

---

***PRACE***

**Instytutu Ceramiki  
i Materiałów Budowlanych**

---

***Scientific Works***  
of Institute of Ceramics  
and Building Materials

---

**Nr 10**

ISSN 1899-3230

**Rok V**

**Warszawa–Opole 2012**

---

*MACIEJ PACIORKOWSKI\**  
*GRZEGORZ SIEMIĄTKOWSKI\*\**  
*JOANNA POLUSZYŃSKA\*\*\**

## **Parametry AT4 i GS21 w polskich instalacjach w aspekcie wymagań dotyczących mechaniczno-biologicznego przetwarzania zmieszanych odpadów komunalnych**

**Słowa kluczowe:** mechaniczno-biologiczne przetwarzanie, AT4, GS21, odpady.

W artykule przedstawiono i krótko scharakteryzowano parametry monitoringowe wymagane dla stabilizatorów po mechaniczno-biologicznym przetwarzaniu odpadów. Omówiono metodykę przeprowadzonych badań oraz dobór instalacji reprezentujących różne technologie mechaniczno-biologicznego przetwarzania odpadów. Wytypowane instalacje, z których pobierano próby stabilizatorów, reprezentowały „wachlarz” technologii biologicznego przetwarzania – od najprostszych pryzmowych do zawansowanych technologicznie betonowych bioreaktorów. W dalszej części artykułu zaprezentowano i omówiono uzyskane wyniki oznaczeń dla pobranych prób stabilizatorów w odniesieniu do stosowanej technologii oraz wymagań prawnych stawianych stabilizatom po procesie mechaniczno-biologicznego przetwarzania odpadów. W podsumowaniu sformułowano ogólne spostrzeżenia, które pojawiły się w trakcie analizy wyników badań.

### **1. Wprowadzenie**

Data 1 stycznia 2013 r. będzie przełomowa dla polskiej gospodarki odpadami. Z tym dniem wchodzi z życie Rozporządzenie Ministra Gospodarki z 7 września

---

\* Mgr, Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych w Warszawie, Oddział Inżynierii Procesowej Materiałów Budowlanych w Opolu.

\*\* Dr, Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych w Warszawie, Oddział Inżynierii Procesowej Materiałów Budowlanych w Opolu.

\*\*\* Mgr, Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych w Warszawie, Oddział Inżynierii Procesowej Materiałów Budowlanych w Opolu.

2005 r. w sprawie kryteriów oraz procedur dopuszczania odpadów do składowania na składowisku odpadów danego typu [1], które wraz z innymi obowiązującymi dokumentami, m.in. Ustawą z 27 kwietnia 2001 r. o odpadach [2] i z Krajowym planem gospodarki odpadami 2014 [3], wprowadza konieczność redukcji ilości składowanych odpadów, tak aby do 31 grudnia 2013 r. nie było składowanych więcej niż 50%, a do 31 grudnia 2020 r. więcej niż 35% odpadów wytworzonych w 1995 r.

Jedną z metod redukcji ilości odpadów jest ich mechaniczno-biologiczne przetwarzanie. Jest to zintegrowany proces technologiczny, w skład którego wchodzi:

a) przetwarzanie mechaniczne – polegające na wydzieleniu ze zmieszanych odpadów frakcji dającej się wykorzystać materiałowo lub energetycznie oraz frakcji 0–80 mm ulegającej biodegradacji o kodzie odpadu 19 12 12, wymagającej przetwarzania biologicznego [4];

b) przetwarzanie biologiczne – kompostowanie lub fermentacja beztlenowa przy udziale mikroorganizmów, w której następują w materiale zmiany właściwości chemicznych, fizycznych i biologicznych. Kompostowanie jest wciąż dominującą formą przetwarzania biologicznego odpadów (90 kompostowni w Polsce w stosunku do 4 zakładów fermentacji [3]) i składa się z dwóch faz:

1) faza termofilowa – faza intensywnych procesów przy udziale organizmów termofilnych. W trakcie tego etapu temperatura materiału osiąga ok. 70°C, co ma kluczowe znaczenie dla higienizacji odpadów [5];

2) faza mezofilowa – dojrzewanie kompostu na pryzmie. W trakcie tego etapu zachodzą procesy mineralizacji i humifikacji materiału.

## 2. Parametr AT4

AT4 (*static respiration test*) jest to krótkotrwały test mikrobiologiczny służący do określania aktywności oddychania – emisja ditlenku węgla lub szybkość poboru tlenu, która może być oznaczana w warunkach statycznych [8]. Parametr AT4 jest jednym ze wskaźników dojrzałości materiału po mechaniczno-biologicznym przetwarzaniu. Wykorzystywany jest m.in. w Niemczech i Austrii jako obligatoryjny test dla oceny utraty zdolności do dalszego biologicznego rozkładu odpadu (tzw. stabilizatu) po mechaniczno-biologicznym przetworzeniu.

W Polsce w celu kontroli procesów biologicznego przetwarzania odpadów oraz produktów wytworzonych w wyniku tych procesów projekt rozporządzenia Ministra Środowiska w sprawie mechaniczno-biologicznego przetwarzania zmieszanych odpadów komunalnych z 7 maja 2012 r. [4] podaje trzy alternatywne sposoby kontroli, w wyniku których muszą być spełnione określone wymagania dla materiału (stabilizatu) po tych procesach:

- 1) straty prażenia stabilizatu mniejsze niż 35% s.m., a zawartość węgla organicznego mniejsza niż 20% s.m. lub
- 2) ubytek masy organicznej w stabilizacie w stosunku do masy organicznej w odpadach, mierzony stratą prażenia lub zawartością węgla organicznego, powyżej 40%, lub
- 3) wartość AT4 poniżej 10 mg O<sub>2</sub>/g s.m.<sup>1</sup>.

Spełnienie powyższych wymagań dopuszcza do deponowania na składowiskach odpadów innych niż niebezpieczne i obojętne.

Dodatkowo parametr AT4 został zaproponowany w wymienionym projekcie rozporządzenia jako jedyny parametr kontrolny materiału bezpośrednio po pierwszym etapie biologicznego przetwarzania, tj. bezpośrednio po procesie prowadzonym w zamkniętym reaktorze lub hali. Wartość AT4 stabilizatu bezpośrednio po pierwszym etapie biologicznego przetwarzania nie może przekraczać 20 mg O<sub>2</sub>/g s.m.

Łącznie czas prowadzenia procesu biologicznego przetwarzania z przerzucaniem odpadów wyznaczony został na 8–12 tygodni. W tym okresie minimum przez 2 pierwsze tygodnie należy go prowadzić w zamkniętym reaktorze lub w hali z aktywnym napowietrzaniem oraz zabezpieczeniem przed wydostawaniem się nieoczyszczonego powietrza do atmosfery.

### 3. Parametr GS21

GS21 jest to test służący do określania potencjału tworzenia się biogazu w procesie inkubacji. Polega on na wyznaczeniu objętości suchego biogazu lub korzystniej metanu (w normalnych warunkach ciśnienia i temperatury) wytwarzanego przez jednostkę masy wprowadzonego substratu (kg s.m.) w określonym czasie 21 dni. Parametr GS21 jest kolejnym wskaźnikiem dojrzałości materiału po mechaniczno-biologicznym przetwarzaniu. Poza badaniem AT4 test GS21 jest powszechnie uznany za najbardziej odpowiedni do oceny utraty zdolności do dalszego biologicznego rozkładu stabilizatu. Równoważnym do GS21 testem jest badanie parametru GB21. Jedno i drugie badanie wykonuje się w warunkach beztlenowych, z tym że w badaniu GS21 wykorzystuje się proces inkubacji, natomiast w GB21 proces fermentacji. Parametry GS21 i GB21 obok parametru AT4 są powszechnie wykorzystywane w badaniu stabilizatów otrzymanych po procesie biologicznego przetworzenia w Austrii i Niemczech.

---

<sup>1</sup> Ze względu na wielokrotne powoływanie się w artykule na zapisy projektu rozporządzenia Ministra Środowiska w sprawie mechaniczno-biologicznego przetwarzania zmieszanych odpadów komunalnych z 7 maja 2012 r. oraz normatywy austriackie, w niniejszym artykule nie stosuje się jednostek miar układu SI, ale jednostki zgodne z zapisanymi w wyżej wymienionych dokumentach.

W Austrii ocena utraty zdolności do dalszego biologicznego rozkładu stabilizatu jest wykonywana łącznie, zarówno w warunkach tlenowych – oznaczenie AT4, jak i w warunkach beztlenowych – oznaczenie GS21 lub GB21. W Niemczech dozwolone jest wykonanie alternatywnie tylko jednego z badań – oznaczenie AT4 lub GB21. W obu tych krajach przyjęto jednakową – wynoszącą  $20 \text{ l}_n/\text{kg s.m.}$  – wielkość graniczną dla parametrów GS21 i GB21, jaką musi spełnić stabilizat, aby mógł być deponowany na składowisku odpadów.

W Polsce, w obecnie proponowanym projekcie rozporządzenia Ministra Środowiska z 7 maja 2012 r. w sprawie mechaniczno-biologicznego przetwarzania zmieszanych odpadów komunalnych, całkowicie pominięto zagadnienie określania potencjału tworzenia się biogazu. Tym samym nie przewiduje się oznaczania parametrów GS21 i GB21.

#### 4. Obiekty badań

W 2011 i 2012 r. w ramach partnerskiego ponadnarodowego projektu pn. „Adaptacja rozwiązań kompostowania i mechaniczno-biologicznego przetwarzania odpadów oraz badań i oceny 4-dniowego zapotrzebowania na tlen (AT4)”<sup>2</sup> Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych, Oddział Inżynierii Procesowej Materiałów Budowlanych w Opolu przeprowadził badania odpadów po procesie biologicznego przetwarzania. Do badań wybrane zostały instalacje reprezentujące różne technologie mechaniczno-biologicznego przetwarzania odpadów. Ze względów praktycznych i ekonomicznych wzięto pod uwagę zakłady położone na terenie województw: dolnośląskiego, opolskiego i śląskiego.

W sumie do badań wybrano 7 instalacji biologicznie przetwarzających odpady. Kryterium wyboru stanowiła zarówno technologia biologicznego przetwarzania, jak i rodzaj materiału podlegającego stabilizacji przy jej użyciu. Wzięto pod uwagę 6 technologii:

- pryzmowa otwarta,
- komorowa otwarta z napowietrzaniem,
- Kneer-Horstman,
- MUT-Dano,
- MUT-Herhof,
- MUT-Kyberferm.

<sup>2</sup> Projekt jest współfinansowany przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego.

Po uzyskaniu od prowadzących instalacje zgody na pobór prób do badań ustalono ich liczbę – przyjmując jako kryterium wyboru głównie wiek danego materiału.

## 5. Metodyka

Próbki pobrane zostały zgodnie z normami: polską (PN-Z-15011-1:1998 – Kompost z odpadów komunalnych. Pobieranie próbek) [6] oraz austriackimi (Önorm-Serie S 2027 – Beurteilung von Abfällen aus der mechanisch-biologischen Behandlung 2004-03 i Önorm-Serie 2123 – Probenahmepläne für Abfälle 2003-11) [7, 9], uwzględniając przede wszystkim ilość materiału na przymie oraz takie czynniki, jak: gęstość materiału, średnica ziarna czy zdolności przerobowe zakładu.

Uwzględniając wielkość przymy, dokonano minimum 3 wykopów przy użyciu ładowarki kołowej, odsłaniając wnętrze przymy. Z każdego wykopu pobrano ok. 10 próbek pierwotnych, tworząc kwalifikowaną próbkę pierwotną. Przykład odsłoniętego wnętrza przymy z zaznaczeniem miejsc poboru prób przedstawia rycina 1.



Źródło: Opracowanie własne M. Paciorkowski.

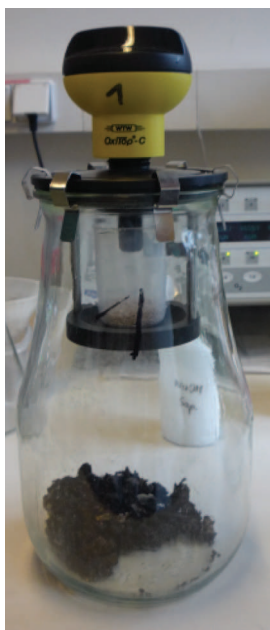
Ryc. 1. Przykład odsłoniętego wnętrza przymy z zaznaczeniem miejsc poboru prób

Kwalifikowane próbki pierwotne zmieszano i metodą kwartowania zmniejszono do objętości ok. 15 l. Otrzymane próbki polowe przetransportowano do laboratorium, gdzie zostały zmielone na frakcje poniżej 20 mm, po czym je zamrożono aż do czasu pomiaru parametrów AT4 i GS21.

Badania parametru AT4 wykonywane były w laboratorium Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych, Oddział Inżynierii Procesowej Materiałów Budow-



lanych w Opolu. Realizacja badań przeprowadzona została zgodnie z normatywami austriackimi Önorm-Serie S 2027 – Beurteilung von Abfällen aus der mechanisch-biologischen Behandlung 2004-03 [7], przy użyciu aparatów OxiTop (ryc. 2). Próbki po rozmrożeniu nawilżono do odpowiedniego poziomu, a następnie minimum 30 g zostało umieszczonych



Fot. G. Siemiątkowski.

Ryc. 2. Urządzenia OxiTop: naczynie reakcyjne, adapter i główka pomiarowa

w naczyniach reakcyjnych, które zamknięto adapterami oraz uszczelniono, po czym do adapterów przyłączone zostały główki pomiarowe. Każdą próbkę oznaczono minimum w dwóch powtórzeniach.

Badania parametru GS21 wykonane były w laboratorium austriackim. Realizacja badań przeprowadzona została zgodnie z normatywami austriackimi Önorm-Serie S 2027 – Beurteilung von Abfällen aus der mechanisch-biologischen Behandlung 2004-03 [7], przy użyciu stanowiska pomiarowego złożonego m.in. z zestawu indywidualnie wykonanych naczyń, zaprojektowanych specjalnie do realizacji testu inkubacyjnego. Na rycinie 3 przedstawiono stanowisko laboratoryjne do wykonywania testu oznaczania potencjału biogazu w procesie inkubacji (GS21). Podobnie jak w przypadku oznaczania parametru AT4, każdą

próbkę w teście GS21 zasadniczo oznacza się w dwóch powtórzeniach. Jednak normatywy austriackie dopuszczają wcześniejsze zakończenie i niebranie pod uwagę wyników jednej z prób, jeśli uzyskiwane wyniki badań obu próbach są do siebie bardzo zbliżone.

Oznaczenia strat prażenia oraz zawartość węgla organicznego (TOC) wykonywane były wg norm, odpowiednio: PN-EN 12879:2004 i PN-ISO 10694:2004; PB/I/30/A:01.04.2011 przez akredytowane laboratorium badawcze.



Fot. G. Siemiątkowski.

Ryc. 3. Stanowisko laboratoryjne do wykonywania testu oznaczania potencjału biogazu w procesie inkubacji (GS21)

## 6. Opis próbek

Analizie poddano następujące próbki:

- 1 – próbka materiału 6 tygodni na przyzmie, odpady „zielone”, technologia: Kneer-Horstman,
- 2.1 – próbka materiału 8 miesięcy na przyzmie, odpady zmieszane, technologia: MUT-Dano,
- 2.2 – próbka materiału 24 godziny na przyzmie, odpady zmieszane, technologia: MUT-Dano,
- 3.1 – próbka materiału świeżo po wyjęciu z komory, odpad zmieszany, technologia: MUT-Herhof,
- 3.2 – próbka materiału 3 miesiące na przyzmie, odpad zmieszany, technologia: MUT-Herhof,
- 3.3 – próbka materiału 6 tygodni na przyzmie, odpad zmieszany z osadem ściekowym (w stosunku masowym 14:1), technologia: MUT-Herhof,
- 4.1 – próbka materiału świeżo po wyjęciu z komory, odpad zmieszany, technologia: kompostownia komorowa otwarta z napowietrzaniem,
- 4.2 – próbka materiału 3 tygodnie na przyzmie, frakcja 0–15 mm, odpad zmieszany, technologia: kompostownia komorowa otwarta z napowietrzaniem,
- 4.3 – próbka materiału 3 tygodnie na przyzmie, frakcja 15–35 mm, odpad zmieszany, technologia: kompostownia komorowa otwarta z napowietrzaniem,
- 5.1 – próbka materiału 25 dni na przyzmie, odpad zmieszany, technologia: Kneer-Horstman,
- 5.2 – próbka materiału 5 dni na przyzmie, odpad zmieszany, technologia: Kneer-Horstman,
- 5.3 – próbka materiału 15 dni na przyzmie, odpad zmieszany, technologia: Kneer-Horstman,
- 6.1 – próbka materiału, przyzma roczna, odpady „zielone”, technologia: przyzma,
- 6.2 – próbka materiału, przyzma 2-letnia, odpady „zielone”, technologia: przyzma,
- 7.1 – próbka materiału świeżo po wyjęciu z komory, odpady zmieszane, technologia: MUT-Kyberferm,
- 7.2 – próbka materiału 7 tygodni na przyzmie, odpady zmieszane, technologia: MUT-Kyberferm.

Dane dotyczące technologii, rodzaju przetwarzanych materiałów i „wieku” materiału uzyskano od pracowników danej instalacji biologicznego przetwarzania odpadów.



## 7. Omówienie wyników badań

Celem badań było uzyskanie odpowiedzi na pytanie, czy obecnie funkcjonujące w Polsce instalacje mechaniczno-biologicznego przetwarzania odpadów spełniają wymagania dla uzyskanych stabilizatów, zgodnie z projektem rozporządzenia Ministra Środowiska w sprawie mechaniczno-biologicznego przetwarzania zmieszanych odpadów komunalnych z 7 maja 2012 r. Badaniom podlegały parametry AT4, strata prażenia, zawartość węgla organicznego oraz dodatkowo parametr GS21, który weryfikowany był z wartościami granicznymi dla potencjału gazu składowiskowego wymienionymi w prawodawstwie Niemiec i Austrii.

Próbka nr 1 pochodziła z kompostowni kontenerowej Kneer-Horstman przetwarzającej odpady zielone. Materiał po komorze umieszczony został na przymie do dojrzewania. Na rycinie 4 przedstawiono kontener przeznaczony do procesu stabilizacji biologicznej oraz przymę, z której pobrano próbki.

a)



b)



Fot. G. Siemiątkowski.

Ryc. 4. Kontener przeznaczony do procesu stabilizacji biologicznej (a) oraz przyma, z której pobrano próbki (b)

W chwili pobierania materiał miał 6 tygodni od momentu wyjęcia z komory. W tabeli 1 przedstawiono wyniki uzyskanych analiz.

T a b e l a 1

Wyniki analiz stabilizatu dla kompostowni kontenerowej Kneer-Horstman przetwarzającej odpady zielone

Numer próbki	Wyniki AT4			Wyniki GS21				LOI	TOC
	I powt.	II powt.	średnia	I powt.	II powt.	średnia	odchylenie pomiędzy pomiarami jednostkowymi		
	mg O <sub>2</sub> /g s.m.			l <sub>n</sub> /kg s.m.			%	[% s.m.]	[% s.m.]
1	1,36	1,51	<b>1,43</b>	1,62	1,75	<b>1,69</b>	3,80	26,30	11,00

Ź r ó d ł o: Opracowanie własne.

Analizując uzyskane wyniki można zauważyć, że zarówno wyniki AT4, GS21, jak i strat prażenia oraz zawartości węgla organicznego pozwalają na zakończenie procesu mechaniczno-biologicznego przetwarzania dla tego materiału. Należy podkreślić, że procesowi biologicznego przetwarzania poddane były odpady zielone, natomiast wartości graniczne przepisów polskich, austriackich i niemieckich dotyczą zmieszanych odpadów komunalnych.

Próbki 2.1 oraz 2.2 pochodziły z instalacji mechaniczno-biologicznego przetwarzania pracującej w systemowej MUT-Dano. Obie próbki stanowiły stabilizat ze zmieszanych odpadów komunalnych, przy czym próbka 2.1 pobrana została z pryzmy ok. 8-miesięcznej (32 tygodnie), natomiast próbka 2.2 z pryzmy, na której stabilizat znajdował się 24 godziny po wyciągnięciu z biostabilizatora. Na rycinie 5 przedstawiono pryzmy stabilizatu na placu dojrzewania po obróbce w biostabilizatorze MUT-Dano, a w tabeli 2 – wyniki uzyskanych analiz.



Fot. G. Siemiątkowski.

Ryc. 5. Pryzmy stabilizatu na placu dojrzewania po obróbce w biostabilizatorze MUT-Dano

Tabela 2

Wyniki analiz stabilizatu dla instalacji mechaniczno-biologicznego przetwarzania pracującej w systemie MUT-Dano

Numer próbki	Wyniki AT4			Wyniki GS21				LOI	TOC
	I powt.	II powt.	średnia	I powt.	II powt.	średnia	odchylenie pomiędzy pomiarami jednostkowymi		
	mg O <sub>2</sub> /g s.m.			l <sub>n</sub> /kg s.m.			%	[% s.m.]	[% s.m.]
2.1	1,54	1,52	<b>1,53</b>	0,57	0,55	<b>0,56</b>	1,50	20,00	7,40
2.2	48,33	49,08	<b>48,70</b>	48,10	–	<b>48,10</b>	0,80	53,00	17,00

Źródło: Jak w tab. 1.

Materiał reprezentowany przez próbkę 2.1 spełnia wszystkie wymagania dotyczące stabilizatu po mechaniczno-biologicznym przetwarzaniu. Zarówno wyniki AT4, GS21, jak i strat prażenia oraz zawartości węgla organicznego pozwalają na zakończenie procesu mechaniczno-biologicznego przetwarzania.

Materiał reprezentowany przez próbkę 2.2 przeznaczony jest do dojrzewania na przymie. Jednakże wysoka wartość AT4 (48,7 mgO<sub>2</sub>/g s.m.) nie spełnia wymagań dla stabilizatów po pierwszej fazie biostabilizacji – procesie prowadzonym w zamkniętym reaktorze, co sugeruje zintensyfikowanie procesu i/lub przedłużenie czasu przebywania materiału w biostabilizatorze do momentu osiągnięcia sugerowanej w projekcie rozporządzenia [4] wartości 20 mg O<sub>2</sub>/g s.m.. Również wysoka wartość strat prażenia (53% s.m. przy wymaganym poziomie poniżej 35% s.m.) wprowadza konieczność dalszej obróbki tego materiału. Zawartość węgla organicznego mieści się w sugerowanych wartościach (17% s.m. przy sugerowanym poziomie poniżej 20% s.m.). W przypadku weryfikacji uzyskanej wartości parametru GS21 (48,1 l<sub>n</sub>/kg s.m.) z granicznymi wartościami wymienionymi w prawodawstwie Niemiec i Austrii, należy również stwierdzić znaczne przekroczenie.

Próbki 3.1, 3.2 oraz 3.3 pobrane zostały z instalacji mechaniczno-biologicznego przetwarzania wykorzystującej technologię MUT-Herhof, przetwarzającej odpady komunalne zmieszane. Próbka 3.1 pobrana została z materiału świeżo po opuszczeniu komory, natomiast próbka 3.2 pochodziła z 3-miesięcznej (12 tygodni) przymy. Próbka 3.3 pobrana została z 6-tygodniowej przymy, w której zmieszano odpad komunalny po pierwszym etapie kompostowania z osadem ściekowym w stosunku masowym 14:1. Na rycinie 6 widnieje bioreaktor MUT-Herhof (a) oraz miejsca poboru prób stabilizatów (b), natomiast w tabeli 3 przedstawiono wyniki oznaczeń dla poszczególnych prób stabilizatów.

a)



b)



Fot. G. Siemiątkowski.

Ryc. 6. Bioreaktor MUT-Herhof (a) oraz miejsca poboru prób stabilizatów (b)

T a b e l a 3

Wyniki oznaczeń dla poszczególnych prób stabilizatorów z instalacji wykorzystującej technologię MUT-Herhof

Numer próbki	Wyniki AT4			Wyniki GS21				LOI	TOC
	I powt.	II powt.	średnia	I powt.	II powt.	średnia	odchylenie pomiędzy pomiarami jednostkowymi		
	mg O <sub>2</sub> /g s.m.			l <sub>n</sub> /kg s.m.			%	[% s.m.]	[% s.m.]
3.1	28,15	25,78	<b>26,97</b>	49,00	47,50	<b>48,30</b>	1,60	39,00	18,00
3.2	8,11	6,98	<b>7,54</b>	11,00	–	<b>11,00</b>	4,60	33,00	11,00
3.3	20,14	21,27	<b>20,70</b>	35,00	37,80	<b>36,40</b>	3,40	40,50	17,00

Ź r ó d ł o: Jak w tab. 1.

Dla próbki 3.1 spełnione są wymagania dotyczące strat prażenia (39% s.m.) oraz zawartości węgla organicznego (18% s.m.). Jednakże wysoka wartość AT4 zaraz po wyciągnięciu stabilizatu z bioreaktora (26,91 mg O<sub>2</sub>/g s.m.) nie spełnia wymagań granicznych zapisanych w projekcie rozporządzenia [4]. Należy wszakże zwrócić uwagę, że w omawianej instalacji łączny czas przebywania odpadów w bioreaktorze wynosił 47 godzin, podczas gdy projekt rozporządzenia [4] wymaga, aby odpady w zamkniętym reaktorze przebywały co najmniej 2 tygodnie. Otrzymane wyniki sugerują zatem, iż przedłużenie czasu pobytu materiału w komorze pozwoli uzyskać wartości AT4 zgodne z wymaganiami projektu rozporządzenia [4]. Jeśli chodzi o parametr GS21, to w tej fazie obróbki biologicznej nie spełnia on wymagań stosowanych w Austrii i Niemczech.

Materiał reprezentowany przez próbkę 3.2 charakteryzuje się znacznym stopniem przetworzenia. W tym przypadku zarówno wyniki AT4 (7,54 mg O<sub>2</sub>/g s.m.), GS21 (11,0 l<sub>n</sub>/kg s.m.), jak i strat prażenia (33% s.m.) oraz zawartość węgla organicznego (11% s.m.) pozwalają uznać ten materiał za przetworzony i dopuszczony do składowania.

Próbka 3.3 miała charakter eksperymentalny. Materiał powstały ze zmieszania odpadów komunalnych z osadami ściekowymi nie jest uwzględniony w projekcie rozporządzenia [4]. Uzyskana wartość AT4 wynosząca 20,7 mg O<sub>2</sub>/g s.m. niewiele przekracza poziom zadowalający (poniżej 20 mg O<sub>2</sub>/g s.m.) dla materiału bezpośrednio po komorze kompostowania. Jednakże w tym przypadku mamy do czynienia z materiałem dojrzewającym przez 6 tygodni na pryzmie. Również wyniki strat prażenia (40,5% s.m.) przekraczają dopuszczalną normę. Jedyne zawartość węgla organicznego (17% s.m.) mieści się w normie. W przypadku wyników parametru GS21 (36,4 l<sub>n</sub>/kg s.m.) stabilizat ten, zarówno według prawodawstwa austriackiego, jak i niemieckiego, ze względu na przekroczenie wartości dopuszczalnej dla potencjału gazu składowiskowego, nie byłby dopuszczony do składowania.

Próbki 4.1, 4.2 oraz 4.3 pobrane zostały z kompostowni wykorzystującej komory otwarte z napowietrzaniem. Na rycinie 7 przedstawiono zdjęcia komór kompostowych w trakcie procesu kompostowania odpadów.



Fot. G. Siemiątkowski.

Ryc. 7. Komory kompostowe w trakcie procesu przetwarzania odpadów

Materiał przetwarzany stanowiły odpady komunalne zmieszane. Próbka 4.1 pobrana została z materiału świeżo po opuszczeniu komory kompostującej, a próbki 4.2 i 4.3 pobrane zostały z 3-tygodniowych pryzm, przy czym próbka 4.2 stanowiła frakcję 0–15 mm, zaś próbka 4.3 frakcję 15–35 mm. Uzyskane wyniki analiz dla poszczególnych prób stabilizatorów prezentowane są w tabeli 4.

Tabela 4

Uzyskane wyniki analiz dla poszczególnych prób stabilizatorów po procesie kompostowania w komorach otwartych z napowietrzaniem

Numer próbki	Wyniki AT4			Wyniki GS21				LOI	TOC
	I powt.	II powt.	średnia	I powt.	II powt.	średnia	odchylenie pomiędzy pomiarami jednostkowymi		
	mg O <sub>2</sub> /g s.m.			l <sub>n</sub> /kg s.m.			%	[% s.m.]	[% s.m.]
4.1	19,75	19,51	<b>19,63</b>	21,70	–	21,70	2,20	22,50	10,00
4.2	3,05	3,17	<b>3,11</b>	1,49	–	1,49	2,70	17,60	7,70
4.3	3,16	3,23	<b>3,20</b>	2,10	–	2,10	0,90	12,90	6,60

Źródło: Jak w tab. 1.

Proces kompostowania prowadzony jest w 15 komorach i trwa ok. 15 tygodni. Odpady są napowietrzane poprzez przerzucanie ich co kilka dni pomiędzy komorami. Wprawdzie instalacja kompostowania w otwartych komorach nie speł-



nia wymagań projektu rozporządzenia [4], jednak wyniki badań uzyskane dla stabilizatorów po tym procesie jak najbardziej mieszczą się w wymaganych granicach. Dla próbki 4.1 zaraz po zakończeniu procesu kompostowania w komorach obserwuje się wysoką wartość AT4 (19,63 mg O<sub>2</sub>/g s.m.), jednakże mieszcząca się w granicy proponowanej w rozporządzeniu [4] (poniżej 20 mg O<sub>2</sub>/g s.m.) dla materiału bezpośrednio po opuszczeniu reaktora) [4]. Wyniki strat prażenia (22,5% s.m.) i zawartości węgla organicznego (10% s.m.) są na tyle niskie, że można uznać materiał za przetworzony i nadający się do dalszej obróbki (unieszkodliwiania lub zagospodarowania). Wyniki dla próbek 4.2 oraz 4.3, zgodnie z oczekiwaniami, są zbliżone i wykazują, że materiał jest wystarczająco ustabilizowany i nadaje się do deponowania na składowisku. W przypadku próbek 4.2 i 4.3 spełnione są również wymagania dotyczące granicznej wartości dla parametru GS21 według prawodawstwa austriackiego i niemieckiego.

Próbki 5.1, 5.2 oraz 5.3 pobrane zostały z instalacji mechaniczno-biologicznego przetwarzania, wykorzystującej system stabilizacji biologicznej Kneer-Horstman, przetwarzającej odpady komunalne zmieszane. Badany materiał usypyany był na przyzmach, na których dojrzał odpowiednio 5 dni (próbka 5.2), 15 dni (próbka 5.3) oraz 25 dni (próbka 5.1). Na rycinie 8 przedstawiono zestaw bioreaktorów Kneer-Horstman, w których prowadzony jest proces biologicznego przetwarzania odpadów oraz przyzmy stabilizatorów, z których pobrano próby do badań. Z kolei w tabeli 5 zamieszczono wyniki pomiarów parametrów dla poszczególnych prób stabilizatorów.

a)



b)



Fot. G. Siemiątkowski.

Ryc. 8. Zespół bioreaktorów Kneer-Horstman (a) oraz przyzmy stabilizatorów, z których pobrano próby do badań (b)



T a b e l a 5

Wyniki pomiarów parametrów dla poszczególnych prób stabilizatów z instalacji mechaniczno-biologicznego przetwarzania wykorzystującej technologię Kneer-Horstman

Numer próbki	Wyniki AT4			Wyniki GS21				LOI	TOC
	I powt.	II powt.	średnia	I powt.	II powt.	średnia	odchylenie pomiędzy pomiarami jednostkowymi		
	mg O <sub>2</sub> /g s.m.			l <sub>n</sub> /kg s.m.			%	[% s.m.]	[% s.m.]
5.1	13,49	13,23	<b>13,36</b>	28,00	–	<b>28,00</b>	0,60	14,90	8,60
5.2	24,11	22,57	<b>23,34</b>	28,90	–	<b>28,90</b>	3,30	25,10	11,00
5.3	16,50	17,62	<b>17,06</b>	19,00	–	<b>19,00</b>	3,50	20,30	6,40

Ź r ó d ł o: Jak w tab. 1.

W przypadku wszystkich prób zarówno wyniki strat prażenia, jak i zawartości węgla organicznego są wyraźnie poniżej wartości granicznych wymaganych w projekcie rozporządzenia [4] i pozwalają uznać stabilizat jako materiał właściwie ustabilizowany. Inne wnioski można wyciągnąć analizując wyniki oznaczeń parametru AT4. Żadna z badanych prób nie spełnia wymagań zapisanych w projekcie rozporządzenia.

Uzyskane wyniki oznaczeń dla stabilizatów z omawianej instalacji są idealnym przykładem wskazującym niewłaściwe podejście prawodawcy polskiego, który uznaje, że spełnienie tylko jednego z warunków:

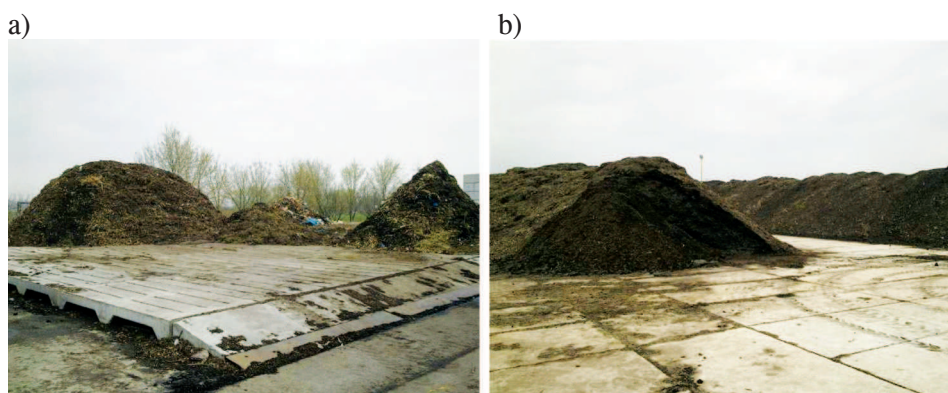
- 1) straty prażenia stabilizatu mniejsze niż 35% s.m., a zawartość węgla organicznego mniejsza niż 20% s.m. lub
- 2) ubytek masy organicznej w stabilizacie w stosunku do masy organicznej w odpadach, mierzony stratą prażenia lub zawartością węgla organicznego, powyżej 40%, lub
- 3) wartość AT4 poniżej 10 mg O<sub>2</sub>/g s.m.

jest wystarczające, aby jednoznacznie uznać, że odpady podlegające biologicznemu przetwarzaniu są właściwie ustabilizowane.

Można się zgodzić, że uzyskanie wartości oznaczeń strat prażenia i zawartości węgla organicznego poniżej wymagań granicznych może być miarodajne do wyznaczenia całkowitego ubytku substancji organicznej w wyniku mineralizacji. Jednak jak pokazują omawiane wyniki badań, nawet uzyskanie niskich wartości strat prażenia i zawartości węgla organicznego nie odzwierciedla utraty zdolności stabilizatu do dalszego biologicznego rozkładu. Właściwym parametrem do takiej oceny jest dopiero badanie AT4 (i/lub badanie potencjału gazu składowiskowego – GS21/GB21 – jak ma to miejsce w Austrii i Niemczech). Wydaje się zatem zasadne, aby w prawodawstwie polskim, wzorem innych państw, oznaczenie parametru AT4 nie było alternatywne, ale zawsze obligatoryjne.

To, że akurat takie wyniki badań uzyskano dla stabilizatorów z instalacji mechaniczno-biologicznego przetwarzania wykorzystującej technologię Kneer-Horstman wcale nie oznacza, iż technologia ta nie pozwala na otrzymanie stabilizatorów spełniających wymagania projektu rozporządzenia [4]. Należy zaznaczyć, że zgodnie z tym projektem proces biologicznego przetwarzania odpadów w pierwszej fazie musi być prowadzony w zamkniętym reaktorze lub w hali przez okres co najmniej 2 tygodni. W omawianej instalacji proces ten przebiegał ok. 1 tygodnia, a więc o połowę krócej. Prowadzenie procesu zgodnie z wymaganiami projektu rozporządzenia [4] powinno przyczynić się do dalszej utraty zdolności stabilizatu do biologicznego rozkładu, co umożliwi dotrzymanie wymagań w zakresie wartości parametru AT4 poniżej 20 mg O<sub>2</sub>/g s.m. dla stabilizatu po zakończeniu procesu w bioreaktorze. Mając na uwadze uzyskane wartości parametru AT4 dla próbek stabilizatorów leżakujących na pryzmach 5 dni, 15 dni i 25 dni, godnym rozważenia byłoby również zintensyfikowanie procesu napowietrzania poprzez odpowiednie przerzucanie stabilizatorów na pryzmach.

Próbki 6.1 oraz 6.2 pochodziły z kompostowni pryzmowej przetwarzającej głównie odpady zielone. W pierwszym etapie proces przebiega na płycie kompostowej, a w drugim na placu dojrzewania. Na rycinie 9 przedstawiono zdjęcia płyty kompostowej oraz pryzm na placu dojrzewania, z których pobrano próbki odpadów do badań.



Fot. G. Siemiątkowski.

Ryc. 9. Kompostownia pryzmowa: a) płyta kompostowa, b) pryzmy na placu dojrzewania

Pryzmy odpadów na placu dojrzewania miały odpowiednio 1 rok (próbka 6.1) i 2 lata (próbka 6.2). W tabeli 6 zamieszczono uzyskane wyniki analiz dla poszczególnych prób odpadów po kompostowaniu.

T a b e l a 6

Uzyskane wyniki analiz dla poszczególnych prób odpadów po kompostowaniu na pryzmach otwartych

Numer próbki	Wyniki AT4			Wyniki GS21				LOI	TOC
	I powt.	II powt.	średnia	I powt.	II powt.	średnia	odchylenie pomiędzy pomiarami jednostkowymi		
	mg O <sub>2</sub> /g s.m.			l <sub>n</sub> /kg s.m.			%	[% s.m.]	[% s.m.]
6.1	8,17	8,27	<b>8,21</b>	16,30	–	<b>16,30</b>	0,20	38,00	17,00
6.2	2,10	2,09	<b>2,10</b>	2,89	–	<b>2,89</b>	2,60	35,70	15,00

Ź r ó d ł o: Jak w tab. 1.

Dla próbki 6.1, biorąc pod uwagę czas przebywania na pryzmie, uzyskano stosunkowo wysoką wartość parametru AT4 (8,21 mg O<sub>2</sub>/g s.m.), jak również strat prażenia (38% s.m.) oraz zawartości węgla organicznego (17% s.m.). W odniesieniu do wymagań, jakie stawia stabilizatom projekt rozporządzenia [4], wartość parametru AT4 pozwala zakończyć przetwarzanie tego materiału, natomiast biorąc pod uwagę kryterium dotyczące strat prażenia oraz zawartości węgla organicznego badany odpad nie spełnia wymagań projektu rozporządzenia [4]. Próbka 6.2, która reprezentowała materiał z pryzmy 2-letniej, charakteryzuje się podobnym układem wyników jak próbka poprzednia. Parametr AT4 jest dużo niższy niż w przypadku próbki 6.1 i również dla tego materiału kwalifikuje się do zakończenia przetwarzania. Jednak wyniki strat prażenia i zawartości węgla organicznego tylko nieznacznie się obniżyły, a wynik strat prażenia nadal przekracza dopuszczalne wartości określone w projekcie rozporządzenia dla stabilizatu. Wyniki badań GS21 zarówno dla próbki 6.1, jak i 6.2, zgodnie z prawodawstwem austriackim i niemieckim, również dopuściłyby stwierdzenie, że materiał ten utracił zdolności do dalszego biologicznego rozkładu.

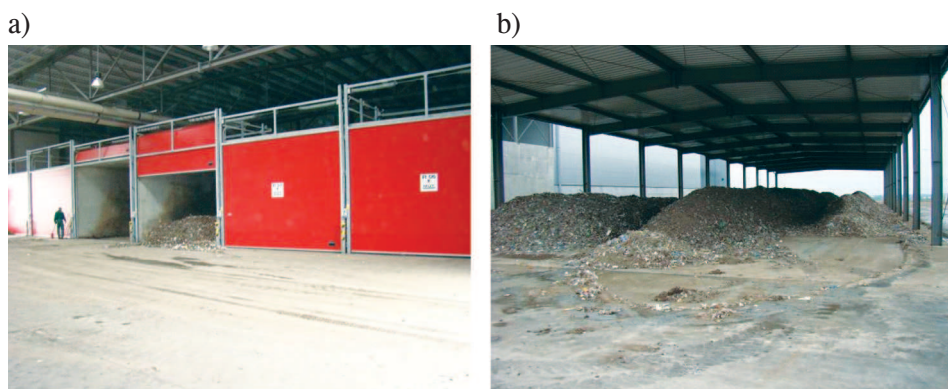
W tym przypadku mamy podobną sytuację jak w poprzednio omawianej technologii, ale odwrotną. Odpady po kompostowaniu spełniają wymagania dla stabilizatów pod kątem wartości, parametru AT4, ale nie spełniają ze względu na łącznie oceniane straty prażenia i zawartość węgla organicznego. Jest to zatem kolejny przykład, że możliwe jest, aby odpady po biologicznym przetwarzaniu uzyskały zadowalające wartości parametrów w jednej kategorii oceny – określającej zdolność do dalszego biologicznego rozkładu (parametr AT4 i/lub GS21), a przekraczające w innej kategorii oceny – określającej poziom ubytku substancji organicznej w przetwarzanych odpadach mierzony wartością strat prażenia i zawartością węgla organicznego. Sytuacja ta potwierdza po raz kolejny zasadność łącznego określania parametrów odpowiadających za:

– określenie zdolności stabilizatu do dalszego biologicznego rozkładu (parametr AT4),

- określenie poziomu ubytku substancji organicznej w przetwarzanych odpadach poprzez spełnienie poniższych wymagań:
- straty prażenia stabilizatu mniejsze niż 35% s.m., a zawartość węgla organicznego mniejsza niż 20% s.m. lub
- ubytek masy organicznej w stabilizacie w stosunku do masy organicznej w odpadach, mierzony stratą prażenia lub zawartością węgla organicznego, powyżej 40%.

Warto w tym miejscu zwrócić jeszcze uwagę na wyniki badań odpadów z omawianej kompostowni pryzmowej (próbki 6.1 i 6.2) oraz wyniki badań odpadów po procesie kompostowania z wykorzystaniem kompostowni kontenerowej Kneer-Horstman (próba 1). W obu przypadkach biologicznemu przetwarzaniu podlegały odpady zielone, różnił się jednak ich sposób przetwarzania. Pomimo że próbki 6.1 i 6.2 podlegały procesowi kompostowania przez okres odpowiednio 1 roku i 2 lat, to wartości wszystkich ocenianych parametrów są niższe dla próbki 1, mimo iż czas jej przetwarzania wynosił ok. 6 tygodni (plus czas pobytu w komorze kompostującej). Obrazuje to przewagę kontenerowych kompostowni nad pryzmowymi.

Próbki 7.1 i 7.2 reprezentowały materiał z instalacji mechaniczno-biologicznego przetwarzania opartej o system betonowych bioreaktorów technologii MUT-Kyberferm przetwarzającej odpady komunalne zmieszane. Próbka 7.1 pochodziła z materiału świeżo po wyjęciu z komory kompostującej, zaś 7.2 pobrana została z pryzmy dojrzewającej ok. 7 tygodni po opuszczeniu komory. Na rycinie 10 przedstawiono system bioreaktorów MUT-Kyberferm, w których prowadzony jest proces biologicznego przetwarzania odpadów oraz pryzmy stabilizatów, z których pobrano próby do badań. W tabeli 7 zamieszczono wyniki pomiarów parametrów dla poszczególnych prób stabilizatów.



Fot. G. Siemiątkowski.

Ryc. 10. System bioreaktorów MUT-Kyberferm (a) oraz pryzmy stabilizatów, z których pobrano próbki do badań (b)

T a b e l a 7

Wyniki pomiarów parametrów dla poszczególnych próbek stabilizatorów z instalacji mechaniczno-biologicznego przetwarzania wykorzystującej technologię MUT-Kyberferm

Numer próbki	Wyniki AT4			Wyniki GS21				LOI	TOC
	I powt.	II powt.	średnia	I powt.	II powt.	średnia	odchylenie pomiędzy pomiarami jednostkowymi		
	mg O <sub>2</sub> /g s.m.			l <sub>n</sub> /kg s.m.			%	[% s.m.]	[% s.m.]
7.1	11,98	11,00	<b>11,49</b>	20,60	–	<b>20,60</b>	6,80	19,00	8,30
7.2	1,44	1,57	<b>1,51</b>	1,60	–	<b>1,60</b>	2,60	13,50	7,70

Ź r ó d ł o: Jak w tab. 1.

W odniesieniu do próbki odpadów pobranej bezpośrednio po wyjęciu z bioreaktora, otrzymane wyniki analiz z dużym zapasem spełniają wymagania w zakresie wartości parametru AT4 stawiane stabilizatom na tym etapie przetwarzania. Już w tym momencie procesu uzyskano wyniki analiz monitorowanych parametrów zbliżone do tych, jakie wymagane są dla stabilizatorów na zakończenie procesu mechaniczno-biologicznego przetwarzania, kwalifikując je do deponowania na składowisku. Wyniki strat prażenia (19% s.m.) oraz zawartości węgla organicznego (8,3% s.m.) bezpośrednio po procesie biologicznego przetwarzania w reaktorze już kwalifikują materiał jako przetworzony. Wyniki oznaczania AT4 oraz GS21, mimo niskich jak na ten etap procesu wartości (AT4 – 11,49 mg O<sub>2</sub>/g s.m., GS21 – 20,6 l<sub>n</sub>/kg s.m.), wprowadzają konieczność dalszej obróbki na pryzmach. Po procesie dojrzewania na pryzmie przez okres ok. 7 tygodni (próbka 7.2) z systematycznym napowietrzaniem i z wykorzystaniem mobilnej przeczucarki kompostu zaobserwowano ponad siedmiokrotne obniżenie wartości AT4 (do 1,5 mg O<sub>2</sub>/g s.m.) i blisko trzynastokrotne obniżenie wartości GS21 (do 1,6 l<sub>n</sub>/kg s.m.). Również redukcja wartości strat prażenia (obniżenie do 13,5% s.m. z 19% s.m.) oraz nieznaczna redukcja zawartości węgla organicznego (7,7% s.m. z 8,3% s.m.) pokazuje konieczność i intensywność dojrzewania materiału na pryzmie.

## 8. Podsumowanie i wnioski

Zbadanych zostało 16 próbek materiałów po mechaniczno-biologicznym przetwarzaniu. Pochodziły one z kompostowni przetwarzających różne rodzaje odpadów oraz wykorzystujących różne technologie biologicznego przetwarzania – od najprostszycy pryzmowych do zaawansowanych technologicznie betonowych bioreaktorów. Mierzone parametry – straty prażenia, zawartość węgla organicznego oraz aktywność oddechowa mierzona parametrem AT4 – stanowiły trzy wskaźniki zaproponowane w projekcie rozporządzenia Ministra Środowiska w sprawie mechaniczno-biologicznego przetwarzania zmieszanych odpadów ko-

munalnych [4]. Oznaczano również jeden dodatkowy parametr służący do określania potencjału wytwarzania gazu składowiskowego GS21, który obok AT4 jest powszechnie wykorzystywany, m.in. w Austrii i Niemczech, do oceny ubytku zdolności masy organicznej do dalszego biologicznego rozkładu.

Większość z badanych zakładów mechaniczno-biologicznego przetwarzania odpadów wymaga dostosowania technologii do wymagań zapisanych w wyżej wymienianym projekcie rozporządzenia [4]. Część zakładów, dysponująca już zamkniętymi bioreaktorami do biologicznego przetwarzania odpadów, najczęściej stosuje zbyt krótkie czasy przetwarzania w bioreaktorze – niezgodne z wymaganiami projektowanego prawodawstwa w Polsce. Jednak dla większości stabilizatorów po kilkutygodniowym dojrzewaniu na pryzmach, wszystkie wymagane parametry osiągają wartości pozwalające uznać dany materiał za przetworzony. Może on być dalej zagospodarowywany lub utylizowany poprzez deponowanie na składowisku odpadów innych niż niebezpieczne i obojętne. Wyniki pokazują również znaczną przewagę kompostowni systemowych nad pryzmowymi.

W kilku przypadkach wyniki AT4 i GS21 nie idą w parze z wynikami strat prażenia oraz zawartości węgla organicznego. Co sugeruje, aby dla zapewnienia weryfikacji pełnej stabilizacji odpadów po mechaniczno-biologicznym przetwarzaniu analizowane były łącznie parametry odpowiadające za:

- określenie zdolności stabilizatu do dalszego biologicznego rozkładu – parametr AT4,
- określenie poziomu ubytku substancji organicznej w przetwarzanych odpadach poprzez spełnienie poniższych wymagań:
  - straty prażenia stabilizatu mniejsze niż 35% s.m., a zawartość węgla organicznego mniejsza niż 20% s.m. lub
  - ubytek masy organicznej w stabilizacie w stosunku do masy organicznej w odpadach, mierzony stratą prażenia lub zawartością węgla organicznego, powyżej 40%\*.

---

\* Cytowaną literaturę zamieszczono po tłumaczeniu artykułu w języku niemieckim.