

ENERGETYCZNIE OPTIMALNA STABILIZACJA STĘŻONEJ GNOJOWICY Z FERM PRZEMYSŁOWYCH

Na przestrzeni dziesięciu lat wybudowano w kraju kilkadziesiąt różnej wielkości ferm przemysłowej hodowli zwierząt rzeźnych. Uprzemysłowienie hodowli pociągnęło za sobą konieczność rozwiązania utylizacji odchodów zwierzęcych, których ilość jest znaczna. Dla zobrazowania problemu niech służyć następujące liczby podające w przeliczeniu na biochemiczne zapotrzebowanie tlenu (BZT₅), ładunki równoważne z liczbą mieszkańców (RLM) [1, 2], tabl. 1.

Tabela 1
ŁADUNKI BZT₅ RÓWNOWAŻNE Z LICZBĄ MIESZKAŃCÓW
DLA RÓŻNYCH ZWIERZĄT

L.p.	Rodzaj zwierzęcia	wg. Loehra	wg. Imhoffa
1	krowa mleczna	8 RLM	5—10 RLM
2	bydło rzeźne	6 „	5—10 „
3	świnia (tucznik)	1,7—1,95	3 „

Powyższe oznaczają, że ferma na 3000 sztuk bydła odprowadza ładunek zanieczyszczeń odpowiadający miastu 30.000, a ferma trzody na 30.000 stanowisk (np. Kołbacz, Szamocin) miastu o 66—90.000 mieszkańców. Dobowe wydalanie składników nawozowych przez hodowane zwierzęta przedstawia tabl. 2 [1, 3, 4].

Tabela 2
WARTOŚCI NAWOZOWE WYDALANE PRZEZ ZWIERZĘTA

L.p.	Wartość nawozowa wydalana (g/d — zwierzę)	N	P	K
1	a) wg. Horta i Turnera	14,4	4,9	5,8
	b) wg. Schmidta i Weigla	13,2	7,4	3,6
	c) wg. Loehra	—17,2	13,1—	6,2—
		19,1—	—14,5	—15,4
2	a) j.w.	175,	23,0	140,0
	b) —	—	—	—
	c) j.w.	158,9	49,9	122,5

Różnice w ilościach NPK podawanych przez różnych autorów spowodowane są między innymi sposobem żywienia zwierząt, różnicą w ciężarze itp.

Przedstawione wyżej ilości składników nawozowych muszą być brane pod uwagę przy realizacji systemu utylizacji tych zanieczyszczeń. Znana od wieków hodowla zwierząt nie stwarzała problemu ściekowego, gdyż część fekalii pozostawała na pastwisku, reszta, razem ze ściółką, wędrowała na pola jako naturalny nawóz, niezmiernie użyteczny dla żyzności gleby. Dotychczasowe badania i praktyka potwierdziły w całej rozciągłości, że rolnicze wykorzystanie gnojowicy jest słuszne ekonomicznie, a jednocześnie stanowi naturalne zamknięcie obiegu materii w przyrodzie. Gleba otrzymuje

na powrót część pobranych przez rośliny substancji mineralnych, a zarazem wzbogaca się o cenną nawozowo substancję organiczną. W obecnym okresie kryzysu energetycznego i znacznej wyższości cen nawozów mineralnych, a nawet poważnego ich deficytu oraz stałego wzrostu popularności ziemiopłodów wyprodukowanych na nawozach naturalnych — rolnicze wykorzystanie gnojowicy jest jak najbardziej celowe, zarówno z punktu widzenia ochrony środowiska jak i wskaźników ekonomicznych.

W rolniczym wykorzystaniu surowej gnojowicy istnieje jednak niebezpieczeństwo przekroczenia naturalnych możliwości przetwórczych gleby i uprawianych roślin. Przy aktualnie zalecanych dawkach 50—100 m³/ha gnojowicy „pełnej” około 25—30% zawartego w niej azotu może się znaleźć poza zasięgiem korzeni roślin. Ta część straconego azotu stanowi zagrożenie dla czystości wód [5]. Zagrożona może być również jakość płodów rolnych. Jak podają Specht, Asmus i Lange [6], już przy dawkach powyżej 200 kg N/ha występują niekorzystne zmiany w składzie chemicznym roślin. Ilustruje to tab. 3.

Tabela 3
DOPUSZCZALNE DAWKI AZOTU DLA RÓŻNYCH ROŚLIN

L.p.	Rośliny	kg/ N/ha	gnojowicy gęstej t/ha		Możliwe zmniejszenie jakości produktów rolnych
			bydłowej	świńskiej	
1	ziemniaki	500	125	75	spadek zawartości skrobi (>240 kg N/ha)
2	buraki cukrowe	500	125	75	spadek zawartości cukru (>240 kg N/ha)
3	buraki pastewne	600	150	90	wzrost zawartości NO ₃ (>200 kg N/ha)
4	kukurydza na kiszonki	600	150	90	opóźnienie dojrzewania, wzrost zawartości NO ₃ (>400 kg N/ha) ważne przy spasaniu świeżej kukurydzy
5	kapusta pastewna	600	150	90	wzbogacenie w NO ₃ (>400 kg N/ha) ważne przy spasaniu świeżej kapusty

Wspomnieć tu również należy o niebezpieczeństwie przenoszenia chorób zakaźnych zwierząt np. czerwonki i helmintoz przy użytkowaniu gnojowicy surowej.

Ponadto jest ona bez wątpienia substratem szczególnie łatwo ulegającym biodegradacji, czego dowodem jest jej wysokie biochemiczne zapotrzebowanie tlenu. Z tego powodu należy również zwrócić uwagę na stosunki tlenowe, powstające w glebie wskutek nawożenia gno-

jowicą, gdyż przekroczenie dopuszczalnych dawek spowodować może zachwianie równowagi między dyfuzją tlenu z atmosfery do gleby, a zużyciem tlenu przez mikroorganizmy glebowe na mineralizację i stabilizację substancji organicznych gnojowicy. Gnojowica surowa posiada właściwości tiksotropowe i powoduje „zaklejanie” gleby, co znacznie utrudnia lub wręcz uniemożliwia transpirację tlenu do gleby. Problemem równowagi tlenowej w glebie szczególnie zajmował się Kowalik [7].

Przywrócenie równowagi tlenowej w glebie jest procesem długotrwałym, a osiągnięcie pełnej reaeracji jest trudniejsze niż w wodach powierzchniowych, gdyż wskutek kapilarności porów gleby, przenikanie tlenu odbywa się tylko na drodze dyfuzji, która przebiega stosunkowo wolno.

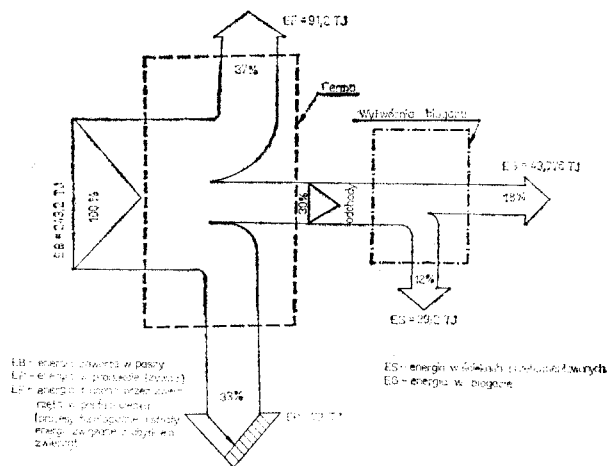
Niebezpieczeństwo odtlenienia gleby przestaje istnieć, gdy do nawożenia stosujemy gnojowicę uprzednio ustabilizowaną.

Procesy stabilizacji ścieków i osadów mogą być prowadzone biochemicznie, w drodze fermentacji metanowej bądź tlenowo.

W tych dwóch procesach, o bardzo licznych modyfikacjach rozwiązań technicznych i warunkach prowadzenia procesu, część substancji zostaje utleniona do H_2O , CO_2 , NO_3 , pozostała część, łącznie z uwolnioną podczas spalania energią, staje się budulcem dla nowych komórek oraz tworzy stabilny biochemicznie humus. Wspomniana wyżej fermentacja metanowa prowadzi do stabilizacji gnojowicy, dając produkt uboczny — gaz palny, wysokokaloryczny. W ostatnim czasie dużo mówi się i pisze o produkcji tego biogazu z odchodów zwierzęcych, stwarzając wrażenie nowości zagadnienia. Wydaje się słusznym przypomnieć, że fermentacja metanowa osadów ściekowych jest znana i stosowana z powodzeniem od dziesiątków lat i u nas w kraju. W polskim wydaniu książki Imhoffa (1957 r.) umieszczono tablicę zawierającą ilości gazu wyprodukowanego z różnych surowców, między innymi z kału zwierzęcego. Badania nad fermentacją metanową prowadził Buswell [8], Teichgräber [9] i wielu innych badaczy. Jedyną przeszkodą w rozpowszechnieniu tej metody jest wysoki koszt urządzeń do produkcji, magazynowania i wykorzystania gazu i dlatego w małych miastach, mimo że prowadzi się fermentację osadów, gazu nie użytkowuje się.

Wprowadzenie dużych ferm hodowlanych daje duże ilości wydaliny, a wykorzystanie ich do produkcji biogazu może być opłacalne.

Przeprowadzone w Polsce, w ostatnim dziesięcioleciu, badania laboratoryjne wykazały, że z 1 tony obornika można uzyskać 30—35 Nm^3 gazu/a, z 1 tony odchodów świńskich 50—80 Nm^3 /a, a z 1 tony zielonych łętów ziemniaczanych 50—60 Nm^3 /a [10, 11]. Turowski sporządził przykładowy schemat bilansu energii dla fermy, o rocznej produkcji 36.500 tuczników. Bilans ten uwzględnia wszystkie postacie energii, a więc zawartą w paszy, żywcu, odchodach itp. Przedstawia go rys. 1.



Rys. 1 Przykładowy bilans roczny energii biomasy dla fermy trzody chlewnej o rocznej produkcji 36,5 tys. tuczników

Podstawowe dane produkcyjne dla tej fermy są następujące:

- produkcja żywca 3.800 t/a
- zużycie paszy 15.200 t/a
- produkcja gnojowicy 111.800 t/a
- zużycie oleju napędowego 1.666 m^3 = 55,1 TJ
- w tym na cele ogrzewcze 1.639 m^3 = 54,4 TJ
- zużycie energii elektrycznej 2.556 MWh = 9,2 TJ

Tabela 4
ILOŚCI GAZU UZYSKIWANE Z FERMENTACJI RÓŻNYCH SUROWCÓW

L.p.	Materiał poddany fermentacji	dm ³ gazu/kg		
		s.s. ogólna	s.s. organiczna	%CH ₄
1	Osady ze ścieków miejskich	431	607	78
2	Mierzwa ze ściółką	286	342	75
3	Kał koński	391	430	78
4	Kał bydły	237	315	80
5	Kał świński	257	415	81
6	Słoma pszenna	348	367	78
7	Łęty ziemniaczane	526	606	75
8	Liście buraków cukrowych	456	501	85

Z bilansu wynika, że przy fermentacji metanowej odzyskuje się ze ścieków 43,8 TJ/a, co stanowi w analizowanym przypadku około 68% energii dostarczonej do ferm w postaci oleju napędowego i energii elektrycznej, razem 64,3 TJ.

Przedstawiony bilans energetyczny nie obejmuje analizy przydatności przefermentowanej gnojowicy do nawożenia. Jest oczywiste, że zarówno tlenowa, jak i beztlenowa stabilizacja zmniejszają w gnojowicy zawartość substancji organicznych (C organicznego), potrzebnych dla utrzymania zawartości humusu w glebie, bez którego intensywne nawożenie azotem mineralnym może być dla gleby wręcz szkodliwe. Istotne znaczenie dla gospodarki węglem i azotem przez drobnoustroje w glebie ma stosunek ilościowy tych pierwiastków. Zapotrzebowanie drobnoustrojów na węgiel jest pokryte przy stosunku C:N=20-30, przy zawężeniu tego stosunku, tj. przy nadmiarze azotu, drobnoustroje pobierać będą węgiel z próchnicy,

mineralizując równocześnie jej azot [12]. W gnojowicy stosunek C:N jest daleki od optymalnego, podczas gdy w oborniku jest bliski 20, to w gnojowicy bydłowej wynosi on tylko 5—9, w świńskiej około 6, a w kurzej około 5. Mając na uwadze powyższe, należy zapobiegać stratom węgla organicznego w próchnicy gleby poprzez zastosowanie nawożenia ustabilizowaną gnojowicą z dodatkiem słomy, względnie przez stosowanie długiego rżyska, zaorywanego przed polewaniem gnojowicą itp.

Zastosowanie gnojowicy ustabilizowanej wiąże się z kosztem przeprowadzenia tego procesu. Stabilizacja beztlenowa przebiega stosunkowo wolno: w temp. 10—15°C, całkowita fermentacja trwa 90—60 dób, a w temp. 20—30°C — 30 dób. Temperatura 55—60°C skraca proces do 15 dób. Dopiero po tych okresach czasu uzyskuje się produkt w pełni stabilny i nadający się do nawożenia, bez obawy odtlenienia gleby. Osad (gnojowica), nie w pełni ustabilizowany, zawiera związki silnie redukcyjne — również siarkowodor, źle się odwadnia i wymaga dalszych zabiegów.

Stabilizacja tlenowa gnojowicy przebiega wielokrotnie szybciej, a w warunkach termofilowych trwa zaledwie 2 doby [13]. Oznacza to w technice kilkakrotne zmniejszenie wielkości urządzeń, powierzchni itp. Pozostaje sprawa zapotrzebowania energii na stabilizację tlenową w temp. 55°C. W wielu badaniach [14, 15, 16] udowodniono, że przy dużych stężeniach substancji organicznej, przekraczających 30g ChZT/dm³ następuje samoogrzanie substratu do temp. 40—50°C, czyli zbędne staje się doprowadzenie energii cieplnej z zewnątrz. W naszych fermach, najczęściej stosuje się splukiwanie fekalii wodą, co powoduje ich nadmierne rozcieńczanie [17].

Zużycie wody bywa bardzo różne, co obrazuje tab. 5. Skutkiem tego otrzymuje się gnojowicę

uzyskania substratu stężonego, który w czasie stabilizacji tlenowej ulegałby samoogrzaniu, lub połączenie procesu beztlenowego z tlenowym, w celu wykorzystania części uzyskanego ciepła (kaloryczności biogazu) dla ogrzewania komór stabilizacyjnych. Wyniki badań nad dwustopniową stabilizacją przedstawione zostaną w dalszej części artykułu.

Cel badań

Na początku artykułu podano podstawowe informacje dotyczące ilości, ładunku zanieczyszczeń i możliwości użytkowania gnojowicy. Zasadę utylizacji gnojowicy z ferm przemysłowych należy sformułować jednoznacznie — gnojowica powinna być wykorzystana jako nawóz organiczny. Realizacja tej zasady wiąże się z koniecznością jej ustabilizowania, czyli przetworzenia na drodze biochemicznej części łatwo rozkładalnej substancji organicznej w cenny nawozowo humus. Uwzględniając aspekt ekonomiczny postanowiono tak prowadzić proces stabilizacji aby zapewnić jego samowystarczalność energetyczną. Taką możliwość stwarza stabilizacja dwustopniowa:

I fermentacja metanowa częściowa dla uzyskania gazu, jako źródła energii

II stabilizacja tlenowa termofilowa, która pozwala wydatnie skrócić czas procesu i uzyskać nawóz nie naruszający równowagi tlenowej gleby, co już potwierdziły wcześniejsze badania [18].

Stabilizowanie gnojowicy, tylko na drodze fermentacji metanowej pozwala co prawda uzyskać maksymalną ilość „biogazu” ale przefermentowane ścieki, przed rozdeszczeniem na polach lub łąkach powinny być zgodnie z wymaganiami nowoczesnej higieny dezynfekowane przez podgrzanie, w czasie 30 minut, do temperatury 338°K. Ponadto całkowity proces fermentacji trwa w zależności od temperatury, w której jest prowadzony od 15—30 d, a to z kolei wpływa na koszt urządzeń (duża objętość komór fermentacyjnych).

Stabilizacja tlenowa, w warunkach termofilowych daje produkt stabilny w znacznie krótszym czasie 2—4 d, bezpieczny sanitarnie, pozbawiony przykrego zapachu, ale aby doszło do samoogrzania ścieków do temperatur optymalnych dla organizmów termofilowych niezbędna jest wysoka koncentracja substancji organicznej. Niestety, praktyka eksploatacyjna naszych ferm nie gwarantuje stałego, wysokiego stężenia gnojowicy, którego duże wahania są spowodowane różną ilością wody co wykazano w tab. 5. Mając na uwadze powyższe, założono, że stabilizacja dwustopniowa pozwoli osiągnąć optymalny układ zapewniający dodatni bilans energetyczny dla fermy.

Metodyka badań

Opis urządzenia modelowego i parametry procesu

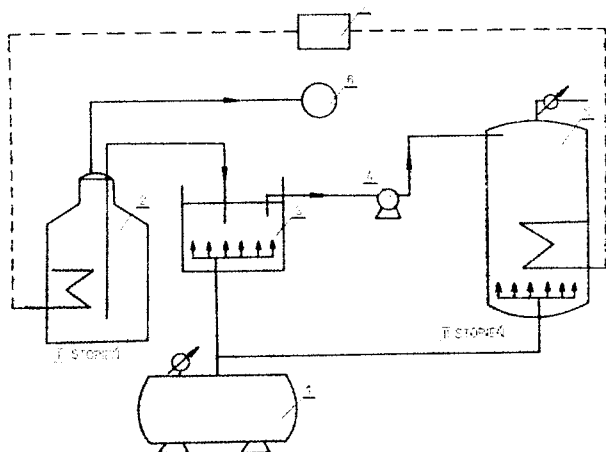
Instalacja modelowa pracowała metodą periodyczną w układzie dwustopniowym. I stopień stanowiło 5 komór fermentacyjnych o różnych

Tabela 5
ZUŻYCIE WODY PRZEZ RÓŻNE FERMY HODOWLANE

L.p.	F e r m a	Docelowa obsada (il. stan. /szt.)	Plano-wana ilość ścieków m ³ /d	Aktualna obsadzo-na ilość stano-wisk sz.	Aktual-na ilość ścieków m ³ /d	Aktual-na ilość ścieków w l/sta-nowisko
1	Kolbacz-trzoda	24.000	800	22.000	1.500	68,2
2	Smardzko-trzoda (typ Kolbacz)	24.000	800	22.000	1.150	52,3
3	Szamocin-trzoda (typ Kolbacz)	24.000	830	17.000	500	29,4
4	Rokitki-trzoda (typ WRL)	10.000	145	6.000	46	7,7
5	Kadłubek-trzoda	11.000	71	8.000	45	5,6
6	Górzycza-bydło rżenne	3.000	78	3.000	79	26,3
7	Jezierzyce-bydło rżenne	3.000	87	2.500	80	92,0
8	Konstantowo-trzoda	—	—	10.000	112	19,2

o bardzo różnym stężeniu, a raczej rozcieńczeniu w granicach 12:1 (np. Kolbacz, Kadłubek). Przy tak dużych rozcieńczeniach, proces samoogrzania oczywiście nie może nastąpić i potrzebne jest doprowadzenie ciepła dla przyspieszenia stabilizacji. Możliwe byłyby tu dwa rozwiązania: zmniejszenie zużycia wody dla

czasach fermentacji — 5, 7,5, 10, 15, 20 d. Wydzielający się gaz zbierano w kalibrowanych rurach szklanych. II stopień stanowił biodegradator tlenowy, pracujący przy niewielkim nadciśnieniu 0,2 MPa. Źródłem tlenu dla drugiego stopnia było sprężone powietrze włączane przez perforowane wewnętrzne dno biodegradatora, co zapewniało silną turbulencję i dobre wymieszanie substratu. Zarówno fermentacja metanowa jak i stabilizacja tlenowa prowadzona była w warunkach termofilowych — temp. 328°K. Schemat technologiczny aparatury modelowej do badań dwustopniowej stabilizacji gnojowicy przedstawia rys. 2



Rys. 2 Schemat technologiczny aparatury pomiarowej do badań dwustopniowej stabilizacji stężonych ścieków

1 — sprężarka, 2 — komora fermentacyjna, 3 — zbiornik powietrza, 4 — pompa, 5 — biodegradator tlenowy, 6 — licznik gazu, 7 — zbiornik gazu.

Stosowany substrat i kontrola analityczna procesu

Do badań użyto gnojowicy z przemysłowej fermy tuczu trzody chlewnej o łącznej liczbie 3.500 stanowisk. Ścieki badane w poszczególnych seriach różniły się początkowym stężeniem wyrażonym jako ChZT (gO_2/dm^3).

Analizę substratów wyjściowych zestawiono w tab. 6.

Tabela 6

ANALIZA SUBSTRATÓW WYJŚCIOWYCH						
Oznaczenia	ChZT	BZT ₅	Strata przy prażeniu	Norg	N	
pH	gO_2/dm^3	gO_2/dm^3	g/dm^3	g/dm^3	g/dm^3	
seria badań						
I seria	7,2	17,8	6,4	12,9	1,3	0,4
II seria	7,5	29,6	14,2	38,3	2,2	1,6
III seria	7,2	42,8	22,0	56,8	2,9	0,4

Dla oceny przebiegu procesu stosowano następujące oznaczenia:

- stężenie substancji organicznej określono przez ChZT, BZT₅
- suchą pozostałość ogólną i pozostałość po prażeniu
- amonifikację białek przez oznaczenie azotu organicznego i azotu amonowego
- przy fermentacji metanowej mierzono ilość gazu, analizowano jego skład oraz określono wartość opałową.

Wyniki badań

Substrat wyjściowy o składzie podanym w tab. 6 stabilizowano tlenem termofilowo. Uzyskane wyniki pozwoliły sporządzić bilans energetyczny dla tego układu. W bilansie wykorzystano wcześniejsze badania Pöpla [20], Lolla [21], Surucu i in. [22]. W oparciu o wyniki bilansu stwierdzono, że w I serii przy ChZT=17,8 gO_2/dm^3 i w II serii przy ChZT=29,6 gO_2/dm^3 stężenie substancji organicznej jest zbyt małe, a co się z tym wiąże, zbyt mała jest ilość ciepła wywiązanej z termogenezy. Seria III przy ChZT=42,8 gO_2/dm^3 zamknęła się dodatnim bilansem energetycznym.

Założenia bilansu były następujące:

1. Bilans sporządzono w przeliczeniu na 1 m³ gnojowicy.
2. Temperaturę gnojowicy dopływającej przyjęto 283°K, taką samą temperaturę przyjęto dla dopływającego powietrza. Temperatura odniesienia wynosi 273°K, temperatura procesu stabilizacji 328°K. Temperaturę otoczenia przyjęto 263°K.
3. Ze względu na zastosowane ciśnienie procesu stabilizacji tlenowej 0,2 MPa założono 20% wykorzystanie tlenu z doprowadzonego powietrza.
4. Straty ciepła, na parowaniu wody unoszonej z powietrzem obliczono, przyjmując 50% nasycenia powietrza parą wodną w temp. 283°K i 100% nasycenia w temperaturze 328°K (ilość pary wodnej w kg odczytano z wykresu Moliera).
5. Przyjęto biodegradator i WKF o pojemności 50 m³ i powierzchni 90 m² w związku z czym na 1 m³ pojemności przypadało 1,8 m² powierzchni.
6. Straty ciepła przez przenikanie ustalono dla współczynnika przenikania $k=0,53 \text{ W/m}^2 \text{ deg}$, przy czym

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{a_1} + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_3} + \frac{1}{a_2} \quad (\text{m}^3 \text{ deg})$$

$\frac{1}{a_1}$ współczynnik przejmowania ciepła przez przegrodę od strony wewnętrznej WKF i biodegradatora = 0,0017 ($\text{m}^2 \text{ deg/W}$)

$\frac{1}{a_2}$ współczynnik przejmowania ciepła przez przegrodę od strony zewnętrznej WKF i biodegradatora = 0,120 ($\text{m}^2 \text{ deg/W}$)

d_1 grubość ścianki izolacyjnej = 0,01 m z twardego poliestru

λ_1 współczynnik przewodzenia ciepła dla ścianki z twardego poliestru = 0,120 W/m.deg

d_2 grubość ścianki izolacyjnej ze styropianu = 0,05 m

λ_2 współczynnik przewodzenia ciepła dla ścianki ze styropianu = 0,030 W/m.deg

d_3 grubość ścianki WKF i biodegradatora z blachy żelaznej = 0,005 m

λ_3 współczynnik przewodzenia ciepła dla ścianki z blachy żelaznej = 43 W/m.deg

7. Wszystkie współczynniki liczbowe, takie jak gęstość powietrza, wody, metanu i dwutlenku węgla, ciepło właściwe dla w/w związków, współczynniki przewodzenia ciepła, ciepło parowania odczytano z tablic cieplnych z wykresami [20].

Tabela 7

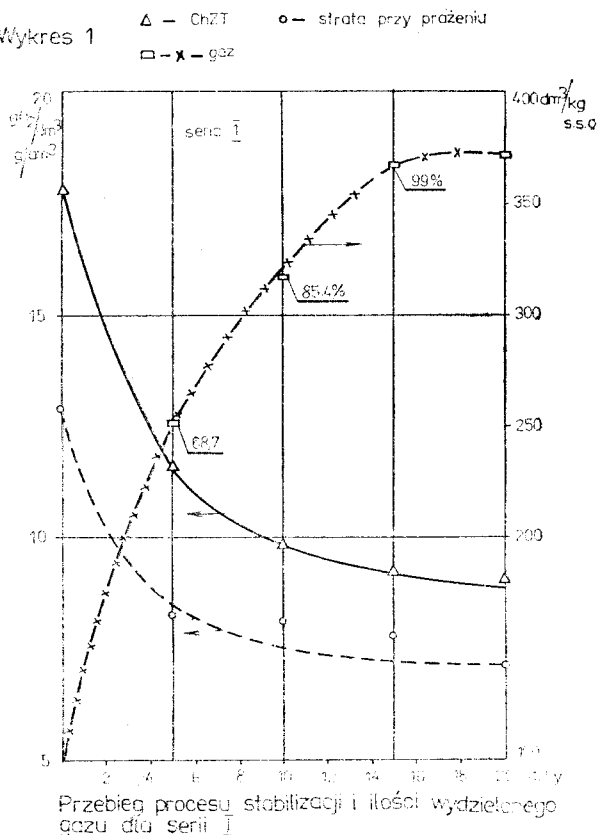
**BILANS ENERGETYCZNY DLA PROCESU STABILIZACJI TLENOWEJ
W TEMP. 328°K**

Przyrost ciepła +	Seria badań	I ChZT=17,6	II ChZT=22,6	III ChZT=42,8
	Czas procesu stabilizacji tlenowej (doby)	1d	2d	4d
1. Ciepło powstałe z termogenezy	ChZT w czasie t (gO ₂ /dm ³)	6,4	14,2	22,0
	$C_1 = \text{ChZT} \cdot 3,5 \cdot 1000$ (KJ)	93.784	208.084	222.383
2. Ciepło doprowadzone z substratem	$C_2 = V_s \cdot Q_s \cdot c_s (T_d - T)$ (KJ)	42.236	42.236	42.236
3. Ciepło doprowadzone z powietrzem	$C_3 = q_p \cdot c_p \cdot (T_p - T)$ (KJ)	qp=115 m ³ /d 1.444	qp=255 m ³ /2d 2.203	qp=396 m ³ /4d 4.974
Suma przyrostów ciepła	$\Sigma C = C_1 + C_2 + C_3$ (KJ)	137.464+	252.489+	369.560+
Straty ciepła —				
1. Ciepło potrzebne do ogrzania zawartości reaktora				
a) ścieków	$C'_1 = V_s \cdot Q_s \cdot (T_r - T_d) \cdot c_s$ (KJ)	185.019	185.019	185.019
b) powietrza	$C'_2 = q_p (T_r - T_p) \cdot c_p$ (KJ)	6.489	14.411	22.383
2. Straty ciepła przez przenikanie	$C'_3 = k \cdot P \cdot (T_r - T_o) \cdot \Delta t$ (KJ)	7.055	14.109	28.215
3. Strata ciepła przez parowanie	$C'_4 = q_w \cdot c_p$ (KJ)	80.580	67.813	105.310
Suma strat ciepła	$\Sigma C' = C'_1 + C'_2 + C'_3 + C'_4$ (KJ)	229.177—	281.353—	340.927—
Suma przyrostów i strat ciepła	$\Sigma C + \Sigma C'$ (KJ)	91.713—	27.863—	28.633+

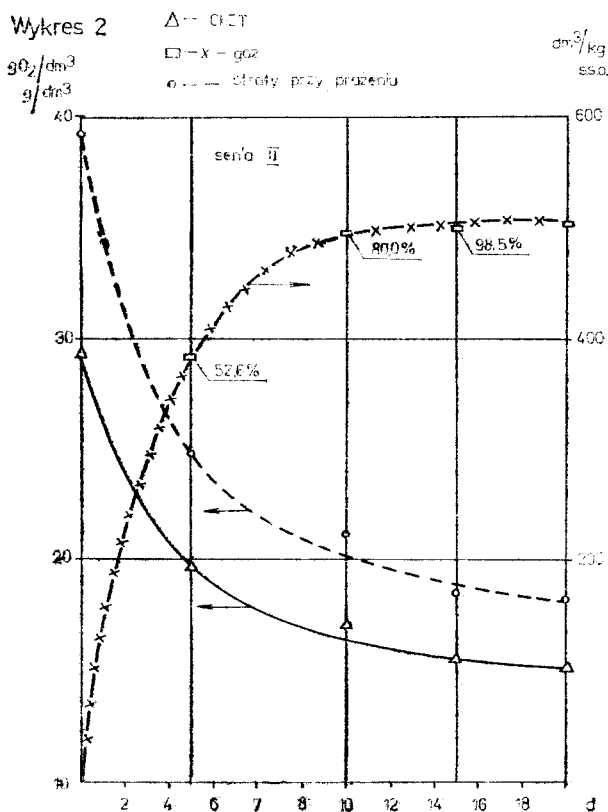
OZNACZENIA

- C_1 — ciepło powstałe z termogenezy (KJ)
- C_2 — ciepło doprowadzone z substratem (KJ)
- C_3 — ciepło doprowadzone z powietrza (KJ)
- C'_1 — ciepło potrzebne do ogrzania ścieków (KJ)
- C'_2 — ciepło potrzebne do ogrzania powietrza (KJ)
- C'_3 — ciepło tracone przez przenikanie (KJ)
- C'_4 — ciepło tracone przez parowanie (KJ)
- C — suma przyrostów ciepła (KJ)
- C' — suma strat ciepła (KJ)
- V_s — objętość substratu (gnojowicy) (m³)
- c_s — ciepło właściwe substratu (KJ/kg·deg)
- T_d — temperatura dopływającego substratu (°K)
- q_p — natężenie dopływu powietrza (N m³/d)
- c_p — ciepło właściwe powietrza KJ/Nm³·deg
- T_p — temperatura powietrza (°K)
- t — czas (doby)
- T_r — temperatura procesu stabilizacji (°K)
- T_o — temperatura odniesienia (°K)
- k — współczynnik przenikania ciepła (W/m²·deg)
- P — powierzchnia biodogradatora i WKF (m²)
- T_o — temperatura otoczenia (°K)
- q_w — ilość odparowanej wody (kg)
- c_p — ciepło parowania (KJ/kg)

Wykres 1



Wykres 2



Przebieg procesu stabilizacji i ilości wydzielonego gazu dla serii

Stabilizacja dwustopniowa

Równolegle prowadzono fermentację metanową substratów (seria I i II), dla których przy stabilizacji tlenowej uzyskano bilans ujemny. Uzyskane wyniki przedstawiono w wykresach 1 i 2. Ilość wydzielonego gazu w przeliczeniu na kg suchej substancji organicznej i jego kaloryczność zestawiono w tab. 8.

Tabela 8

ILUŚCI GAZU UZYSKANE Z 1 KG S.S.O. PRZY RÓŻNYCH CZASACH FERMENTACJI

Czas fermentacji	Nr serii	Ilość gazu dm^3/kg s.s.o.	% gazu	Wartość opałowa (KJ)
5 dob	I	256	68,7%	23.781
	II	294	52,6	24.622
7,5 doby	I	282	75,8	24.869
	II	420	75,2	25.456
10 dob	I	218	85,4	24.786
	II	446	80,0	25.678
15 dob	I	369	97,5	24.535
	II	549	98,5	26.083

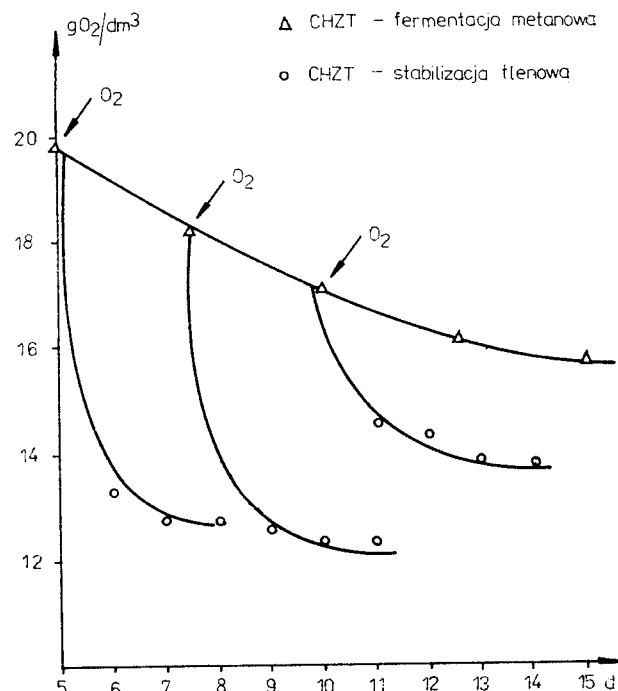
Fermentację metanową przerywano po 5, 7,5, 10 dobach i dalej proces stabilizacji kontynuowano tlenowo. Założono wykorzystanie wydzielonego w I stopniu gazu do ogrzania zarówno komór fermentacyjnych jak i biodegradatora tlenowego. Uzyskane efekty stabilizacji w II stopniu procesu przedstawia tab. 9 i wykres 3.

Tabela 9

PRZEBIEG PROCESU STABILIZACJI W UKŁADZIE DWUSTOPNIOWYM

Czas stabilizacji tlenowej doby	pH	ChZT gO_2/dm^3	TTC MTF gO_2/dm^3	Strata przy przebiegu gO_2/dm^3	N org. g/dm^3	N NH_3 g/dm^3
substrat po 5 dobach fermentacji (seria II)						
0	7,20	19,9	242	24,9	1,22	1,98
1	7,96	13,1	1720	17,8	0,6	3,8
2	8,13	12,8	352	16,2	0,6	3,9
3	8,20	12,8	56	17,0	0,6	3,9
substrat po 7,5 dobach fermentacji (seria II)						
0	7,42	17,5	119	26,9	1,6	1,8
1	8,10	12,6	1940	21,2	0,3	3,2
2	8,20	12,4	75	16,8	0,3	3,2
3	8,18	12,4	0	16,9	0,3	3,2
substrat po 5 dobach fermentacji (seria II)						
0	7,6	15,8	125	20,0	1,2	2,8
1	8,1	14,6	1230	13,4	0,26	3,80
2	8,15	14,4	56	13,6	0,20	3,80
3	8,15	13,9	0	13,6	0,20	3,80

W oparciu o uzyskane wyniki stabilizacji gnojowicy w układzie dwustopniowym sporządzono bilans energetyczny analizując proces wg różnych czasów fermentacji. Założenia przyjęto identyczne jak dla bilansu sporządzonego w oparciu o proces tlenowy, z wyjątkiem temperatury ścieków, dopływających do II stopnia stabilizacji. Ścieki opuszczając WKF mają temperaturę 328°K . Przy przepływie i napowietrzeniu w zbiorniku pośrednim ich temperatura obniży się do 308°K i tę temperaturę przyjęto jako wyjściową do stabilizacji tlenowej substratu.



Wykres 3. Ubytek ChZT w procesie stabilizacji dwustopniowej

Podsumowanie

- Jak wynika z bilansu (tab. 7) proces stabilizacji tlenowej dla trzech różnych substratów jest energetycznie samowystarczalny, wówczas gdy biochemiczne zużycie tlenu osiągnęło $22 \text{ gO}_2/\text{m}^3$. Należy podkreślić, że ChZT jest równoznaczne z BZT po czasie t [21].
- Stabilizacja tlenowa substratów mniej stężonych daje bilans energetyczny ujemny, a w praktyce stężenie substratów ulega dużym wahaniom, wynika stąd konieczność doprowadzenia ciepła z zewnętrznego źródła. Źródłem energii może być stabilizacja metanowa.
- Z uwagi na to, że stabilizacja metanowa jest długotrwała i inwestycyjnie droższa od tlenowej proponuje się układ dwustopniowy, którego bilans energetyczny przedstawiono w tab. 10.
- Z bilansów dla układu dwustopniowego zarówno dla serii I i II wynika jednoznacznie, że proces fermentacji metanowej można już zakończyć po 5 dobach uzyskując ilość energii wystarczającą na pokrycie zapotrzebowania I i II stopnia, a nawet pewien nadmiar, który wynosił dla serii I 87.346 KJ i dla serii II 167.827 KJ . Układ tej przyjęto za optymalny energetycznie.
- Przy zastosowaniu w rozwiązaniach technicznych odzysku ciepła w wymiennikach, ilość ciepła potrzebna do ogrzania ścieków surowych w WKF zmniejszy się o $60\text{--}70\%$, co wpłynie dodatnio na ogólne saldo energii.
- Całkowitą stabilność substratu w układzie dwustopniowym uzyskano w ciągu 7 d: gdyby proces stabilizacji ograniczyć tylko do fermentacji metanowej substrat stabilny uzyskuje się po 15 dobach. Oszczędność inwestycyjna jest oczywista.

Tabela 10

BILANS ENERGETYCZNY DLA DWUSTOPNIOWEJ STABILIZACJI

Przyrost ciepła +	I stopień — FERMENTACJA METANOWA			
	czas fermentacji metanowej t (doby)	5	7,5	10
1. Ciepło zawarte w gazie fermentacyjnym	$C_1 = \text{wartość opałowa gazu (KJ)}$	276.756	373.140	438.576
Straty ciepła —				
1. Ciepło konieczne do ogrzania zawartości WKF	$C'_1 = V_1 \cdot \rho_s \cdot c_s \cdot (T_1 - T_0)$ (KJ)	185.019	185.019	185.019
2. Ciepło traczone przez przenikanie	$C'_2 = k \cdot P \cdot (T_1 - T_0) / \Delta t$ (KJ)	35.270	52.904	70.539
3. Ciepło unoszone z gazem				
a) z metanem 70%	$C'_3 = V_2 \cdot \rho_2 \cdot T_1 \cdot c_2$ (KJ)	692	893	1.051
b) z CO ₂ 30%	$C'_4 = V_3 \cdot \rho_3 \cdot T_1 \cdot c_3$ (KJ)	308	398	469
straty ciepła	$C' = C'_1 + C'_2 + C'_3 + C'_4$ (KJ)	221.239	229.214	257.078
Σ strat + przyrostów	$C' + C_1$ (I stopień)	55.467+	133.926+	181.498+
Przyrost ciepła +	II stopień — STABILIZACJA TIENOWA			
	czas stabilizacji tlenowej t (doby)	2d	2d	1d
1. Ciepło powstałe z termogenezy	$\Delta \text{ ChZT w czasie t (gO}_2\text{/dm}^3)$ $C_2 = \text{ChZT} \cdot 2,5 \cdot 1000$ (KJ)	7,1	5,1	2,0
2. Ciepło doprowadzone z substratów	$C_3 = V_1 \cdot \rho_s \cdot c_s \cdot (T_1 - T_0)$ (KJ)	145.075	145.075	145.075
3. Ciepło doprowadzone z powietrzem	$C_4 = q_p \cdot (T_1 - T_0) / \Delta t$ (KJ)	$q_p = 128 \text{ m}^3/2d$ 1.608	$q_p = 92 \text{ m}^3/2d$ 1.155	$q_p = 36 \text{ m}^3/1d$ 452
Σ przyrostów ciepła	$\Sigma C = C_2 + C_3 + C_4$ (KJ)	250.725+	220.905+	174.834+
Straty ciepła —				
1. Ciepło konieczne do ogrzania zawartości reaktora				
a) ścieków	$C'_1 = V_1 \cdot \rho_s \cdot c_s \cdot (T_1 - T_0)$ (KJ)	82.983	82.983	82.983
b) powietrza	$C'_2 = q_p \cdot (T_1 - T_0) / \Delta t$ (KJ)	7.234	5.200	2.035
2. Ciepło traczone przez przenikanie	$C'_3 = k \cdot C \cdot (T_1 - T_0) / \Delta t$ (KJ)	14.188	14.108	7.854
3. Ciepło traczone przez parowanie	$C'_4 = q_w \cdot c_p$ (KJ)	34.048—	24.446—	101.646—
Σ strat ciepła	$\Sigma C' = C'_1 + C'_2 + C'_3 + C'_4$ (KJ)	130.365—	126.737—	101.646—
Σ strat + Σ przyrostów	$C + C'$ (II stopień) (KJ)	112.360+	94.168+	73.188+
Σ strat i przyrostów I stopnia	I (C + C')	167.827+	228.094+	254.686+
Σ strat i przyrostów II stopnia	II (C + C')			

Oznaczenia:

- V_1 — objętość wydzielonego CH₄ (m³)
 V_2 — objętość wydzielonego CO₂ (m³)
 ρ_1 — gęstość CH₄ (kg/m³)
 ρ_2 — gęstość CO₂ (kg/m³)
 c_3 — ciepło właściwe CH₄ (KJ/kg.deg)
 c_4 — ciepło właściwe CO₂ (KJ/kg.deg)

LITERATURA

1. R.C. LOEHR, R.W. AGNEW: Cattle Wastes — Pollution and Potential Treatment. Journal Sanit. Engin. Div Vol 93 (1967).
2. K. IMHOFF: Kanalizacja miast i oczyszczanie ścieków, W-wa Arkady 1970.
3. S.A. HART, M.E. TURNER: Lagoons for Livestock Manure Journal WPCF Vol 37 (1965).
4. G. SCHMIDT, H. WEIGELT: Wasser und Boden 5/1972.
5. J. KUTERA: Eliminacja związków biogenych ze ścieków przez ich rolnicze wykorzystanie — Materiały z konferencji na temat „Nawożenie a eutrofizacja wód” — Zielona Góra 1976.
6. G. SPECHT, F. ASMUS, H. LANGE: Empfehlungen für den Einsatz der Gülle in der Pflanzenproduktion. Wissenschaftlich — technische Informationen für das Meliorationswesen Heft 13 Bad Freienwalde — November 1971.
7. P. KOWALIK, H. OBARSKA-PEMPKOWIAK: Badania modelowe nad utylizacją zanieczyszczeń ściekowych w profilu glebowym. — Materiały z seminarium naukowego nt. „Oczyszczanie i utylizacja ścieków w środowisku glebowym i wodnym jako jeden z głównych kierunków realizacji konwencji helsińskiej — Szczecin 1977.
8. A.M. BUSWELL: Anaerobic Fermentations. State Water Survey, Bulletin 32, Urbana Illinois 1939.
9. H. TEICHGRÄBER: Die anaerobe Zersetzung vom Klärschlamm Ges. Ing. 1943.
10. S. TUROWSKI: Nowe rozwiązanie wytwórni biogazu źródłem taniej energii i ulepszanego nawozu dla rolnictwa. Bibl. Postępu Rolniczego WRN w Gdańsku, Gdańsk 1966.
11. S. TUROWSKI: Możliwości wytwarzania biogazu z gnojowicy. Materiały z konferencji na temat „Mechanizacja prac związanych z usuwaniem ścieków inwentarskich z wielkotowarowych ferm hodowlanych. Gdańsk 1979.
12. H. KASZUBIAK: Wpływ nawożenia gnojowicy na drobnoustroje w glebie. Materiały z konferencji nt. „Wpływ przemysłowej hodowli zwierząt na środowisko glebowe i wodne” Zielona Góra 1978.
13. M. GRACZYK, S. KOŁACZKOWSKI: Aerobic Thermophilic Stabilization of Hog Manure. Materials z IV światowego Sympozjum — „on Livestock Wastes” Amarillo U.S.A. 1980.
14. F. PÖPEL: Grundsätzliche Betrachtung zur geordneten Ablagerung und ihre Probleme. Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft Bd. 41 München — Verlag R. Oldenbourg 1968.
15. C.L. CONNEY, D.J.C. WANG, R.J. MATELS: Measurement of heat evolution and correlation with oxygen consumption during microbiological growth. Biotechnology and Bioengineering XI 1968.
16. U. LOLL: Stabilisierung hochkonzentrierter organischer Abwässer und Abwasserschlämme durch aerob-thermophile Abbauprozesse. Dissertation Darmstadt 1974.
17. A. Paszkowski: Sposoby ograniczenia ilości ścieków z ferm przemysłowych chowu zwierząt. Materiały z II seminarium nt. „Gospodarowanie ściekami z ferm przemysłowych”. Trzebiezowice 1974.
18. M. GRACZYK, S. T. KOŁACZKOWSKI: Aerobowa, termofilowa stabilizacja wysokostężonych ścieków. Gaz, woda i technika sanitarna tom LV nr 5/1981.
19. G. A. SURUCU, E. S. K. CHIAN, R. S. ENGBRECHT: Aerobic thermophilic treatment of high strength wastewaters, Journal W.P.C.F. V. 43 Nr 4 1976 s. 669/679.
20. K. RAŻNJEWIĆ: Tablice cieplne z wykresami. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne Warszawa 1968.
21. S. T. KOŁACZKOWSKI: Dogodna metoda oznaczania BZT Gaz, woda i technika sanitarna Nr 7/8 1975.