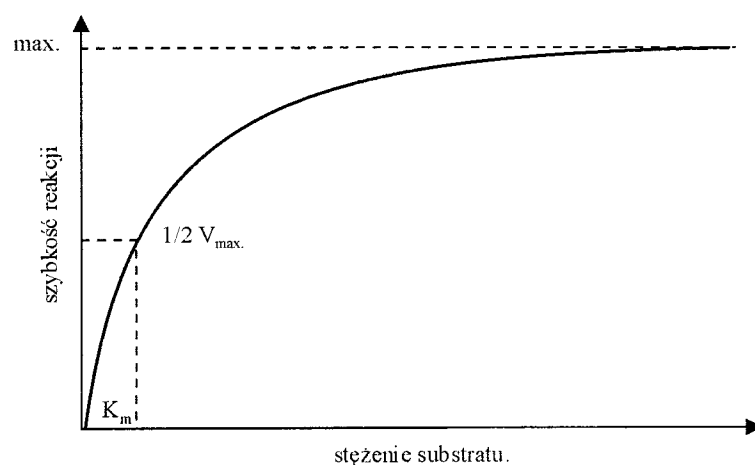


Główne zarysy technologii fermentacji metanowej zostały ustalone, a następnie udoskonalone, w latach trzydziestych dwudziestego wieku w Niemczech i Stanach Zjednoczonych Ameryki Północnej. Nowoczesną technologię zastosowano w dużych oczyszczalniach ścieków miejskich i przemysłowych. Kiedy powstały duże bezściółkowe fermi hodowlane, skorzystano z wypracowanych technologii i adaptowano sprawdzone rozwiązania do fermentacji metanowej płynnych odchodów zwierzęcych lub roślinnych odpadów rolniczych [9].

Dokładny schemat przemian substancji organicznych w warunkach beztlenowych przedstawiono na rysunku 2.3 i 2.4. Podczas fermentacji mogą występować wszystkie lub tylko wybrane procesy, pokazane na tych rysunkach. Zależy to od dominacji związków wchodzących w skład substancji organicznych zawartych w osadach poddawanych procesowi fermentacji metanowej [9].



Rys. 2.5. Fazy rozwoju mikroorganizmów według Monda
Źródło: [9, 13]



Rys. 2.6. Krzywa charakteryzująca szybkość reakcji biochemicznych
Źródło: [9, 13]

Przy innych warunkach środowiska lub dla odmiennych grup bakterii, fazy rozwoju mikroorganizmów będą miały przebieg podobny do tego, który jest przedstawiony na rysunku 2.5; nachylenie prostych na rysunku 2.5b będzie inne, co rzutuje na różne wartości współczynników kinetyki wzrostu. Szybkość reakcji biochemicznych zależy także od stężenia substratu [13], co schematycznie obrazuje rysunek 2.6. Szybkość reakcji (V) biochemicznego rozkładu substratu w warunkach optymalnych przedstawia równanie [2-5]

$$V = V_{\max} \times [S / (K_m + s)]$$

[2-5]

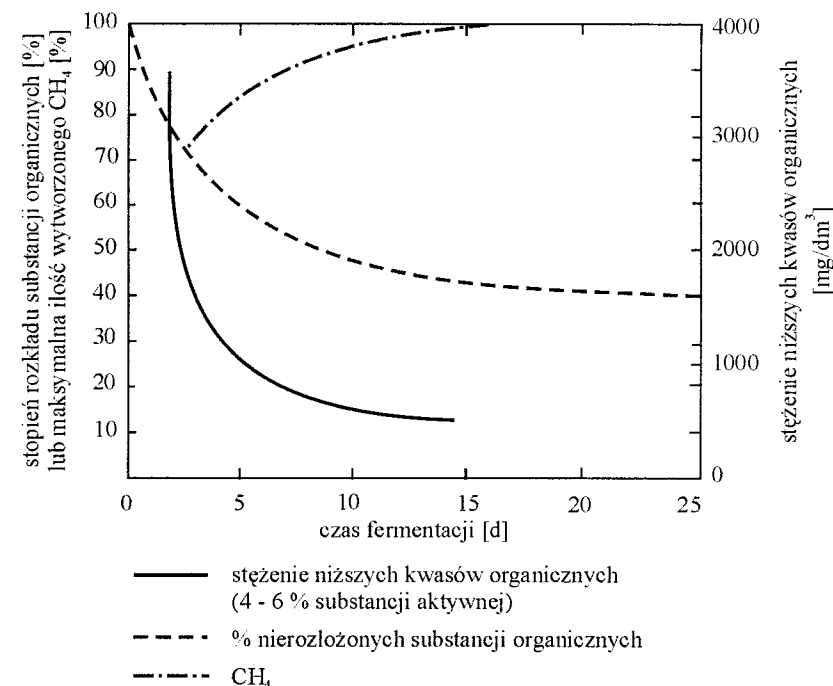
gdzie:

K_m – stała Michaelisa – Mentena,

S – stężenie substratu limitującego wzrost [9].

Obrazem graficznym równania [2-5] jest krzywa przedstawiona na rysunku 2.6.

Podstawowym produktem fermentacji jest gaz fermentacyjny. Ilość wytworzonego gazu jest wprost proporcjonalna do stopnia rozkładu substancji organicznych. Podczas pierwszych dziesięciu dni trwania procesu można uzyskać spadek zawartości związków organicznych mierzonych jako sucha masa organiczna od 7 do 50% (gnojowica świńska i osady ściekowe). W miarę dalszego prowadzenia procesu szybkość rozkładu maleje i po dwudziestu – dwudziestu pięciu dniach osiąga się od 30 do 60% rozkładu, co schematycznie pokazano na rysunku 2.7 [13].



Rys. 2.7. Charakterystyka fermentacji wysokoobciążonej w temperaturze 33-37°C
Źródło: [13]

2.2. Rodzaje modeli matematycznych kinetyki procesów fermentacji metanowej oraz modeli technologicznych

Do opisu procesu stabilizacji beztlenowej stosuje się trzy grupy modeli matematycznych, objaśniających kinetykę przemian zachodzących w komorach fermentacyjnych:

- w pierwszej grupie jako kryterium przyjmuje się wartości właściwej szybkości wzrostu (μ), współczynnik wydajności przemian substratu (Y) i czas fermentacji (SRT),
- w drugiej grupie jako kryterium przyjmuje się szybkość fermentacji niższych kwasów organicznych, a przede wszystkim kwasu octowego i masłowego,
- w trzeciej grupie kinetykę reakcji opisuje się według:
 - czasu rozkładu,
 - uzyskania biomasy łatwo ulegającej odwodnieniu,
 - uzyskania biomasy bezpiecznej pod względem sanitarnym [9].

Odrębną grupę stanowią modele technologiczne fermentacji metanowej, które opierają się na ocenie rozkładu masy organicznej do prostych składników chemicznych. Wyróżnia się następujące rodzaje fermentacji metanowej:

- fermentacja konwencjonalna – charakteryzuje się brakiem wymuszonego mieszania oraz rozwarstwieniem masy; strefa aktywnej fermentacji zajmuje dolną część komory,
- fermentacja z wysokoobciążoną komorą – strefa aktywnej fermentacji jest jednorodna i praktycznie zajmuje całą objętość komory,
- fermentacja z wysokoobciążoną komorą i recyrkulacją biomasy – charakteryzuje się zwiększoną wydajnością komory dzięki wprowadzeniu do recyrkulacji zagęszczonej masy wraz z mikroorganizmami [9].

Kinetyka produkcji gazu dla układu nieprzepływowego zależy od fazy rozkładu związków organicznych. Ilość wydzielonego gazu (G), w przypadku użycia do fermentacji niższych kwasów organicznych (S) i hodowli bakterii metanogennych, jest proporcjonalna do ilości rozłożonego kwasu i współczynnika wydajności reakcji. Krzywa wytwarzania gazu w czasie fermentacji ma kształt litery „S”, co obrazuje rysunek 2.8.

W początkowym okresie ilość gazu wytwarzana w jednostce czasu stale się zwiększa. Trwa to do chwili powstania w przybliżeniu połowy całkowitej ilości gazu. Faza ta nosi nazwę „fazy wzrostu logarytmicznego”. Szybkość reakcji tego etapu jest proporcjonalna do ilości powstającego gazu i opisana równaniem:

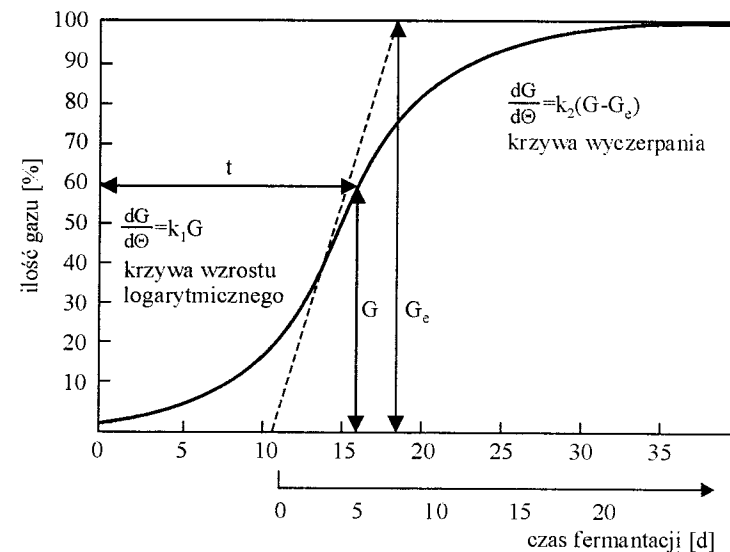
$$dG/d\tau_1 = k_1 \times G \quad [2-6]$$

gdzie:

G – ilość gazu otrzymana do czasu τ_1 [m^3/d],

τ_1 – czas trwania pierwszej fazy rozkładu [d],

k_1 – współczynnik szybkości reakcji w pierwszej fazie [d^{-1}].



Rys. 2.8. Kinetyka wytwarzania gazu podczas fermentacji w warunkach nieprzepływowych według Phelps'a
Źródło: [9]

Po przekształceniu:

$$k_1 \times \tau_1 = \ln G \quad [2-7]$$

Po osiągnięciu punktu przegięcia szybkość produkcji gazu zaczyna się systematycznie zmniejszać i powoli zanika. Ogólna ilość wytwarzanego gazu zbliża się do granicznej wielkości „ G_e ”. Szybkość drugiej fazy, „fazy wyczerpywania”, jest proporcjonalna do różnicy między praktycznie osiągalną ilością gazu a ilością gazu uzyskaną w danej chwili. Można to przedstawić za pomocą równania:

$$dG/d\tau_2 = -k_2 \times (G_e - G) \quad [2-8]$$

gdzie:

G_e – praktycznie osiągalna ilość gazu [m^3/d],

τ_2 – czas trwania drugiej fazy rozkładu [d],

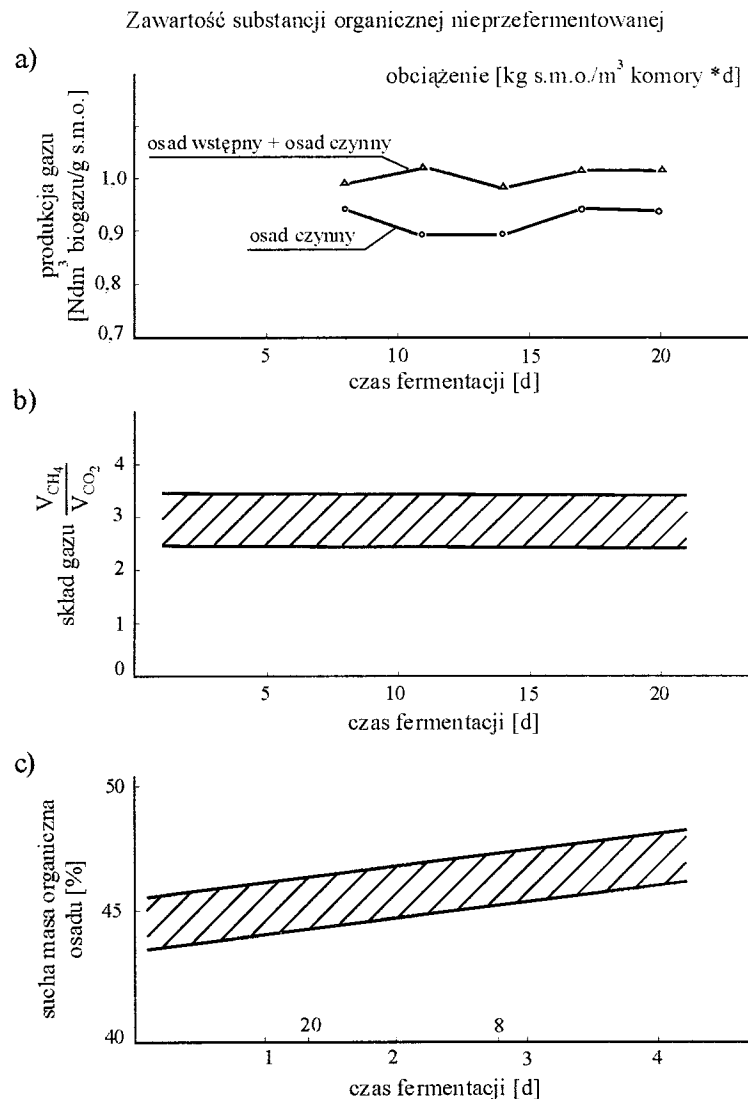
k_2 – współczynnik szybkości reakcji w drugiej fazie [d^{-1}],

G – jak we wzorze [2-6].

Po przekształceniu:

$$-k_2 \times \tau_2 = \ln[(G_e - G/G_e)], [9] \quad [2-9]$$

Na rysunku 2.9 przedstawiono wpływ czasu fermentacji na wydajność produkcji gazu i na skład gazu dla układu przepływowego.



Rys. 2.9. Produkcja gazu z osadów ściekowych w układzie przepływowym. Fermentacja mezofilowa
Źródło: [15]

2.3. Podstawowe czynniki wpływające na proces fermentacji

Na proces fermentacji wpływają przede wszystkim:

- skład chemiczny doprowadzonego substratu (osadu),
- temperatura fermentacji,
- czas fermentacji,
- ilość i częstotliwość doprowadzania osadu surowego,
- intensywność mieszania,
- odczyn,
- zawartość lotnych kwasów tłuszczowych i wartość zasadowości,
- zawartość substancji toksycznych [64].

2.3.1. Mieszanie

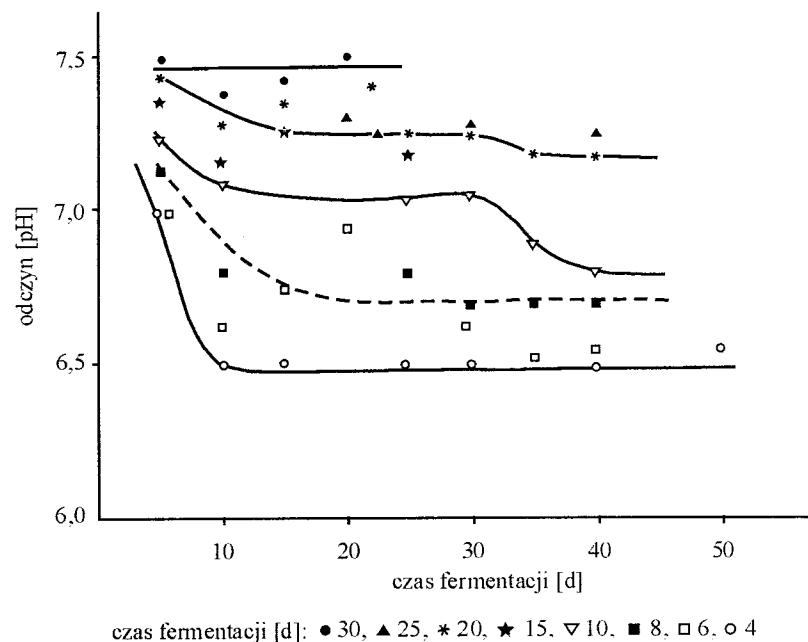
Poprzez mieszanie osadu zapewnia się jednorodność fermentującej masy w całej objętości komory. Intensywność mieszania zależy od temperatury procesu. Im wyższa temperatura fermentacji, tym większa musi być intensywność mieszania. W przypadku fermentacji mezofilowej wydajność dobowa urządzeń do mieszania powinna być od 6 do 10 razy większa niż wydajność przewidywana dla objętości komory [64].

W komorze fermentacyjnej różnica między zawartością suchej masy osadu na różnych głębokościach komory nie powinna przekraczać 5 kg s.m./m³ [2].

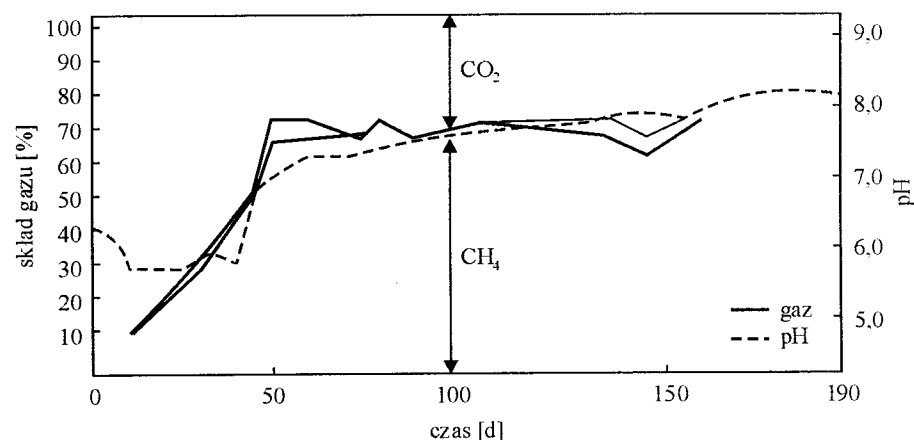
2.3.2. Odczyn

Bardzo ważny wpływ na stabilność pracy komór fermentacyjnych ma odpowiednia wartość odczynu. Odczyn osadu wpływa na rozwój mikroorganizmów odpowiedzialnych za proces fermentacji. Spowodowany on jest przede wszystkim obecnością w środowisku kwasów lotnych. W prawidłowo działającej komorze fermentacyjnej odczyn cieczy nadosadowej powinien wynosić od 7,0 do 7,2 pH, przy zawartości LKT od 100 do 500 g/m³ i zasadowości nie mniejszej niż 500 g/m³. Graniczne wartości odczynu wynoszą od 6,5 pH do 8,5 pH, a wartości LKT nie powinny być większe niż 2 000 mg CH₃COOH/dm³ [64]. Związek między odczynem procesu fermentacji a czasem prowadzenia procesu przedstawiono na rysunku 2.10.

Wpływ odczynu na skład gazu fermentacyjnego został przedstawiony na rysunku 2.11.



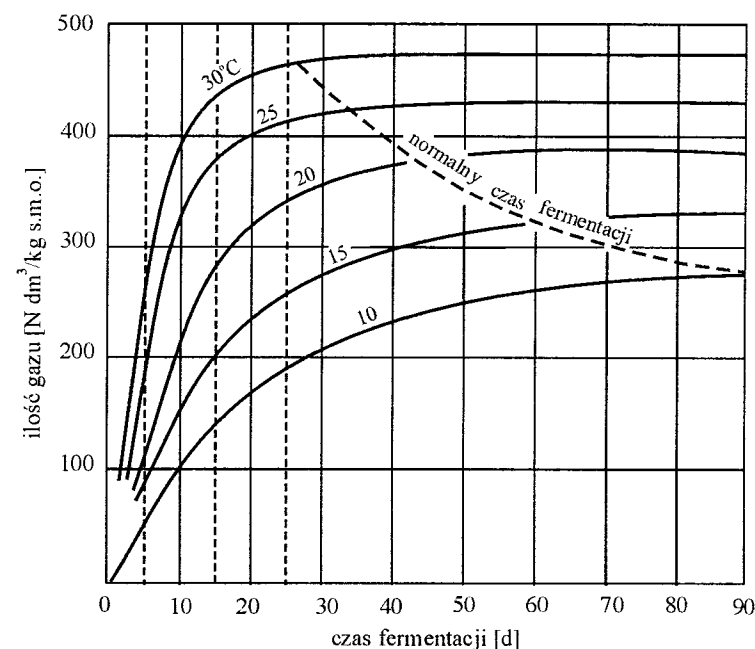
Rys. 2.10. Związek między czasem prowadzenia procesu, obciążeniem i wartością odczynu
Źródło: [15]



Rys. 2.11. Wpływ odczynu osadów ściekowych na skład gazu fermentacyjnego
Źródło: [14]

2.3.3. Temperatura procesu

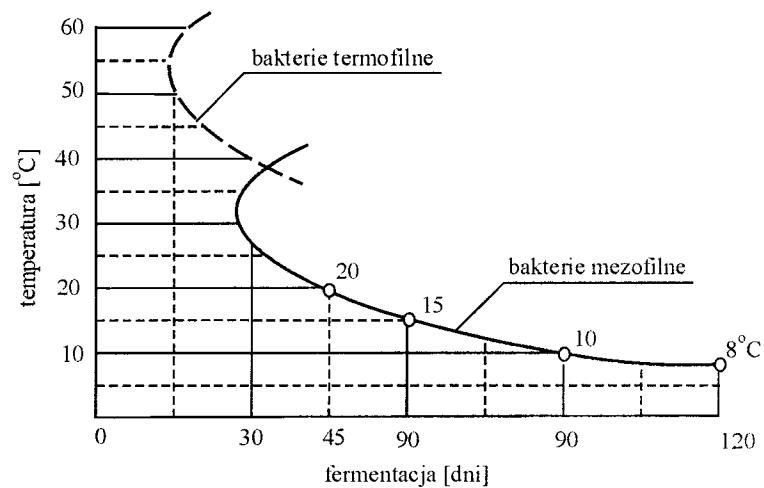
Istotnym parametrem decydującym o równowadze dynamicznej w komorze fermentacyjnej jest temperatura. Gwałtowne zmiany temperatury w ciągu doby powodują obumieranie bakterii metanowych. Konsekwencją tych zmian jest wzrost stężenia lotnych kwasów w komorze i związany z tym gwałtowny spadek zasadowości i odczynu. W czasie eksploatacji komór fermentacyjnych dopuszcza się zmiany temperatury do dwóch stopni w ciągu doby [64]. Wpływ temperatury na czas fermentacji i ilość powstającego biogazu pokazano na rysunkach 2.12; 2.13 i 2.14.



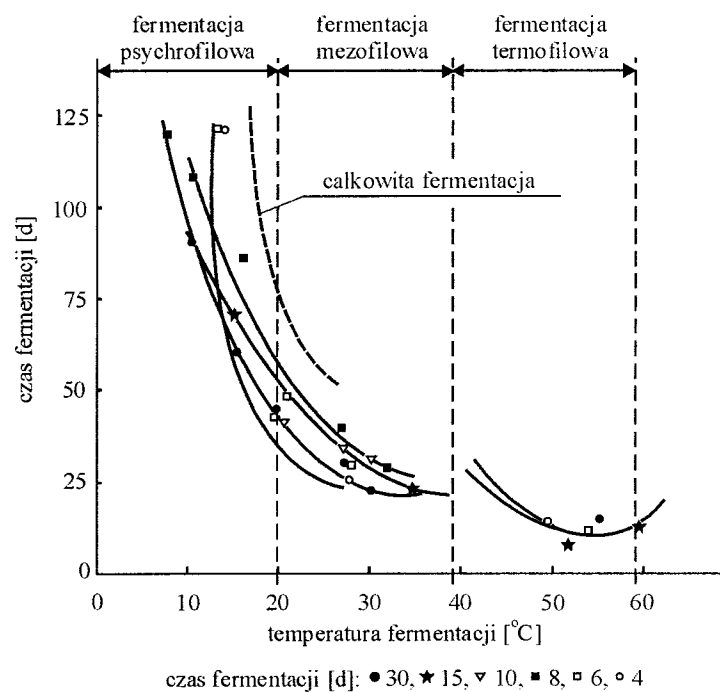
Rys. 2.12. Ilość gazu uzyskana z 1 kg suchej masy organicznej osadu doprowadzonego do komory fermentacji
Źródło: [80]

Zależność między temperaturą, ilością wytworzonego biogazu a czasem trwania procesu fermentacji metanowej gnojowicy świńskiej i bydlęcej przedstawiono graficznie na rysunku 2.15.

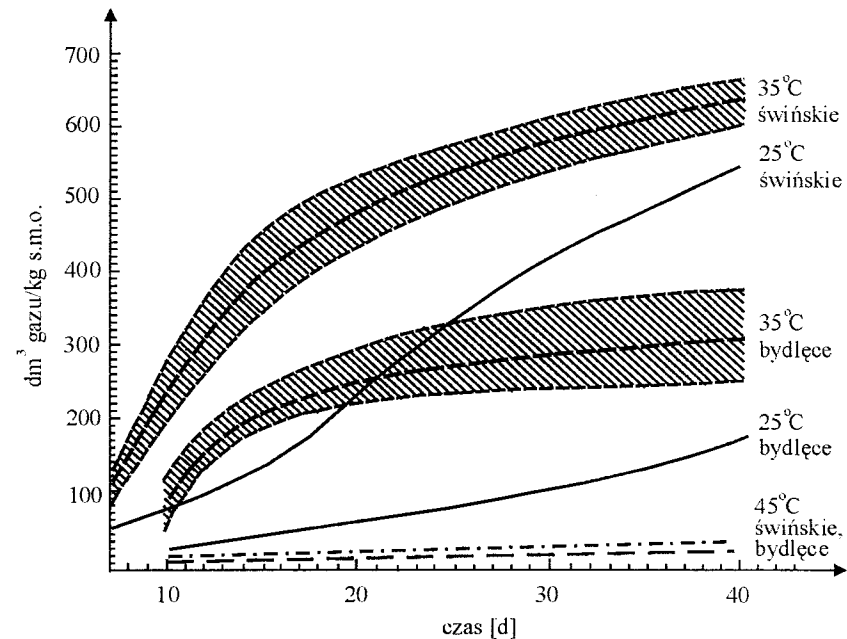
Wpływ temperatury na rozkład substancji organicznych osadu przedstawiono na rysunku 2.16.



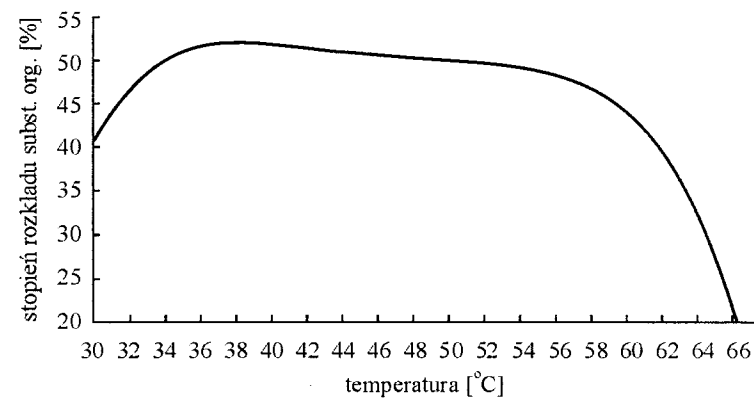
Rys. 2.13. Normalny czas fermentacji osadu w różnej temperaturze (według Imhoffa)
Źródło: [80]



Rys. 2.14. Wpływ temperatury na czas fermentacji osadu
Źródło: [15]



Rys. 2.15. Wpływ temperatury na wytwarzanie gazu z różnego rodzaju gnojowicy
Źródło: [13]



Rys. 2.16. Wpływ temperatury na czas rozkładu substancji organicznych (według Goluekiego)
Źródło: [14]

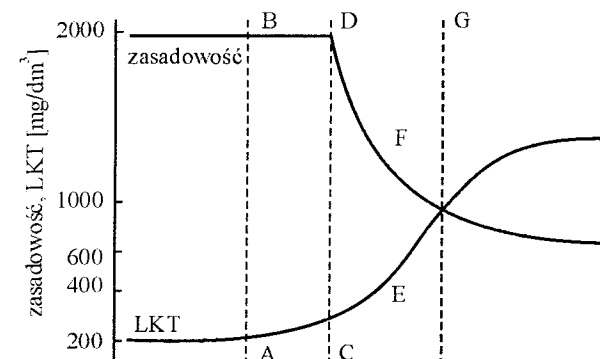
2.3.4. Lotne kwasy tłuszczowe

W prawidłowo przebiegającej fermentacji metanowej zawartość kwasów lotnych wynosi od 100 do 500 g/m³, przy zasadowości nie mniejszej niż 500 g CaCO₃/m³. Wartość odczynu zależy od zdolności buforowych osadu w komorze. Na zdolność buforową wpływa zasadowość (ilość węglanów i kwaśnych węglanów) oraz ilość kwasów organicznych w formie niezdysocjowanej. Zwiększenie zawartości kwasów lotnych wpływa na obniżenie się odczynu, co zwiększa toksyczność kwasów lotnych w stosunku do bakterii metanowych. Zwiększenie zawartości kwasów niezdysocjowanych powoduje, że kwasy te reagują z zasadami, zwiększając zawartość dwutlenku węgla. Konsekwencją tego procesu jest spadek wartości pH. Zmiany tych wielkości są przedstawione schematycznie na rysunku 2.17.

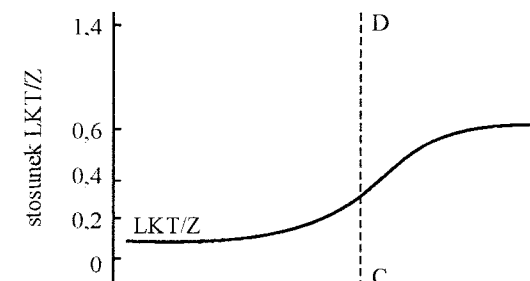
Z wykresu wynika, że szybkie obniżenie odczynu następuje wtedy, gdy proces fermentacji uległ załamaniu. Dobrym wskaźnikiem oceny prawidłowego przebiegu procesu fermentacji metanowej jest wartość stosunku lotnych kwasów tłuszczowych do zasadowości. Wzrost tego stosunku poprzedza w czasie gwałtowne obniżenie pH. Bieżąca kontrola wartości tego stosunku pozwala na prostą ocenę przebiegu procesu fermentacji. Podstawowym działaniem przeciwko obniżaniu się odczynu lub wzrostowi wartości stosunku lotnych kwasów tłuszczowych (LKT) do zasadowości jest neutralizacja osadu w komorze za pomocą zasad lub niektórych soli. Dane z eksploatacji wykazują, że dawka wapna, w przeliczeniu na Ca(OH)₂, do neutralizacji jest równa zawartości lotnych kwasów mierzonych w miligramach na litr. Wprowadzenie reagentów do komory powinno być rozłożone w czasie, ponieważ część z nich będzie reagować z dwutlenkiem węgla zawartym w biogazie. Spowoduje to zmniejszenie objętości gazu w komorze. Zbyt duża jednorazowa dawka reagenta może doprowadzić do gwałtownego spadku ciśnienia gazu w komorze, aż do wytworzenia podciśnienia, czego konsekwencją może być zassanie powietrza do gazu [16].

2.3.5. Azot

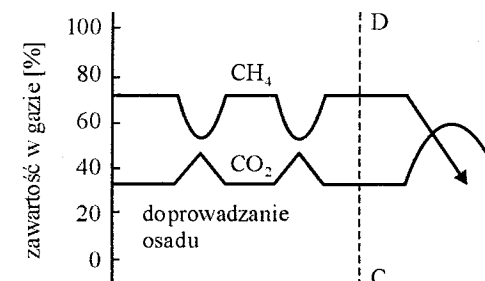
W procesie beztlenowego rozkładu substancji organicznych azot organiczny przechodzi w azot amonowy, a część azotu organicznego jest wiązana w biomase. Związanie azotu w biomase zależy od stosunku C:N w substratach. Efektywność tworzenia azotu amonowego zależy od obciążenia komory fermentacyjnej oraz temperatury, w której proces zachodzi. Snell w swojej pracy zauważył, że azot organiczny podczas rozkładu białek w czasie fermentacji w 75-90% przechodzi w azot amonowy (amonifikacja beztlenowa), [9].



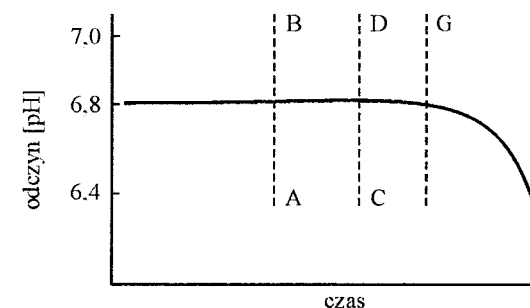
Do przekroju A - komora fermentacyjna pracuje normalnie. W punkcie A nastąpiło zakłócenie pracy komory, co w konsekwencji doprowadziło do wzrostu ilości lotnych kwasów tłuszczowych. Za przekrojem C-D, wskutek wyczerpania się pojemności buforowej osadu, zasadowość zaczyna spadać. Od punktu G ilość lotnych kwasów tłuszczowych przewyższa ilość zasadowości, zaczyna gwałtownie spadać pH.



Stosunek LKT/Z rośnie. Przekroczenie wartości 0.3 może spowodować całkowite załamanie się procesu w krótkim czasie.



Skład gazu jest bardzo stabilny. Po załamaniu się procesu w punkcie G wstrzymana zostaje produkcja CO₂ i CH₄.



pH zaczyna dopiero wtedy spadać, gdy proces się już załamał i w reaktorze dominuje fermentacja kwaśna.

Rys. 2.17. Zmiany odczynu, zasadowości i lotnych kwasów tłuszczowych w czasie fermentacji
Źródło: [16]

Obecność amoniaku w komorach fermentacyjnych związana jest z procesami biomineralizacji połączeń organicznych azotu. Toksyczność amoniaku dla bakterii metanowych jest zależna od stopnia jego zdysocjowania; im stopień zdysocjowania jest większy, tym toksyczność amoniaku jest mniejsza [10].

2.3.6. Fosfor

Badaniem fosforanów i ich przemian w czasie procesów fermentacji zajmowały się między innymi E. Zielewicz-Madej i B. Cora [17], które określały stężenie fosforanów w cieczy nadosadowej w poszczególnych fazach beztlenowej stabilizacji osadów. Zawartość fosforanów w suchej masie osadu została przedstawiona na rysunku 2.18.



Rys. 2.18. Zawartość fosforanów w suchej masie osadu i cieczy nadosadowej w procesie fermentacji
Źródło: [17]

W pierwszej fazie procesu fermentacji metanowej bakterie hydrolizujące rozkładają nierozpuszczone związki organiczne, uwalniając do środowiska kwasy organiczne, które zwiększają stopień rozpuszczania związków fosforu w cieczy nadosadowej. W kolejnej fazie następuje rozkład do mniej złożonych związków organicznych, co wyraża się dalszym uwalnianiem fosforanów do cieczy osadowej. W obu fazach gwałtownie obniża się stopień odwodnienia osadów. W następnej fazie następuje zwiększenie uwalniania fosforanów do cieczy nadosadowej. Proces ten wzmacnia się w ostatniej fazie, w której zanika produkcja metanu. Prowadzone badania wykazały również, że wydłużenie czasu fermentacji (powyżej 34 dni) po-

woduje spadek zawartości fosforanów w cieczy nadosadowej. Jest to prawdopodobnie spowodowane samorzutnym rozpoczęciem rozwoju populacji mikroorganizmów, które do swojego rozwoju wykorzystują ortofosforany z cieczy nadosadowej [17].

2.4. Efektywność procesu fermentacji metanowej

Efektywność procesu fermentacji (E_s) oznacza się za pomocą różnych parametrów. Należą do nich:

- **Zmniejszenie zawartości suchej masy organicznej** w wyniku procesów metanogennych. Efektywność ta wyraża się wzorem:

$$E_s = [(M_o - M_e) / M_o] \times 100\% \quad [\%] \quad [2-10]$$

gdzie:

E_s – efektywność procesu fermentacji metanowej [%],

M_o – masa organiczna w doprowadzonym osadzie surowym [kg s.m.o./d],

M_e – masa organiczna w osadzie przefermentowanym, po procesie [kg s.m.o./d].

Wartość $M_o = Q_{sur} \times S_o$.

Wartość $M_e = Q_{ferm} \times S_e$.

Jeżeli $Q_{sur} = Q_{ferm}$, otrzymuje się wzór:

$$E_s = (S_o - S_e) \times 100 / S_o \quad [\%] \quad [2-10a]$$

gdzie:

E_s – efektywność procesu fermentacji metanowej [%],

S_o – zawartość suchej masy organicznej w osadzie surowym przed procesem [g/m³],

S_e – zawartość suchej masy organicznej w osadzie przefermentowanym, po procesie [g/m³], [13].

- **Określenie ilości gazu uzyskanej z 1 kg suchej masy organicznej (G_j)** doprowadzonej do układu, którą można obliczyć według następujących wzorów:

$$G_j = G_{dośw} / (Q \times S_o) \quad [2-11]$$

$$G_j = G_{dośw} / [Q(S_o - S_e)] \quad [2-11a]$$

gdzie:

- $G_{do\acute{s}w}$ – ilość biogazu uzyskana w doświadczeniu praktycznym [m^3],
- Q – ilość doprowadzonego osadu [m^3],
- S_o – zawartość suchej masy organicznej w osadzie surowym przed procesem [g/m^3],
- S_e – zawartość suchej masy organicznej w osadzie przefermentowanym po procesie [g/m^3], [13].

- **Moduł fermentacji (M_f)** określony wzorem:

$$M_f = 100[1 - (< l_1 \times m_0 > / < l_0 \times m_1 >)] \quad [\%], \quad [2-12]$$

gdzie:

- M_f – moduł fermentacji [%],
- l_0, l_1 – masa organiczna [% s.m.] osadu surowego i osadu przefermentowanego,
- m_0, m_1 – masa nieorganiczna [% s.m.] osadu surowego i osadu przefermentowanego [85].

Jeżeli $M_f \geq 50\%$, to osad jest ustabilizowany.

- **Okres przebywania biomasy w komorze fermentacyjnej**, podczas którego 90% substancji metanogennych zostanie przekształcone w biogaz.
- **Minimalny czas fermentacji** określony jako czas przebywania biomasy w komorze fermentacyjnej w danej temperaturze, niezbędny do zachowania stałego poziomu populacji bakterii fermentacji metanowej [13].
- **Zmniejszenie zawartości substancji organicznych** mierzonych za pomocą chemicznego zapotrzebowania na tlen oznaczonego metodą chromianową lub biochemicznego zapotrzebowania na tlen oznaczanych w cieczy nadosadowej.

Do parametrów określających efektywność procesów fermentacji można zaliczyć również:

- stopień nitrifikacji,
- aktywność enzymatyczną,
- zawartość OWO,
- moduł stabilizacji i indeks stabilizacji [86].

Liczba oraz różnorodność wskaźników i wyróżników, określających efektywność procesu stabilizacji beztlenowej, skłoniła autora do poszukiwania ujednoliconego parametru, który w sposób szybki i kompetentny umożliwiłaby określenie stopnia stabilizacji osadów poddawanych procesowi fermentacji.

3. Badania nad procesem fermentacji beztlenowej

3.1. Przedmiot i metoda badań

Zakres opracowania zagadnienia obejmował:

- badania nad zmianami wybranych wskaźników fizyczno-chemicznych osadów ściekowych i gnojowicy oraz parametrów techniczno-technologicznych procesu fermentacji,
- zestawienie i analizę uzyskanych wyników z zastosowaniem elementów statystyki,
- omówienie i interpretację wyników pracy,
- opracowanie indeksu efektywności procesu stabilizacji beztlenowej osadów ściekowych.

3.2. Metoda badań analitycznych

Badania analityczne nad osadami ściekowymi i cieczami nadosadowymi podczas fermentacji obejmowały następujące oznaczenia:

- odczyn (pH),
- chemiczne zapotrzebowanie na tlen oznaczone metodą dwuchromianową (ChZT-Cr),
- chemiczne zapotrzebowanie na tlen oznaczone metodą nadmanganianową (ChZT-Mn),
- azot ogólny Kjeldahla (TKN),
- azot amonowy ($N - NH_4^+$),
- azot azotynowy ($N - NO_2^-$),
- azot azotanowy ($N - NO_3^-$),
- azot organiczny,
- fosforany (PO_4^{3-}),
- suchą pozostałość,
- pozostałość po prażeniu (substancje mineralne),
- straty przy prażeniu (sucha masa organiczna),

- kwasowość,
- zasadowość,
- lotne kwasy tłuszczowe (LKT),
- uwodnienie (%),
- sumaryczną ilość wydzielającego się biogazu.

Wszystkie oznaczenia wykonano zgodnie z zaleceniami Polskich Norm i obowiązującymi wytycznymi, a uzyskane wyniki to średnia z co najmniej trzech oznaczeń wykonywanych równolegle:

- odczyn, kwasowość i zasadowość – PN-91/C-04540.05, PN-90/C-04540.01,02,03,
- chemiczne zapotrzebowanie na tlen, oznaczone metodą dwuchromianową, (ChZT-Cr) – PN-74/C-04578.03,
- chemiczne zapotrzebowanie na tlen, oznaczone metodą nadmanganianową, (ChZT-Mn) – PN-85/C-04578.02,
- azot organiczny – PN-75/C-04576/16,
- azot ogólny Kjeldahla (TKN) – PN-75/C-04576/17,
- azot amonowy – PN-75/C-04576/15,
- azot azotynowy – PN-73/C-04576/06,
- azot azotanowy – PN-86/C-04576/10,
- ortofosforany – PN-88/C-04537.04,
- sucha pozostałość, pozostałość po prażeniu (substancje mineralne), straty przy prażeniu (sucha masa organiczna), uwodnienie – PN-75/C-04616/01,
- lotne kwasy tłuszczowe – PN-75/C-04616/04,
- sumaryczna ilość wydzielającego się biogazu była mierzona za pomocą laboratoryjnego, legalizowanego gazomierza; ilość ta była każdorazowo przeliczana na warunki normalne (ciśnienie 760 mm Hg i temperaturę 0°C (273 K) za pomocą praw gazowych: Boylea, Gay-Lussaca i Charlesa oraz Daltona),
- skład objętościowy biogazu oznaczano za pomocą aparatu Orsata, według normy PN-73/C-04759/01, gdzie tlenek węgla był oznaczany za pomocą amoniakalnego roztworu chlorku miedziawego, tlen za pomocą pirogalolu, dwutlenek węgla za pomocą wodorotlenku potasowego i metan za pomocą spalania.

W ramach badań oznaczano 24 wskaźniki fizyczno-chemiczne osadu oraz 7 wskaźników przeliczeniowych na suchą masę. W sumie w zestawieniach tabelarycznych przedstawiono 31 wskaźników charakteryzujących proces fermentacji metanowej wybranych rodzajów osadów ściekowych.

3.3. Metoda badań technologicznych

Badania wykonano w dwóch układach, na modelach w skali ułamkowo-technicznej, i prowadzono w zakresie temperatury 303-305°K (33-35°C), czyli

w fazie fermentacji mezofilowej. Zrealizowano dwa sposoby prowadzenia procesu fermentacji metanowej:

- fermentację statyczną – podczas której utylizacji był poddawany osad ściekowy jednorazowo wprowadzony do komory fermentacyjnej; proces prowadzono do momentu całkowitego zaniku wydzielania się biogazu; komora była zaszczerpiona osadem przefermentowanym w ilości około 20% osadu surowego,
- fermentację dynamiczną – podczas której po każdorazowym pobraniu próby dawkowano do komory fermentacyjnej osad surowy w ilości równej objętości pobranego do oznaczeń osadu fermentującego; proces prowadzono do momentu ustabilizowania się ilości wydzielanego gazu w ciągu doby na jednakowym poziomie; czas badań trwał 20-40 dni.

Na podstawie danych literaturowych [9, 13, 18] ustalono podstawowe parametry prowadzenia procesu fermentacji metanowej wybranych osadów ściekowych:

- optymalna temperatura do przemian metanogennych wynosiła 308°K (35°C),
- odczyn obojętny,
- maksymalną ilość biogazu uzyskuje się przy obciążeniu komory ładunkiem substancji organicznych, równym 4,5 kg s.m.o./m³,d, i dozowaniu 3-6% objętości osadów zawartych w komorze.

3.3.1. Opis modelu pierwszej komory fermentacyjnej

Model komory fermentacyjnej umieszczono w wydzielonym pomieszczeniu, wentylowanym mechanicznie i wyposażonym w zawór czerpakowy wody. Pod konstrukcją komory znajdowała się kratka ściekowa.

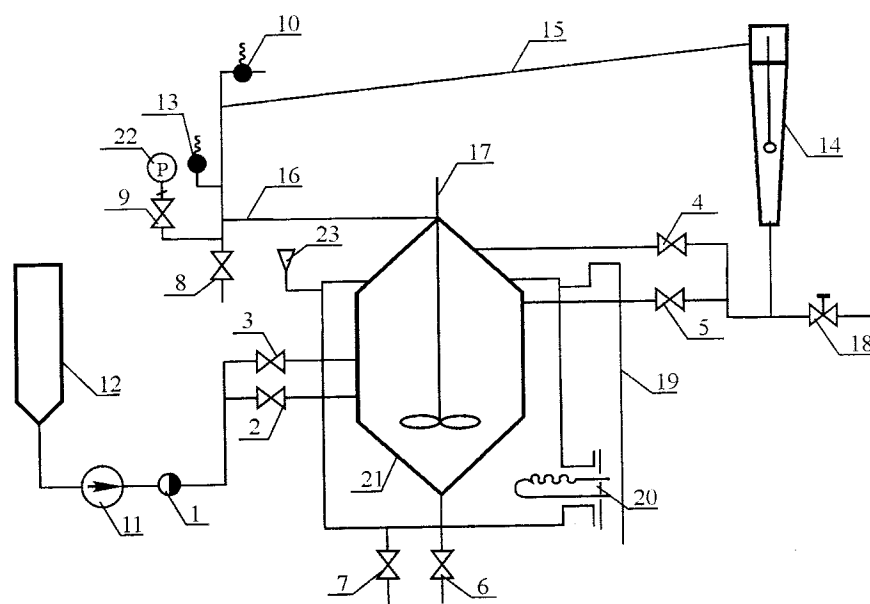
Model komory fermentacyjnej o pojemności około trzydziestu litrów wykonano z blachy pokrytej warstwą farby antykorozyjnej. Wyposażenie komory stanowiły:

- króćce doprowadzające osady surowe,
- króciec do odprowadzania gazu pofermentacyjnego,
- spust wody nadosadowej,
- spust przefermentowanego osadu z zasuwą klinową.

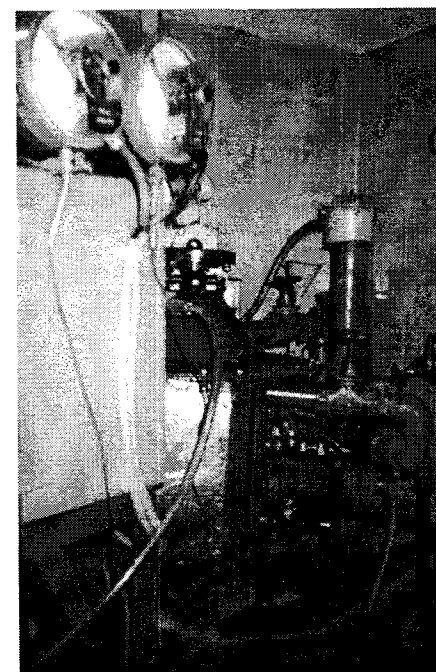
Model komory fermentacyjnej umieszczono na konstrukcji stalowej wykonanej z kątowników. Mieszanie zawartości komory odbywało się za pomocą mieszadła mechanicznego, łopatkowego, umieszczonego w osi komory. Łopatki mieszadła rozstawione były w gwiazdę. Prędkość obrotowa wynosiła 6 obrotów na minutę.

Proces fermentacji prowadzono w temperaturze 35°C (308°K). Osad podgrzewany był pośrednio, za pomocą płaszcza wodnego, wykonanego z blachy. Pojemność płaszcza wynosiła 23 litry. Woda wypełniająca płaszcz stykała się z zewnętrzną ścianą komory fermentacyjnej. Płaszcz wodny wyposażony był w lejek

wlewowy, rurę przelewową oraz wlot wody grzejnej. Woda w płaszczu podgrzewana była za pomocą grzałki elektrycznej o mocy 1400 W. Grzałka załączana i wyłączana była automatycznie przy zastosowaniu termometrów kontaktowych mierzących temperaturę wody w płaszczu grzejnym i osadu w komorze fermentacyjnej. Przefermentowany osad odprowadzany był z komory za pomocą zasuw klinowej, otwieranej i zamykanej ręcznie, zamontowanej na przewodzie spustowym w dnie komory. Gaz pofermentacyjny odprowadzany był za pomocą zaworu do legalizowanego laboratoryjnego licznika gazowego, którym dokonywano pomiaru ilości gazu, a następnie odprowadzany do atmosfery. Dla ustalenia składu wydzielającego się gazu, elastyczny przewód z licznika gazowego łączony był z aparatem Orsata lub z aparatem Gas-Pointer II i analizatorem Fyrite. Schemat i zdjęcie komory przedstawiono na rysunkach 3.1 i 3.2.



Rys. 3.1. Schemat modelu wydzielonej komory fermentacyjnej: 1 – zawór zwrotny, 2,3 – zawory odcinające dawkowanie osadu surowego, 4,5 – zawory odcinające spust wody nadosadowej, 6 – zawór spustowy osadu przefermentowanego, 7 – zawór spustowy wody z płaszcza, 8 – zawór pobierania gazu, 9 – zawór do manometru, 10 – zawór spustowy gazu, 11 – pompa, 12 – zbiornik dawkujący, 13 – zawór bezpieczeństwa, 14 – wyłącznik pływakowy, 15 – przewód elektryczny, 16 – odprowadzanie gazu, 17 – mieszadło, 18 – elektrozawór, 19 – przelew wody grzejnej, 20 – grzałka elektryczna, 21 – komora fermentacyjna, 22 – manometr, 23 – wlot wody do płaszcza, 24 – płaszcz grzejny

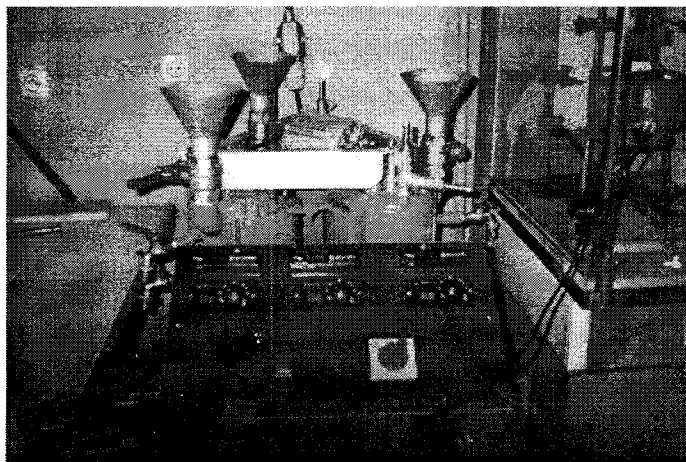


Rys. 3.2. Widok komory fermentacyjnej

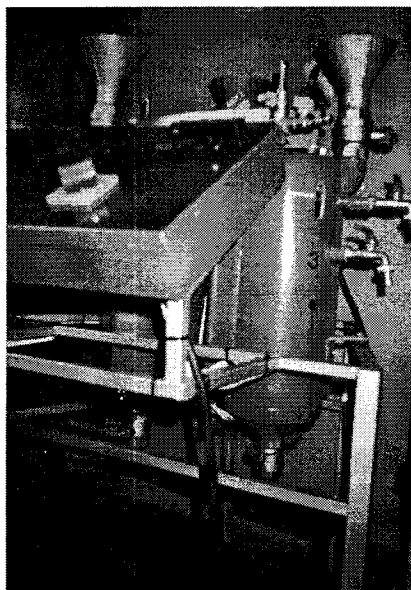
3.3.2. Opis drugiego modelu zestawu komór fermentacyjnych

W celu sprawdzenia otrzymanych wyników wykonano zestaw składający się z trzech oddzielnych zbiorników. Zbiorniki pokazane na rysunku 3.3 zostały wykonane z blachy stalowej o grubości 2 mm, pokrytej warstwą farby antykorozyjnej. Komory mają kształt walca, a w dolnej części – odwróconego stożka. Każdy z trzech zbiorników ma pojemność 10 litrów. Każdą pojedynczą komorę zbudowano z następujących elementów: wlotu świeżego osadu, zaworu do odprowadzania wód nadosadowych, zaworu do odprowadzania wytworzonego gazu i zaworu do opróżniania komory. Kontrola napełniania odbywała się za pomocą wziernika podłużnego. Komory zostały zamontowane na jednej wspólnej konstrukcji nośnej, którą był stół w kształcie trapezu. Stół został wykonany z kształtownika profilowanego. Sterowanie modelem odbywało się za pośrednictwem tablicy rozdzielczej, w której znajdowały się: wyłącznik główny, włącznik silnika, trzy włączniki gałek z termostatami i diodami wskaźnikowymi oraz trzy termometry. Mieszanie osadu w komorach odbywało się za pomocą mieszadła – miksera budowlanego. Do napędu mieszadła zastosowano silnik elektryczny jednofazowy o mocy 0,25 kW. Mikser obracał się w prawą stronę, co powodowało ruch osadu od dołu do góry. Umożliwiało to utrzymanie jednorodnej zawiesiny w komorze, a także jednakowej temperatury w całej masie osadu. Osad podgrzewany był pośrednio za pomocą

płaszcz wodnego, wykonanego z blachy stalowej o grubości 2 mm. Całkowita pojemność płaszcza wynosiła 8 litrów. Ogrzewanie wody odbywało się za pomocą grzałki elektrycznej o mocy 2 000 W, sterowanej regulatorem temperatury C-24. Regulator zaopatrzony był w sondę pomiaru temperatury umieszczonej wewnątrz płaszcza wodnego. Temperaturę osadu odczytywano na termometrze elektrycznym, którego sonda sensorowa umieszczona była w komorze fermentacyjnej. Drugi zestaw do procesu fermentacji przedstawiono na rysunkach 3.3 i 3.4



Rys. 3.3. Widok komory fermentacyjnej od strony tablicy rozdzielczej



Rys. 3.4. Widok komory fermentacyjnej

3.4. Koncepcja badań

Ogólna koncepcja badań polegała na określeniu efektywności procesu fermentacji metanowej wybranych do badań osadów ściekowych za pomocą oznaczeń wskaźników fizyczno-chemicznych, podanych w rozdziale 3.2, i na ocenie możliwości wspólnej stabilizacji osadów za pomocą procesu fermentacji metanowej. Wszystkie badania prowadzono w skali laboratoryjnej. Do badań wykorzystano rzeczywiste osady ściekowe i gnojowicę. Parametry, według których prowadzono ostateczne badania, zostały wypracowane na podstawie badań na obiektach rzeczywistych oraz z wykorzystaniem danych z wybranej literatury [65-70]. Uzyskane wyniki porównano z danymi z obiektów rzeczywistych, poddano je obróbce statystycznej i opracowano indeks efektywności procesu stabilizacji beztlenowej osadów ściekowych, który zweryfikowano w kolejnych badaniach.

3.5. Wybór skali badań

Wybór odpowiedniej skali badań warunkują czynniki technologiczne, ekonomiczne i praktyczne. Nowe badania wymagają zazwyczaj przejścia ze skali laboratoryjnej do skali ułamkowo-technicznej i technicznej. Taki tok postępowania daje gwarancję, że uzyskiwane wyniki są wiarygodne i możliwe jest wszechstronne zbadanie interesującego nas procesu.

Badania technologiczne prowadzono w skali laboratoryjnej. Ich wyniki pozwoliły ustalić parametry techniczno-technologiczne procesu biodegradacji beztlenowej w odniesieniu do skali technicznej. W ramach badań prowadzonych w latach 1995-2000 wykonano około 250 analiz osadów ściekowych pobranych z około 90 małych i średnich obiektów oraz z dużych oczyszczalni ścieków komunalnych zlokalizowanych w Białymstoku, Suwałkach, Łomży i Ełku. Analizowano również osady z 10 oczyszczalni ścieków mleczarskich oraz osady z 6 ferm tuczu trzody chlewnej i bydła, w których powstaje gnojowica. Pozwoliło to na uzyskanie pełnej charakterystyki i zmienności jakości wybranych rodzajów osadów.

3.6. Matematyczna interpretacja wyników badań

3.6.1. Analiza statystyczna wyników badań

Teoria eksperymentu określa sposób organizacji doświadczenia oraz zależności między wybranymi wielkościami charakteryzującymi obiekt badań (zjawisko, proces, układ). Obejmuje ona głównie planowanie doświadczeń i statystyczną analizę wyników badań.

W pracy przyjęto metodę postępowania zgodną, w ogólnych założeniach, z teorią eksperymentu. Świadomie zaplanowano badania w takich układach, na takim medium i w takiej częstotliwości, aby opisać dokładnie proces fermentacji i móc na podstawie opracowanego indeksu efektywności procesu stabilizacji beztlenowej osadów ściekowych określić stopień przefermentowania osadów.

Analiza wyników pomiarów określa ostateczny rezultat badań doświadczalnych [19]. W pracy analizę statystyczną wykorzystano między innymi do celów takich jak:

- opis statystyczny parametrów wejściowych i wyjściowych badanych osadów ściekowych,
- określenie indeksu efektywności procesu stabilizacji beztlenowej osadów ściekowych, opisującego stan przefermentowania substratu,
- ocena wartości otrzymanego indeksu efektywności procesu.

3.6.2. Charakterystyka obiektu badań

Obiektem badań był proces fermentacji metanowej osadów ściekowych, pochodzących z wybranych oczyszczalni ścieków komunalnych i oczyszczalni ścieków mleczarskich, oraz proces fermentacji metanowej gnojowicy świńskiej i bydłowej, zarówno w układzie statycznym, jak i dynamicznym. Taki rodzaj substratu (osadów ściekowych) jest bardzo często spotykany na terenach rolniczo-przemysłowych. Rozwiązania doświadczalnego wymagało określenie:

- warunków pracy układu badawczego (parametrów technologicznych prowadzenia procesu),
- czasu prowadzenia procesu,
- efektu usunięcia wartości badanych wskaźników zanieczyszczeń w osadach po procesie fermentacji metanowej.

W pracy podjęto próbę opracowania, na bazie uzyskanych wyników, indeksu efektywności procesu stabilizacji beztlenowej osadów ściekowych, wyznaczonego na podstawie wybranych wskaźników zanieczyszczeń oznaczonych w osadach surowych oraz w osadach po fermentacji.

Do opisu statystycznego zastosowano:

- średnie arytmetyczne badanych wskaźników zanieczyszczeń,
- odchylenie standardowe,
- wartości minimalne i maksymalne badanych wielkości,
- medianę.

Do analizy statystycznej wykorzystano pakiet statystyczny STATISTICA. Do oceny istotności parametrów zastosowano test T-Studenta. Do oceny jakości dopasowania modelu zastosowano współczynniki determinacji R^2 .

Do zbioru wielkości wejściowych (zmienne niezależne: $x_1, x_2, \dots, x_k, \dots, x_i$) zaliczono wybrane wielkości określające warunki pracy układu (parametry technologiczne) oraz zawartości zanieczyszczeń w osadach surowych.

Sterowalnymi wielkościami wejściowymi były:

- sposób pracy układu: statyczny i dynamiczny,
- czas procesu fermentacji,
- rodzaj osadów poddanych procesowi.

Nierozdzielalnymi wielkościami wejściowymi były:

- obciążenie komory ładunkiem zanieczyszczeń organicznych,
- zawartość wybranych wskaźników zanieczyszczeń w osadach surowych.

Do zbioru wielkości wyjściowych (zmienne zależne: $z_1, z_2, \dots, z_p, \dots, z_w$) zaliczono stopień usunięcia podstawowych wskaźników zanieczyszczeń oraz stopień zawartości zanieczyszczeń w osadach po procesie fermentacji.

Do opisu statystycznego wybrano zmienne niezależne (wielkości sterowalne i nierozdzielalne), które wpływają na poziom indeksu wyjściowego w osadach przefermentowanych.

Wybór podstawowych wskaźników istotnych do opisu statystycznego przedstawiono w zbiorczej tabeli 3.1. W tabeli tej znakiem „+” zaznaczono istotną zależność wyliczoną testem T-Studenta między poszczególnymi wskaźnikami. Na podstawie przeprowadzonych analiz wybrano do dalszej analizy statystycznej 17 podstawowych wskaźników fizyczno-chemicznych. Są to:

- odczyn osadu,
- kwasowość cieczy nadosadowej,
- zasadowość cieczy nadosadowej,
- azot amonowy w osadzie,
- azot azotanowy w osadzie,
- fosforany w cieczy nadosadowej,
- lotne kwasy tłuszczowe,
- stosunek lotnych kwasów tłuszczowych do zasadowości,
- chemiczne zapotrzebowanie na tlen oznaczone metodą dwuchromianową osadu,
- pozostałość po prażeniu,
- straty po prażeniu,
- sucha pozostałość,
- uwodnienie,
- azot amonowy w procentach suchej masy,
- ilość wydzielonego gazu,
- chemiczne zapotrzebowanie na tlen oznaczone metodą nadmanganianową w cieczy nadosadowej.

Z dokonanej obróbki statystycznej wynikało, że w dalszej analizie procesu nie rozpatrywano sposobu pracy układu, lecz tylko czas procesu i rodzaj osadów.

Wybór, na podstawie analizy statystycznej, podstawowych wskaźników istotnych w opisie statystycznym

[illegible]

cd. tabeli 3.1.

I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
10. LKT/ zasadowosc	—	—	—	—	—	—	—	—	+	+	+	—	—	—	+	—	—
11. ChZT oznaczone metoda dwuchromianowa osadu	mg O ₂ /dm ³	—	—	—	—	—	+	+	—	—	—	—	—	+	—	—	—
12. Pozostalosc po praznieniu	mg/dm ³	—	—	—	—	—	—	—	—	+	—	—	+	+	+	—	—
13. Strata po praznieniu	mg/dm ³	—	+	—	—	+	+	—	+	—	—	—	—	—	+	—	—
14. Sucha masa (sucha pozostalosc)	mg/dm ³	—	+	—	—	—	—	—	+	—	—	—	—	—	—	—	—
15. Uwodnienie	%	+	+	—	—	+	—	—	—	—	—	—	—	+	—	+	—
16. Azot amonowy N · NH ₄ ⁺	% s.m.	+	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
17. Azot azotynowy N · NO ₂ ⁺	% s.m.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
18. Azot azotanowy N · NO ₃ ⁺	% s.m.	—	+	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
19. Fosforany PO ₄ ⁺	% s.m.	+	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	+	—	—	—
20. Kwasy lotne	% s.m.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	+	—	+	—
21. Dobowa ilosc gazu	dm ³ / d	+	+	—	—	—	+	+	—	—	—	—	—	—	—	—	—
22. Calkowita ilosc gazu	dm ³	—	—	—	—	—	—	—	—	—	+	—	—	+	—	—	—
23. Azot amonowy N · NH ₄ ⁺ cieczy	mg/dm ³	—	—	—	—	+	—	+	—	—	—	+	—	+	—	—	—
24. Azot azotynowy N · NO ₂ ⁺ cieczy	mg/dm ³	+	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
25. Azot azotanowy N · NO ₃ ⁺ cieczy	mg/dm ³	—	+	—	+	—	—	—	—	—	—	+	—	—	+	—	—
26. ChZT oznaczone metoda nadmanganianowa cieczy	mg O ₂ /dm ³	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	+	+	—	+	—	—
27. ChZT oznaczone metoda dwuchromianowa cieczy	mg O ₂ /dm ³	—	—	—	—	—	+	—	—	+	—	+	—	—	—	—	—
28. ChZT oznaczone metoda nadmanganianowa osadu	mg O ₂ /dm ³	—	—	—	—	+	+	—	—	—	—	+	—	+	+	—	—
29. Pozostalosc po praznieniu	% s.m.	—	+	—	+	—	+	—	—	—	—	+	+	—	—	+	—
30. Strata po praznieniu	% s.m.	—	—	+	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
31. N _{og} – azot ogolny	mg N/dm ³	—	—	—	—	+	—	+	+	—	—	—	—	—	—	—	—
32. Rodzaj osadow	—	—	+	—	+	+	+	+	+	+	+	+	+	—	+	—	—
33. metoda	—	+	—	—	—	—	+	—	—	—	—	+	—	—	+	—	—
Suma pluwow	—	8	9	2	3	8	9	9	7	4	3	13	6	12	18	4	0

cd. tabeli 3.1.

WYJŚCIE / WEJŚCIE															
Parametry	Jednostka	Parametry													
		1	2	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1. Odczyn cieczy nadosadowej	pH	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2. Odczyn osadu	pH	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3. Zasadowość	mval/dm ³	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4. Zasadowość	mg/dm ³	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5. Azot amonowy osadu	mg/dm ³	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6. Azot azotynowy osadu	mg/dm ³	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7. Azot azotanowy osadu	mg/dm ³	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8. Fosforany	mg/dm ³	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9. Kwasy lotne	mg l/dm ³	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Suma plusów		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

cd. tabeli 3.1.

I	2	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
		mg O ₂ /dm ³	mg O ₂ /dm ³	mg/dm ³	mg/dm ³	mg/dm ³	mg/dm ³	mg/dm ³	mg/dm ³	mg/dm ³	mg/dm ³	mg/dm ³	mg/dm ³	mg/dm ³	mg/dm ³	mg/dm ³	mg/dm ³
10. LKT/zasadowość	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11. ChZT oznaczone metodą dwuchromianową osadu	mg O ₂ /dm ³	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12. Pozostałość po prażeniu	mg/dm ³	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
13. Strata po prażeniu	mg/dm ³	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14. Sucha masa (sucha pozostałość)	mg/dm ³	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15. Uwodnienie	%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
16. Azot amonowy N - NH ₄ ⁺	% s.m.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
17. Azot azotynowy N - NO ₂ ⁻	% s.m.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18. Azot azotanowy N - NO ₃ ⁻	% s.m.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19. Fosforany PO ₄ ⁻	% s.m.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20. Kwasy lotne	% s.m.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21. Dobowa ilość gazu	dm ³ /d	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22. Całkowita ilość gazu	dm ³	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
23. Azot amonowy N - NH ₄ ⁺ cieczy	mg/dm ³	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
24. Azot azotynowy N - NO ₂ ⁻ cieczy	mg/dm ³	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
25. Azot azotanowy N - NO ₃ ⁻ cieczy	mg/dm ³	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
26. ChZT oznaczone metodą nadmanganianową cieczy	mg O ₂ /dm ³	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
27. ChZT oznaczone metodą dwuchromianową cieczy	mg O ₂ /dm ³	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
28. ChZT oznaczone metodą nadmanganianową osadu	mg O ₂ /dm ³	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
29. Pozostałość po prażeniu	% s.m.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30. Strata po prażeniu	% s.m.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
31. N _{og} - azot ogólny	mg N/dm ³	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
32. Rodzaj osadów	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
33. metoda	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Suma plusów		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Do zbioru wielkości stałych ($c_1, c_2, \dots, c_c$) zaliczono parametry wynikające ze względów konstrukcyjnych modelu badawczego oraz te, które nie wpływały istotnie na przebieg procesu fermentacji. Do nich zaliczono między innymi: wielkość modelu, szybkość mieszania, miejsce doprowadzenia osadów i średnice króćców przewodów.

Do zbioru wielkości zakłócających ($h_1, h_2, \dots, h_z$) zaliczono te parametry, których wpływ na wielkości wyjściowe jest losowy i nieznany dla realizatora badań (na przykład niejednorodność próbek osadu).

Przed badaniami właściwymi przeprowadzono badania wstępne (eliminacyjne). Ich celem było usunięcie tych wielkości wejściowych (między innymi chwilowej ilości wydzielającego się gazu), których wpływ na wielkości wyjściowe okazał się nieistotny. Wielkości nieistotne przesunięto do zbioru wielkości stałych, uzyskując w ten sposób zmniejszenie liczby pomiarów, a zatem kosztów i czasu trwania badań właściwych.

Planując eksperyment kierowano się potrzebą:

- uzyskania wymaganej informacji niezbędnej do zrealizowania celu,
- sprawdzenia, czy przyjęty plan badań jest możliwy do realizacji na stanowisku badawczym,
- w miarę niskich kosztów badań,
- uzyskania odpowiedzi na pytanie, co decyduje o efektywności procesu.

Postępowanie miało na celu:

- stwierdzenie charakteru i istotności wpływu każdej z wielkości wejściowych na wielkość wyjściową,
- obliczenie wartości wielkości wyjściowej (z) dla zbioru dowolnych (z przyjętych zakresów) wartości wielkości wejściowych x_k ,
- określenie indeksu efektywności procesu stabilizacji beztlenowej osadów ściekowych stabilizacji osadów.

4. Interpretacja wyników badań

Wyniki badań analitycznych nad fermentacją metanową wybranych rodzajów osadów ściekowych przedstawiono w zbiorczych tabelach i przykładowych seriach badawczych, po jednej dla poszczególnych rodzajów osadów ściekowych.*

4.1. Gnojowica

Gnojowica jest mieszaniną odchodów zwierzęcych: kału, moczu i resztek pokarmowych, niewielkiej ilości słomy oraz wód technologicznych (z mycia zwierząt, splukiwania stanowisk, kanałów). Naturalny stosunek, w przypadku trzody chlewnej, w przybliżeniu wynosi około 40% kału i 40% moczu i około 20% wody. Gnojowica cechuje się dużą zmiennością właściwości, na które ma wpływ:

- gatunek zwierząt i ich wiek,
- rodzaj zadawanej paszy,
- sposób usuwania gnojowicy,
- zawartość resztek paszowych lub ściółki,
- zawartość wody,
- temperatura otoczenia,
- stopień wymieszania.

Gnojowica jest układem polidispersyjnym, w którym faza stała znajduje się w stanie zawieszenia [4, 21, 22, 34] i podczas długotrwałego magazynowania ulega rozwarstwieniu. Górną warstwę stanowi kożuch, niżej znajduje się ciecz nadosadowa, a na dnie zagęszczony osad.

Wskaźniki gnojowicy poddawanej procesowi fermentacji metanowej zostały pokazane w tabeli 4.1, a przykładowa seria badawcza w tabelach 4.5 i 4.6.

4.2. Osady z mleczarskich oczyszczalni ścieków

Osady poddawane procesowi stabilizacji beztlenowej pochodziły z oczyszczalni zakładowych, oczyszczających ścieki pochodzące wyłącznie z produkcji

* Wyniki te zaprezentowano również w sposób graficzny w rozdziale 4.5 i 4.6.

Parametry	Jednostka	Gnojowica surowa					Współ- czynnik zmienności %	Gnojowica po fermentacji					Współ- czynnik zmienności %	Średni efekt obniżki
		średnia	mediana	minimum	maksy- mum	odchylenie standardowe		średnia	mediana	minimum	maksy- mum	odchylenie standardowe		
Odczyn cieczy nadosadowej	pH	-	-	7,25	8,40	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kwasowość	mmol/dm ³	36,80	37,20	28,50	40,70	3,45	9,38	17,50	17,10	14,30	22,70	2,38	13,60	52,45
Zasadowość	mmol/dm ³	9,009	8,785	7,760	11,210	9,54	1,059	20,389	205,55	176,20	246,80	20,66	10,13	-126,32
Azot amonowy N-NH ₄ ⁺ osadu	mg/dm ³	2 441,70	2 500,00	1 060,00	3 380,00	691,69	28,33	2 929,20	3 030,00	1 830,00	3 490,00	507,77	17,33	-19,97
Azot azotanowy N-NO ₃ ⁻ osadu	mg/dm ³	16,80	16,00	5,00	26,40	8,01	47,68	8,20	9,00	4,00	14,60	3,92	47,80	51,19
Azot azotanowy N-NO ₃ ⁻ osadu	mg/dm ³	52,60	48,50	28,00	81,00	18,83	35,80	88,00	86,60	59,60	121,60	19,28	21,91	-67,30
Fosforany PO ₄ ⁻	mg/dm ³	1 245,00	1 270,00	570,00	1 760,00	352,07	28,28	643,50	680,00	280,00	860,00	184,40	28,66	48,31
Kwasy lotne	mg/dm ³	4 350,80	4 320,00	2 830,00	6 040,00	1 051,51	24,17	2 020,00	2 090,00	720,00	3 030,00	743,52	36,81	53,57
LKT zasadowość	mg/dm ³	0,50	0,50	0,26	0,70	0,14	28,00	0,10	0,10	0,04	0,20	0,04	40,00	80,00
ChZT oznaczone metodą dwuchro- mianowa osadu	mg O ₂ /dm ³	84 138,30	86 630,00	25 600,00	148 800,00	40 772,00	48,46	19 241,70	22 150,00	3 600,00	32 000,00	10 185,32	52,93	77,13
Pozostałość po przetrznięciu (substancje imperialne)	mg/dm ³	57 180,30	51 600,00	14 580,00	89 670,00	22 836,87	39,94	33 297,50	29 560,00	10 000,00	66 900,00	16 185,69	48,61	41,77
Sucha po przetrznięciu	mg/dm ³	69 495,20	57 001,00	28 490,00	120 000,00	27 639,23	39,77	21 790,70	18 730,00	4 050,00	40 220,00	11 321,63	51,96	68,64
Sucha po przetrznięciu (poza pozostałość)	mg/dm ³	126 675,40	116 930,00	43 070,00	209 670,00	47 078,74	37,16	55 088,20	46 100,00	14 050,00	102 200,00	25 979,68	47,16	56,51
Uwodnienie	%	96,30	96,30	95,70	96,70	0,26	0,27	92,50	92,50	91,20	93,00	0,49	0,53	3,95
Azot amonowy N-NH ₄ ⁺	% s.m.	2,00	2,10	1,61	2,50	0,33	16,50	6,40	6,40	3,42	13,00	2,78	43,44	-220,00
Azot azotanowy N-NO ₃ ⁻	% s.m.	0,00	0,00	0,02	0,10	0,02	-	0,20	0,20	0,10	0,40	0,09	45,00	-
Fosforany PO ₄ ⁻	% s.m.	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	-	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	-	-
Kwasy lotne	% s.m.	1,00	1,00	0,80	1,30	0,20	20,00	1,30	1,10	0,84	2,20	0,46	35,38	-30,00
Dobowy ilość gazu	% s.m.	3,80	3,60	1,94	7,20	1,54	40,53	4,60	4,20	0,79	10,70	2,79	60,65	-21,05
Calciovita ilość gazu	dm ³	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-	17,50	15,80	0,20	37,20	13,23	75,60	-
Azot amonowy N-NH ₄ ⁺ cieczy	mg/dm ³	1 333,30	1 415,00	630,00	1 740,00	306,78	23,01	1 832,50	1 970,00	1 000,00	2 130,00	320,26	17,48	-37,44
Azot azotanowy N-NO ₃ ⁻ cieczy	mg/dm ³	0,40	0,30	0,12	1,80	0,45	112,50	0,10	0,10	0,10	0,10	0,01	10,00	75,00
ChZT oznaczone metodą nadhangar- mianowa cieczy	mg/dm ³	2,70	2,80	2,40	3,10	0,24	8,89	1,60	1,60	1,30	1,90	0,18	11,25	40,74
ChZT oznaczone metodą nadhangar- mianowa cieczy	mg O ₂ /dm ³	592,90	605,00	465,00	680,00	70,79	11,94	161,70	155,00	40,00	430,00	98,61	60,98	-72,73
ChZT oznaczone metodą nadhangar- mianowa osadu	mg O ₂ /dm ³	7 215,00	7 845,00	620,00	8 700,00	2 163,57	29,99	1 813,30	1 980,00	360,00	2 680,00	657,48	36,26	74,87
Pozostałość po przetrznięciu (substancje imperialne)	mg/dm ³	13 530,00	7 600,00	3 470,00	36 000,00	11 811,45	87,30	5 445,80	3 000,00	1 500,00	12 000,00	4 142,38	76,07	59,75
Strata po przetrznięciu	% s.m.	44,70	43,90	33,65	58,00	7,34	16,42	60,70	62,40	43,25	76,10	9,25	15,24	-35,79
N _{org} – azot ogólny	mgN/dm ³	55,30	56,10	42,04	66,30	7,34	13,27	39,30	37,60	23,91	56,80	9,25	23,54	28,93
N _{org} – azot organiczny (wyliczony) osadu	mgN _{org} /dm ³	4 168,30	4 030,00	3 870,00	4 850,00	301,39	7,23	3 811,70	3 760,00	3 510,00	4 360,00	249,83	6,55	8,56
	mgN _{org} /dm ³	2 121,25	1 465,50	2 777,00	1 362,60	1 000,13	47,15	1 125,40	634,40	1 616,40	733,80	624,09	55,16	46,95

mleka i jego przetworów. Ścieki mleczarskie z zakładów, zlokalizowanych w rejonie północno-wschodnim, mają z reguły niższe wskaźniki BZT₅ i ChZT niż ścieki pochodzące z innych regionów kraju. Wartości tych wskaźników osiągnięte w badaniach są zbliżone do podawanych w literaturze [72-84].

Osady ściekowe pochodzące z tych ścieków są zasobne w azot, fosfor i wapń. Zawartość tych składników w suchej masie osadów jest od 2,5 do 3 razy większa niż w oborniku. Znacząca, z uwagi na właściwości nawozowe, jest również zawartość magnezu. W suchej masie osadu średnio 60% stanowi substancja organiczna. Mikroelementy i metale ciężkie występują w małych stężeniach. Zawartość większości z nich można określić jako śladową [22].

Wskaźniki osadów mleczarskich poddawanych procesowi fermentacji metabolicznej zostały pokazane w tabeli 4.2, a przykładowa seria badawcza w tabeli 4.9.

4.3. Osady z komunalnych oczyszczalni ścieków

Osady pochodzące z komunalnych oczyszczalni ścieków, zlokalizowanych w regionie północno-wschodniej Polski, używane w badaniach zostały scharakteryzowane w tabeli 4.3, a przykładowa seria badawcza została przedstawiona w tabelach 4.7 i 4.8.

Skład fizyczno-chemiczny osadów ze ścieków komunalnych zależy od rodzaju i ilości ścieków wprowadzanych do kanalizacji oraz od metod ich oczyszczania. W ostatnich latach maleje w ściekach zawartość metali ciężkich, które muszą być usuwane przed ich wprowadzeniem do kanalizacji miejskiej. Skład chemiczny osadów ściekowych jest zmienny w bardzo szerokim zakresie, zarówno w poszczególnych oczyszczalniach, jak i w czasie eksploatacji [16].

W pracy badano osady zmieszane z osadów wstępnych i wtórnych. Łączni w całym procesie oczyszczania ścieków powstaje od 0,5 do 1,2 kg suchej masy osadu na 1 kg usuniętego BZT₅.

4.4. Osady zmieszane

Wskaźniki fizyczno-chemiczne osadów zmieszanych poddawanych procesowi stabilizacji beztlenowej zaprezentowano w tabeli 4.4. Przykładowa seria badawcza została przedstawiona w tabeli 4.10. W tej serii badane osady ściekowe zostały zmieszane w równych proporcjach, to znaczy po jednej trzeciej objętości komory.

Wskaźniki fizyczno-chemiczne są praktycznie wartościami pośrednimi w stosunku do wartości wskaźników osadów wziętych do badań. O wartości wskaźników decyduje zawartość gnojowicy.

Parametry	Jednostka	Osady surowe						Współ- czynnik			Osady po fermentacji			Parametry	Jednostka	Współ- czynnik	Średni efekt obniżki
		średnia	mediana	minimum	maksimum	odchylenie standardowe	odchylenie standardowe	średnia	mediana	średnia	średnia	mediana	średnia				
		mg/dm ³	mg/dm ³	mg/dm ³	mg/dm ³	mg/dm ³	mg/dm ³	mg/dm ³	mg/dm ³	mg/dm ³	mg/dm ³	mg/dm ³	mg/dm ³				
ChZT oznaczone metodą dwuchromatową osadu	mg O ₂ /dm ³	18 596,43	16 180,00	5 800,00	34 600,00	11 191,42	59,23	13 716,43	8 660,00	3 730,00	31 600,00	10 380,84	75,68	27,41			
ChZT oznaczone metodą dwuchromatową osadu	mg/dm ³	17 306,00	17 300,00	10 152,00	25 460,00	5 097,77	29,46	21 615,71	24 460,00	8 600,00	31 113,00	9 552,39	44,19	24,90			
Strata po przeliczeniu	mg/dm ³	5 652,86	6 200,00	3 350,00	7 010,00	1 347,81	23,84	4 062,29	4 040,00	1 762,00	5 700,00	1 386,47	34,13	28,14			
Sucha masa (sucha pozostałość)	mg/dm ³	22 958,86	22 400,00	14 822,00	32 470,00	5 943,53	23,89	23 678,00	28 500,00	12 875,00	35 200,00	9 706,97	37,80	11,84			
Uwodnienie	%	98,00	98,00	97,00	99,00	0,87	0,89	96,80	96,50	96,00	98,00	0,85	0,88	1,22			
Azot amonowy N-NH ₄ ⁺	% s.m.	1,01	1,17	0,45	1,65	0,45	44,55	2,61	2,33	1,23	5,44	1,38	52,87	158,42			
Azot azotanowy N-NO ₃ ⁻	% s.m.	0,09	0,08	0,05	0,14	0,03	33,33	0,06	0,04	0,02	0,13	0,04	0,04	33,33			
Azot azotanowy N-NO ₃ ⁻	% s.m.	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,34	48,20			
Azot azotanowy N-NO ₃ ⁻	% s.m.	1,39	1,55	0,59	1,99	0,48	34,53	0,72	0,63	0,39	1,32	0,34	47,22	48,20			
Fosforany PO ₄ ⁻	% s.m.	15,25	8,97	2,89	29,85	11,08	72,66	10,23	7,52	1,49	33,17	10,68	104,40	32,92			
Kwasy lotne	% s.m.	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-	0,20	0,22	0,10	0,30	0,07	35,00	-			
Dobowa ilość gazu	dm ³ /d	0	0,00	0,00	0,00	0,00	-	33,21	25,66	2,91	100,12	32,35	33,76	-158,73			
Całkowita ilość gazu	dm ³	0	0,00	0,00	0,00	0,00	-	33,21	25,66	2,91	100,12	32,35	33,76	-158,73			
Azot amonowy N-NH ₄ ⁺ cieczy	mg/dm ³	139,14	130,00	54,00	228,00	79,12	56,86	360,00	140,00	490,00	121,52	33,76	33,76	63,79			
Azot azotanowy N-NO ₃ ⁻ cieczy	mg/dm ³	4,17	4,10	3,80	4,90	0,37	8,87	1,51	1,50	0,90	2,10	0,42	27,81	63,79			
ChZT oznaczone metodą nadmanganową cieczy	mg/dm ³	0,09	0,09	0,06	0,12	0,02	22,22	0,04	0,04	0,02	0,05	0,01	25,00	55,56			
ChZT oznaczone metodą nadmanganową cieczy	mg O ₂ /dm ³	1044,29	1 040,00	970,00	1 120,00	58,27	5,58	614,29	630,00	540,00	690,00	52,55	8,55	41,18			
ChZT oznaczone metodą dwuchromatową cieczy	mg O ₂ /dm ³	1988,57	1 680,00	590,00	3 670,00	1 164,15	58,54	1 417,43	870,00	372,00	3 160,00	1 066,00	75,21	28,72			
ChZT oznaczone metodą nadmanganową osadu	mg O ₂ /dm ³	5730	4 860,00	1 840,00	10 400,00	3 317,15	57,89	3 684,29	2 610,00	1 150,00	6 300,00	2 345,60	63,66	35,70			
Pozostałość po przeliczeniu (substancje mineralne)	% s.m.	74,86	77,50	68,16	82,01	5,43	7,25	82,11	85,82	60,56	91,00	10,31	12,56	-9,68			
Strata po przeliczeniu	% s.m.	25,14	22,50	17,99	31,84	5,43	21,60	17,89	14,18	9,00	39,44	10,31	57,63	28,84			
N _{org} - azot ogólny	mg N/dm ³	947,14	940,00	860,00	1 100,00	78,89	8,33	744,29	730,00	710,00	830,00	48,26	6,48	21,42			
N _{org} - azot organiczny (wyliczony)	mg N _{org} /dm ³	723,41	689,31	757,50	679,10	55,44	7,66	240,30	18,70	461,90	10,80	318,98	132,74	66,78			

5.4. tabela 1

Wartości podane w tabeli dotyczą pomiarów wykonanych w warunkach laboratoryjnych z użyciem aparatury pomiarowej.

Wartości podane w tabeli dotyczą pomiarów wykonanych w warunkach laboratoryjnych z użyciem aparatury pomiarowej.

Parametry	Jednostka	Osady surowe						Współ- czynnik			Osady po fermentacji			Parametry	Jednostka	Współ- czynnik	Średni efekt obniżki
		średnia	mediana	minimum	maksimum	odchylenie standardowe	odchylenie standardowe	średnia	mediana	średnia	średnia	mediana	średnia				
		mg/dm ³	mg/dm ³	mg/dm ³	mg/dm ³	mg/dm ³	mg/dm ³	mg/dm ³	mg/dm ³	mg/dm ³	mg/dm ³	mg/dm ³	mg/dm ³				
ChZT oznaczone metodą dwuchromatową osadu	mg O ₂ /dm ³	18 596,43	16 180,00	5 800,00	34 600,00	11 191,42	59,23	13 716,43	8 660,00	3 730,00	31 600,00	10 380,84	75,68	27,41			
ChZT oznaczone metodą dwuchromatową osadu	mg/dm ³	17 306,00	17 300,00	10 152,00	25 460,00	5 097,77	29,46	21 615,71	24 460,00	8 600,00	31 113,00	9 552,39	44,19	24,90			
Strata po przeliczeniu	mg/dm ³	5 652,86	6 200,00	3 350,00	7 010,00	1 347,81	23,84	4 062,29	4 040,00	1 762,00	5 700,00	1 386,47	34,13	28,14			
Sucha masa (sucha pozostałość)	mg/dm ³	22 958,86	22 400,00	14 822,00	32 470,00	5 943,53	23,89	23 678,00	28 500,00	12 875,00	35 200,00	9 706,97	37,80	11,84			
Uwodnienie	%	98,00	98,00	97,00	99,00	0,87	0,89	96,80	96,50	96,00	98,00	0,85	0,88	1,22			
Azot amonowy N-NH ₄ ⁺	% s.m.	1,01	1,17	0,45	1,65	0,45	44,55	2,61	2,33	1,23	5,44	1,38	52,87	158,42			
Azot azotanowy N-NO ₃ ⁻	% s.m.	0,09	0,08	0,05	0,14	0,03	33,33	0,06	0,04	0,02	0,13	0,04	0,04	33,33			
Azot azotanowy N-NO ₃ ⁻	% s.m.	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,34	48,20			
Azot azotanowy N-NO ₃ ⁻	% s.m.	1,39	1,55	0,59	1,99	0,48	34,53	0,72	0,63	0,39	1,32	0,34	47,22	48,20			
Fosforany PO ₄ ⁻	% s.m.	15,25	8,97	2,89	29,85	11,08	72,66	10,23	7,52	1,49	33,17	10,68	104,40	32,92			
Kwasy lotne	% s.m.	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-	0,20	0,22	0,10	0,30	0,07	35,00	-			
Dobowa ilość gazu	dm ³ /d	0	0,00	0,00	0,00	0,00	-	33,21	25,66	2,91	100,12	32,35	33,76	-158,73			
Całkowita ilość gazu	dm ³	0	0,00	0,00	0,00	0,00	-	33,21	25,66	2,91	100,12	32,35	33,76	-158,73			
Azot amonowy N-NH ₄ ⁺ cieczy	mg/dm ³	139,14	130,00	54,00	228,00	79,12	56,86	360,00	140,00	490,00	121,52	33,76	33,76	63,79			
Azot azotanowy N-NO ₃ ⁻ cieczy	mg/dm ³	4,17	4,10	3,80	4,90	0,37	8,87	1,51	1,50	0,90	2,10	0,42	27,81	63,79			
ChZT oznaczone metodą nadmanganową cieczy	mg/dm ³	0,09	0,09	0,06	0,12	0,02	22,22	0,04	0,04	0,02	0,05	0,01	25,00	55,56			
ChZT oznaczone metodą nadmanganową cieczy	mg O ₂ /dm ³	1044,29	1 040,00	970,00	1 120,00	58,27	5,58	614,29	630,00	540,00	690,00	52,55	8,55	41,18			
ChZT oznaczone metodą dwuchromatową cieczy	mg O ₂ /dm ³	1988,57	1 680,00	590,00	3 670,00	1 164,15	58,54	1 417,43	870,00	372,00	3 160,00	1 066,00	75,21	28,72			
ChZT oznaczone metodą nadmanganową osadu	mg O ₂ /dm ³	5730	4 860,00	1 840,00	10 400,00	3 317,15	57,89	3 684,29	2 610,00	1 150,00	6 300,00	2 345,60	63,66	35,70			
Pozostałość po przeliczeniu (substancje mineralne)	% s.m.	74,86	77,50	68,16	82,01	5,43	7,25	82,11	85,82	60,56	91,00	10,31	12,56	-9,68			
Strata po przeliczeniu	% s.m.	25,14	22,50	17,99	31,84	5,43	21,60	17,89	14,18	9,00	39,44	10,31	57,63	28,84			
N _{org} - azot ogólny	mg N/dm ³	947,14	940,00	860,00	1 100,00	78,89	8,33	744,29	730,00	710,00	830,00	48,26	6,48	21,42			
N _{org} - azot organiczny (wyliczony)	mg N _{org} /dm ³	723,41	689,31	757,50	679,10	55,44	7,66	240,30	18,70	461,90	10,80	318,98	132,74	66,78			

Tabela 4.4.
Skład fizyčno chemiczny osadów zmieszanych przed i po fermentacji (1/3 gnojowicy, 1/3 osadów z oczyszczania ścieków młeczarskich i 1/3 z oczyszczania ścieków komunalnych)

Parametry	Jednostka	Osad surowy				Współ- czynnik zmienności %	Osad po fermentacji					Współ- czynnik efektu zmienności % obniżki	Średni efekt obniżki
		średnia	mediana	minimum	maksimum	odchylenie stan- dardowe	średnia	mediana	minimum	maksimum	odchylenie standardowe		
Odczyn cieczy nadosadowej	pH	—	—	6,42	8,40	—	—	—	6,68	8,80	—	—	—
Odczyn osadu	pH	—	—	6,35	8,20	—	—	—	6,48	9,00	—	—	—
Kwasowość	mval/dm ³	20,11	13,95	1,20	40,70	14,47	71,95	9,22	6,40	22,70	7,35	79,72	54,15
Zasadowość	mg/dm ³	5 532,33	4 315,00	1 700,00	11 210,00	3 043,88	55,02	11 694,67	7 650,00	3 200,00	24 680,00	7 449,34	63,70
Azot amonowy N-NH ₄ ⁺ osadu	mg/dm ³	1 172,03	365,00	63,00	3 380,00	1 208,56	103,12	1 672,00	820,00	240,00	3 490,00	1 178,26	70,47
Azot azotanowy N-NO ₃ ⁻ osadu	mg/dm ³	7,18	0,95	0,30	26,40	9,38	130,64	3,39	0,34	0,01	14,60	4,68	138,05
Azot azotanowy N-NO ₃ ⁻ osadu	mg/dm ³	40,30	38,70	12,20	81,00	17,94	44,52	40,42	14,50	3,30	121,60	41,42	102,47
Fosforany PO ₄ ⁻	mg/dm ³	669,67	353,50	160,00	1 760,00	529,63	79,09	348,80	200,50	61,00	860,00	272,95	78,25
Kwasy lotne	mg/dm ³	3 206,10	2 775,00	700,00	6 040,00	1 661,45	51,82	1 607,77	1 430,00	280,00	4 710,00	1 044,27	64,95
LKT/ zasadowość	—	0,70	0,55	0,16	1,60	0,45	64,29	0,19	0,11	0,04	0,80	0,19	100,00
ChZT/ oznaczone metodą dwuchro- minową osadu	mg O ₂ /dm ³	51 466,97	37 100,00	5 800,00	148 800,00	38 884,38	75,55	19 495,63	19 600,00	3 600,00	40 738,00	10 414,02	53,42
Pozostałość po prażeniu (substancje mineralne)	mg/dm ³	32 131,50	18 305,00	8 250,00	89 670,00	25 533,04	79,46	26 074,67	25 680,00	3 030,00	66 900,00	14 957,45	57,36
Strata po prażeniu	mg/dm ³	35 757,73	25 010,00	3 350,00	120 000,00	33 425,93	93,48	15 009,80	15 479,00	1 762,00	40 220,00	10 545,42	70,26
Sucha masa (sucha pozostałość)	mg/dm ³	67 889,23	35 350,00	14 822,00	209 670,00	57 048,99	84,03	41 084,47	38 000,00	6 270,00	102 200,00	22 960,88	55,89
Uwodnienie	%	97,47	97,00	95,70	99,50	1,25	1,28	94,64	95,25	91,20	98,00	2,03	2,14
Azot amonowy N-NH ₄ ⁺	% s.m.	1,50	1,26	0,23	8,70	1,54	102,67	5,60	3,34	1,21	48,60	8,59	153,39
Azot azotanowy N-NO ₃ ⁻	% s.m.	0,09	0,08	0,02	0,20	0,05	55,56	0,10	0,07	0,01	0,40	0,10	100,00
Azot azotanowy N-NO ₃ ⁻	% s.m.	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	100,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	100,00
Fosforany PO ₄ ⁻	% s.m.	1,07	1,00	0,37	2,00	0,41	38,32	0,90	0,89	0,17	2,20	0,56	62,22
Kwasy lotne	% s.m.	7,40	5,29	1,94	29,90	7,12	96,22	5,24	3,17	0,79	33,20	6,00	114,50
Dobowa ilość gazu	dm ³ /d	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	—	9,28	5,10	0,10	37,20	10,99	118,43
Całkowita ilość gazu	dm ³	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	—	160,47	123,98	2,91	441,00	116,28	72,46
Azot amonowy N-NH ₄ ⁺ cieczy	mg/dm ³	612,53	215,00	38,00	1 740,00	630,41	102,92	1 030,63	515,00	140,00	2 130,00	745,82	72,37
Pozostałość po prażeniu (substancje mineralne)	mg/dm ³	2,70	3,85	0,12	4,90	1,97	72,96	1,19	1,40	0,10	2,80	0,97	81,51
Azot azotanowy N-NO ₃ ⁻ cieczy	mg/dm ³	1,14	0,10	0,06	3,10	1,32	115,79	0,66	0,05	0,02	1,90	0,78	118,18
ChZT/ oznaczone metodą nadmanga- nianową cieczy	mg O ₂ /dm ³	880,17	980,00	465,00	1 150,00	247,46	28,12	435,67	570,00	40,00	730,00	239,19	54,90
ChZT/ oznaczone metodą dwuchro- minową cieczy	mg O ₂ /dm ³	3 691,67	1 575,00	590,00	8 700,00	3 283,99	88,96	1 155,73	730,00	190,00	3 160,00	944,60	81,73
ChZT/ oznaczone metodą nadmanga- nianową osadu	mg O ₂ /dm ³	11 008,00	8 325,00	1 840,00	36 000,00	8 404,58	76,35	5 497,67	5 145,00	1 150,00	12 000,00	3 463,90	63,01
Pozostałość po prażeniu (substancje mineralne)	% s.m.	51,65	46,15	27,25	82,00	17,74	34,35	63,42	64,30	27,67	91,00	16,36	25,80
Strata po prażeniu	% s.m.	48,35	53,85	17,99	72,70	17,74	36,69	36,58	35,70	9,00	72,30	16,36	44,72
N _{org} – azot ogólny	mg N/dm ³	2 385,67	1 140,00	860,00	4 850,00	1 586,59	66,51	2 071,00	835,00	710,00	4 360,00	1 513,86	73,10

Tabela 4.5.

Przykładowa seria badawcza mezofilowej fermentacji metanowej gnojowicy (układ przepływowy)

Parametry		Czas trwania procesu w dobach										Średni efekt obniżki
		0	3	8	14	16	20	23	34			
Odczyn	pH	7,75	7,40	7,87	8,45	8,50	8,23	7,90	8,06	—		
Kwasowość	mval/dm ³	36,20	32,70	29,50	24,60	22,10	19,60	15,70	14,80	59,12		
Zasadowość	mg/dm ³	9 840	11 260	13 470	15 890	16 730	18 820	19 940	21 430	-117,78		
Azot amonowy N-NH ₄ ⁺	mg/dm ³	2 600,00	2 650,00	2 680,00	2 630,00	2 580,00	2 590,00	2 590,00	2 590,00	0,38		
Azot azotanowy N-NO ₂ ⁻	mg/dm ³	5,00	4,70	4,60	4,80	6,00	4,80	4,30	4,00	20,00		
Azot azotanowy N-NO ₃ ⁻	mg/dm ³	70,00	72,00	73,00	75,50	66,60	70,50	73,00	76,00	-8,57		
Fosforany PO ₄ ⁻	mg/dm ³	1 120,00	1 070,00	960,00	920,00	840,00	760,00	682,00	632,00	43,57		
Kwasy lotne	mg/dm ³	4240	4178	3842	3648	3496	3278	2746	2200	48,11		
Chemiczne zapotrzebowanie na tlen oznaczone metodą dwuchromianową	mg O ₂ /dm ³	26 600,00	25 600,00	16 200,00	8 000,00	3 200,00	3 400,00	3 600,00	3 600,00	86,47		
Pozostałość po prażeniu (substancje mineralne)	mg/dm ³	61 800,00	57 580,00	52 710,00	54 000,00	40 000,00	30 083,00	20 980,00	16 560,00	73,20		
Strata po prażeniu	mg/dm ³	55 130,00	45 800,00	43 250,00	43 060,00	42 297,00	41 992,00	27 985,00	12 620,00	77,10		
Sucha masa (sucha pozostałość)	mg/dm ³	116 930,00	103 380,00	95 960,00	97 060,00	82 297,00	72 075,00	48 965,00	29 180,00	75,04		
Uwodnienie	%	95,70	95,50	94,90	94,60	94,20	93,20	92,70	91,20	4,70		
Całkowita ilość gazu	dm ³	0,00	10,90	16,30	24,90	30,10	37,22	46,64	51,36	—		
Chemiczne zapotrzebowanie na tlen oznaczone metodą nadmanganową	mg O ₂ /dm ³	650,00	400,00	280,00	180,00	150,00	400,00	450,00	430,00	33,85		
N _{og} – azot ogólny	mg N/dm ³	4 050,00	3 970,00	3 920,00	3 870,00	3 830,00	3 780,00	3 710,00	3 650,00	9,88		
N _{org} – azot organiczny	mg N _{org} /dm ³	1 375,00	1 243,30	1 162,40	1 159,70	1 177,40	1 114,70	1 042,70	980,00	28,73		

Tabela 4.6.

Przykładowa seria badawcza mezofilowej fermentacji metanowej gnojowicy (układ nieprzepływowy)

Parametry		Czas trwania procesu w dobach											Średni efekt obniżki
		0	4	8	12	16	20	24	28	32	34		
Odczyn	pH	7.89	7.82	7.64	7.82	7.88	8.02	8.00	7.99	7.95	7.90	—	
Kwasowość	mval/dm ³	40,70	39,10	37,20	35,60	34,10	31,20	28,60	24,70	21,30	19,60	51,84	
Zasadowość	mg/dm ³	8420	9630	10470	12470	13620	14710	15930	16470	18520	19970	-137,17	
Azot amonowy N-NH ₄ ⁺	mg/dm ³	2 340,00	2 420,00	2 550,00	2 680,00	2 760,00	2 850,00	2 880,00	2 900,00	3 000,00	3 030,00	-29,49	
Azot azotanowy N-NO ₂ ⁻	mg/dm ³	25,00	11,00	8,50	7,00	6,50	6,00	5,50	5,00	4,80	4,70	81,20	
Azot azotanowy N-NO ₃ ⁻	mg/dm ³	28,00	50,00	56,00	58,00	60,00	65,00	65,00	65,00	70,00	72,00	-157,14	
Fosforany PO ₄ ⁻	mg/dm ³	1 270,00	1 164,00	1 120,00	1 058,00	952,00	923,00	846,00	810,00	783,00	710,00	44,09	
Kwasy lotne	mg/dm ³	6040	5743	5498	5182	4862	4485	4068	3748	3294	3030	49,83	
Chemiczne zapotrzebowanie na tlen oznaczone metodą dwuchromianową	mg O ₂ /dm ³	88 000,00	86 400,00	72 000,00	62 400,00	51 400,00	47 300,00	37 400,00	30 000,00	25 800,00	25 600,00	70,91	
Pozostałość po prażeniu (substancje mineralne)	mg/dm ³	44 570,00	43 240,00	39 300,00	35 820,00	30 420,00	22 130,00	23 200,00	23 800,00	29 580,00	29 560,00	33,68	
Strata po prażeniu	mg/dm ³	57 000,00	57 660,00	59 550,00	56 680,00	55 980,00	56 620,00	57 200,00	42 030,00	28 800,00	17 260,00	69,72	
Sucha masa (sucha pozostałość)	mg/dm ³	101 570,00	100 900,00	98 850,00	92 500,00	86 400,00	78 750,00	80 400,00	65 830,00	58 380,00	46 820,00	53,90	
Uwodnienie	%	96,20	96,10	95,70	95,40	95,10	94,90	94,30	93,70	93,40	92,90	3,43	
Całkowita ilość gazu	N dm ³	0,00	0,00	53,50	116,00	148,00	178,00	179,50	216,00	250,00	285,50	—	
Chemiczne zapotrzebowanie na tlen oznaczone metodą nadmanganianową	mg O ₂ /dm ³	620,00	560,00	530,00	450,00	410,00	360,00	320,00	270,00	240,00	220,00	64,52	
N _{og} - azot ogólny	mg N/dm ³	4 030,00	3 970,00	3 920,00	3 880,00	3 800,00	3 750,00	3 700,00	3 690,00	3 630,00	3 600,00	10,67	
N _{org} - azot organiczny	mg N _{org} /dm ³	1 637,00	1 489,00	1 305,50	1 135,00	973,50	829,00	749,50	720,00	555,20	493,30	69,87	

Tabela 4.7.

Przykładowa seria badawcza fermentacji metanowej osadów z oczyszczania ścieków komunalnych (układ przepływowy)

Parametry		Czas trwania procesu w dobach							Średni efekt obniżki
		0	7	10	14	17	22		
Odczyn	pH	6,75	7,70	7,81	8,00	7,60	8,10	-	
Kwasowość	mval/dm ³	2,10	1,90	1,80	1,70	1,50	1,40	33,33	
Zasadowość	mg/dm ³	1800	3640	3600	3680	3660	3440	-91,11	
Azot amonowy N-NH ₄ ⁺	mg/dm ³	105,00	280,00	350,00	476,00	504,00	1 204,00	-1 046,67	
Azot azotanowy N-NO ₂ ⁻	mg/dm ³	0,90	0,70	0,50	0,40	0,20	0,09	90,00	
Azot azotanowy N-NO ₃ ⁻	mg/dm ³	40,10	35,20	30,70	28,30	24,70	18,60	53,62	
Fosforany PO ₄ ⁻	mg/dm ³	360,00	332,00	297,00	265,00	250,00	240,00	33,33	
Kwasy lotne	mg/dm ³	2700	1602	1594	1543	1508	1370	49,26	
Chemiczne zapotrzebowanie na tlen oznaczone metodą dwuchromianową	mg O ₂ /dm ³	23 222,00	21 400,00	17 664,00	13 896,00	12 350,00	25 272,00	-8,83	
Pozostałość po prażeniu (substancje mineralne)	mg/dm ³	12 700,00	13 800,00	18 400,00	28 400,00	28 496,00	44 200,00	-248,03	
Strata po prażeniu	mg/dm ³	17 300,00	31 400,00	26 500,00	21 700,00	11 504,00	15 700,00	9,25	
Sucha masa (sucha pozostałość)	mg/dm ³	30 000,00	45 200,00	44 900,00	50 100,00	40 000,00	59 900,00	-99,67	
Uwodnienie	%	97,00	95,50	95,50	95,00	96,00	94,00	3,09	
Całkowita ilość gazu	dm ³	0,00	21,80	53,50	92,90	137,00	142,20	-	
Chemiczne zapotrzebowanie na tlen oznaczone metodą nadmanganianową	mg O ₂ /dm ³	1 080,00	1 020,00	940,00	860,00	730,00	620,00	42,59	
N _{og} - azot ogólny	mg N/dm ³	1 450,00	1 420,00	1 390,00	1 370,00	1 340,00	1 320,00	8,97	
N _{org} - azot organiczny	mg N _{org} /dm ³	1 304,00	1 104,10	1 008,80	865,30	811,10	97,31	92,54	

Tabela 4.8.

Przykładowa seria badawcza fermentacji metanowej osadów z oczyszczania ścieków komunalnych (układ nieprzeprływowy)

Parametry		Czas trwania procesu w dobach											Średni efekt obniżki
		0	5	8	12	15	19	22	26	29	33	36	
Odczyn	pH	7,40	7,40	7,60	7,70	7,70	7,70	7,80	7,90	7,90	8,00	8,20	-
Kwasowość	mval/dm ³	1,20	1,14	1,12	1,12	1,14	1,05	1,06	1,02	0,95	0,84	0,80	33,33
Zasadowość	mg/dm ³	1700	3020	3560	4040	4040	4360	4360	4400	4540	4680	4480	-163,53
Azot amonowy N-NH ₄ ⁺	mg/dm ³	63,00	231,00	350,00	364,00	406,00	490,00	525,00	560,00	560,00	658,00	693,00	-1 000,00
Azot azotanowy N-NO ₂ ⁻	mg/dm ³	0,60	0,50	0,30	0,20	0,10	0,08	0,07	0,06	0,06	0,04	0,02	96,67
Azot azotanowy N-NO ₃ ⁻	mg/dm ³	34,20	29,80	19,90	17,10	15,70	11,20	9,80	7,80	7,90	6,50	4,90	85,67
Fosforany PO ₄ ⁻	mg/dm ³	230,00	214,00	187,00	165,00	143,00	152,00	147,00	140,00	136,00	124,00	110,00	52,17
Kwasy lotne	mg/dm ³	2615	1526	1628	1611	1251	986	1586	1629	480	729	497	80,99
Chemiczne zapotrzebowanie na tlen oznaczone metodą dwuchromianową	mg O ₂ /dm ³	26 040,00	32 947,00	29 328,00	28 644,00	24 576,00	32 640,00	34 592,00	32 364,00	24 446,00	30 336,00	30 176,00	-15,88
Pozostałość po prażeniu (substancje mineralne)	mg/dm ³	13 200,00	13 650,00	14 820,00	16 320,00	16 840,00	17 560,00	18 420,00	19 230,00	21 762,00	23 160,00	24 200,00	-83,33
Strata po prażeniu	mg/dm ³	14 200,00	21 350,00	20 180,00	18 680,00	13 260,00	22 640,00	21 680,00	15 770,00	8 338,00	11 840,00	10 800,00	23,94
Sucha masa (sucha pozostałość)	mg/dm ³	27 400,00	35 000,00	35 000,00	35 000,00	30 100,00	40 200,00	40 100,00	35 000,00	30 100,00	35 000,00	35 000,00	-27,74
Uwodnienie	%	98,00	97,00	97,00	97,00	97,00	96,00	96,00	96,00	97,00	96,50	96,50	1,53
Całkowita ilość gazu	dm ³	0,00	4,40	15,10	39,70	60,80	110,30	159,00	195,40	223,70	236,30	238,50	-
Chemiczne zapotrzebowanie na tlen oznaczone metodą nadmanganianową	mgO ₂ /dm ³	980,00	940,00	880,00	820,00	760,00	730,00	680,00	630,00	610,00	600,00	590,00	39,80
N _{og} – azot ogólny	mgN/dm ³	1 140,00	1 110,00	980,00	960,00	950,00	940,00	940,00	920,00	890,00	850,00	820,00	28,07
N _{org} – azot organiczny	mgN _{org} /dm ³	1 042,20	848,70	609,80	578,70	528,20	438,72	405,13	352,14	322,04	185,46	122,08	88,29

Tabela 4.9.

Przykładowa seria badawcza fermentacji metanowej osadów z oczyszczania ścieków mleczarskich (układ nieprzeprływowy)

Parametry		Czas trwania procesu w dobach							Średni efekt obniżki
		0	6	9	13	16	19	26	
Odczyn	pH	6.70	6.74	7.15	7.02	8.89	8.80	9.00	—
Kwasowość	mval/dm ³	6.80	6.40	6.60	5.00	5.60	3.48	4.24	
Zasadowość	mg/dm ³	4400	4600	5320	5850	5160	6000	6890	
Azot amonowy N-NH ₄ ⁺	mg/dm ³	380,00	410,00	425,00	670,00	560,00	450,00	700,00	
Azot azotynowy N-NO ₂ ⁻	mg/dm ³	0.50	0.35	0.40	0.11	0.06	0.35	0.23	
Azot azotanowy N-NO ₃ ⁻	mg/dm ³	40,00	37,00	28,00	27,00	12,00	23,00	13,00	
Fosforany PO ₄ ⁻	mg/dm ³	190,00	180,00	140,00	29,00	81,00	91,00	61,00	
Kwasy lotne	mg/dm ³	2 720	2 670	2 550	2 380	2 140	1 040	1 490	
Chemiczne zapotrzebowanie na tlen oznaczone metodą dwuchromianową	mg O ₂ /dm ³	34 600,00	32 480,00	27 680,00	24 250,00	25 130,00	20 430,00	31 600,00	
Pozostałość po prażeniu (substancje mineralne)	mg/dm ³	25 460,00	24 770,00	25 455,00	24 431,00	18 950,00	13 469,00	11 113,00	
Strata po prażeniu	mg/dm ³	7 010,00	6 820,00	4 825,00	5 529,00	3 996,00	2 463,00	1 762,00	
Sucha masa (sucha pozostałość)	mg/dm ³	32 470,00	31 590,00	30 280,00	29 960,00	22 946,00	15 932,00	12 875,00	
Uwodnienie	%	97.50	97,00	97,00	97,00	98.40	97,00	96.50	
Całkowita ilość gazu	dm ³	0.00	4.28	7.98	11.58	13.88	18.24	18.49	
Chemiczne zapotrzebowanie na tlen oznaczone metodą nadmanganianową	mg O ₂ /dm ³	1 020,00	970,00	850,00	830,00	780,00	720,00	640,00	
N _{og} – azot ogólny	mg N/dm ³	950,00	930,00	910,00	870,00	840,00	760,00	720,00	
N _{org} – azot organiczny	mg N _{org} /dm ³	529.50	482.65	456.60	172.89	267.94	286.65	6.77	

Tabela 4.10. Przykładowa seria badań fermentacji metanowej osadów zmieszanych w równej proporcji po 1/3 objętości komory gnojowicy, osadów ze ścieków komunalnych i osadów ze ścieków mleczarskich (układ nieprzepływowy)

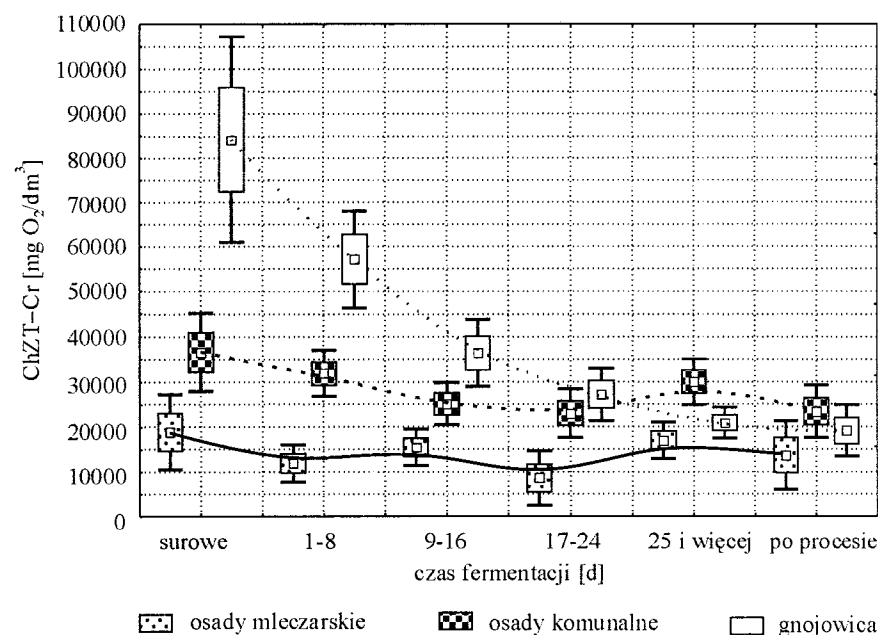
Parametry /Ddzień		0	4	8	11	17	20	30	Sredni efekt obniżki
Odczyn	pH	7,10	7,25	7,30	7,40	7,50	7,70	8,10	—
Kwasowość	mval/dm ³	20,10	19,90	18,20	17,30	16,40	14,60	11,20	44,28
Zasadowość	mg/dm ³	4030	4110	4360	5820	7920	8130	8200	-103,47
Azot amonowy N-NH ₄ ⁺	mg/dm ³	1 370,00	1 450,00	1 560,00	1 640,00	1 710,00	1 790,00	1 870,00	-36,50
Azot azotanowy N-NO ₂ ⁻	mg/dm ³	7,30	6,80	6,20	5,40	4,80	4,30	3,80	47,95
Azot azotanowy N-NO ₃ ⁻	mg/dm ³	42,10	41,70	40,60	40,10	39,70	39,20	37,70	10,45
Fosforany PO ₄ ⁻	mg/dm ³	682,30	624,30	576,40	498,70	410,50	384,20	337,40	50,55
Kwasy lotne	mg/dm ³	3627	3699	3924	5238	3960	2439	1640	54,78
Chemiczne zapotrzebowanie na tlen oznaczone metodą dwuchromianową	mg O ₂ /dm ³	54 650,00	48 720,00	27 680,00	24 250,00	25 130,00	20 430,00	31 600,00	42,18
Pozostałość po prażeniu (substancje mineralne)	mg/dm ³	35 472,00	34 210,00	32 850,00	29 560,00	27 410,00	25 860,00	23 660,00	33,30
Strata po prażeniu	mg/dm ³	27 210,00	25 470,00	22 630,00	20 470,00	18 460,00	16 570,00	12 560,00	53,84
Sucha masa (sucha pozostałość)	mg/dm ³	62 682,00	59 680,00	55 480,00	50 030,00	45 870,00	42 430,00	36 220,00	42,22
Uwodnienie	%	97,50	97,00	96,50	96,00	95,50	95,00	94,50	3,08
Całkowita ilość gazu	dm ³	0,00	42,80	78,90	115,60	136,80	182,40	185,90	—
Chemiczne zapotrzebowanie na tlen oznaczone metodą nadmanganianową	mg O ₂ /dm ³	400,00	500,00	580,00	650,00	640,80	594,70	560,00	-40,00
N _{og} – azot ogólny	mg N/dm ³	2 150,00	2 147,00	2 120,00	2 089,00	2 080,00	2 074,00	2 060,00	4,19
N _{org} – azot organiczny	mg N _{org} /dm ³	730,60	648,50	513,20	403,50	325,50	240,50	148,50	79,67

4.5. Wyniki badań (układ nieprzepływowy)

Wyniki zmian wartości zanieczyszczeń podczas fermentacji metanowej gnojowicy, osadów pochodzących z oczyszczalni ścieków mleczarskich i osadów z oczyszczalni ścieków komunalnych przedstawiono w tabelach 4.1-4.9. Opracowano je także w sposób graficzny (rys. 4.1-4.15).

4.5.1. Substancje organiczne

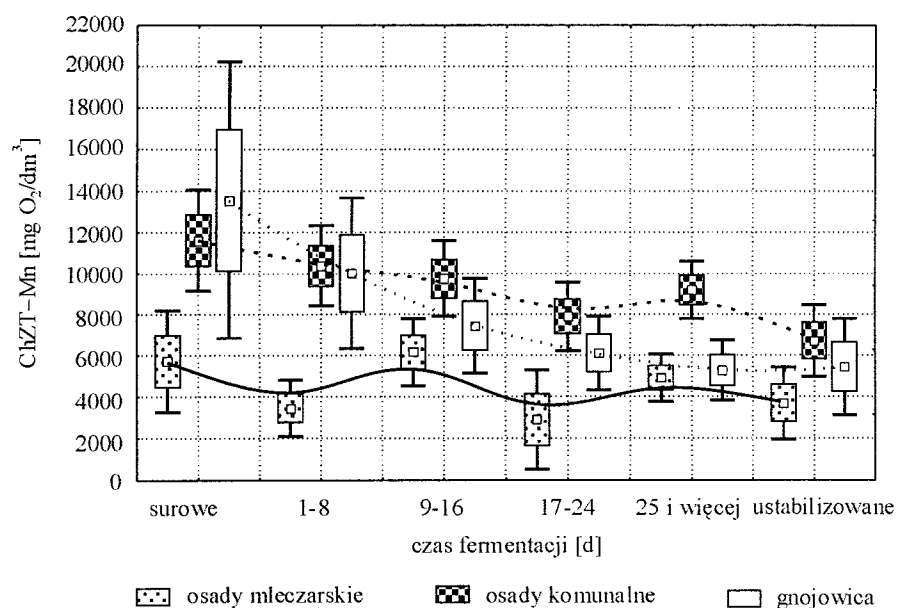
Rozkład substancji organicznych oznaczonych jako ChZT-Cr w funkcji czasu fermentacji przedstawia rysunek 4.1. Wartość tego wskaźnika na wejściu w przypadku gnojowicy jest dwukrotnie lub trzykrotnie większa niż w przypadku osadów ze ścieków mleczarskich lub komunalnych. Po procesie fermentacji we wszystkich osadach wartość tego wskaźnika jest zbliżona i wynosi około 20-30 g/dm³. Z badań wynika, że 50% rozkład substancji organicznej mierzonej ChZT-Cr nastąpił między 9 a 17 dniem trwania procesu.



Rys. 4.1. Zmiany zawartości ChZT-Cr w czasie fermentacji metanowej w układzie nieprzepływowym

Ilość związków organicznych mierzonych chemicznym zapotrzebowaniem na tlen, oznaczonym metodą nadmanganianową (ChZT-Mn), wynosiła na początku procesu: od 6 000 mg/dm³ – w przypadku osadów ze ścieków mleczarskich do 12 000-14 000 mg/dm³ – w przypadku osadów komunalnych i gnojowicy. Po zakoń-

czeniu procesu stabilizacji wartość ChZT-Mn wynosiła od 4 000 do 7 000 mg/dm³. Ubytek związków organicznych oznaczonych jako ChZT-MN w osadach, w czasie, został pokazany na rysunku 4.2. Średni efekt obniżki tego wskaźnika w trakcie badania procesu fermentacji wynosił od 40 do 60%.



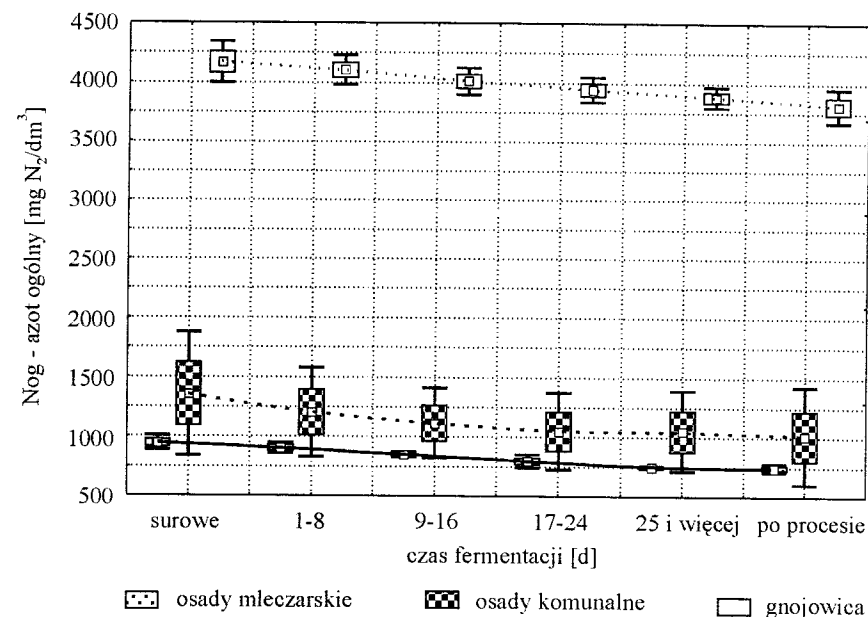
Rys. 4.2. Zmiany zawartości ChZT-Mn w czasie fermentacji metanowej w układzie nieprzepływowym

4.5.2. Formy azotu

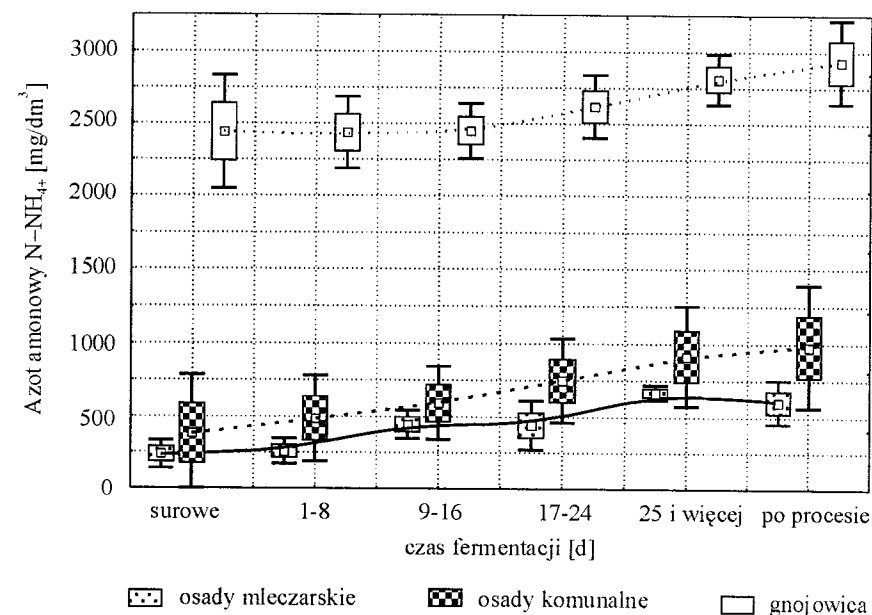
Wyniki badań nad zmianami zawartości wszystkich form azotu, to jest azotu ogólnego, amonowego, azotynowego i azotanowego w osadach w czasie fermentacji przedstawiono na rysunkach 4.3, 4.4, 4.5 i 4.6.

Zawartość azotu ogólnego (rys. 4.3) we wszystkich analizowanych osadach zmalała w czasie fermentacji w niewielkim stopniu – od 10 do 30%. Najwyższe wartości tego wskaźnika ma gnojowica surowa – około 4 000 mg/dm³. Zdecydowanie niższą wartość mają osady surowe ze ścieków mleczarskich lub komunalnych, w których zawartość azotu ogólnego wynosi 1 000-1 500 mg/dm³.

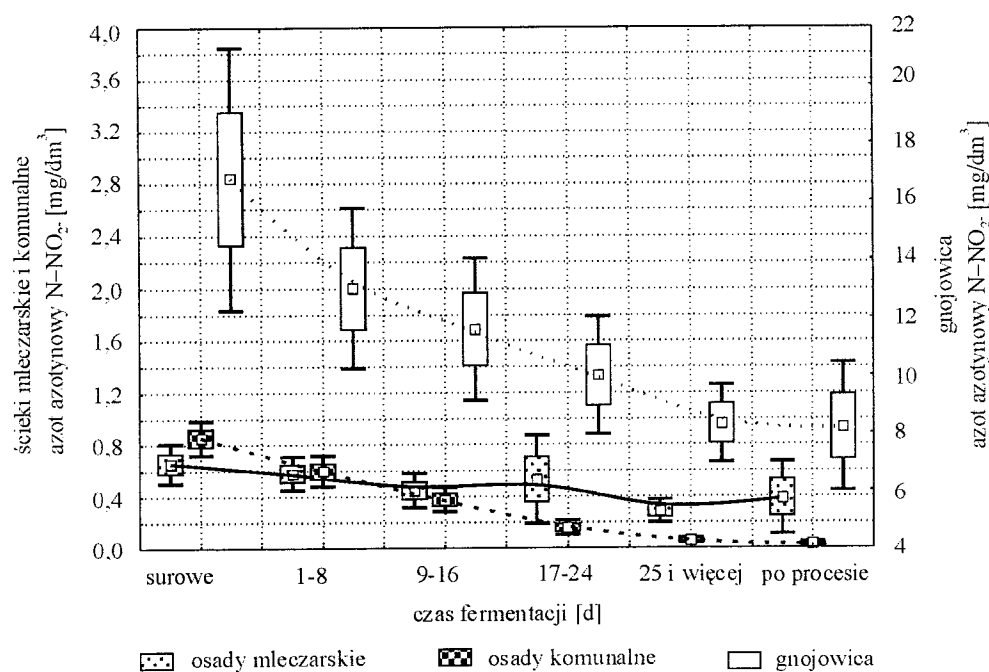
Zawartość azotu amonowego w czasie trwania procesu fermentacji (rys. 4.4) wzrasta. Najwyższe wartości uzyskano dla gnojowicy – wartości początkowe wynosiły w tym przypadku około 9 000 mg/dm³, a po procesie fermentacji – około 20 000 mg/dm³. W przypadku dwóch pozostałych rodzajów osadów wartości początkowe azotu amonowego wahają się w granicach 200-400 mg/dm³, a po procesie – 600-900 mg/dm³.



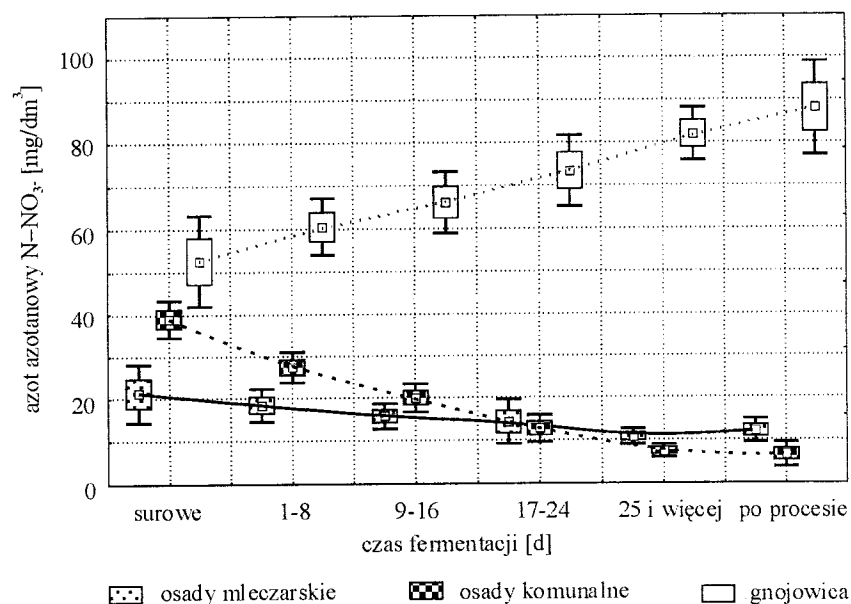
Rys. 4.3. Zmiany zawartości azotu ogólnego w czasie fermentacji metanowej w układzie nieprzepływowym



Rys. 4.4. Zmiany zawartości azotu amonowego w czasie fermentacji metanowej w układzie nieprzepływowym



Rys. 4.5. Zmiany zawartości azotu azotynowego w czasie fermentacji metanowej w układzie nieprzepływowym



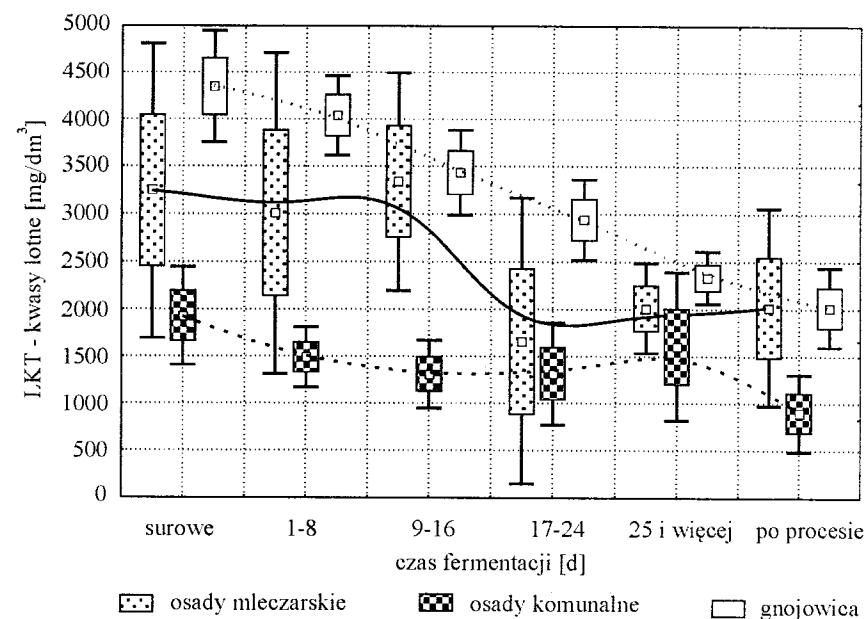
Rys. 4.6. Zmiany zawartości azotu azotanowego w czasie fermentacji metanowej w układzie nieprzepływowym

Zawartość azotu azotynowego (rys. 4.5) w trakcie procesu zmniejsza się w granicach 26-96%. Najbardziej obniża się w osadach ze ścieków komunalnych (z 0,85 do 0,03 mg/dm^3), a najmniej w osadach ze ścieków mleczarskich (z 0,66 do 0,39 mg/dm^3). W przypadku gnojowicy spadek ten wynosi z 16,8 do 8,2 mg/dm^3 , co znaczy, że wartości te są pośrednie w stosunku do wyżej wymienionych.

Zawartość azotu azotanowego została przedstawiona na rysunku 4.6. Osady ze ścieków komunalnych i mleczarskich zachowywały się podobnie, to znaczy zawartość azotu azotanowego w tych osadach ulegała zmniejszeniu z 20-40 mg/dm^3 do 6-12 mg/dm^3 , natomiast w przypadku gnojowicy wartość ta wzrastała z 52 mg/dm^3 do 88 mg/dm^3 .

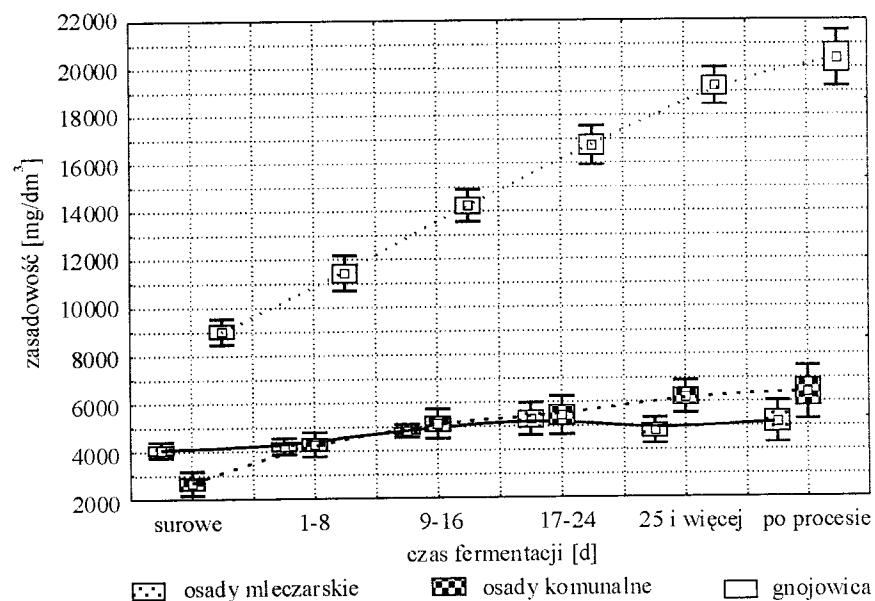
4.5.3. Lotne kwasy tłuszczowe, odczyn, kwasowość i zasadowość

Zawartość lotnych kwasów tłuszczowych ulegała w czasie obniżeniu, w przypadku fermentacji gnojowicy – z 4 000 do 2 000 $\text{mg CH}_3\text{COOH/dm}^3$, natomiast w osadzie ze ścieków mleczarskich – z 3 000 do 2 000 $\text{mg CH}_3\text{COOH/dm}^3$, a w osadzie z oczyszczania ścieków komunalnych – z 2 000 do 900 $\text{mg CH}_3\text{COOH/dm}^3$ (rys. 4.7).



Rys. 4.7. Zmiany zawartości lotnych kwasów tłuszczowych w czasie fermentacji metanowej w układzie nieprzepływowym

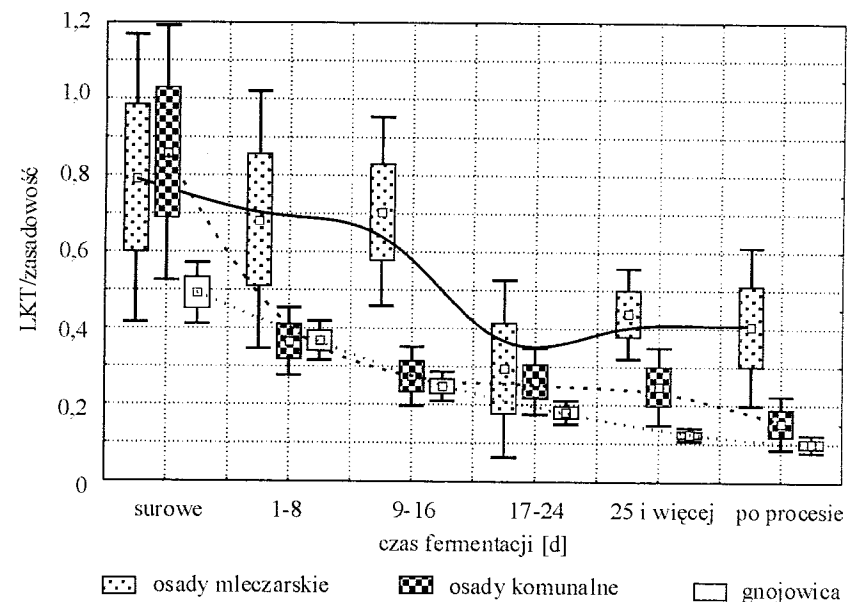
Zasadowość podczas fermentacji wzrastała i w przypadku gnojowicy wynosiła na początku 9 000 mg $\text{CaCO}_3/\text{dm}^3$, a na końcu procesu 20 000 mg $\text{CaCO}_3/\text{dm}^3$; dla osadów ze ścieków mleczarskich – odpowiednio – 4 000 i 5 100 mg $\text{CaCO}_3/\text{dm}^3$; w przypadku osadów ze ścieków komunalnych wskaźnik ten wzrastał od 2 600 mg $\text{CaCO}_3/\text{dm}^3$ do 6 300 mg $\text{CaCO}_3/\text{dm}^3$.



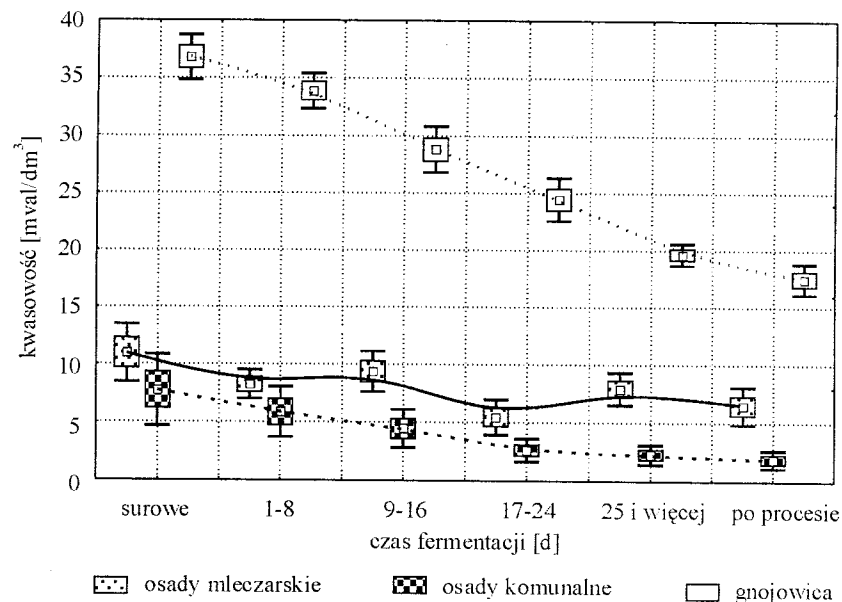
Rys. 4.8. Zmiany zawartości zasadowości w czasie fermentacji metanowej w układzie nieprzepływowym

Istotnym parametrem w eksploatacji komór fermentacyjnych jest stosunek lotnych kwasów tłuszczowych do zasadowości. Wartość tego wskaźnika zmieniała się w czasie procesu stabilizacji beztlenowej i została przedstawiona na rysunku 4.9. Wartość tego stosunku w fazie początkowej wynosiła od 0,5 w gnojowicy do 0,8 w pozostałych osadach. W końcowym etapie procesu wartość wynosiła: dla gnojowicy 0,1, dla osadów z ścieków komunalnych – 0,15, a dla osadów z oczyszczania ścieków mleczarskich – 0,41.

Wartość kwasowości w fermentujących osadach w miarę trwania procesu ulegała systematycznemu zmniejszaniu, co zostało pokazane na rysunku 4.10. W gnojowicy wartość kwasowości zmniejszyła się – z 36,8 do 17,5 mval/dm³, w osadach komunalnych – z 7,75 do 1,9 mval/dm³, a w mleczarskich – z 11,0 do 6,5 mval/dm³.

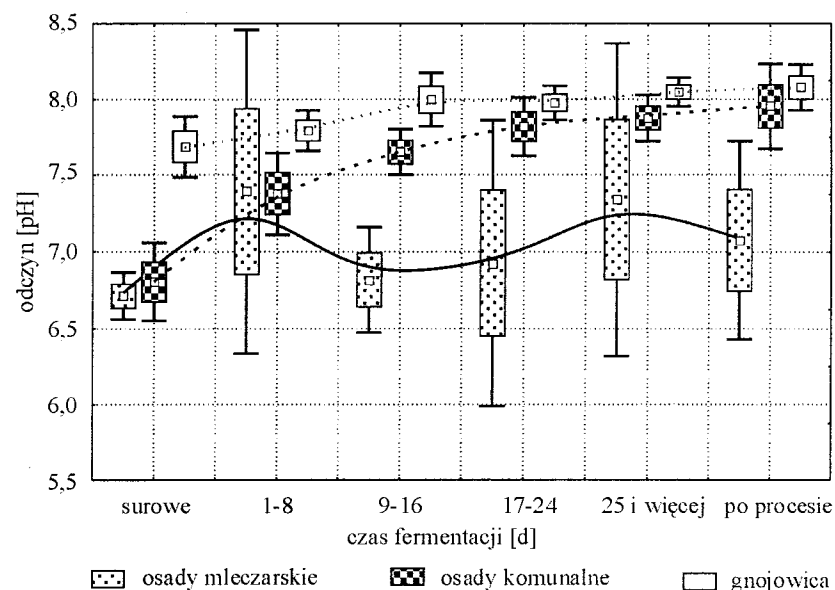


Rys. 4.9. Zmiany stosunku zawartości lotnych kwasów tłuszczowych do zasadowości w czasie fermentacji metanowej w układzie nieprzepływowym



Rys. 4.10. Zmiany kwasowości w czasie fermentacji metanowej w układzie nieprzepływowym

W miarę trwania procesu fermentacji metanowej wartość odczynu powoli i systematycznie wzrastała, osiągając w gnojowicy 8,1 pH, w osadach ze ścieków komunalnych 7,9 pH i w osadach z oczyszczania ścieków mleczarskich 7,1 pH (rys. 4.11).

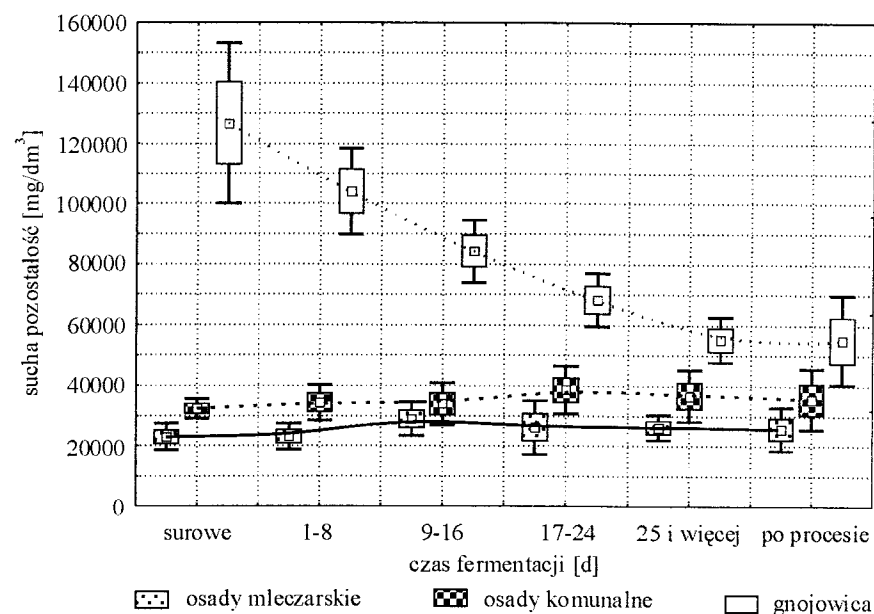


Rys. 4.11. Zmiany zawartości odczynu w czasie fermentacji metanowej w układzie nieprzepływowym

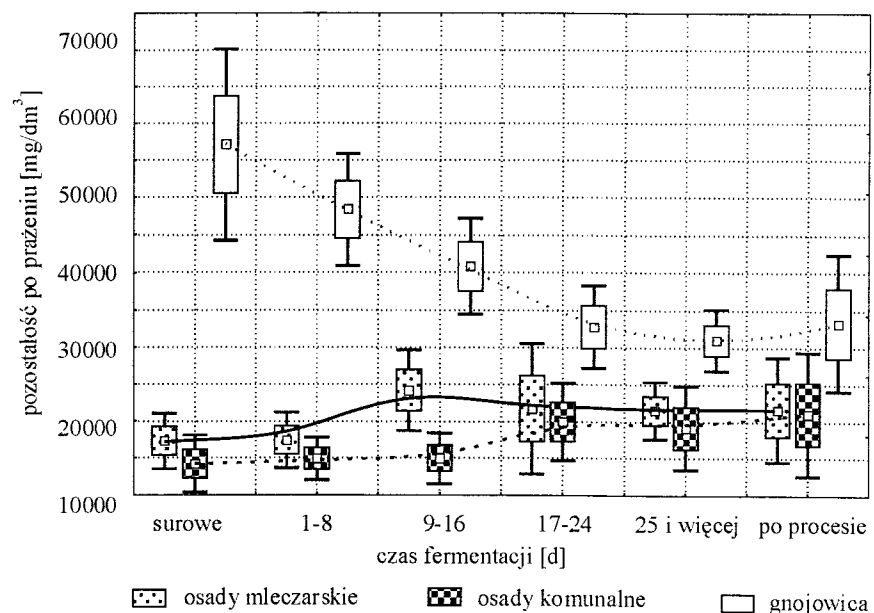
4.5.4. Pozostałość po prażeniu, sucha pozostałość i straty po prażeniu

Sucha pozostałość (sucha masa) w czasie procesu fermentacji metanowej w gnojowicy ulegała obniżeniu średnio z 127 g/dm^3 do 55 g/dm^3 , czyli o przeszło 50%. W pozostałych badanych osadach zawartość suchej masy pozostawała, w zasadzie, na niezmiennym poziomie, a nawet o 10% wzrosła (rys. 4.12). Jest to spowodowane zagęszczaniem osadu, a także prawdopodobieństwem, że wydzielający się dwutlenek węgla łączy się z wodorotlenkiem wapnia i powstaje węglan wapnia, powodujący nieznaczny wzrost suchej masy.

Zawartość pozostałości po prażeniu w gnojowicy na początku procesu wynosiła 57 g/dm^3 (44,7% s.m.), po procesie – 34 g/dm^3 (60,7% s.m.). W osadach z oczyszczania ścieków mleczarskich wartość tego wskaźnika wynosiła na wlocie – 17 g/dm^3 (75 % s.m.), na wylocie – $21,6 \text{ g/dm}^3$ (82% s.m.). W przypadku osadów z oczyszczania ścieków komunalnych wynosiła ona na wlocie – 14 g/dm^3 (44% s.m.), na wylocie – 21 g/dm^3 (54,5% s.m.) (rys. 4.13).

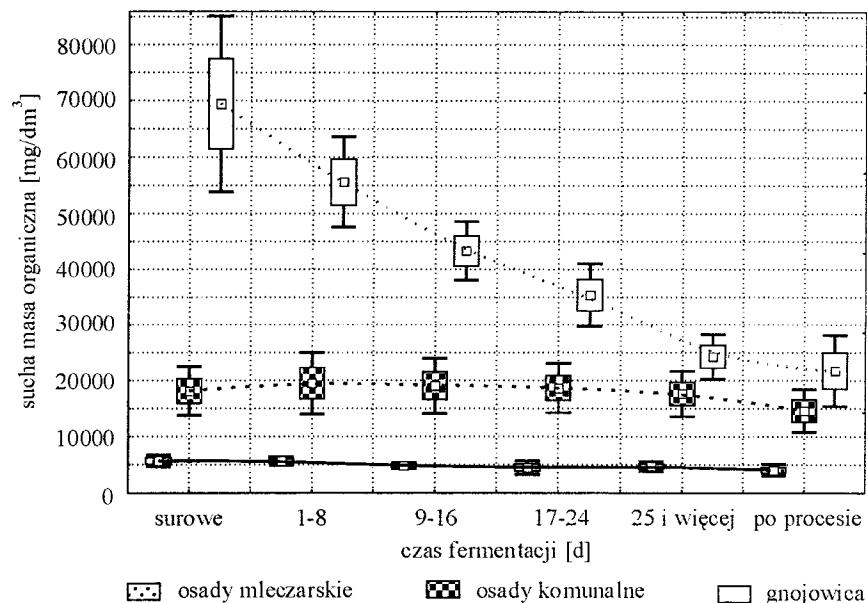


Rys. 4.12. Zmiany zawartości suchej pozostałości w czasie fermentacji metanowej w układzie nieprzepływowym



Rys. 4.13. Zmiany zawartości pozostałości po prażeniu w czasie fermentacji metanowej w układzie nieprzepływowym

Wartość suchej masy organicznej, mierzona jako strata po prażeniu, w czasie procesu fermentacji we wszystkich rodzajach osadów, wyrażona w mg/dm^3 i procentach suchej masy, malała (rys. 4.14). Zawartość suchej masy organicznej w gnojowicy na początku procesu wynosiła $69,5 \text{ g/dm}^3$ (55,3% s.m.), po procesie – $21,8 \text{ g/dm}^3$ (39,3% s.m.). W przypadku osadów z oczyszczania ścieków mleczarskich wartość suchej masy organicznej wynosiła na wlocie – $5,6 \text{ g/dm}^3$ (25,1% s.m.), na wylocie – 4 g/dm^3 (17,9% s.m.). W osadach z oczyszczania ścieków komunalnych wartość ta wynosiła na początku procesu – $18,1 \text{ g/dm}^3$ (55,5% s.m.), na końcu procesu – $14,6 \text{ g/dm}^3$ (45,5% s.m.).



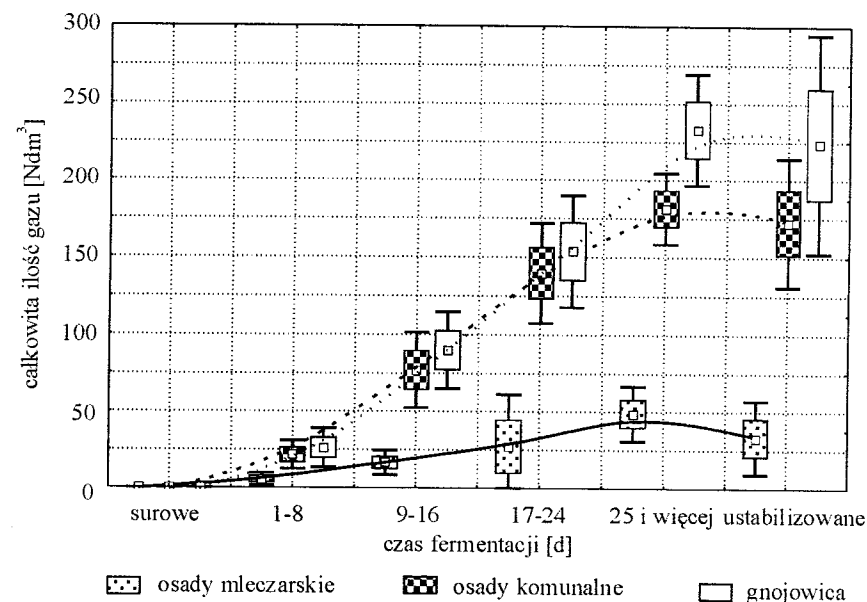
Rys. 4.14. Zmiany w suchej masie organicznej w czasie fermentacji metanowej w układzie nieprzepływowym

4.5.5. Biogaz

Okres wpracowania układu badawczego wynosił od 4 do 14 dni. W tym czasie nie obserwowano produkcji biogazu. Po tym okresie odnotowywano stały wzrost ilości wydzielanego gazu aż do uzyskania maksimum wydajności dobowej. Później każdy kolejny odczyt licznika gazowego wskazywał coraz mniejszą ilość gazu wydzielanego w ciągu doby.

Przeciętnie podczas procesu fermentacji metanowej wybranych osadów wydzielilo się od 30 do 230 litrów gazu. Całkowitą ilość gazu wydzieloną z poszczególnych rodzajów osadów przedstawia rysunek 4.15. We wszystkich seriach ba-

dawczych badano skład biogazu za pomocą aparatury wymienionej w rozdziale 3.2. Przykładowy skład biogazu z czterech badawczych serii przedstawiono w tabeli 4.11.



Rys. 4.15. Całkowita ilość wydzielającego się gazu w czasie fermentacji metanowej w układzie nieprzepływowym

Przykładowy skład biogazu z czterech serii badawczych (% objętości) **Tabela 4.11.**

Numer serii	CH ₄	CO ₂	CO	O ₂	H ₂ S	Inne
I	82	15	1	1	0	1
II	90	5	1	2	1	1
III	79	16	1	1	1	2
IV	80	16	1	1	1	1

4.5.6. Zależności pomiędzy wskaźnikami zanieczyszczeń

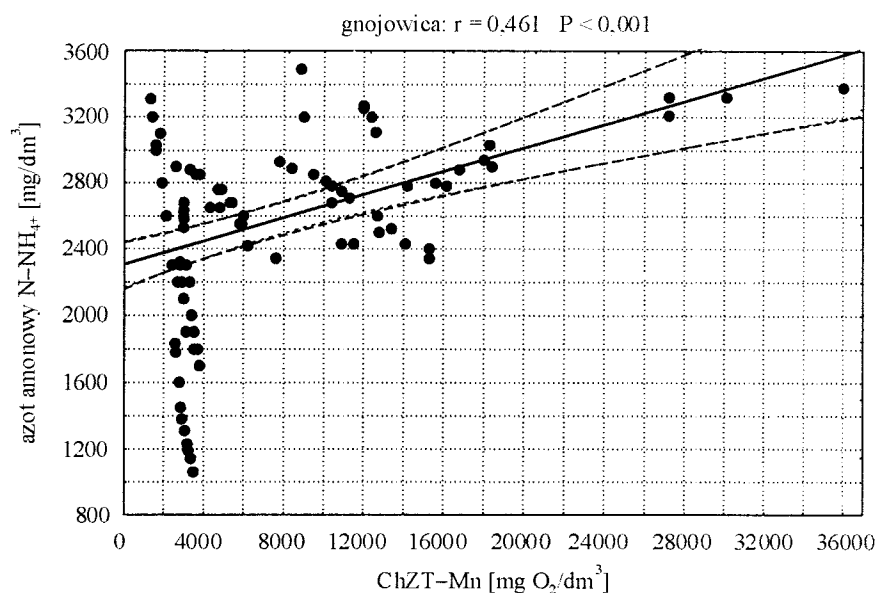
Podczas fermentacji metanowej osadów występuje ubytek masy organicznej oraz zmienia się wiele wskaźników zanieczyszczeń, charakteryzujących proces fermentacji, w tym głównie związków azotu, wskaźników zasadowości i zawartości kwasów lotnych. Przemiany te decydują o właściwościach osadu i świadczą o stopniu jego ustabilizowania. Wyznaczenie korelacji pomiędzy poszczególnymi

wskaźnikami może być podstawą oceny przebiegu procesu fermentacji metanowej i oceny dokładności pomiarów.

- Chemiczne zapotrzebowanie na tlen a azot amonowy

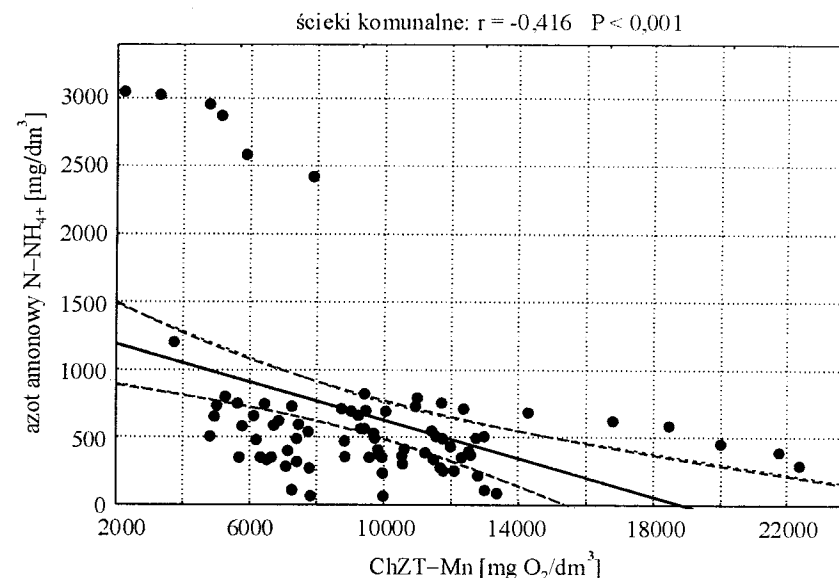
Wpływ wskaźnika chemicznego zapotrzebowania na tlen, oznaczonego metodą nadmanganianową (ChZT-Mn), oznaczonego w cieczy nadosadowej w poszczególnych badanych osadach ściekowych i gnojowicy, na zawartość azotu amonowego w osadach przedstawiono na rysunkach – 4.16, 4.17 i 4.18.

Wartość ChZT-Mn cieczy nadosadowej (umownie nazwaną utlenialnością) w przypadku fermentacji gnojowicy wahała się w przedziale 4-20 g/dm³, co odpowiadało zawartości azotu amonowego na poziomie 1 200-3 200 mg/dm³ i co przedstawiono na rysunku 4.16. Otrzymana zależność cechuje się jednak niską wartościowością empirycznego współczynnika korelacji.

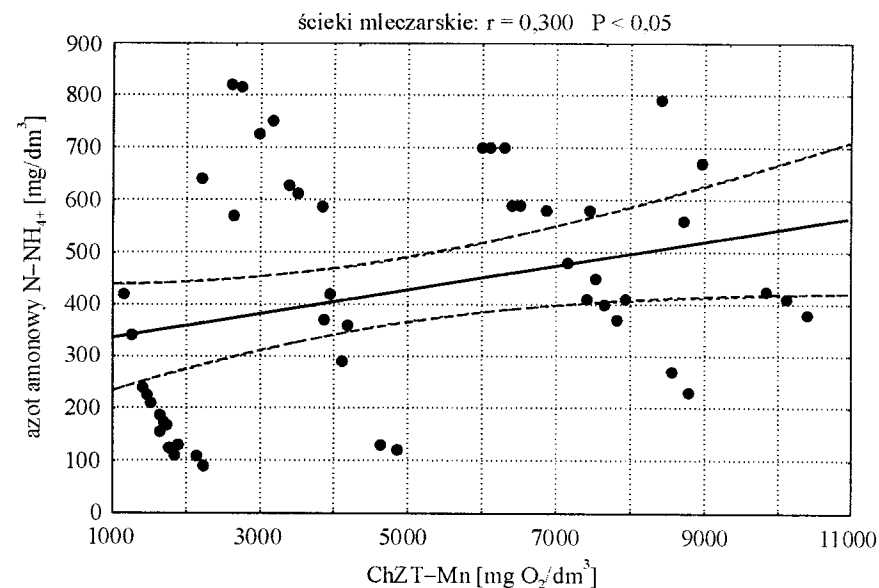


Rys. 4.16. Zmiany zawartości azotu amonowego w zależności od wartości chemicznego zapotrzebowania na tlen, oznaczonego metodą nadmanganianową podczas fermentacji w gnojowicy

Dla osadów ze ścieków komunalnych wartość chemicznego zapotrzebowania na tlen, oznaczonego metodą nadmanganianową, oznaczonego w cieczy nadosadowej, wynosiła najczęściej od 4 500 do 13 000 mg/dm³, co odpowiadało zawartości azotu amonowego w badanym osadzie od 200 do 900 mg/dm³ (rys. 4.17). Dla tych osadów, podobnie jak dla gnojowicy, otrzymana korelacja nie jest istotnie znacząca.



Rys. 4.17. Zmiany zawartości azotu amonowego w zależności od wartości chemicznego zapotrzebowania na tlen, oznaczonego metodą nadmanganianową podczas fermentacji osadu ze ścieków komunalnych

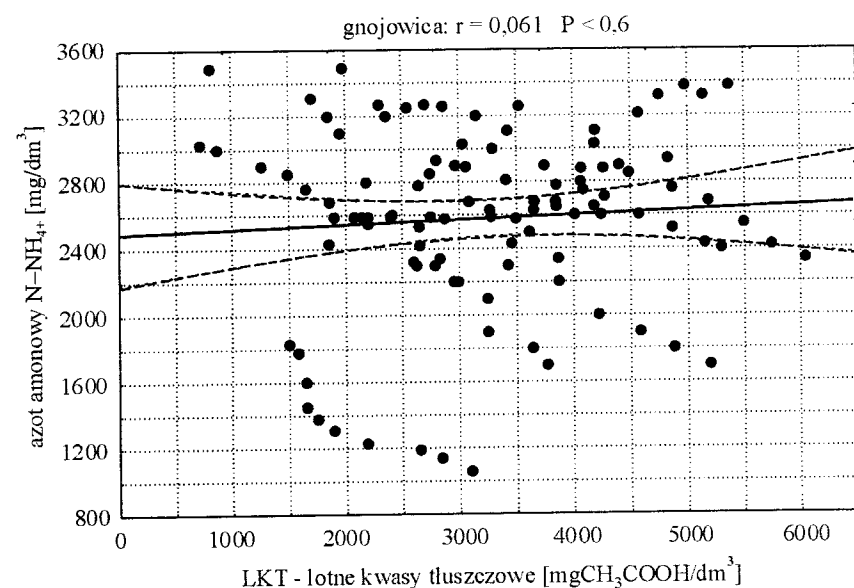


Rys. 4.18. Zmiany zawartości azotu amonowego w zależności od chemicznego zapotrzebowania na tlen oznaczonego metodą nadmanganianową podczas fermentacji osadów ze ścieków mleczarskich

W cieczy nadosadowej osadów ze ścieków mleczarskich wartość chemicznego zapotrzebowania na tlen, oznaczonego metodą nadmanganianową, wynosiła od 1 500 do 9 000 mg/dm³, co odpowiadało zawartości azotu amonowego w badanym osadzie od 100 do 800 mg/dm³ (rys. 4.18). Z wykresu wynika, że również dla tych osadów otrzymana korelacja nie jest istotnie znacząca.

• Lotne kwasy tłuszczowe a azot amonowy

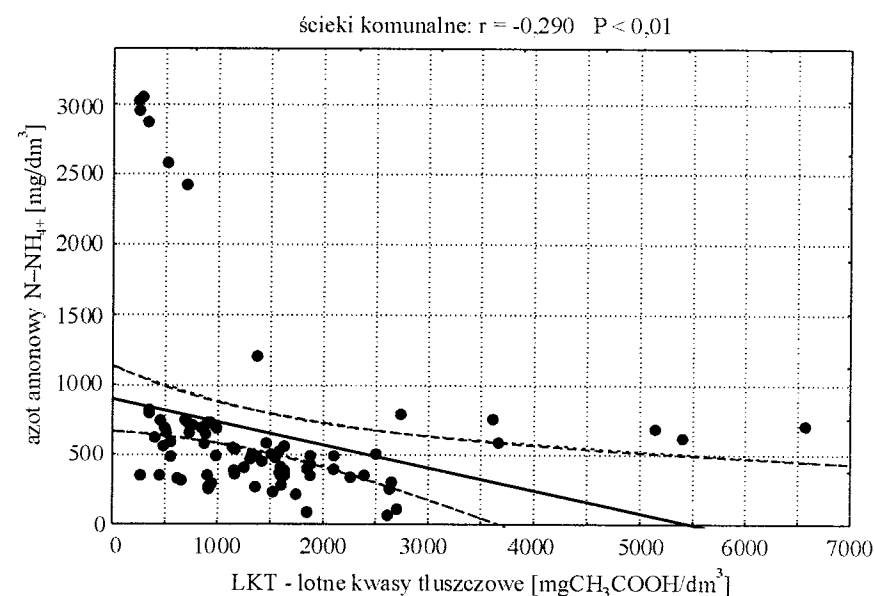
Korelację pomiędzy zawartością LKT a azotem amonowym w gnojowicy przedstawia rysunek 4.19. Zawartość LKT w gnojowicy wynosiła 1 500-5 000 mg CH₃COOH/dm³, a azotu amonowego w przedziale 2 000-3 400 mg/dm³. Z wykresu wynika, że również dla tych osadów otrzymana korelacja nie jest istotnie znacząca.



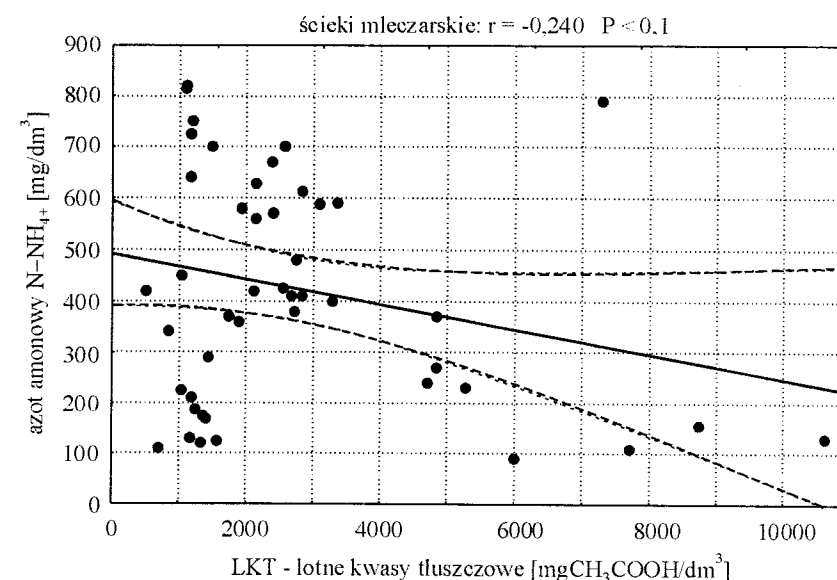
Rys. 4.19. Korelacja pomiędzy zawartością azotu amonowego a zawartością lotnych kwasów tłuszczowych w gnojowicy

Korelację pomiędzy zawartością LKT i azotu amonowego w osadach ze ścieków komunalnych przedstawia rysunek 4.20. Zawartość LKT w tych osadach wynosiła 400-2 600 mg CH₃COOH/dm³, a azotu amonowego zawierała się w przedziale 300-800 mg/dm³. Z wykresu wynika, że również dla tych osadów otrzymana korelacja nie jest istotnie znacząca. Natomiast LKT zawarte w osadach ze ścieków mleczarskich wahały się w przedziale 600-5 000 mg CH₃COOH/dm³, co odpowiadało wartości azotu amonowego na poziomie 100-800 mg/dm³.

Podobna korelacja jak w osadach ze ścieków komunalnych i mleczarskich występuje w przypadku gnojowicy, co przedstawiono na rysunku 4.21.



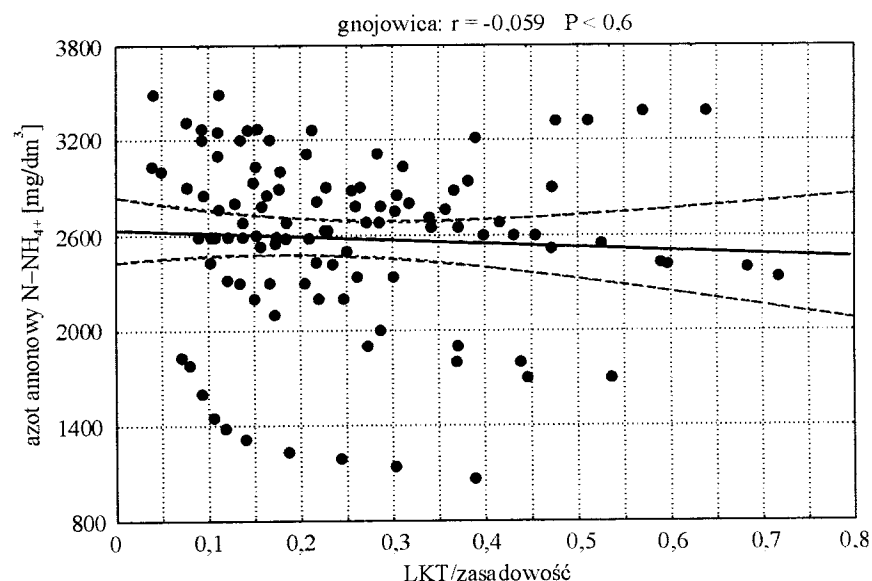
Rys. 4.20. Korelacja pomiędzy zawartością azotu amonowego a zawartością lotnych kwasów tłuszczowych w osadach ze ścieków komunalnych



Rys. 4.21. Korelacja pomiędzy zawartością azotu amonowego a zawartością lotnych kwasów tłuszczowych w osadach ze ścieków mleczarskich

- Azot amonowy a stosunek lotnych kwasów tłuszczowych do zasadowości

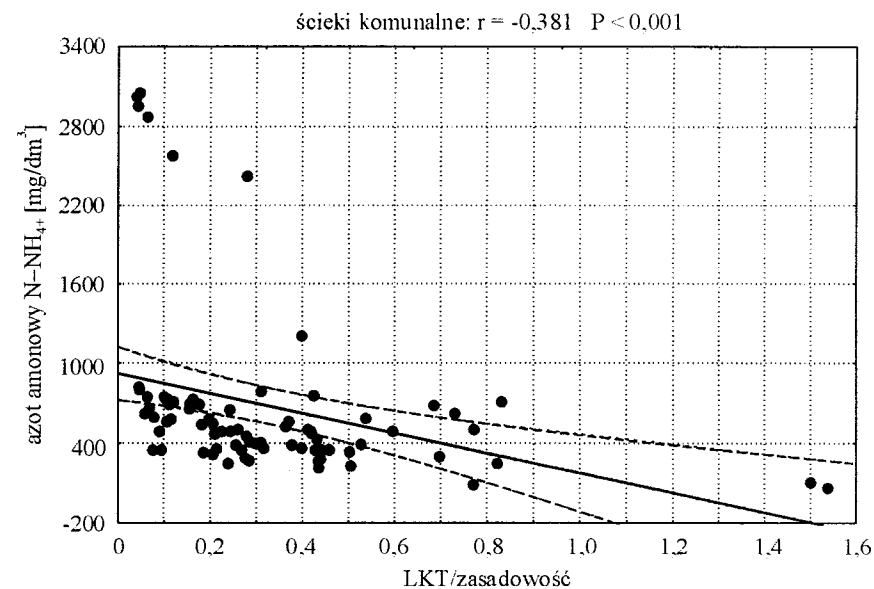
Zależności zawartości azotu amonowego w osadach poddawanych procesowi fermentacji metanowej od stosunku lotnych kwasów tłuszczowych do zasadowości przedstawiono na rysunkach 4.22, 4.23 i 4.24. Stosunek ten jest bardzo ważny i istotny w przypadku kontroli procesu stabilizacji.



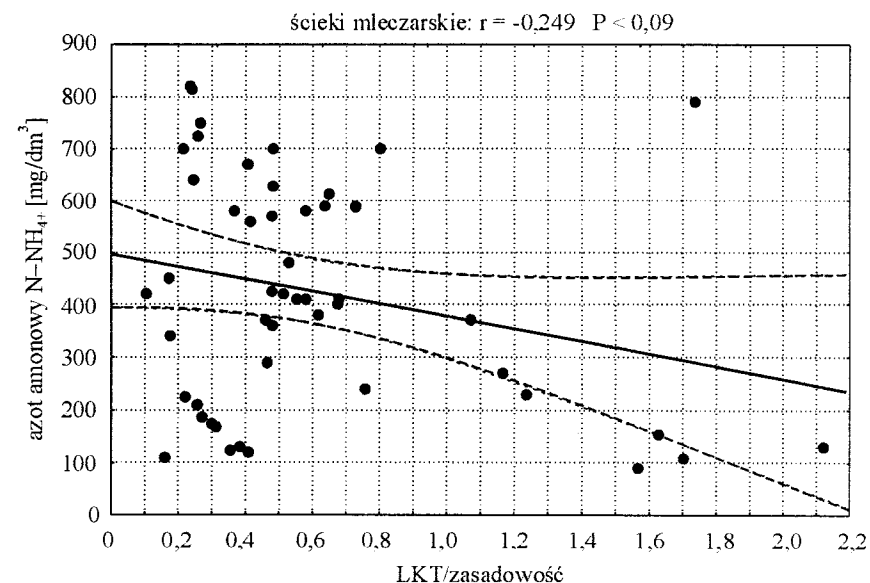
Rys. 4.22. Korelacja pomiędzy zawartością azotu amonowego a stosunkiem lotnych kwasów tłuszczowych do zasadowości w gnojowicy

Na rysunku 4.22 przedstawiono wpływ stosunku LKT do zasadowości na wartość azotu amonowego w osadach ze ścieków komunalnych. W tym przypadku stosunek LKT do zasadowości wahał się od 0,08 do 0,5, a azotu amonowego od 1 400 do 3 500 mg/dm³. Z wykresu wynika, że również dla tych osadów otrzymana korelacja nie jest istotnie znacząca.

Na rysunku 4.23 przedstawiono wpływ stosunku LKT do zasadowości na wartość azotu amonowego w osadach ze ścieków mleczarskich. W tym przypadku stosunek LKT do zasadowości wahał się od 0,2 do 0,9, a azotu amonowego od 100 do 750 mg/dm³. Z wykresu wynika, że również dla tych osadów otrzymana korelacja nie jest istotnie znacząca.



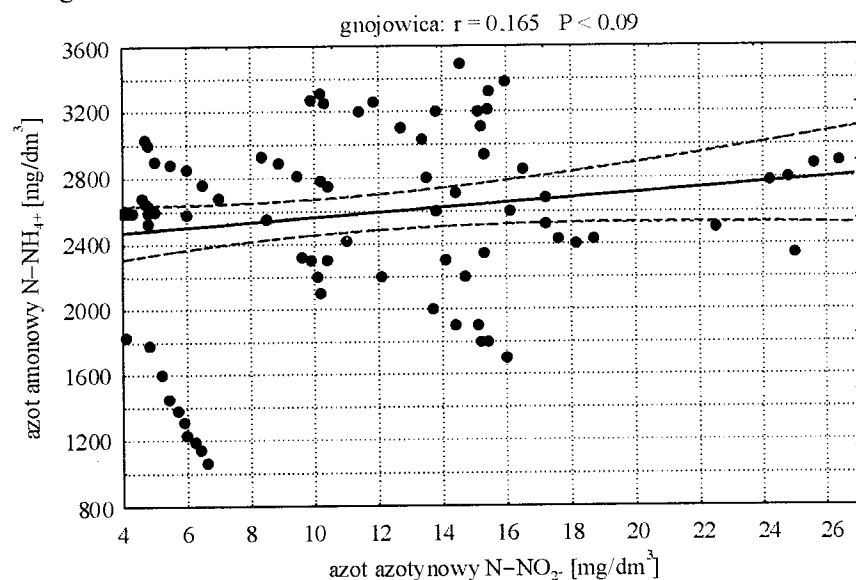
Rys. 4.23. Korelacja pomiędzy zawartością azotu amonowego a stosunkiem lotnych kwasów tłuszczowych do zasadowości w osadach ze ścieków komunalnych



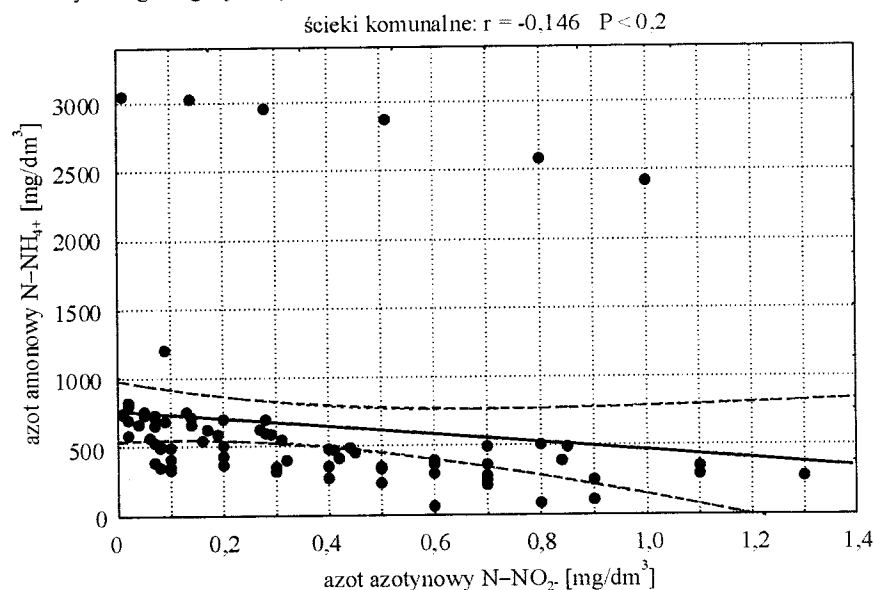
Rys. 4.24. Korelacja pomiędzy zawartością azotu amonowego a stosunkiem lotnych kwasów tłuszczowych do zasadowości w osadach ze ścieków mleczarskich

- Azot azotynowy a azot amonowy

Na rysunkach 4.25, 4.26 i 4.27 przedstawione są zależności pomiędzy zawartością azotu azotynowego w osadach poddawanych badaniom a wartością azotu amonowego.



Rys. 4.25. Korelacja pomiędzy zawartością azotu amonowego a zawartością azotu azotynowego w gnojowicy

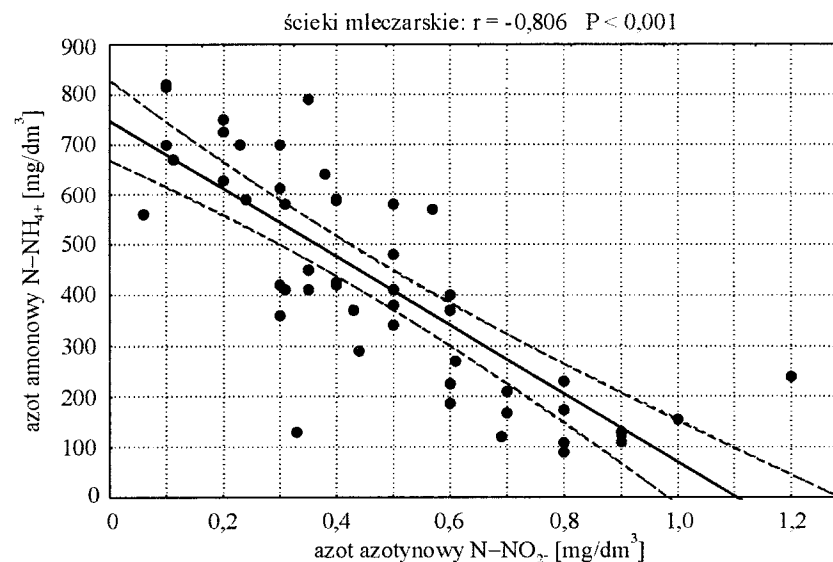


Rys. 4.26. Korelacja pomiędzy zawartością azotu amonowego a zawartością azotu azotynowego w osadach ze ścieków komunalnych

Na rysunku 4.25 przedstawiono wpływ stężenia azotu azotynowego w gnojowicy na wartość azotu amonowego w gnojowicy. W tym przypadku wartość azotu azotynowego wahała się od 4 do 18 mg/dm³, a wartość azotu amonowego od 1 200 do 3 500 mg/dm³.

Na rysunku 4.26 przedstawiono wpływ wartości azotu azotynowego na wartość azotu amonowego w osadach ze ścieków komunalnych. Wartość azotu azotynowego wahała się od 0,02 do 0,9, a wartość azotu amonowego od 100 do 750 mg/dm³.

W przypadku osadów ze ścieków mleczarskich zawartość azotu azotynowego wynosiła od 0,1 do 0,9 mg/dm³, a zawartość azotu amonowego wynosiła 100-700 mg/dm³ (rys. 4.27).

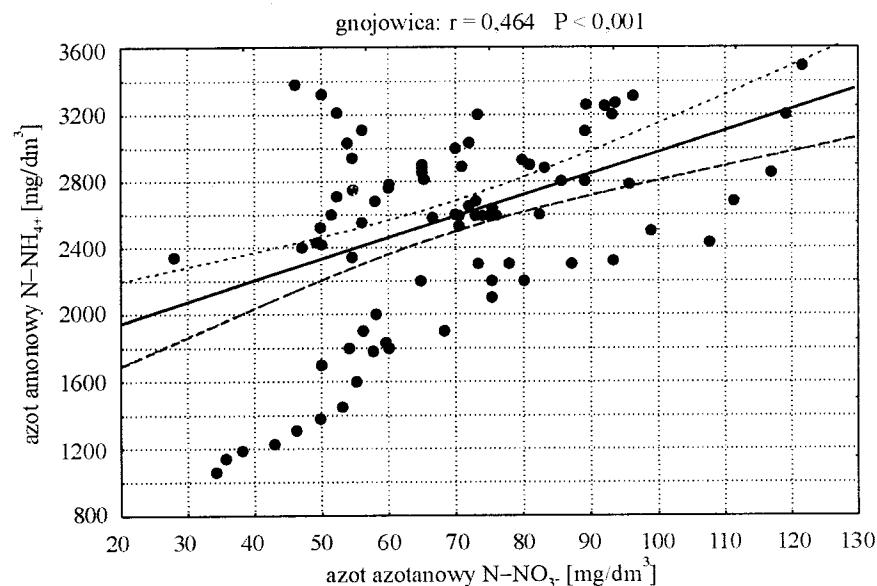


Rys. 4.27. Korelacja pomiędzy zawartością azotu amonowego a zawartością azotu azotynowego w osadach ze ścieków mleczarskich

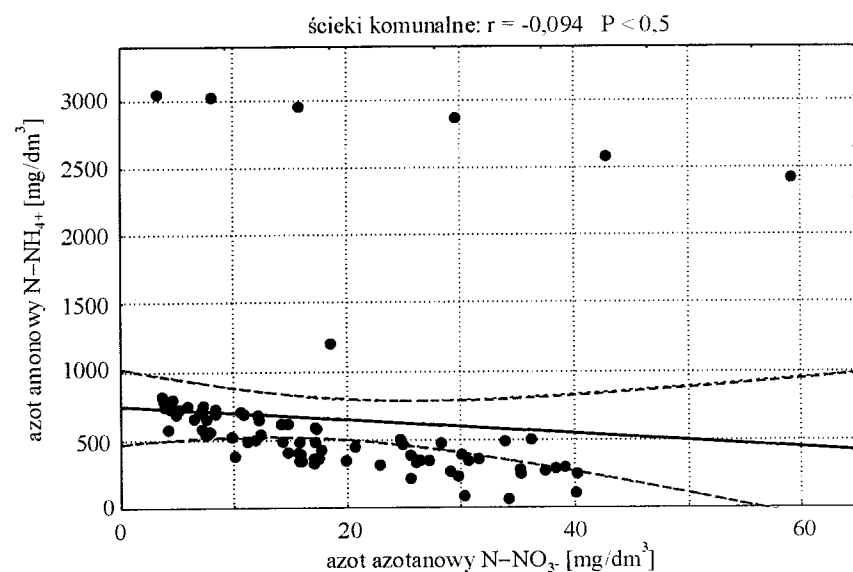
- Azot amonowy a azot azotanowy

Na rysunku 4.28 przedstawiono wpływ zawartości azotu azotanowego na wartość azotu amonowego w gnojowicy. Wartość azotu azotanowego wahała się od 35 do 100 mg/dm³, a wartość azotu amonowego od 1200 do 3500 mg/dm³.

Na rysunku 4.29 przedstawiono wpływ wartości azotu azotanowego na wartość azotu amonowego w osadach ze ścieków komunalnych. Wartość azotu azotynowego wahała się od 5 do 40 mg/dm³, a wartość azotu amonowego od 100 do 750 mg/dm³.

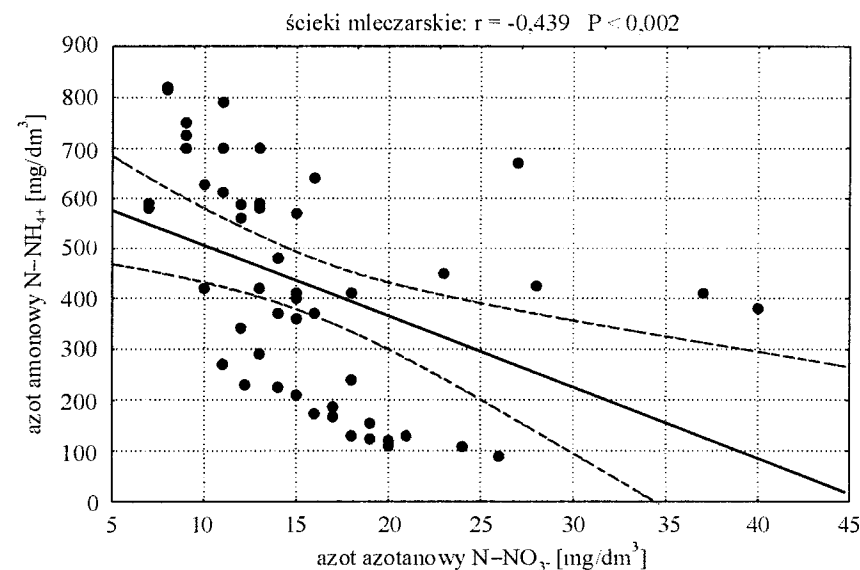


Rys. 4.28. Korelacja pomiędzy zawartością azotu amonowego a zawartością azotu azotanowego w gnojowicy



Rys. 4.29. Korelacja pomiędzy zawartością azotu amonowego a zawartością azotu azotanowego w osadach ze ścieków komunalnych

W przypadku osadów ze ścieków mleczarskich (rys. 4.30) zawartość azotu azotanowego wynosiła 8 do 20 mg/dm³, a azotu amonowego – 100-700 mg/dm³.



Rys. 4.30. Korelacja pomiędzy zawartością azotu amonowego a zawartością azotu azotanowego w osadach ze ścieków mleczarskich

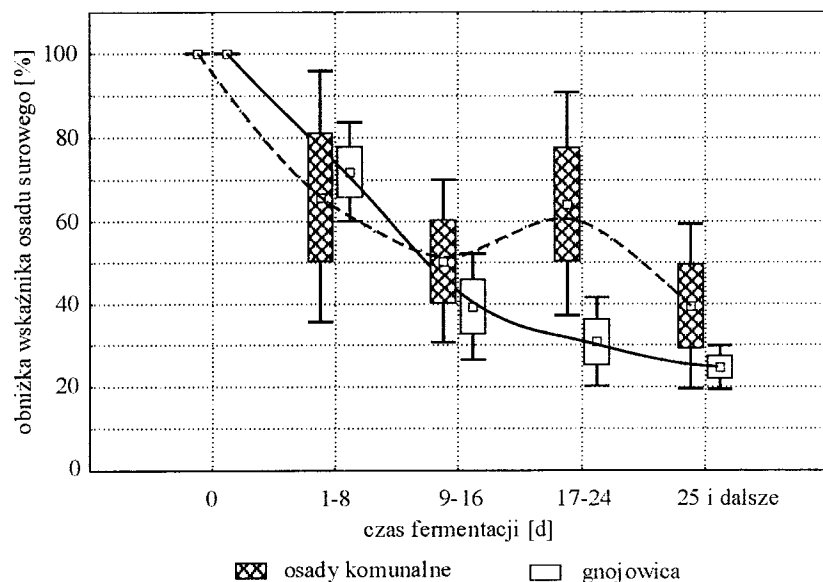
Otrzymane słabe korelacje pomiędzy wybranymi wartościami wskaźników charakteryzujących proces fermentacji metanowej wybranych osadów ściekowych świadczą o małej zależności między tymi wskaźnikami. Zależą one przede wszystkim od rodzaju osadu ściekowego i czasu trwania procesu stabilizacji. Zostało to wykorzystane przy wyznaczaniu indeksu efektywności procesu stabilizacji.

4.6. Wyniki badań (układ przepływowy)

Badaniom technologicznym w układzie przepływowym poddano gnojowicę oraz osady pochodzące ze ścieków komunalnych. Nie można było przeprowadzać procesu w laboratorium ze względu na potrzebę codziennego dostarczania surowych osadów, a także ze względu na znane i powszechnie stosowane układy przepływowe procesu fermentacji.

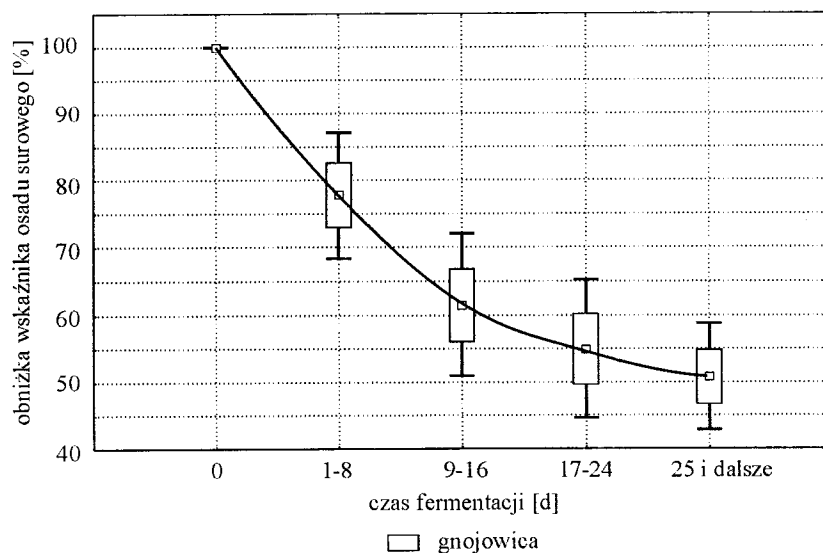
4.6.1. Substancje organiczne

Rozkład substancji organicznych oznaczonych jako ChZT-Cr w funkcji czasu fermentacji przedstawia rysunek 4.31. Po procesie fermentacji w badanych osadach ich wartość jest zbliżona i wynosi około 25-40% wartości początkowej.



Rys. 4.31. Zmiany zawartości ChZT-Cr w czasie fermentacji metanowej w układzie przepływowym

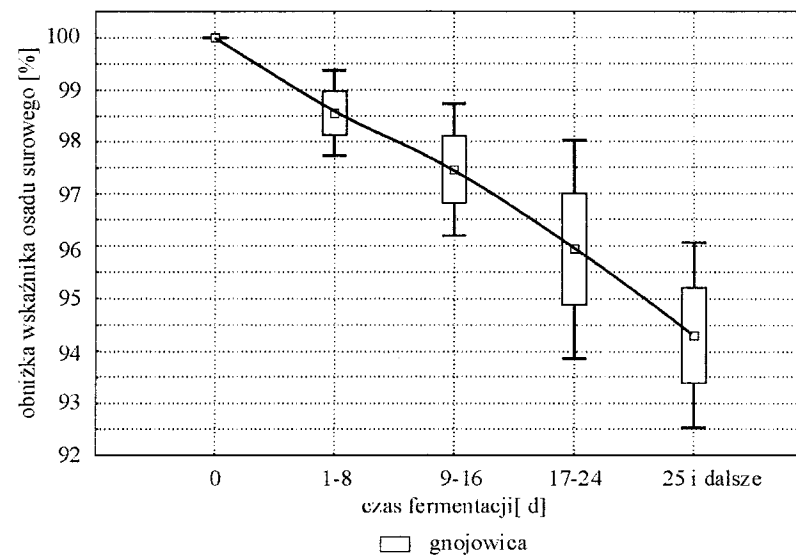
Ilość związków organicznych mierzonych chemicznym zapotrzebowaniem na tlen, oznaczonym metodą nadmanganianową (ChZT-Mn), w cieczy nadosadowej w przypadku gnojowicy uległa w czasie procesu fermentacji zmniejszeniu o około 50%, co przedstawiono na rysunku 4.32.



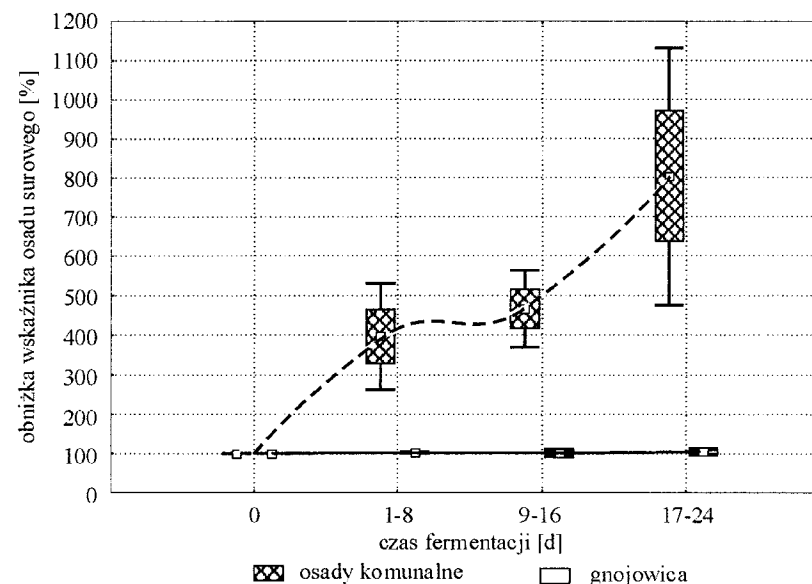
Rys. 4.32. Zmiany zawartości ChZT-Mn w czasie fermentacji metanowej w układzie przepływowym

4.6.2. Formy azotu

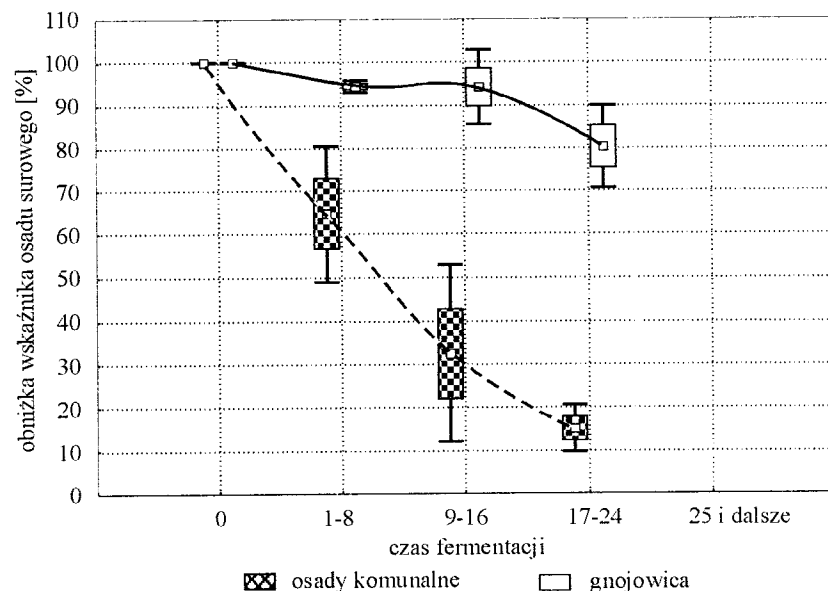
Wyniki badań zawartości wszystkich form azotu, to jest azotu ogólnego, amonowego, azotynowego i azotanowego, w osadach w czasie fermentacji przedstawiono na rysunkach 4.33, 4.34, 4.35 i 4.36.



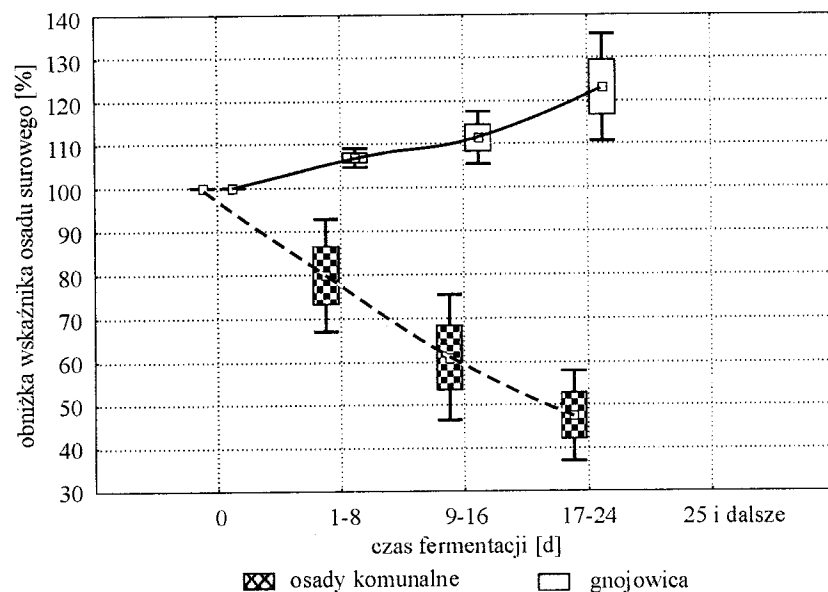
Rys. 4.33. Zmiany zawartości azotu ogólnego w czasie fermentacji metanowej w układzie przepływowym



Rys. 4.34. Zmiany zawartości azotu amonowego w czasie fermentacji metanowej w układzie przepływowym



Rys. 4.35. Zmiany zawartości azotu azotynowego w czasie fermentacji metanowej w układzie przepływowym



Rys. 4.36. Zmiany zawartości azotu azotanowego w czasie fermentacji metanowej w układzie przepływowym

Zawartość azotu ogólnego w przypadku gnojowicy zmalała w czasie fermentacji w niewielkim stopniu, bo o około 6-10% (rys. 4.33).

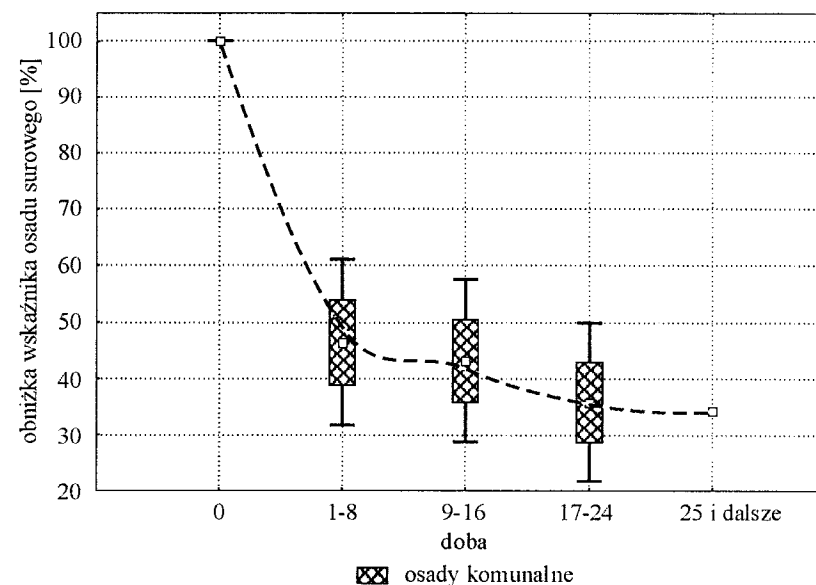
Zawartość azotu amonowego w czasie trwania procesu fermentacji wzrosła. Najwyższy wzrost odnotowano w przypadku osadów z oczyszczania ścieków komunalnych, w których wartości po procesie są sześć, siedem razy wyższe niż początkowe; w przypadku gnojowicy wzrost jest nieznaczny, ponieważ tylko o około 10-20% (rys. 4.34).

Zawartość azotu azotynowego ulega największemu obniżeniu o około 82% w stosunku do wartości początkowej w osadach ze ścieków komunalnych, a najmniejszemu – o około 20% w osadach z gnojowicy (rys. 4.35).

Zawartość azotu azotanowego w osadach z oczyszczania ścieków komunalnych ulegała zmniejszeniu o około 45-50%, natomiast w przypadku gnojowicy wzrosła o około 20% (rys. 4.36).

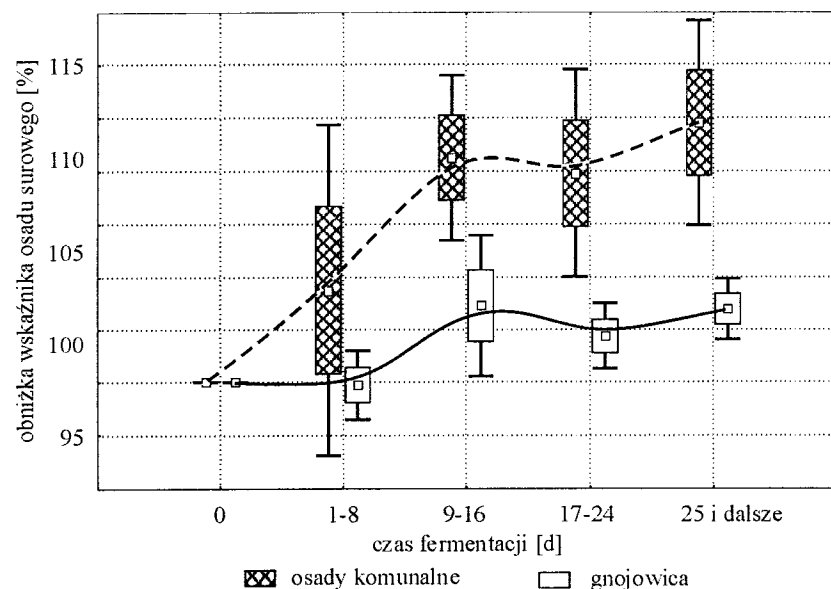
4.6.3. Lotne kwasy tłuszczowe i odczyn

Zawartość lotnych kwasów tłuszczowych w osadach pochodzących z oczyszczania ścieków komunalnych w fermentacji prowadzonej w układzie przepływowym ulegała obniżeniu o około 65% w stosunku do wartości początkowej (rys. 4.37).



Rys. 4.37. Zmiany zawartości lotnych kwasów tłuszczowych w czasie fermentacji metanowej w układzie przepływowym

Wartość odczynu w osadach pochodzących z oczyszczania ścieków komunalnych po fermentacji była wyższa o około 12-13% w stosunku do wartości odczynu na początku procesu. W przypadku gnojowicy wzrost był niższy i wynosił około 3-4% (rys. 4.38).

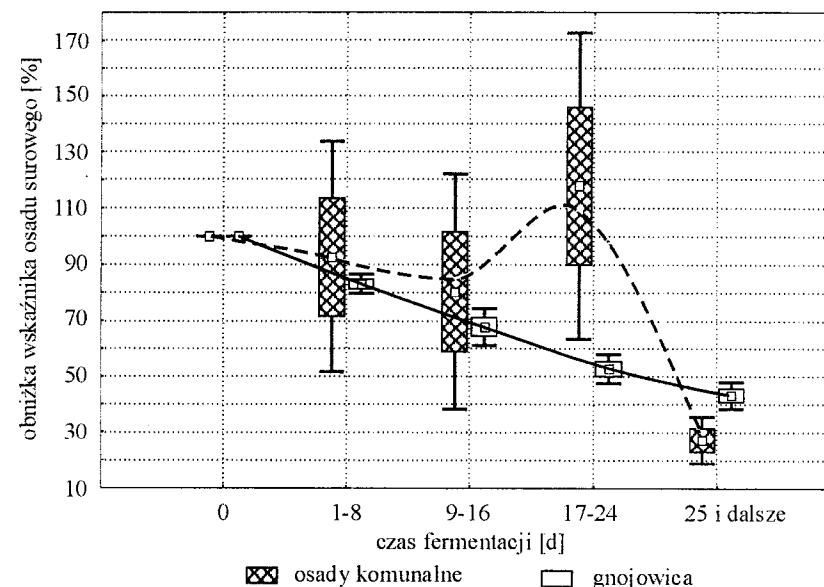


Rys. 4.38. Zmiany zawartości odczynu w czasie fermentacji metanowej w układzie przepływowym

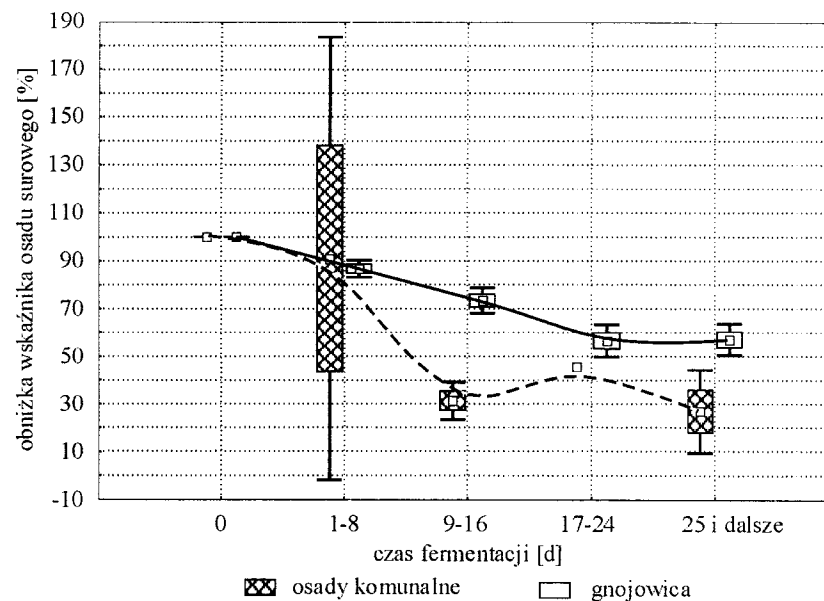
4.6.4. Pozostałość po prażeniu, sucha pozostałość i straty po prażeniu

Sucha pozostałość (sucha masa) w czasie procesu fermentacji metanowej w układzie przepływowym w gnojowicy ulegała obniżeniu średnio o przeszło 55% w stosunku do wartości początkowej, natomiast w osadach pochodzących z oczyszczania ścieków komunalnych spadek w stosunku do wartości początkowej wynosił 70%; po około 15 dniach od początku procesu nastąpił wzrost o 10%, a następnie spadek (rys. 4.39).

Zawartość substancji mineralnych, po procesie fermentacji metanowej w układzie przepływowym, wyrażona w procentach w stosunku do wartości początkowej, zmalała w przypadku gnojowicy o około 40%, a w osadach pochodzących z oczyszczania ścieków komunalnych o około 70% (rys. 4.40).

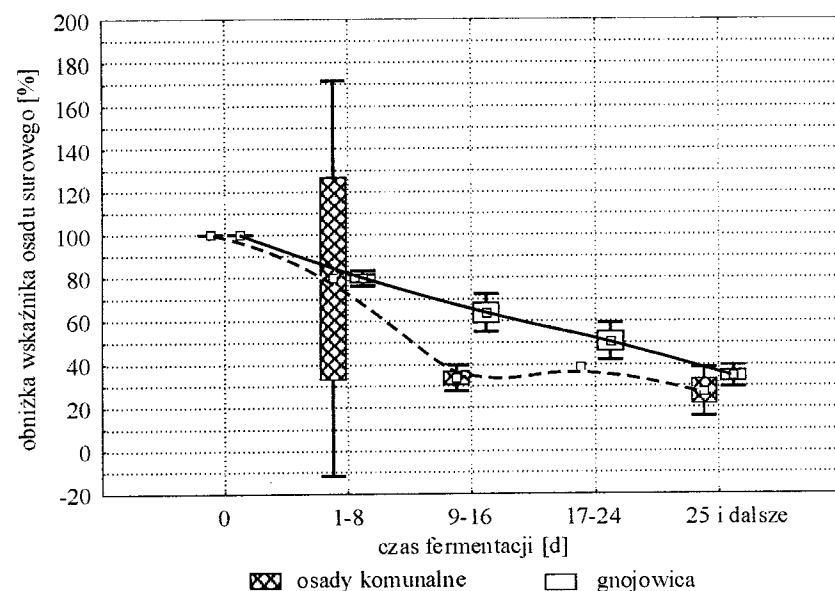


Rys. 4.39. Zmiany zawartości suchej pozostałości w czasie fermentacji metanowej w układzie przepływowym



Rys. 4.40. Zmiany zawartości pozostałości po prażeniu w czasie fermentacji metanowej w układzie przepływowym

Wartość suchej masy organicznej mierzonej jako strata przy prażeniu, w czasie procesu fermentacji prowadzonej w układzie przepływowym, zmalała w badanych dwóch rodzajach osadów w stosunku do wartości na początku procesu: o 50% – gnojowica i 70% – osady pochodzące z oczyszczania ścieków komunalnych (rys. 4.41).

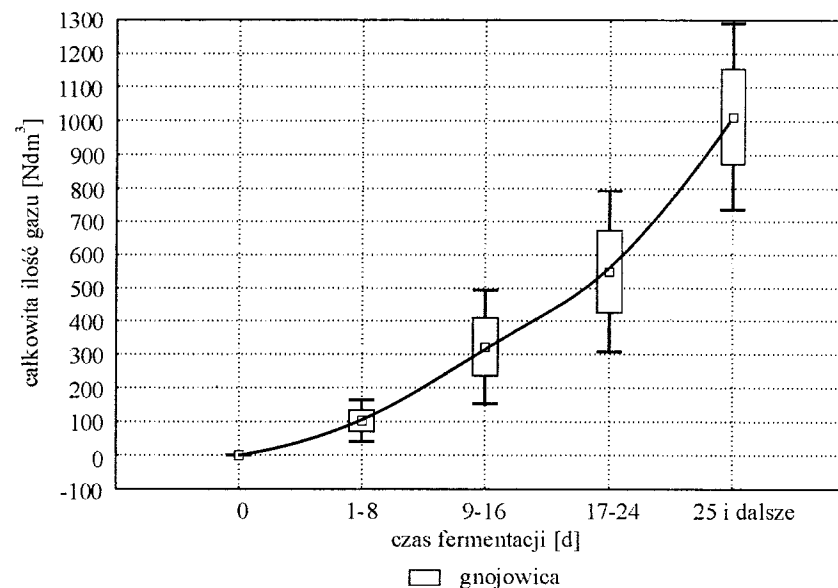


Rys. 4.41. Zmiany w suchej masie organicznej w czasie fermentacji metanowej w układzie przepływowym

4.6.5. Biogaz

Okres wpracowania układu badawczego wynosił od 4 do 14 dni. W tym czasie praktycznie nie obserwowano produkcji biogazu. Po tym okresie odnotowywano stały wzrost ilości wydzielanego gazu aż do uzyskania maksimum wydajności dobowej, a każdy kolejny odczyt licznika gazowego charakteryzował się podobną ilością wydzielonego gazu w ciągu doby. Przykładowy wykres całkowitego wydzielonego biogazu w przypadku fermentacji metanowej prowadzonej w układzie przepływowym w gnojowicy pokazano na rysunku 4.42. Całkowita ilość wydzielonego biogazu wyniosła około 1 000 Ndm³ w czasie 34 dni.

We wszystkich seriach badawczych badano skład biogazu za pomocą aparatury wymienionej w rozdziale 3.2. Przykładowy skład biogazu z trzech badawczych serii przedstawiono w tabeli 4.12.



Rys. 4.42. Całkowita ilość wydzielającego się gazu w czasie fermentacji metanowej w układzie przepływowym

Tabela 4.12.

Przykładowy skład biogazu z trzech serii badawczych (% objętości)

Numer serii	CH ₄	CO ₂	CO	O ₂	H ₂ S	Inne
I	78	18	1	1	0	2
II	86	9	1	2	1	1
III	76	19	1	1	1	2

4.7. Ocena wyników badań

Przeprowadzone badania nad procesem fermentacji osadów ściekowych i gnojowicy wykazały, że proces ten pozwala na wysoką obniżkę związków organicznych w postaci ChZT, dochodzącą średnio do 77% (na przykład z 84,1 g/dm³ do 19,2 g/dm³ w przypadku gnojowicy). Dostępne dane literaturowe [56-84] podają wartość 78% jako maksymalny stopień rozkładu związków organicznych, wyrażonych jako ChZT. Taką wartość osiągnięto dla osadów ze ścieków mleczarskich i komunalnych; w przypadku gnojowicy wartość ta była wielkością średnią.

Otrzymane w badaniach wyniki są wyższe od wartości podanych przez Buračewskiego i Mazurczaka [9, 18]. Autorzy ci w swoich badaniach stosowali codzienne dawkowanie biomasy, natomiast w badaniach prezentowanych w niniej-

szej rozprawie osad dawkowano raz na trzy-cztery dni, w ilości około 5% objętości całej masy, co w przypadku pierwszego modelu wykorzystywanego w badaniach dawało 0,8 l, w przypadku drugiego modelu stosowanego w badaniach dawało około 0,5 l. Pozwalało to na lepsze wpracowanie się układu biodegradacyjnego, dzięki czemu efekt stabilizacji był wyższy.

W 1929 roku Fischer [9] stwierdził, że duży wpływ na efektywność procesu fermentacji ma stężenie suchej masy zawartej w osadach poddawanych procesowi beztlenowego rozkładu. Wykazał on, że osad zawierający około 20% suchej masy daje się jeszcze fermentować, a optymalna zawartość suchej masy w osadach poddawanych procesowi wynosi 6-8%. Do badań prezentowanych w niniejszej pracy używano osadów i gnojowicy o stężeniu wynoszącym od 3,1 do 20,4% suchej masy. Lepsze efekty rozkładu związków organicznych uzyskano przy wartości stężenia suchej masy w granicach 10-15%, a więc nieco wyższych niż wynika z badań Fischera.

Podczas procesu fermentacji metanowej azot organiczny transformowany jest do azotu amonowego, co powodowało wzrost jego stężenia w przerabianym osadzie – w gnojowicy średnio o około 20%, w osadach ze ścieków mleczarskich o około 54% i w osadach z oczyszczania ścieków komunalnych o około 56%. Badania dowiodły, że w warunkach beztlenowego procesu stabilizacji w gnojowicy zwiększa się w osadzie zawartość związków azotu azotanowego średnio o 67% (na przykład z 52,6 mg/dm³ do 88,0 mg/dm³). W osadach ze ścieków komunalnych oraz w osadach ze ścieków mleczarskich następuje spadek tej formy azotu odpowiednio o 83% i 43%.

Podczas badań prowadzonych przez autora zaobserwowano wpływ odczynu na zawartość metanu w wydzielanym biogazie. Zawartość ta wynosiła np. przy:

- pH = 7,15-85% CH₄,
- pH = 7,75-83% CH₄,
- pH = 7,98-82% CH₄,
- pH = 8,20-79% CH₄.

Otrzymana zawartość metanu w biogazie mieści się w przedziałach podanych w dostępnych danych źródłowych [56, 58, 61, 62, 63]. Keefer [18] stwierdził, że więcej gazu pofermentacyjnego można uzyskać z biomasy o dużej zawartości suchej masy. W przeprowadzonych badaniach uzyskał z biomasy o stężeniu 25% s.m., o 8% więcej gazu niż z biomasy o zawartości suchej masy 5,3%.

W badaniach własnych uzyskano 400-600 Ndm³ gazu/kg usuniętego ładunku ChZT przy stężeniu suchej masy 10-20,4%.

Skład biogazu ustalono w ścisłym powiązaniu z czasem trwania procesu stabilizacji anaerobowej, stopniem rozkładu substancji organicznych oraz ze zmianami zawartości azotu amonowego, lotnych kwasów tłuszczowych i odczynu fermentującego osadu i wody nadosadowej.

Jednym z parametrów, który umożliwia ocenę warunków fermentacji jest zawartość lotnych kwasów tłuszczowych. Nagły wzrost stężenia tych związków sygnalizuje początek wadliwej pracy komór. Obserwacja zmian zawartości LKT w badaniach laboratoryjnych w układach nieprzepływowych wykazała, że zawartość mieściła się w przedziale od 510 mg CH₃COOH/dm³ do 4 700 mg CH₃COOH/dm³. We wszystkich seriach badawczych odnotowano obniżkę kwasów organicznych od 35,5% do 89%, co świadczy o prawidłowo zachodzącej fermentacji.

Wskaźnikiem zakłóceń przebiegu beztlenowej stabilizacji jest, według Bartoszewskiego [64], obniżenie się odczynu, ponieważ decyduje on o prawidłowym rozmnażaniu mikroorganizmów. Dostępne dane literaturowe [70, 71] podają zakres wartości ekstremalnych odczynu dla rozwoju bakterii metanogennych od 5,2 pH do 9,2 pH. Zmiany odczynu fermentującego osadu, zachodzące we wszystkich seriach, mieszczą się w tym przedziale. Bartoszewski [64] podaje też, że odczyn cieczy nadosadowej podczas fermentacji waha się w granicach od 7,0 pH do 7,2 pH. Potwierdzają to tylko wyniki badań czwartej serii (od 6,96 pH do 7,49 pH). Pozostałe serie charakteryzowały się wartościami odczynu w cieczy nadosadowej poniżej 7,0 pH.

Zawartość metanu w wydzielającym się gazie wahała się od 71% do 86,8%. Imhoff [80] podaje, że gazy z fermentacji zawierają 65-70% metanu. Wydzielający się biogaz z osadów ze ścieków mleczarskich zawierał więcej tego związku. Ilość dwutlenku węgla wahała się w granicach 1,5-26,8%. Ilość tlenu węgla była znikoma i wynosiła od 0,1% do 0,6%. Ilość wydzielającego się gazu zależna była od stężenia ładunku materii organicznej. Z jednego kilograma usuniętego ChZT uzyskano od 228,6 do 698,2 Ndm³ gazu.

5. Opracowanie indeksu efektywności procesu stabilizacji beztlenowej osadów ściekowych

Zgodnie z postawionym celem pracy, zmiany zachodzące podczas fermentacji badanych osadów postanowiono opisać nową wielkością, określaną mianem **indeksu efektywności procesu stabilizacji**. Do wyznaczania indeksu efektywności zastosowano analizę czynnikową jako metodę redukcji liczby zmiennych. U podstaw analizy czynnikowej leży założenie, że w zespole cech są ukryte wspólne czynniki, a w najprostszym przypadku jeden, będący źródłem wspólnej informacji tkwiącej w nich [46]. W analizie tej można zastosować wiele strategii rotacji, których celem jest uzyskanie przejrzystego układu ładunków, to znaczy takich czynników, które wyróżniają się wysokimi ładunkami przy niektórych zmiennych i niskimi ładunkami przy innych. Taki ogólny układ określany jest także jako struktura prosta. Typowe strategie rotacji to: varimax, biquartimax, quartimax oraz equamax.

W pracy zastosowano strategię rotacji varimax. Celem tej rotacji jest maksymalizacja wariancji znormalizowanych ładunków czynnikowych zmiennych dla każdego czynnika; jest to równoznaczne z maksymalizacją wariancji w kolumnach macierzy znormalizowanych ładunków czynnikowych. Ładunki czynnikowe można zobrazować na wykresie rozrzutu, na którym każda zmienna jest reprezentowana przez punkt.

Poprzez analizę czynnikową wyodrębniono dwa czynniki i wypunktowano wskaźniki związane z czynnikiem pierwszym oraz z drugim. Zostały one przedstawione w tabeli 5.1. W pierwszym etapie zinterpretowano pierwszy i drugi czynnik oraz skorelowano ładunki, które te czynniki niosą. Wskaźniki wchodzące w skład pierwszego czynnika są słabo związane z czasem trwania procesu fermentacji, a skupione w czynniku drugim bardzo zależą od czasu oraz rodzaju osadów poddawanych procesowi stabilizacji beztlenowej. W drugim etapie wskaźnikom poddanym analizie (tab. 5.1) przypisano odpowiednią skalę punktową w dziesięciu przedziałach, tak zwanych decylach. Decyl jest to liczba odcinająca 10% wartości. Tą metodą opracowano 17 analizowanych wskaźników. Jeden punkt wskazuje na złą pracę komór fermentacyjnych, a tym samym na zakłócenia w przebiegu procesu lub jego początek, a dziesięć punktów wskazuje na prawidłowy przebieg procesu i optymalne warunki jego zakończenia. Wybrane wskaźniki z odpowiednim przedziałem punktów przedstawiono, przykładowo, w tabeli 5.2.

Analiza czynnikowa wybranych 17 wskaźników

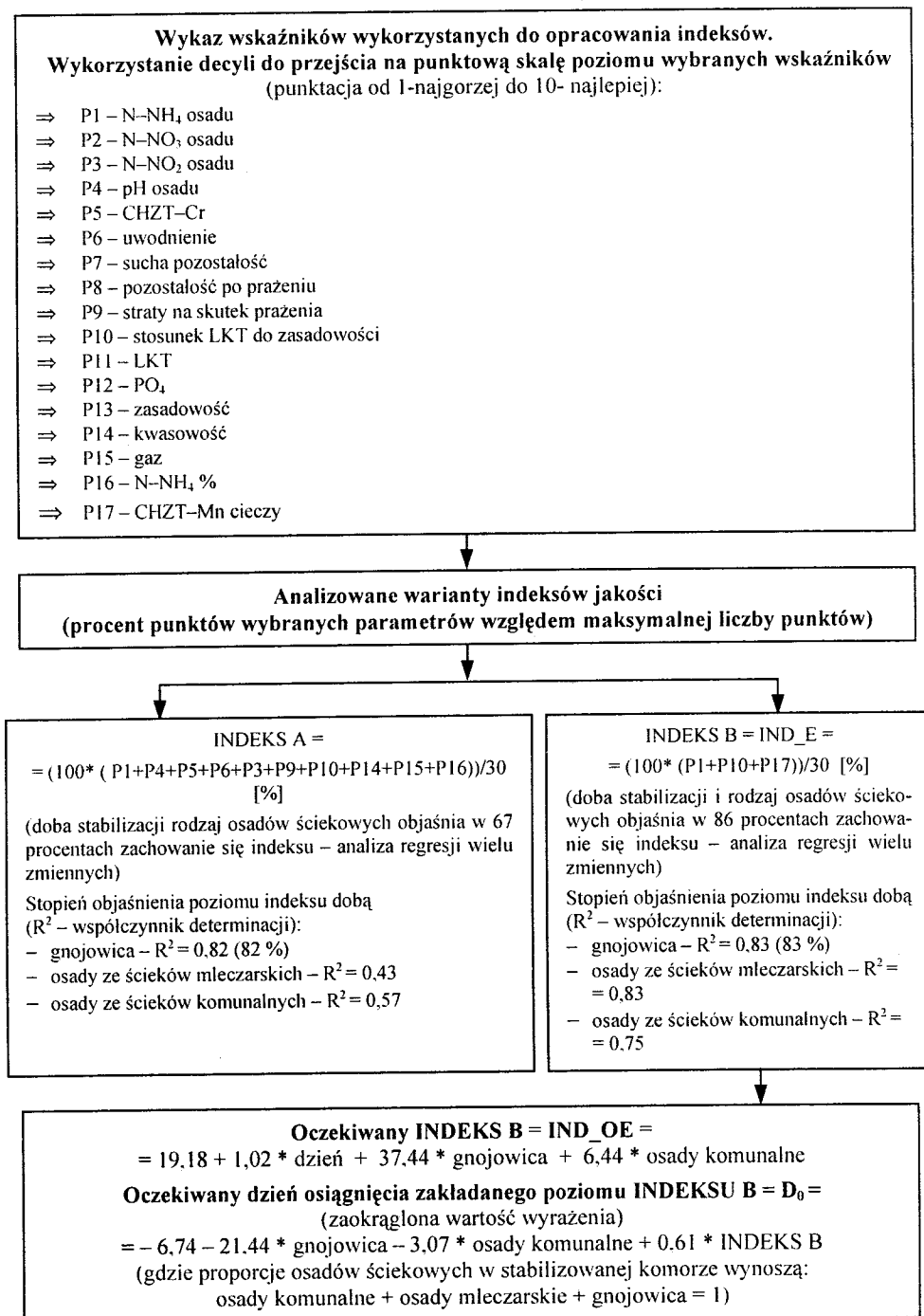
Tabela 5.1.

Lp.	Zmienna	Ładunki czynnikowe [Varimax znormalizowane]			
		Czynnik 1		Czynnik 2	
		Wartość	istotność	Wartość	istotność
1	Odczyn osadu	0.161147		0.439539	
2	Kwasowość	0.821851	*	0.343205	
3	Zasadowość	0,333702		0,862825	*
4	N-NH₄ osadu	0,572746		0,750257	*
5	N-NO ₂ osadu	0,792199	*	0,392001	
6	N-NO ₃ osadu	0,522305		0,672471	
7	PO ₄	0,885609	*	0,366010	
8	LKT	0,696008		-0,202369	
9	LKT / zasadowości	0,199831		-0,719689	*
10	ChZT-Cr	0,741424	*	-0,110991	
11	Pozostałość po prażeniu	0,810589	*	0,228693	
12	Straty po prażeniu	0,877161	*	0,190969	
13	Sucha pozostałość	0,907891	*	0,222595	
14	Uwodnienie	- 0,187718		-0,797172	*
15	N-NH ₄ [%]	- 0,268047		0,437646	
16	Gaz	0,048304		0,379082	
17	ChZT-Mn cieczy nadosadowej	- 0,348754		-0,842058	*
Wartości wyjściowe		6,381338		4,747508	
Udział		0,375373		0,279265	

Tabela 5.2.

Przykładowe wykorzystanie decyli do przejścia na punktową skalę poziomą wybranych parametrów

Punkty P	Parametry		
	P1	P10	P17
	mg/dm ³	–	mg/dm ³
	N – NH ₄ osadu	LKT/zasadowość	ChZT-Mn cieczy
10	≥ 3 000	≤ 0.05	≤ 180
9	2 700 - 3 000	0.05 - 0.08	180 - 300
8	2 500 - 2 700	0.08 - 0.14	300 - 400
7	1 900 - 2 500	0.14 - 0.23	400 - 530
6	750 - 1 900	0.23 - 0.27	530 - 600
5	600 - 750	0.27 - 0.37	600 - 700
4	450 - 600	0.37 - 0.46	700 - 800
3	350 - 450	0.46 - 0.65	800 - 900
2	230 - 350	0.65 - 0.70	900 - 980
1	≤ 230	≥ 0.7	≥ 980



W trzecim etapie analizowanym wskaźnikom przyporządkowano dwa indeksy efektywności – INDEKS A i INDEKS B (rys. 5.1). W etapie czwartym zależności między nimi a czasem trwania procesu fermentacji i rodzajem osadów ściekowych określono metodą regresji wielokrotnej.

Indeks A został stworzony na podstawie następujących wartości punktowych wskaźników: azotu amonowego osadu, odczynu osadu, chemicznego zapotrzebowania na tlen, oznaczonego metodą dwuchromianową, uwodnienia osadu, azotu azotynowego osadu, strat na skutek prażenia, czyli suchej masy organicznej, stosunku lotnych kwasów tłuszczowych do zasadowości, kwasowości, ilości wydzielonego gazu i azotu amonowego. **Indeks B** został określony na podstawie tylko trzech wartości punktowych wskaźników, które w bardzo łatwy sposób można zmierzyć w każdej oczyszczalni ścieków, a mianowicie: azotu amonowego osadu, stosunku lotnych kwasów tłuszczowych do zasadowości i chemicznego zapotrzebowania na tlen, oznaczonego metodą nadmanganianową cieczy nadosadowej.

Z analizy regresji wielokrotnej wynika, że Indeks A w 67% daje się prognozować po uwzględnieniu czasu przebywania w komorze oraz zawartych w niej rodzajów osadów ściekowych (tab. 5.3), natomiast Indeks B w 86% daje się prognozować po uwzględnieniu czasu beztlenowej stabilizacji i rodzaju osadów ściekowych (tab. 5.4). Uwzględniając prostotę określenia Indeksu B i jego wysoką prognozowalność, można zaproponować jego stosowanie do sprawdzania poprawności prowadzenia procesu fermentacji osadów ściekowych.

Tabela 5.3.

Oszacowanie parametrów linii regresji wyrażających związek między INDEKSEM A a rodzajem osadów ściekowych i czasem trwania procesu fermentacji

Statystyczna regresja wielokrotna	Podsumowanie regresji zmiennej zależnej: INDEKS A					
	$R^2 = 0.67014710$					
N = 238	BETA	Błąd st. BETA	B	Błąd st. B	t [234]	poziom p
Wyraz wolny			37,92619	1,107666	34,23974	0,000000
Dzień	0,801481	0,037648	0,87002	0,040868	21,28863	0,000000
Gnojowica	0,109841	0,049489	2,61952	1,180234	2,21949	0,027413
Osady ze ścieków komunalnych	0,167659	0,049189	4,19776	1,231565	3,40848	0,000769

Rys. 5.1. Schemat opracowania indeksu efektywności

Tabela 5.4.
Oszacowanie parametrów linii regresji wyrażających związek pomiędzy INDEKSEM B a rodzajem osadów ściekowych i czasem trwania procesu fermentacji

Statystyczna regresja wielokrotna	Podsumowanie regresji zmiennej zależnej: INDEKS B $R^2 = 0.85815275$					
	BETA	Błąd st. BETA	B	Błąd st. B	T [234]	poziom p
N = 238						
Wyraz wolny			19,18098	1.403563	13.66592	0.000000
Dzień	0.486530	0.024689	1,02051	0.051785	19.70670	0.000000
Gnojowica	0.812459	0.032454	37,43946	1.495517	25.03447	0.000000
Osady ze ścieków komunalnych	0.133152	0.032256	6,44188	1.560560	4.12793	0.000051

Tabela 5.5.

Oszacowanie parametrów linii regresji, wyrażających związek pomiędzy czasem trwania procesu fermentacji a rodzajem osadów ściekowych i INDEKSEM B

Statystyczna regresja wielokrotna	Podsumowanie regresji zmiennej zależnej: INDEKS B $R^2 = 0.85815275$					
	BETA	Błąd st. BETA	B	Błąd st. B	T [234]	poziom p
N = 238						
Wyraz wolny			-6,7354	1.388732	-4.8500	0.000002
Gnojowica	-0.97597	0.078372	-21,4416	1.721805	-12.4530	0.000000
Osady ze ścieków komunalnych	-0.13328	0.053542	-3,0741	1.234943	-2.4893	0.013496
Indeks efektywności B	1.282569	0.065083	0,6115	0.031028	19.7067	0.000000

Na bazie powyższych obliczeń zaproponowano wprowadzenie indeksu efektywności procesu fermentacji IND_E, który jest określony wzorem:

$$IND_E = (100 \times [P1 + P2 + P3]) / 30 \quad [5-1]$$

gdzie:

- IND_E** – indeks efektywności procesu stabilizacji beztlenowej osadów ściekowych [%],
- P1** – wartość punktów (tab. 5.2) wynikająca z pomiaru zawartości azotu amonowego w osadzie,
- P2** – wartość punktów (tab. 5.2) z pomiaru wartości stosunku LKT do zasadowości,
- P3** – wartość punktów (tab. 5.2) wynikająca z pomiaru zawartości ChZT oznaczonego metodą nadmanganianową w cieczy nadosadowej.

Indeks efektywności procesu stabilizacji beztlenowej osadów ściekowych jest miernikiem stopnia rozkładu substancji organicznej. Wskazuje on na

kontrolę pracy komór fermentacyjnych w oczyszczalniach ścieków w warunkach przepływowych, a także w warunkach nieprzepływowych.

Przykład wyliczenia indeksu efektywności IND_E na podstawie równania [5-1] przedstawiono w tabeli 5.6.

Tabela 5.6.

Przykład obliczenia IND_E dla mieszaniny osadów ściekowych

Parametr	Jednostka	Wartość	Punkty P [patrz tab. 5.2]
N-NH ₄ osadu	mg/dm ³	850	6
LKT/zasadowości	–	0,5	3
ChZT-Mn cieczy	mg/dm ³	540	6
Indeks efektywności:		50	

Indeks efektywności wyrażony jest w procentach i im jest on bliższy wartości 100, tym efekt fermentacji metanowej jest lepszy.

Chcąc prognozować efekty stabilizacji beztlenowej osadów ściekowych i gnojowicy, bądź ustalić dzień trwania procesu, uwzględniając ilości mieszanych osadów (gnojowica, osady komunalne i osady z ścieków mleczarskich) można wyliczyć oczekiwany indeks efektywności lub dobę trwania procesu na podstawie wzorów:

$$IND_{OE} = 19,18 + 1,02 \times D + 37,44 \times W_g + 6,44 \times W_k \quad [5-2]$$

gdzie:

- IND_OE** – oczekiwany indeks efektywności procesu stabilizacji beztlenowej osadów ściekowych [%],
- D** – zakładany czas trwania procesu stabilizacji beztlenowej [doba],
- W_g** – zawartość objętościowa gnojowicy w komorze fermentacyjnej w stosunku do całej objętości komory [ułamek dziesiętny],
- W_k** – zawartość objętościowa osadów ze ścieków komunalnych w komorze fermentacyjnej w stosunku do całej objętości komory, [ułamek dziesiętny].

Należy wyjaśnić, że proporcja osadów ściekowych w komorze fermentacyjnej wynosi:

$$W_g + W_k + W_m = 1 \quad [5-3]$$

gdzie:

- W_m** – zawartość objętościowa osadów z oczyszczalni ścieków mleczarskich w komorze fermentacyjnej w stosunku do całej objętości komory [ułamek dziesiętny].

Przykład obliczenia oczekiwanego wskaźnika indeksu efektywności (IND_OE) przedstawiono w tabeli 5.7.

Tabela 5.7.
Przykład obliczenia oczekiwanego indeksu efektywności procesu stabilizacji beztlenowej osadów ściekowych na podstawie składu ilościowego mieszaniny osadów na podstawie zadanego czasu trwania procesu [doba]

Dzień	Gnojowica	Komunalne	Mleczarskie
7	0,5	0,25	0,25
Oczekiwany indeks efektywności IND_OE:		46,7	

Z równania [5-2] można wyliczyć prognozowany dzień osiągnięcia zakładanego poziomu oczekiwanego indeksu efektywności, w postaci:

$$D_o = -6,74 - 21,44 \times W_g - 3,07 \times W_k + 0,61 \times IND_OE \quad [5-4]$$

gdzie:

IND_OE – oczekiwany indeks efektywności procesu stabilizacji beztlenowej osadów ściekowych,

D_o – wymagany czas trwania procesu stabilizacji beztlenowej [doba],

W_g, W_k – jak w równaniu [5-2].

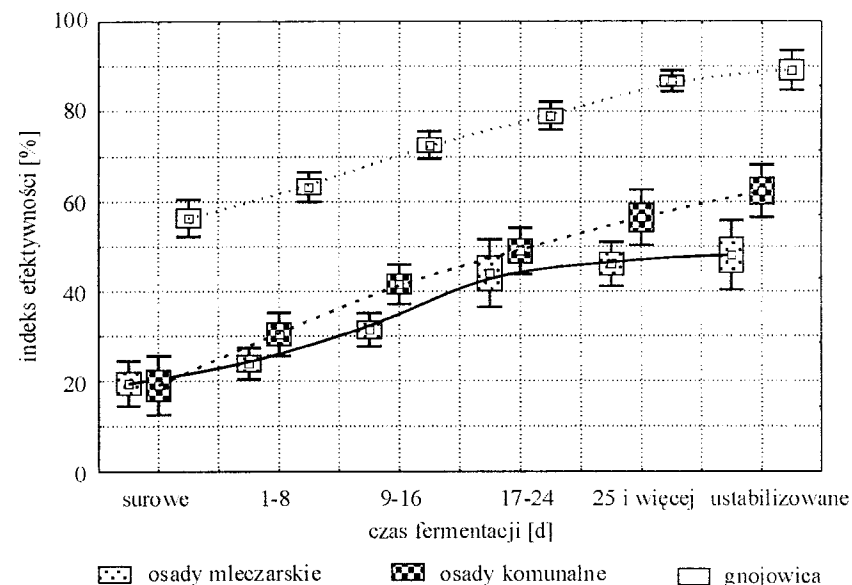
Przykład wyliczenia oczekiwanego dnia osiągnięcia założonego indeksu efektywności 46,7 przy następujących proporcjach osadów: gnojowica – 20% objętości komory, osady z oczyszczania ścieków komunalnych – 30%, osady z oczyszczalni ścieków mleczarskich – 50% objętości komory (tab. 5.8).

Tabela 5.8.
Wyliczenie doby trwania procesu na podstawie składu ilościowego mieszaniny osadów i założonego indeksu efektywności ich stabilizacji

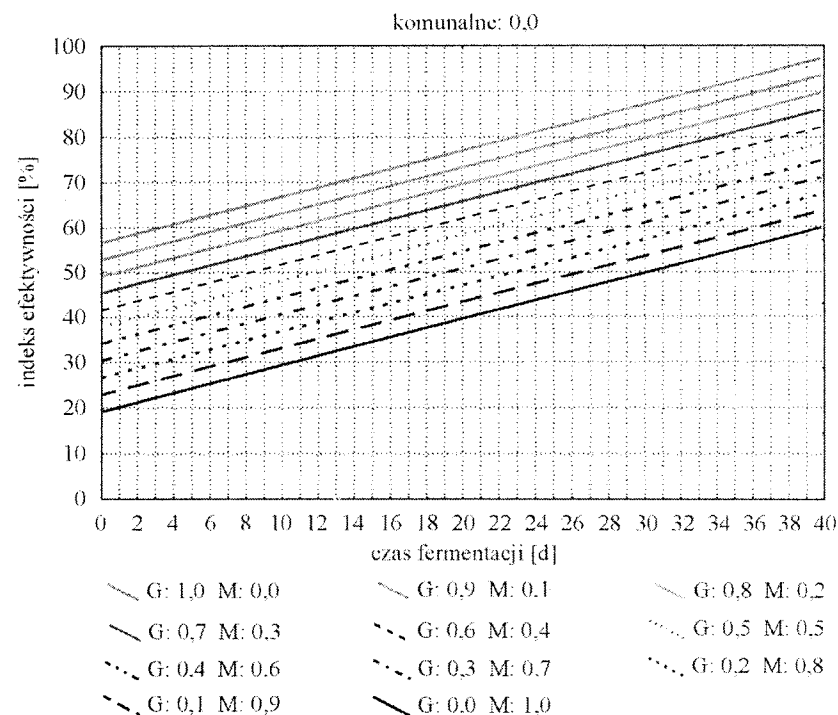
Indeks	Gnojowica	Komunalne	Mleczarskie
46,7	0,2	0,3	0,5
Wymagany czas stabilizacji		19	

Uzyskane w badaniach wartości indeksu efektywności procesu stabilizacji beztlenowej osadów ściekowych (równanie 5-1), w zależności od czasu trwania procesu fermentacji dla poszczególnych rodzajów osadów, pokazano na rysunku 5.2.

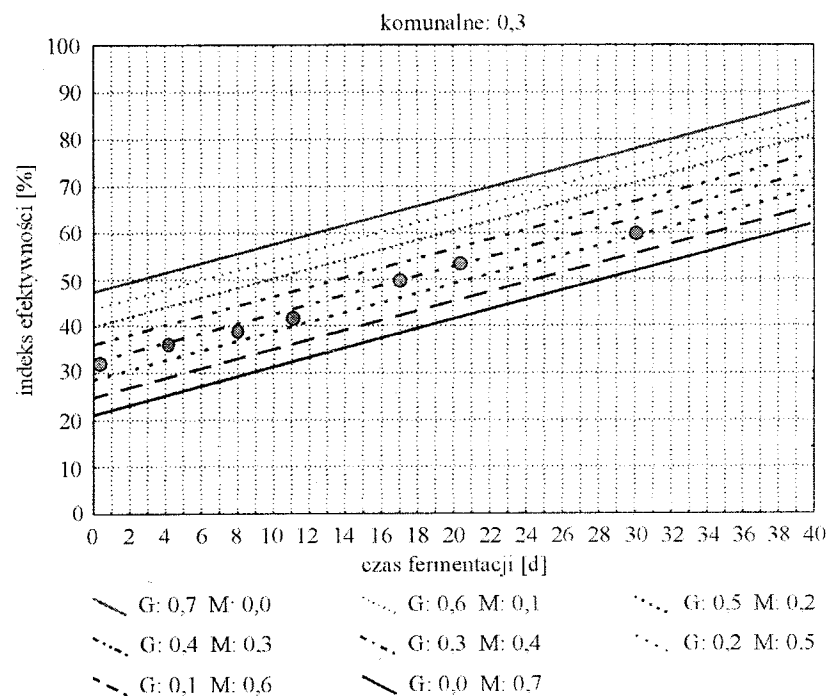
Na rysunku 5.3 pokazano jak zmienia się obliczony indeks efektywności procesu w zależności od różnej zawartości gnojowicy i osadów ze ścieków mleczarskich przy zerowej zawartości osadów ze ścieków komunalnych. Na rysunku 5.4 został przedstawiony obliczony indeks efektywności procesu w zależności od różnej zawartości gnojowicy i osadów ze ścieków mleczarskich przy 30% zawartości osadów ze ścieków komunalnych. Na tym wykresie punktami zostały przedstawione wartości indeksu z serii badawczej przedstawionej w tabeli 4.10.



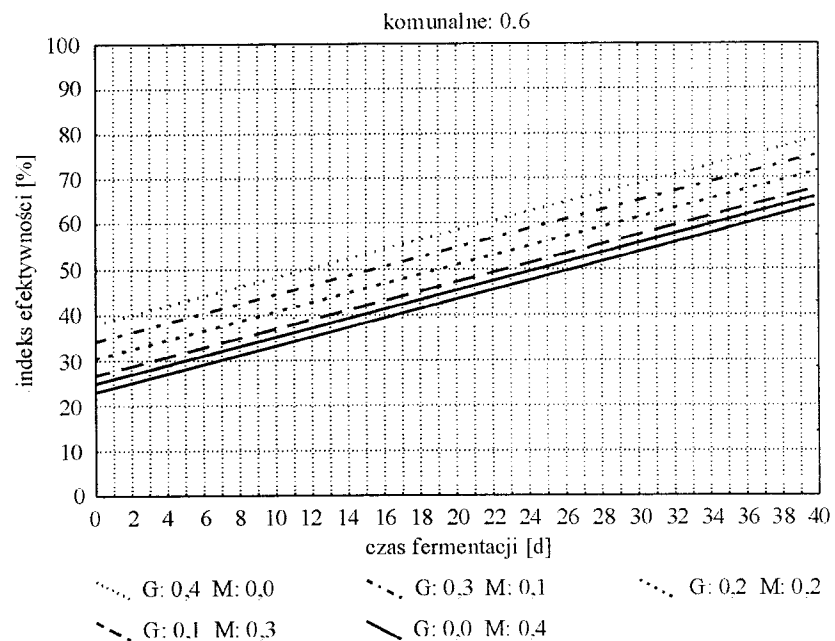
Rys. 5.2. Zmiany indeksu efektywności procesu stabilizacji beztlenowej osadów ściekowych w procentach, w zależności od czasu trwania procesu fermentacji dla poszczególnych rodzajów osadów



Rys. 5.3. Zmiany indeksu efektywności procesu stabilizacji beztlenowej osadów ściekowych przy różnej proporcji wybranych osadów ściekowych

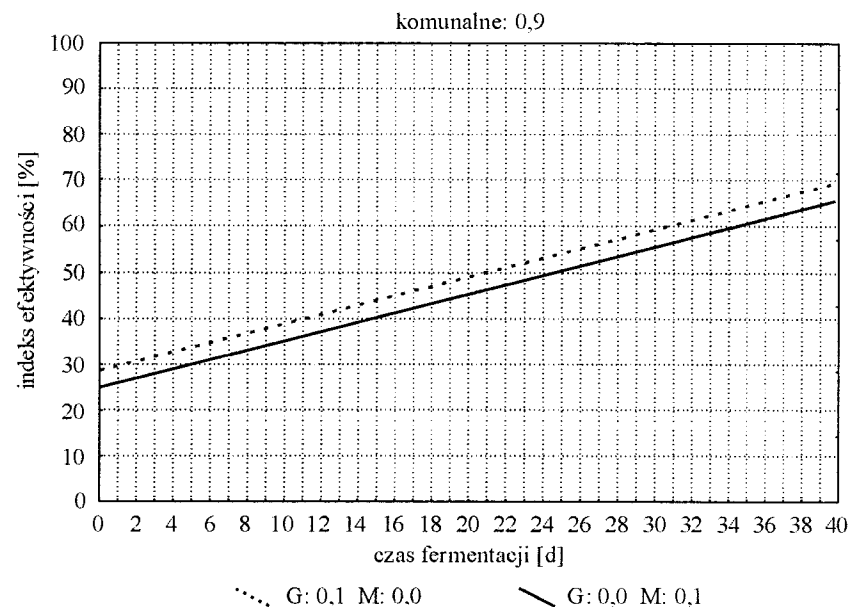


Rys. 5.4. Zmiany indeksu efektywności procesu stabilizacji beztlenowej osadów ściekowych przy różnej proporcji wybranych osadów ściekowych



Rys. 5.5. Zmiany indeksu efektywności procesu stabilizacji beztlenowej osadów ściekowych przy różnej proporcji wybranych osadów ściekowych

Na rysunku 5.5 został przedstawiony obliczony z równania [5-1] indeks efektywności procesu w zależności od różnej zawartości gnojowicy i osadów ze ścieków mleczarskich przy 60% zawartości osadów ze ścieków komunalnych. Rysunek 5.6 obrazuje indeks efektywności procesu w zależności od różnej zawartości gnojowicy i osadów ze ścieków mleczarskich przy 90% zawartości osadów ze ścieków komunalnych. Powyższe wykresy są liniami prostymi i pozwalają na prognozowanie indeksu efektywności procesu stabilizacji beztlenowej osadów ściekowych przy różnej zawartości badanych osadów ściekowych i gnojowicy w reaktorze beztlenowym.



Rys. 5.6. Zmiany indeksu efektywności procesu stabilizacji beztlenowej osadów ściekowych przy różnej proporcji wybranych osadów ściekowych

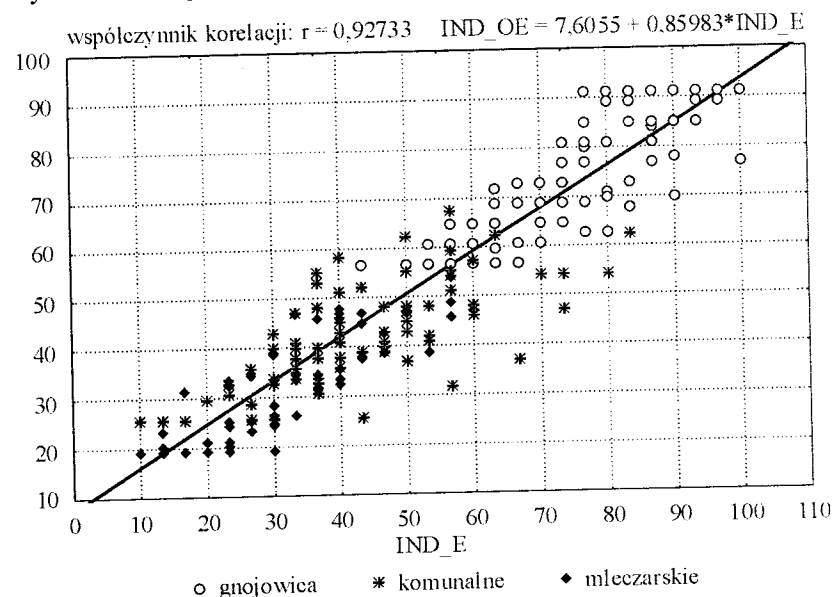
Zależność między indeksem efektywności wynikającym z pomiaru czterech wskaźników zanieczyszczeń a oczekiwanym indeksem wyliczonym z czasu trwania procesu i proporcjonalnej zawartości poszczególnych osadów w komorze fermentacyjnej, na podstawie badań wyrażono wzorem [5-5]. Wykres tej zależności przedstawiono na rysunku 5.7.

$$IND_{OE} = 7,60055 + 0,85983 \times IND_E \quad [5-5]$$

gdzie:

IND_{OE} – oczekiwany indeks efektywności procesu stabilizacji beztlenowej osadów ściekowych [%],

IND_E – indeks efektywności procesu stabilizacji beztlenowej osadów ściekowych [%].
Współczynnik korelacji tego równania wynosi 0,93.



Rys. 5.7. Zależność pomiędzy indeksem efektywności a indeksem oczekiwanym

W celu weryfikacji proponowanych równań na wyznaczenie indeksu efektywności i oczekiwanego indeksu efektywności procesu stabilizacji beztlenowej w tabeli 5.9 i na rysunku 5.8 przedstawiono wartości indeksów obliczone dla badań w warunkach nieprzepływowych, przy następujących proporcjach zmieszania osadów ściekowych:

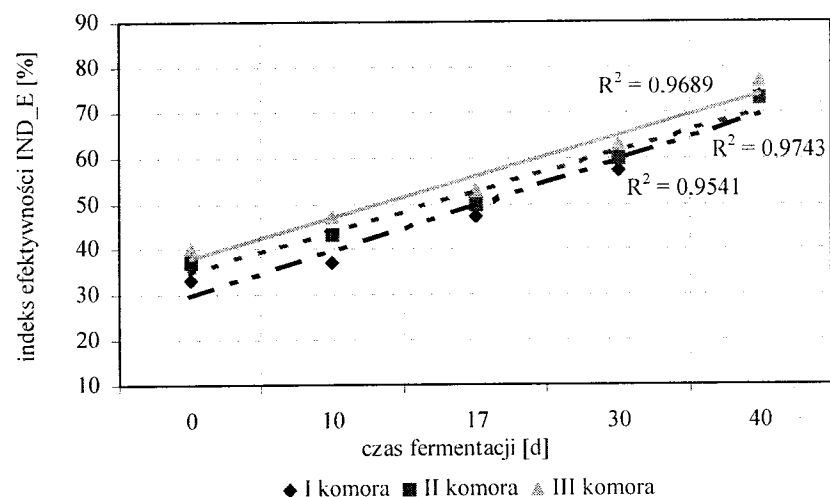
- I komora – 2 l gnojowicy + 4 l osadów ze ścieków komunalnych + 4 l osadów ze ścieków mleczarskich,
- II komora – 4 l gnojowicy + 2 l osadów ze ścieków komunalnych + 4 l osadów ze ścieków mleczarskich,
- III komora – 4 l gnojowicy + 4 l osadów ze ścieków komunalnych + 2 l osadów ze ścieków mleczarskich.

W tabeli 5.10 przedstawiono wyliczony indeks efektywności procesu stabilizacji beztlenowej osadów ściekowych na podstawie pomiarów czterech wskaźników w działających komorach fermentacyjnych w dużych oczyszczalniach ścieków, zlokalizowanych w regionie północno-wschodnim, a stosujących proces fermentacji do stabilizacji osadów ściekowych. Układy te działają w sposób przepływowy, a czas zatrzymania osadów w komorze wynosi do 20 do 30 dni. Komory są już wpracowane, wartości parametrów są stałe, w związku z czym indeks efektywności jest ustabilizowany i wynosi od 53 do 73, i świadczy o prawidłowo zachodzącym procesie stabilizacji beztlenowej.

Tabela 5.9.

Weryfikacja wartości IND_E i IND_OE z badań w warunkach nieprzepływowych

Parametr	λdop	N - NH ₄ osadu mg/dm ³	LKT/za- sado- wość –	ChZT-Mn cieczy mg/dm ³	punkty			IND_E	IND_OE
					N - NH ₄ osadu	LKT/za- sadowość	ChZT-Mn cieczy		
I komora mieszanka osadów	1	1 100,00	0,48	1 400,00	6	3	1	33	30
	10	1 000,00	0,39	1 300,00	6	4	1	37	39
	17	1 300,00	0,32	800,00	6	5	3	47	47
	27	1 800,00	0,25	650,00	6	6	5	57	57
	41	2 100,00	0,18	300,00	7	7	8	73	71
II komora mieszanka osadów	1	800,00	0,40	1 200,00	6	4	1	37	36
	10	1 500,00	0,27	1 100,00	6	6	1	43	46
	17	2 200,00	0,25	900,00	7	6	2	50	53
	27	2 100,00	0,21	700,00	7	7	4	60	63
	41	2 300,00	0,19	350,00	7	7	8	73	77
III komora mieszanka osadów	1	1 100,00	0,35	1 200,00	6	5	1	40	38
	10	1 950,00	0,24	1 000,00	7	6	1	47	47
	17	1 900,00	0,21	850,00	6	7	3	53	54
	27	2 200,00	0,20	650,00	7	7	5	63	64
	41	2 300,00	0,20	200,00	7	7	9	77	79

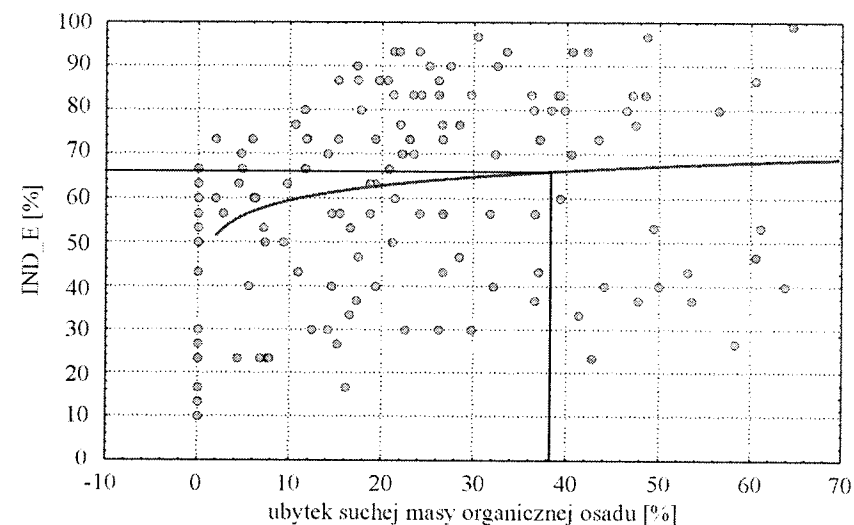


Rys. 5.8. Zmiany indeksu efektywności w trzech komorach doświadczalnych

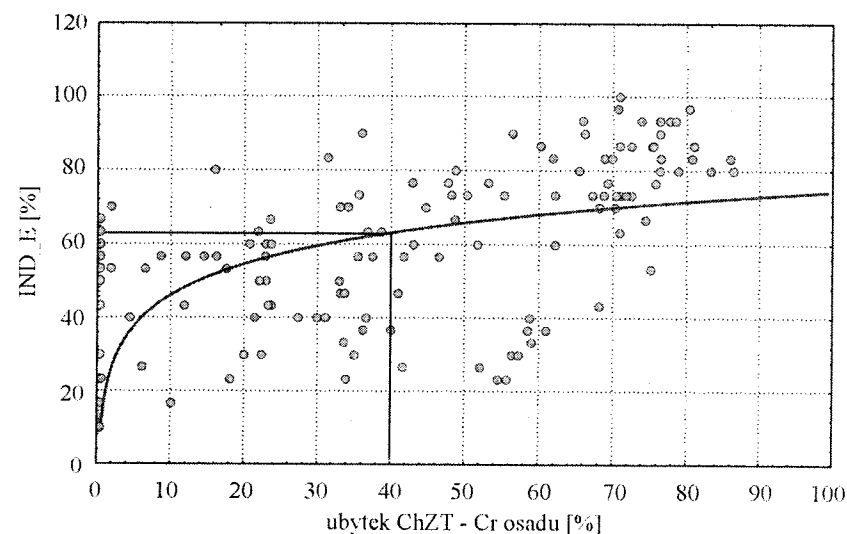
Tabela 5.10.
Indeks efektywności w wybranych oczyszczalniach ścieków regionu północno-wschodniego, stosujących proces fermentacji w układzie przepływowym

parametr	N - NH ₄ osadu mg/dm ³	LKT/za- sadowość –	ChZT-Mn cieczy mg/dm ³	punkty			Indeks efek- tywno- ści
				N - NH ₄ osadu	LKT/za- sadowość	ChZT-Mn cieczy	
I oczyszczalnia	739	0.37	591	5	5	6	53
II oczyszczalnia	726	0.08	523	5	9	7	70
III oczyszczalnia	641	0.03	462	5	10	7	73

Na rysunkach 5.9 i 5.10 zilustrowano w jaki sposób opracowany indeks efektywności procesu stabilizacji zależy od ubytku suchej masy organicznej i zmniejszenia się substancji organicznych oznaczanych jako ChZT-Cr w przypadku wyników uzyskanych w skali laboratoryjnej. Te wartości porównano z dotychczas obowiązującymi wskaźnikami i uzyskano wynik większy od 60% (IND_E); jest on wyższy od proponowanego, gdyż został uzyskany w warunkach laboratoryjnych.



Rys. 5.9. Porównanie indeksu efektywności z ubytkiem suchej masy organicznej



Rys. 5.10. Porównanie indeksu efektywności stabilizacji z ubytkiem ChZT-Cr (wszystkie osady)

Na podstawie przeprowadzonych badań nad procesem fermentacji wybranych rodzajów osadów ściekowych i gnojowicy oraz na podstawie pomiarów indeksów efektywności w warunkach rzeczywistych w układach przepływowych z zastosowaniem osadów mieszanych oszacowano dolną granicę indeksu efektywności na poziomie 50. W przypadku wartości indeksu większej od 50 osad może być uważany za ustabilizowany.

Podsumowanie

Stabilizacja beztlenowa osadów ze ścieków komunalnych, mleczarskich i gnojowicy ma podstawowe znaczenie dla ochrony środowiska. Przyrodnicze wykorzystanie osadów ściekowych jest jak najbardziej uzasadnione ekonomicznie i właściwe ze względów ekologicznych, ale w przypadku dużej ilości osadów, trudne ze względów technicznych i ekonomicznych.

Badaniom technologicznym procesu fermentacji metanowej poddano wybrane osady pochodzące ze ścieków komunalnych, mleczarskich i gnojowicy. Badania przeprowadzone zostały na rzeczywistych osadach ściekowych i gnojowicy, pobranych z komunalnych i mleczarskich oczyszczalni ścieków oraz z ferm tuczu trzody chlewnej i bydła.

Zasadniczym celem badań było opracowanie nowej metody oceny efektywności procesu stabilizacji beztlenowej na bazie wybranych rodzajów osadów ściekowych.

Opracowany indeks efektywności procesu stabilizacji beztlenowej osadów ściekowych jest nowym miernikiem stopnia rozkładu substancji organicznych zawartych w komorze fermentacyjnej, zależnym od pomiaru czterech podstawowych wskaźników fizyczno-chemicznych. Miernik ten ułatwia kontrolę pracy komór fermentacyjnych.

Wykazano, że proponowany syntetyczny indeks efektywności procesu stabilizacji osadów wskazuje na przebieg procesu fermentacji wybranych rodzajów osadów ściekowych oraz gnojowicy, prowadzonego w warunkach technicznych lub laboratoryjnych. Indeks ten wyznacza się na podstawie znajomości zawartości objętości poszczególnych osadów doprowadzonych do komory fermentacyjnej oraz na podstawie wartości trzech wskaźników: azotu amonowego mieszaniny osadów, stosunku LKT do zasadowości oraz chemicznego zapotrzebowania na tlen oznaczonego metodą nadmanganianową cieczy nadosadowej w komorze fermentacyjnej. Wartości indeksu pozwalają na prognozowanie czasu trwania procesu dla osiągnięcia założonego efektu rozkładu związków organicznych zawartych w mieszaninie wybranych osadów ściekowych. Jest to bardzo istotne i przydatne dla technologów zajmujących się stabilizacją osadów ściekowych.

Przydatność indeksu do prognozowania potwierdzają przykłady przedstawione w tabelach A, B, C.

Tabela A.
Przykładowe wskaźniki fizyczno-chemiczne mieszaniny osadów ściekowych w mg/dm³ oraz otrzymany indeks

			Punkty
Parametr	N-NH ₄ osadu	1 710	6
	LKT/zasadowości	0.5	3
	ChZT-Mn cieczy nadosadowej	640	6
Indeks efektywności procesu stabilizacji:			50

Wyliczony indeks efektywności procesu stabilizacji osadów ściekowych, który może być wykorzystany do kontroli pracy komór fermentacyjnych w istniejących obiektach, przedstawiono w tabeli A.

Tabela B.
Indeks efektywności procesu stabilizacji beztlenowej osadów ściekowych na podstawie składu ilościowego mieszaniny i zadanego dnia trwania procesu

Dzień	Gnojowica	Komunalne	Mleczarskie
17	0.3	0.3	0.4
Oczekiwany indeks:		49,7	

Wyliczony indeks efektywności procesu stabilizacji beztlenowej osadów ściekowych w siedemnastym dniu trwania procesu fermentacji, w przypadku gdy w komorze znajduje się 30% gnojowicy, 30% osadów ze ścieków komunalnych i 40% osadów ze ścieków mleczarskich, przedstawiono w tabeli B.

Tabela C.
Określenie dnia trwania procesu na podstawie składu ilościowego mieszaniny i założonego indeksu efektywności procesu stabilizacji osadów ściekowych

Indeks	Gnojowica	Komunalne	Mleczarskie
49.7	0.3	0.3	0.4
Dzień		18	

Wyliczony okres (tab. C) różni się o dobę w stosunku do okresu badań rzeczywistych.

Wykazano, że dla indeksu efektywności stabilizacji beztlenowej powyżej 50% następuje wymagana stabilizacja osadów w procesie fermentacji, co potwierdzają badania własne i efekty pracy komór fermentacyjnych w dużych obiektach w warunkach rzeczywistych. Opracowany indeks efektywności jest nowym sposobem

oceny procesu i jest nieporównywalny z innymi znanymi miernikami oceny efektywności procesu fermentacji beztlenowej.

Opracowany indeks efektywności procesu stabilizacji beztlenowej wybranych rodzajów osadów ściekowych ma, oprócz walorów czysto praktycznych, znaczenie naukowe. Pozwala on w miarę dokładnie prognozować wymagany czas trwania procesu, a także przewidywać jakość przefermentowanych osadów ściekowych.

Wnioski

Wykorzystana w pracy literatura, badania technologiczne oraz ich interpretacja pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków:

1. Osady ze ścieków komunalnych, ścieków mleczarskich oraz gnojowicy nadają się do łącznej fermentacji metanowej, która jest szczególnie korzystna na terenach rolniczo-przemysłowych.
2. Opracowany nowy indeks efektywności procesu stabilizacji beztlenowej osadów ściekowych umożliwia określenie:
 - stopnia stabilizacji mieszaniny osadów,
 - oczekiwanego efektu stabilizacji w założonym dniu,
 - czasu, w którym zostanie osiągnięty założony efekt procesu.Indeks efektywności procesu wyliczany jest na podstawie czterech wskaźników, czyli azotu amonowego, lotnych kwasów tłuszczowych, wskaźnika zasadowości oraz chemicznego zapotrzebowania na tlen oznaczonego metodą nadmanganianową cieczy nadosadowej. Indeks ten może być przydatny w procesie projektowania i eksploatacji komór fermentacyjnych z mieszaniną osadów, a także w przypadku kontroli procesu w działających komorach fermentacyjnych.
3. Wartość indeksu efektywności powyżej 50% zapewnia ustabilizowanie osadów podczas procesu fermentacji metanowej.
4. Indeks efektywności procesu stabilizacji jest uniwersalny i można go zastosować w układzie przepływowym i nieprzepływowym.

Piśmiennictwo

- [1] **Kempa E.S.**, *Przyszłościowa gospodarka osadami ściekowymi*, w: Materiały konferencyjne *Problemy gospodarki osadowej w oczyszczalniach ścieków*, Politechnika Częstochowska, Częstochowa, 1993, s. 16.
- [2] **Bień J., Matysiak B., Wystalska K.**, *Stabilizacja i odwadnianie osadów ściekowych*, Politechnika Częstochowska, Częstochowa, 1999.
- [3] **Magrel L., Boruszko D., Dąbrowski W.**, *Bilans ścieków i osadów ściekowych w oczyszczalniach ścieków województwa podlaskiego 1998-2000*, Fundacja Ekonomistów Środowiska i Zasobów Naturalnych, Białystok, 2000.
- [4] **Kutera J., Hus S.**, *Rolnicze oczyszczanie i wykorzystanie ścieków i gnojowicy*, Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej we Wrocławiu nr 342, Wrocław, 1998.
- [5] **Magrel L., Dąbrowski W.**, *Oczyszczanie ścieków. unieszkodliwianie i przeróbka osadów ściekowych pochodzących z zakładów przetwórstwa mleczarskiego*, sprawozdanie książkowe z realizacji grantu nr 7 TO7G 029 11, Białystok, 1998.
- [6] **Serafin M., Tabernacki J.**, *Biochemiczne usuwanie azotu i fosforu ze ścieków w świetle doświadczeń duńskich*, „Gaz, Woda i Technika Sanitarna” 1992 nr 9.
- [7] **Barbusiński K.**, *Leksykon biotechnologii środowiskowej*, PWN, Warszawa, 1993.
- [8] **Kempa E.S., Bień J.**, *Problemy przeróbki osadów ściekowych*, w: Materiały konferencyjne *Problemy gospodarki osadowej w oczyszczalniach ścieków*, UNI-Service, Częstochowa, 1995, s. 51-62.
- [9] **Buraczewski G.**, *Fermentacja metanowa*, PWN, Warszawa, 1989.
- [10] **Graczyk M., Sadecka Z.**, *Perystencja i toksyczność wybranych insektycydów w warunkach fermentacji metanowej*, Zeszyt Naukowy nr 66, WSI, Zielona Góra, 1993.
- [11] **Baumann G.**, *Anwendbarkeit der anaeroben biologischen Abwasserreinigung*, „Korrespondenz Abwasser“, 1987 nr 1.
- [12] **Kroiss H.**, *Anaerobe Abwasserreinigung*, Wiener Mitteilungen Bd. 62 Tu, Wien, 1985.
- [13] **Buraczewski G., Bartoszek B.**, *Biogaz – wytwarzanie i wykorzystanie*, PWN, Warszawa, 1990.
- [14] **Nasierowska A.A.**, *Fermentacja metanowa jako sposób unieszkodliwiania osadów ściekowych*, praca dyplomowa, Biblioteka Wyższej Szkoły Ekologii i Zarządzania, Warszawa, 2000, s. 9.
- [15] **Hartman L.**, *Biologiczne oczyszczanie ścieków*, Instalator Polski, Warszawa, 1996.
- [16] **Dymaczewski Z., Oleszkiewicz J.A., Sozański M.M.**, *Poradnik eksploatatora oczyszczalni ścieków*, PZITS, Poznań, 1997.
- [17] **Zielewicz-Madej E., Cora B.**, *Fosforany w procesie przeróbki osadów*, w: Materiały konferencyjne *Nowe technologie w uzdatnianiu wody, oczyszczaniu ścieków i gospodarce osadowej*, Politechnika Częstochowska, Częstochowa, 1997, s. 177.
- [18] **Buraczewski G.**, *Ustalenie optymalnych parametrów technologii fermentacji metanowej gnojowicy*, SGGW, Warszawa, 1990.
- [19] **Górecka R.**, *Teoria i technika eksperymentu*, Politechnika Krakowska, Kraków, 1995.
- [20] **Sikora J., Barbusiński K.**, *Praktyczna ocena równań kinetyki rozkładu zanieczyszczeń w procesie osadu czynnego*, „Gaz, Woda i Technika Sanitarna” 1994 nr 2.
- [21] **Kutera J., Hus S.**, *Zasady zagospodarowania gnojówki i gnojowicy w rolnictwie terenów górskich z uwzględnieniem warunków ochrony środowiska*, Akademia Rolnicza, Wrocław, 1990.
- [22] **Maćkowiak Cz.**, *Wartość nawozowa osadów i odpadów z przemysłu spożywczego*, w: Materiały konferencyjne *Osady ściekowe – przeróbka i wykorzystanie*, Politechnika Poznańska, Poznań, 1997.
- [23] **Oleszkiewicz J.**, *Gospodarka osadami ściekowymi*. Poradnik decydenta, LEM s.c., Kraków, 1998.
- [24] **Wójcik A.R., Laudański Z.**, *Planowanie i wnioskowanie statystyczne w doświadczałnictwie*, PWN, Warszawa, 1989.
- [25] **Kalisz L., M. Kaźmierczak M.**, *Analiza aktualnego stanu sanitarnego osadów ściekowych z oczyszczalni ścieków miejskich pod kątem ich dalszej utylizacji*, UNIKLAR, Suplement, CTBK, Warszawa, 1990.
- [26] **Karbouris J., Georgakakos P.**, *Optimal Control Of The Activated Sludge Process*, „Water Research” 1990, Vol. 24.
- [27] **Kiely G.**, *Environmental Engineering*, McGraw-Hill, New York, 1996.
- [28] **Magrel L. i in.**, *Zdrowie a skażenie środowiskowe i jego minimalizacja*, t.2, Fundacja Życie w Zdrowiu, Białystok, 1999.

- [29] **Magrel L., Boruszko D., Rodowicz T.Z.**, *Gospodarka osadowa oczyszczalni ścieków w Białymstoku*, w: Materiały konferencyjne *Problemy gospodarki osadowej w oczyszczalniach ścieków*, Politechnika Częstochowska, Częstochowa, 1995, s. 205-215.
- [30] **Magrel L., D. Boruszko D., Dąbrowski W.**, *Bilans ścieków i osadów ściekowych w oczyszczalniach ścieków województwa podlaskiego*, Fundacja Ekonomistów Środowiska i Zasobów Naturalnych, Białystok, 1999.
- [31] **Magrel L., Boruszko D., Wierzbicki T.L.**, *Wpływ wybranych jonów metali ciężkich na proces fermentacji statycznej osadów ściekowych*, w: Materiały konferencyjne *Problemy gospodarki osadowej w oczyszczalniach ścieków*, Politechnika Częstochowska, Częstochowa, 1995, s. 75-85.
- [32] **Magrel L., Boruszko D.**, *Biogaz – niekonwencjonalne źródło energii*, w: Materiały konferencyjne *Energetyczne aspekty oczyszczania ścieków*, Politechnika Częstochowska, Ustroń, 1995, s. 107-120.
- [33] **Magrel L., Boruszko D.**, *Biogaz – produkt unieszkodliwiania osadów ściekowych metodą fermentacji*, w: Materiały konferencyjne *Ochrona środowiska naturalnego – niekonwencjonalne źródła energii*, Wyższa Szkoła Oficerska Inżynierii Wojskowej, Wrocław, 1994, s. 39-52.
- [34] **Magrel L., Boruszko D.**, *Rolnicze wykorzystanie gnojowicy na przykładzie wybranych ferm tuczu trzody chlewnej*, w: Materiały konferencyjne *Oczyszczanie ścieków – nowe trendy, modernizacja istniejących oczyszczalni i gospodarka osadów*, Fundacja Ekonomistów Środowiska i Zasobów Naturalnych, Rajgród, 1997, s. 399-404.
- [35] **Magrel L., Dąbrowski D., Wierzbicki T.L.**, *Gospodarka osadowa na oczyszczalniach ścieków mleczarskich z zakładów przetwórstwa mleczarskiego w regionie północno-wschodnim*, w: Materiały konferencyjne *Nowe technologie w uzdatnianiu wody, oczyszczaniu ścieków i gospodarce osadowej*, Politechnika Częstochowska, Częstochowa-Ustroń, 1997, s. 157-164.
- [36] **Magrel L., Dąbrowski D., Wierzbicki T.L.**, *Problemy eksploatacyjne systemów oczyszczania ścieków i gospodarki osadowej na przykładzie wybranych zakładów przetwórstwa mleczarskiego regionu północno-wschodniego*, w: Materiały konferencyjne *Oczyszczanie ścieków – nowe trendy, modernizacja istniejących oczyszczalni i gospodarka osadowa*, Fundacja Ekonomistów Środowiska i Zasobów Naturalnych, Rajgród, 1997, s. 269-273.
- [37] **Magrel L., Dąbrowski W.**, *Bilans osadów oraz koncepcje ich zagospodarowania w oczyszczalniach ścieków województwa białostockiego*, Fundacja Ekonomistów Środowiska i Zasobów Naturalnych, Białystok, 1998.
- [38] **Magrel L., Dąbrowski W.**, *Technologia odzysku biogazu z fermentacji osadów ściekowych*, w: *Odnawialne źródła energii*, M.G.P.U.H. Mirosław Gromek, Supraśl, 1998, s.19-25.
- [39] **Magrel L., Dąbrowski W., Królikowski A.**, *Bilans oraz propozycje zagospodarowania osadów powstających na miejskich oczyszczalniach ścieków regionu północno-wschodniego*, „Gaz, Woda i Technika Sanitarna” 2000 nr 1.
- [40] **Magrel L., Dzieńis L.**, *Intensification Of Digesters Operation In Wastewater Treatment Plant In Nowa Wieś Elcka*, w: Materiały konferencyjne *Wastewater Sludge – Waste Or Resource?*, t.2, Politechnika Częstochowska, Częstochowa, 1997, s. 204-208.
- [41] **Magrel L., Stasiulewicz E.**, *Usuwanie związków azotu z gnojowicy świńskiej metodą fermentacji metanowej*, w: Materiały konferencyjne *XIII Międzynarodowe Sympozjum Studentów i Młodych Pracowników Nauki*, Zeszyt Budownictwa i Inżynierii Środowiska WSI, Zielona Góra, 1991, s. 212-216.
- [42] **Magrel L.**, *Uzdatnianie wody i oczyszczanie ścieków. Urządzenia, procesy, metody*, Wyd. Ekonomia i Środowisko, Białystok, 2000.
- [43] **Magrel L., Wierzbicki T.L.**, *Metodyka badań procesu fermentacji osadów ściekowych*, w: Materiały konferencyjne *Analityka w służbie geologii i ochronie środowiska*, Państwowy Instytut Geologiczny, Krasnobród-Warszawa, 1993, s. 73.
- [44] **Magrel L., Wierzbicki T.L.**, *Próby oceny energooszczędności beztlenowych metod utylizacji organicznych osadów ściekowych*, w: Materiały konferencyjne *Energooszczędność w procesach gospodarki wodnej i ściekowej*, Politechnika Białostocka, Białowieża, 1993, s. 180-187.
- [45] **Magrel L., Wierzbicki T.L.**, *Próby utylizacji gnojowicy metodą fermentacji i wpływ tej metody na ochronę ujęć wodnych*, w: Materiały konferencyjne *Wybrane problemy wodooszczędności*, Politechnika Białostocka, Białystok, 1991, s.321-328.
- [46] **Magrel L., Wierzbicki T.L.**, *Próby wykorzystania procesu fermentacji metanowej do unieszkodliwiania gnojowicy pochodzącej z ferm trzody chlewnej*, Zeszyt Naukowy Nr 6 „Inżynieria Środowiska” Politechniki Białostockiej, Białystok, 1993, s. 55-64.
- [47] **Magrel L., Wierzbicki T.L.**, *Utylizacja gnojowicy poprzez fermentację metanową – jako przykład właściwej gospodarki ściekowej w gminach wiejskich*, w: Materiały konferencyjne *Problemy gospodarki wodno-ściekowej w gminach*, Politechnika Częstochowska, Częstochowa, 1994, s. 295-306.
- [48] **Magrel L., Wierzbicki T.L.**, *Utylizacja małych ilości gnojowicy metodą fermentacji metanowej*, w: Materiały konferencyjne *Problemy odprowadzania i unieszkodliwiania*, PZliTS, Instytut Inżynierii Środowiska Politechniki Łódzkiej, Łódź, 1991, s. 241-252.
- [49] **Magrel L., Wierzbicki T.L., Rodowicz Z., Grudzień B.**, *Doświadczenia z pracy węzła osadowego na przykładzie oczyszczalni ścieków w Białymstoku*,

- w: Materiały konferencyjne *Osady ściekowe – odpad czy surowiec?*, Politechnika Częstochowska, Częstochowa, 1997, s. 117-120.
- [50] **Magrel L., Wierzbicki T.L.**, *Attempts Of Theoretical Estimation Of Biogas Volume Produced From Liquid Swine Manure*, w: Materiały konferencyjne *The 4 Th Polish-Danish Workshop On Biofuels*, BTCh-Gdańsk, Starbienino, 1997, s. 97-100.
- [51] **Magrel L., Wierzbicki T.L.**, *Przystosowanie osadów ściekowych przed ich rolniczym wykorzystaniem*, w: Materiały konferencyjne *Gospodarka odpadami i osadami ściekowymi w rolnictwie, leśnictwie i przemyśle drzewnym*, WSI, Koszalin-Kołobrzeg, 1996, s. 1-12.
- [52] **Magrel L., Wierzbicki T.L.**, *Technologiczne aspekty przeróbki osadów ściekowych w dużych oczyszczalniach*, w: Materiały konferencyjne *Wykorzystanie osadów ściekowych – techniczne i prawne uwarunkowania*, Częstochowa, 1996, s. 73-81.
- [53] **Magrel L.**, *Zastosowanie procesu fermentacji do skutecznego oczyszczania gnojowicy z ferm trzody chlewnej*, rozprawa doktorska, Białystok, 1992.
- [54] **Magrel L.**, *Badania modelowe biodegradacji gnojowicy trzody chlewnej metodą fermentacji beztlenowej*, w: Materiały konferencyjne *XIII Międzynarodowe Sympozjum Studentów i Młodych Pracowników Nauki*, Zeszyt Budownictwa i Inżynierii Środowiska WSI, Zielona Góra, 1991, s. 198-201.
- [55] **Magrel L.**, *Beztlenowe metody utylizacji ścieków i osadów ściekowych z terenów wiejskich*, w: Materiały konferencyjne *Kontenerowe i przydomowe oczyszczalnie ścieków oraz stacje uzdatniania wody*, Politechnika Białostocka, Wigry, 1995, s. 282-287.
- [56] **Bernacka J., Pawłowska L., Przeróbka I.**, *Zagospodarowanie osadów z miejskich oczyszczalni ścieków*, Instytut Ochrony Środowiska, Warszawa, 1996.
- [57] **Magrel L.**, *Wskaźniki fizykochemiczne charakteryzujące proces fermentacji metanowej osadów ściekowych*, w: Materiały konferencyjne *Analityka w służbie geologii i ochrony środowiska*, Państwowy Instytut Geologiczny, Szelment, 1996, s. 42.
- [58] **Magrel L.**, *Związki organiczne zawarte w gnojowicy świńskiej – ich przemiany w czasie procesu fermentacji*, w: Materiały konferencyjne *Biotechnologia środowiskowa*, Politechnika Śląska, Ustroń – Jaszowiec, 1993, p.
- [59] **Malina J.F., Difilippo J.**, *Treatment Of Supernatants And Liquids Associated With Sludge Treatment*, Raport Uniwersytetu w Austin, Texas, 1968.
- [60] **Magrel L.**, *Fermentacja metanowa ścieków i osadów z ferm trzody chlewnej*, w: Materiały konferencyjne *Problemy gospodarki osadowej w oczyszczalniach*, Politechnika Częstochowska, Częstochowa, 1993, s. 223-228.
- [61] **Mąkinia J.**, *Przykłady zastosowania nowoczesnych metod usuwania nadmiaru azotu i fosforu ze ścieków*, „Gaz, Woda i Technika Sanitarna” 1995 nr 12.
- [62] **Mąkinia J.**, *Wybrane aspekty procesu usuwania azotu w miejskich oczyszczalniach ścieków*, „Gaz, Woda i Technika Sanitarna” 1996 nr 8.
- [63] **Nöring J.**, *Grawitacyjne zagęszczanie osadów ściekowych*, w: Materiały konferencyjne *Przeróbka, wykorzystanie i usuwanie osadów ściekowych*, Fundacja Wspomagająca Zaopatrzenie Wsi w Wodę, Warszawa, 1996, s. 23-30.
- [64] **Bartoszewski K.**, *Kontrola przebiegu procesu fermentacji osadów w komorach fermentacyjnych*, w: Materiały konferencyjne *Problemy gospodarki osadowej w oczyszczalniach ścieków*, Politechnika Częstochowska, Częstochowa, 1995, s. 152-160.
- [65] **Narbutt L.**, *Trójfazowy reaktor BIOSET do usuwania C, N, P zastosowany w oczyszczalni ścieków w Węgorzewie*, w: Materiały konferencyjne *Nowe technologie w uzdatnianiu wody, oczyszczaniu ścieków i gospodarce osadowej*, Politechnika Częstochowska, Częstochowa, 1997, s. 223-230.
- [66] **Oleszkiewicz J., Barnard J.**, *Fermentacja kwaśna osadu wstępnego dla intensyfikacji biologicznego usuwania fosforu i azotu*, w: Materiały konferencyjne *Usuwanie związków biogenywnych*, LEM Politechnika Krakowska, Kraków, 1997.
- [67] **Sozański M., Grocholski K., Urbaniak A.**, *Struktura osadów pochodzących z oczyszczania wody i ścieków*, w: Materiały Konferencyjne *Oczyszczanie ścieków – nowe trendy, modernizacja istniejących oczyszczalni i gospodarka osadowa*, Fundacja Ekonomistów Środowiska i Zasobów Naturalnych, Rajgród, 1997, s. 54-68.
- [68] **Makać W., Urbanek-Krzysztofiak D.**, *Metody opisu statystycznego*, Wyd. Uniwersytetu Gdańskiego, Gdańsk, 1999.
- [69] **Magrel L.**, *Skład ilościowy i jakościowy biogazu powstającego z fermentacji osadów ze ścieków mleczarskich*, w: Materiały konferencyjne *Znaczenie procesów jednostkowych w technologii oczyszczania wody i ścieków*, Politechnika Koszalińska, Koszalin-Ustronie Morskie, 1998, s. 137-146.
- [70] **Magrel L.**, *Unieszkodliwianie gnojowicy świńskiej w wydzielonych komorach fermentacyjnych przed jej rolniczym wykorzystaniem*, Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej we Wrocławiu nr 293, Wrocław, 1996, s. 147-154.
- [71] **Bernacka J., Pawłowska L.**, *Gospodarka i wykorzystanie miejskich osadów ściekowych*, Instytut Ochrony Środowiska, Warszawa, 1994.
- [72] **Bernacka J.**, *Stan obecny i możliwości techniczne przeróbki i zagospodarowania osadów ściekowych w Polsce*, w: Materiały konferencyjne *Przeróbka, wykorzystanie i usuwanie osadów ściekowych*, Fundacja Wspomagająca Zaopatrzenie Wsi w Wodę, Warszawa, 1996, s. 109-116.

- [73] **Bever J., Stein A., Teichmann H.**, *Zaawansowane metody oczyszczania ścieków*, Bydgoszcz, 1997.
- [74] **Bień J.**, *Problemy gospodarki osadowej w małych oczyszczalniach ścieków*, w: Materiały konferencyjne *Gospodarka ściekami i odpadami w gminach*, Politechnika Poznańska, Poznań, 1993, s. 139-145.
- [75] **Bień J., Wójcik-Szwedzińska M., Nowak D.**, *Charakterystyka osadów w aspekcie mikrobiologicznym*, w: Materiały konferencyjne *Osady ściekowe w praktyce*, Politechnika Częstochowska, Częstochowa, 1998, s. 21-26.
- [76] **Clifford D., Xiaosha L.**, *Biological Denitryfication Of Spent Regenerant Brine Using A SBR*, "Water Research" 1993 nr 9.
- [77] **Dojlido J.R.**, *Chemia wód powierzchniowych*, Wyd. Ekonomia i Środowisko, Białystok, 1995.
- [78] **Fernandez L., Kennedy K.J.**, *Dynamic Modeling Of Substrate Degradation In SBAR*, "Water Research" 1993 nr 11.
- [79] Materiały konferencyjne *Osady ściekowe – odpad czy surowiec?*, Politechnika Częstochowska, Częstochowa, 1997.
- [80] **Imhoff K., Imhoff K.R.**, *Kanalizacja miast i oczyszczanie ścieków*, Poradnik, Arkady, Warszawa, 1997.
- [81] **Jaźwiński Z., Oleszczyk A.**, *Charakterystyka ilościowa i jakościowa osadów oraz parametry obliczeniowe stosowane w Polsce*, w: Materiały konferencyjne *Przeróbka, wykorzystanie i usuwanie osadów ściekowych*, Fundacja Wspomagająca Zaopatrzenie Wsi w Wodę, Warszawa, 1996, s. 17-22.
- [82] **Anderson B., Mavinic D.S., Oleszkiewicz J.A.**, *Stabilization of combined sludge: aerobic processes*, "Environmental Technol." 1996 nr 17.
- [83] Anon, *Biogas from municipal solid waste*, Intern. Energy Agency, IEA, 1994.
- [84] **Baier U., Zwiefelhofer H.**, *Sludge stabilization effects of aerobic thermophilic pre-treatment*, "Waster Env. Technolo." 1991 nr 1.
- [85] **Bartoszewski K., Kempa E., Szpadt R.**, *Systemy oczyszczania ścieków. Podstawy technologiczne i projektowanie*, skrypt Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1981.
- [86] **Furmańska M., Podedworna J.**, *Zmiany charakterystyki osadów w procesie wydzielonej stabilizacji tlenowej*, w: Materiały konferencyjne *Problemy gospodarki osadowej w oczyszczalniach ścieków*, UNI-Service, Częstochowa, 1995, s.63-74.

Spis rysunków

Rys. 2.1.	Fazy rozkładu cząsteczkowego	11
Rys. 2.2.	Rozkład związków organicznych	12
Rys. 2.3.	Schemat przemian biochemicznych podczas procesu fermentacji biomasy	14
Rys. 2.4.	Schemat czterostopniowego beztlenowego rozkładu związków organicznych	15
Rys. 2.5.	Fazy rozwoju mikroorganizmów według Monda	16
Rys. 2.6.	Krzywa charakteryzująca szybkość reakcji biochemicznych ...	16
Rys. 2.7.	Charakterystyka fermentacji wysokoobciążonej w temperaturze 33-37°C	17
Rys. 2.8.	Kinetyka wytwarzania gazu podczas fermentacji w warunkach nieprzepływowych (według Phelps)	19
Rys. 2.9.	Produkcja gazu z osadów ściekowych w układzie przepływowym. Fermentacja mezofilowa	20
Rys. 2.10.	Związek między czasem prowadzenia procesu, obciążeniem i wartością odczynu	22
Rys. 2.11.	Wpływ odczynu osadów ściekowych na skład gazu fermentacyjnego	22
Rys. 2.12.	Ilość gazu uzyskana z 1 kg suchej masy organicznej osadu doprowadzonego do komory fermentacji	23
Rys. 2.13.	Normalny czas fermentacji osadu w różnej temperaturze (według Imhoffa)	24
Rys. 2.14.	Wpływ temperatury na czas fermentacji osadu	24
Rys. 2.15.	Wpływ temperatury na wytwarzanie gazu z różnego rodzaju gnojowicy	25
Rys. 2.16.	Wpływ temperatury na czas rozkładu substancji organicznych według Goluekiego	25
Rys. 2.17.	Zmiany odczynu, zasadowości i lotnych kwasów tłuszczowych w czasie fermentacji	27
Rys. 2.18.	Udział fosforanów w suchej masie osadu i cieczy nadosadowej w procesie fermentacji	28
Rys. 3.1.	Schemat modelu wydzielonej komory fermentacyjnej	34
Rys. 3.2.	Widok komory fermentacyjnej	35
Rys. 3.3.	Widok komory fermentacyjnej od strony tablicy rozdzielczej	36
Rys. 3.4.	Widok komory fermentacyjnej	36

Rys. 4.1.	Zmiany zawartości ChZT-Cr w czasie fermentacji metanowej w układzie nieprzepływowym	57
Rys. 4.2.	Zmiany zawartości ChZT-Mn w czasie fermentacji metanowej w układzie nieprzepływowym	58
Rys. 4.3.	Zmiany zawartości azotu ogólnego w czasie fermentacji metanowej w układzie nieprzepływowym	59
Rys. 4.4.	Zmiany zawartości azotu amonowego w czasie fermentacji metanowej w układzie nieprzepływowym	59
Rys. 4.5.	Zmiany azotu azotynowego w czasie fermentacji metanowej w układzie nieprzepływowym	60
Rys. 4.6.	Zmiany azotu azotanowego w czasie fermentacji metanowej w układzie nieprzepływowym	60
Rys. 4.7.	Zmiany zawartości lotnych kwasów tłuszczowych w czasie fermentacji metanowej w układzie nieprzepływowym	61
Rys. 4.8.	Zmiany zawartości zasadowości w czasie fermentacji metanowej w układzie nieprzepływowym	62
Rys. 4.9.	Zmiany stosunku zawartości lotnych kwasów tłuszczowych do zasadowości w czasie fermentacji metanowej w układzie nieprzepływowym	63
Rys. 4.10.	Zmiany kwasowości w czasie fermentacji metanowej w układzie nieprzepływowym	63
Rys. 4.11.	Zmiany zawartości odczynu w czasie fermentacji metanowej w układzie nieprzepływowym	64
Rys. 4.12.	Zmiany suchej pozostałości w czasie fermentacji metanowej w układzie nieprzepływowym	65
Rys. 4.13.	Zmiany pozostałości po prażeniu w czasie fermentacji metanowej w układzie nieprzepływowym	65
Rys. 4.14.	Zmiany w suchej masie organicznej w czasie fermentacji metanowej w układzie nieprzepływowym	66
Rys. 4.15.	Całkowita ilość wydzielającego się gazu w czasie fermentacji metanowej w układzie nieprzepływowym	67
Rys. 4.16.	Zmiany zawartości azotu amonowego w zależności od wartości chemicznego zapotrzebowania na tlen oznaczone metodą nadmanganianową podczas fermentacji w gnojowicy	68
Rys. 4.17.	Zmiany zawartości azotu amonowego w zależności od wartości chemicznego zapotrzebowania na tlen oznaczone metodą nadmanganianową podczas fermentacji osadu ze ścieków komunalnych	69
Rys. 4.18.	Zmiany zawartości azotu amonowego w zależności od chemicznego zapotrzebowania na tlen oznaczone metodą nadmanganianową podczas fermentacji osadów ze ścieków mleczarskich	69

Rys. 4.19.	Korelacja pomiędzy zawartością azotu amonowego a zawartością lotnych kwasów tłuszczowych w gnojowicy	70
Rys. 4.20.	Korelacja pomiędzy zawartością azotu amonowego a zawartością lotnych kwasów tłuszczowych w osadach ze ścieków komunalnych	71
Rys. 4.21.	Korelacja pomiędzy zawartością azotu amonowego a zawartością lotnych kwasów tłuszczowych w osadach ze ścieków mleczarskich	71
Rys. 4.22.	Korelacja pomiędzy zawartością azotu amonowego a stosunkiem lotnych kwasów tłuszczowych do zasadowości w gnojowicy	72
Rys. 4.23.	Korelacja pomiędzy zawartością azotu amonowego a stosunkiem lotnych kwasów tłuszczowych do zasadowości w osadach ze ścieków komunalnych	73
Rys. 4.24.	Korelacja pomiędzy zawartością azotu amonowego a stosunkiem lotnych kwasów tłuszczowych do zasadowości w osadach ze ścieków mleczarskich	73
Rys. 4.25.	Korelacja pomiędzy zawartością azotu amonowego a zawartością azotu azotynowego w gnojowicy	74
Rys. 4.26.	Korelacja pomiędzy zawartością azotu amonowego a zawartością azotu azotynowego w osadach ze ścieków komunalnych	74
Rys. 4.27.	Korelacja pomiędzy zawartością azotu amonowego a zawartością azotu azotynowego w osadach ze ścieków mleczarskich	75
Rys. 4.28.	Korelacja pomiędzy zawartością azotu amonowego a zawartością azotu azotynowego w gnojowicy	76
Rys. 4.29.	Korelacja pomiędzy zawartością azotu amonowego a zawartością azotu azotynowego w osadach ze ścieków komunalnych	76
Rys. 4.30.	Korelacja pomiędzy zawartością azotu amonowego a zawartością azotu azotynowego w osadach ze ścieków mleczarskich	77
Rys. 4.31.	Zmiany zawartości ChZT-Cr w czasie fermentacji metanowej w układzie przepływowym	78
Rys. 4.32.	Zmiany zawartości ChZT-Mn w czasie fermentacji metanowej w układzie przepływowym	78
Rys. 4.33.	Zmiany zawartości azotu ogólnego w czasie fermentacji metanowej w układzie przepływowym	79
Rys. 4.34.	Zmiany zawartości azotu amonowego w czasie fermentacji metanowej w układzie przepływowym	79
Rys. 4.35.	Zmiany zawartości azotu azotynowego w czasie fermentacji metanowej w układzie przepływowym	80
Rys. 4.36.	Zmiany zawartości azotu azotanowego w czasie fermentacji metanowej w układzie przepływowym	80

Rys. 4.37.	Zmiany zawartości lotnych kwasów tłuszczowych w czasie fermentacji metanowej w układzie przepływowym	81
Rys. 4.38.	Zmiany zawartości odczynu w czasie fermentacji metanowej w układzie przepływowym	82
Rys. 4.39.	Zmiany suchej pozostałości w czasie fermentacji metanowej w układzie przepływowym	83
Rys. 4.40.	Zmiany pozostałości po prażeniu w czasie fermentacji metanowej w układzie przepływowym	83
Rys. 4.41.	Zmiany w suchej masie organicznej w czasie fermentacji metanowej w układzie przepływowym	84
Rys. 4.42.	Całkowita ilość wydzielającego się gazu w czasie fermentacji metanowej w układzie przepływowym	85
Rys. 5.1.	Schemat opracowania indeksu efektywności	90
Rys. 5.2.	Zmiany indeksu efektywności procesu stabilizacji beztlenowej osadów ściekowych w procentach w zależności od czasu trwania procesu fermentacji dla poszczególnych rodzajów osadów	95
Rys. 5.3.	Zmiany indeksu efektywności procesu stabilizacji beztlenowej osadów ściekowych przy różnej proporcji wybranych osadów ściekowych	95
Rys. 5.4.	Zmiany indeksu efektywności procesu stabilizacji beztlenowej osadów ściekowych przy różnej proporcji wybranych osadów ściekowych	96
Rys. 5.5.	Zmiany indeksu efektywności procesu stabilizacji beztlenowej osadów ściekowych przy różnej proporcji wybranych osadów ściekowych	96
Rys. 5.6.	Zmiany indeksu efektywności procesu stabilizacji beztlenowej osadów ściekowych przy różnej proporcji wybranych osadów ściekowych	97
Rys. 5.7.	Zależność pomiędzy indeksem efektywności a indeksem oczekiwany	98
Rys. 5.8.	Zmiany indeksu efektywności w trzech komorach doświadczalnych	100
Rys. 5.9.	Porównanie indeksu efektywności z ubytkiem suchej masy organicznej	101
Rys. 5.10.	Porównanie indeksu efektywności z ubytkiem ChZT-Cr	101

Spis tabel

Tab. 3.1.	Wybór podstawowych wskaźników istotnych do opisu statystycznego na podstawie analizy statystycznej	40
Tab. 4.1.	Skład fizyczno-chemiczny gnojowicy przed i po fermentacji	47
Tab. 4.2.	Skład fizyczno-chemiczny osadów z oczyszczalni ścieków mleczarskich przed i po fermentacji	48
Tab. 4.3	Skład fizyczno-chemiczny osadów z oczyszczania ścieków komunalnych przed i po fermentacji	49
Tab. 4.4.	Skład fizyczno-chemiczny osadów zmieszanych przed i po fermentacji (1/3 gnojowicy, 1/3 osadów z oczyszczania ścieków mleczarskich i 1/3 z oczyszczania ścieków komunalnych)	50
Tab. 4.5.	Przykładowa seria badawcza mezofilowej fermentacji metanowej gnojowicy (układ przepływowy)	51
Tab. 4.6.	Przykładowa seria badawcza mezofilowej fermentacji metanowej gnojowicy (układ nieprzepływowy)	52
Tab. 4.7.	Przykładowa seria badawcza fermentacji metanowej osadów z oczyszczalni ścieków komunalnych (układ przepływowy)	53
Tab. 4.8.	Przykładowa seria badawcza fermentacji metanowej osadów z oczyszczalni ścieków komunalnych (układ nieprzepływowy)	54
Tab. 4.9.	Przykładowa seria badawcza fermentacji metanowej osadów z oczyszczalni ścieków mleczarskich (układ nieprzepływowy) ..	55
Tab. 4.10.	Przykładowa seria badawcza fermentacji metanowej osadów zmieszanych w równej proporcji po 1/3 objętości komory gnojowicy, osadów ze ścieków komunalnych i osadów ze ścieków mleczarskich (układ nieprzepływowy)	56
Tab. 4.11.	Przykładowy skład biogazu z czterech serii badawczych (% objętości)	67
Tab. 4.12.	Przykładowy skład biogazu z trzech serii badawczych (% objętości)	85
Tab. 5.1.	Analiza czynnikowa wybranych 17 wskaźników	89
Tab. 5.2.	Przykładowe wykorzystanie decyli do przejścia na punktową skalę poziomu wybranych parametrów	89

Tab. 5.3.	Oszacowanie parametrów linii regresji wyrażających związek między INDEKSEM A a rodzajem osadów ściekowych i czasem trwania procesu fermentacji	91
Tab. 5.4.	Oszacowanie parametrów linii regresji wyrażających związek pomiędzy INDEKSEM B a rodzajem osadów ściekowych i czasem trwania procesu fermentacji	92
Tab. 5.5.	Oszacowanie parametrów linii regresji wyrażających związek pomiędzy czasem trwania procesu fermentacji a rodzajem osadów ściekowych i INDEKSEM B	92
Tab. 5.6.	Przykład obliczenia IND_E dla mieszaniny osadów ściekowych	93
Tab. 5.7.	Przykład obliczenia oczekiwanego indeksu efektywności procesu stabilizacji beztlenowej osadów ściekowych na podstawie składu ilościowego mieszaniny osadów i zadanej doby trwania procesu	94
Tab. 5.8.	Wyliczenie doby trwania procesu na podstawie składu ilościowego mieszaniny osadów i założonego indeksu efektywności ich stabilizacji	94
Tab. 5.9.	Weryfikacja wartości IND_E i IND_OE z badań w warunkach przepływowych	99
Tab. 5.10.	Indeks efektywności w wybranych oczyszczalniach ścieków regionu północno-wschodniego, stosujących proces fermentacji w układzie przepływowym.....	100
Tab. A.	Przykładowe wskaźniki fizyczno-chemiczne mieszaniny osadów ściekowych w mg/dm ³ oraz otrzymany indeks	103
Tab. B.	Indeks efektywności procesu stabilizacji beztlenowej osadów ściekowych na podstawie składu ilościowego mieszaniny i zadanej doby trwania procesu	103
Tab. C	Określenie doby trwania procesu na podstawie składu ilościowego mieszaniny i założonego indeksu efektywności procesu stabilizacji osadów ściekowych	103