prof. dr hab. inż. Ewa Liwarska-Bizukojć[1)]
ORCID: 0000-0003-4510-1369

Biodegradability evaluation of plastics used in construction

Ocena biodegradowalności tworzyw sztucznych stosowanych w budownictwie

DOI: 10.15199/33.2026.10.15

Abstract. The aim of this work was to evaluate biodegradability of the plastics which are the most frequently used in construction. In building applications plastics based on fossil raw materials such as PVC, PE, PS are the most often used. All these three polymers are classified as not biodegradable according to the international standards of biodegradability for plastics. However, scientists found microbes capable of partial decomposing of these materials but they have been not widely applied yet. Among bioplastics, PHA, PLA or PBS are the most commonly used in construction. These polymers are classified as biodegradable according to the international standards. However, their complete transformation into simple inorganic compounds requires long time (about 180 days), appropriate fragmentation and environmental conditions (e.g. temperature, oxygen concentration).

Keywords: biodegradation; bioplastics; construction; plastics

Streszczenie. W artykule przedstawiono ocenę podatności tworzyw sztucznych, najczęściej wykorzystywanych w budownictwie, na biodegradację. Należą do nich przede wszystkim tworzywa sztuczne wyprodukowane z surowców kopalnych, a są to PVC, PE lub PS. Te trzy polimery są klasyfikowane jako niebiodegradowalne wg międzynarodowych norm biodegradowalności dotyczących tworzyw sztucznych, ale naukowcom udało się znaleźć mikroorganizmy zdolne do częściowego rozkładu tych materiałów, choć na razie nie mają one zastosowania na szerszą skalę. Spośród bioplastików w budownictwie najczęściej stosowane są PHA, PLA lub PBS. Są to polimery klasyfikowane jako biodegradowalne, wg międzynarodowych norm, ale do pełnego przekształcenia ich w proste związki nieorganiczne potrzeba zwykle dużo czasu (ok. 180 dni), odpowiedniego rozdrobnienia i spełnienia określonych warunków środowiskowych (np. temperatura, stężenie tlenu).
Słowa kluczowe: biodegradacja; biotworzywa sztuczne; budownictwo; tworzywa sztuczne

Global plastics production has systematically increased from the middle of 20th century to 2024, when it reached nearly 431 million tonnes [1]. The vast majority of them, still around 90%, were produced from fossil-based materials (Figure 1). However, it is worth noting that in recent years, there has been a growing share of plastics produced from materials derived from plastic waste recycling and from bio-based sources. In 2018 the contribution of recycled materials was close to 8.4%, while in 2024 it achieved around 10.2%. It is worth noting that in Europe the contribution of recycled materials in production of plastics was significantly higher than in the world and reached 15.4% in 2024 [1]. The majority of plastics produced from materials classified as circular are derived from selective waste collection and recycling, i.e. primarily mechanical recycling, and to a lesser extent, chemical recycling [1].

At the same time plastics produced from renewable, bio-based raw materials such as corn, wheat, or wood pulp, are called bioplastics. To this group belong both plastics produced from materials of biological origin, which not always are biodegradable and biodegradable plastics (e.g. starch or cellulose) that might be obtained from fossil-based raw materials (e.g., polybutylene adipate terephthalate), and plastics possesing both these features, e.g. polyhydroxybutyrate (Figure 2). Towards the end of the

[1)] Politechnika Łódzka, Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska;
ewa.liwarska-bizukojc@p.lodz.pl

Produkcja tworzyw sztucznych na świecie systematycznie się zwiększa od połowy XX wieku. W 2024 r. osiągnęła blisko 431 mln ton [1]. Prawie 90% z nich wyprodukowano z surowców kopalnych (rysunek 1). Należy podkreślić, że w ostatnich latach zwiększa się ilość tworzyw sztucznych wyprodukowanych z materiałów uzyskanych dzięki recyklingowi odpadów z tworzyw sztucznych i z materiałów pochodzenia biologicznego. W 2018 r. udział materiałów z recyklingu wynosił ok. 8,4%, a w 2024 r. było to ok. 10,2%. W Europie udział materiałów z recyklingu w produkcji tworzyw sztucznych był w 2024 r. znacznie większy i osiągnął 15,4% [1]. Dużą część tworzyw sztucznych wyprodukowanych z materiałów określanych mianem cyrkularnych zawdzięczmy selektywnej zbiórce odpadów i recyklingowi, w tym przede wszystkim recyklingowi mechanicznemu, a w mniejszym stopniu chemicznemu [1].

Tworzywa sztuczne produkowane z surowców odnawialnych, pochodzenia biologicznego, takich jak kukurydza, pszenica, pulpa drzewna nazywane są biotworzywami lub bioplastikami. Do tej grupy zalicza się zarówno tworzywa sztuczne wyprodukowane z materiałów pochodzenia biologicznego, nie zawsze biodegradowalne, jak i tworzywa biodegradowalne (np. skrobia czy celuloza), które mogą być otrzymywane z surowców kopalnych (np. politereftalan adypinianu butylenu), a także tworzywa mające obie te cechy, np. polihydroksymaślan (rysunek 2). Pod koniec drugiej dekady XXI wieku spodziewano się, że udział biotworzyw w światowej produkcji two-

second decade of the 21st century, the contribution of bioplastics in global plastics production was expected to rise. Indeed, in the years 2023–2024, bioplastic production has remained at a level of 2.6–3 million tonnes annually, which corresponded to a 0.6–0.7% of total annual plastics production [1]. For comparison, in 2018 bioplastic production was 1.2 million tonnes, representing approximately 0.3% of global plastic production [2].

Among plastics produced from fossil-based raw materials in 2024, polypropylene (PP) accounted for the largest share at 19%, followed by low-density polyethylene (LDPE) at 13.9%, polyvinyl chloride (PVC) at 12.8%, and high-density polyethylene (HDPE) at 12.1% [1]. Next were polyethylene terephthalate (PET), polyurethanes (PU), polystyrene (PS), and other plastics, each accounting for less than 10% of global plastic production [1]. At the same time regarding bioplastics, polylactide (PLA) accounts for the largest share of production, although its contribution decreased from 31.1% in 2023 to 26.4% in 2025 [2]. Apart form PLA, the world's most widely produced biodegradable bioplastics include starch-based polymers, polybutylene succinate (PBS), and polybutylene adipate terephthalate (PBAT), while non-biodegradable bioplastics include, among others, polyamide, polytrimethylene terephthalate, and polyethylene [2] (Figure 2).

Plastics are primarily used for the production of packaging. Approximately 44% of the plastics produced globally are used for this purpose. The construction sector ranks second, accounting for approximately 18% of global plastic production [3]. Other sectors that used significant quantities of plastics include the automotive industry (8%), the electrical and electronics industry (7%), and the household sector (7%) [3]. Plastics have a wide range of applications in the construction sector. They are used to manufacture products such as insulation, hydro-insulation, windows, doors, and roof tiles, and are also essential for interior finishing, serving as a key

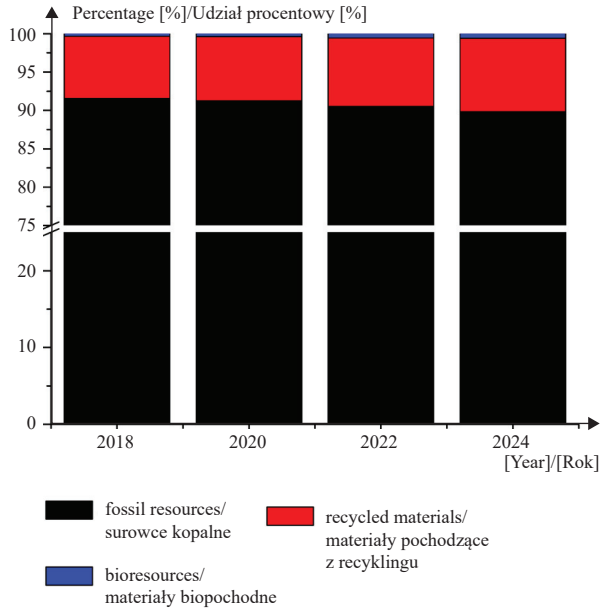
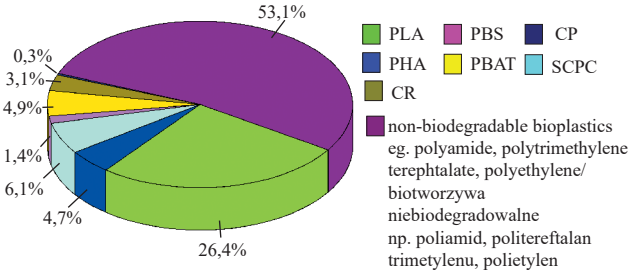


Fig. 1. Division of plastics on the basis of the raw materials used in their production in the years 2018–2024

Fig. own study based on [1]

Rys. 1. Podział tworzyw sztucznych ze względu na surowce stosowane do ich produkcji w latach 2018–2024

Rys. opracowano na podstawie [1]



Rys. 2. Udział biodegradowalnych i niebiodegradowalnych biotworzyw wyprodukowanych na świecie w 2025 r.: PLA – polilaktyd; PHB – polihydroksymaślan; SCPC – polimery na bazie skrobi; PBS – polibursztynian butylenu; PBAT – politereftalan adypinianu butylenu; CR – regeneraty celulozy; CP – polimery kazeinowe

Rys. opracowano na podstawie https://www.european-bioplastics.org/bioplastics/materials/dostęp 20.05.2026

Fig. 2. The contribution of biodegradable and non-biodegradable bioplastics produced in the world in 2025. PLA – polylactide; PHB – polyhydroxybutyrate; SCPC – starch-based polymers; PBS – polybutylene succinate; PBAT – polybutylene adipate terephthalate; CR – cellulose regenerates; CP – casein polymers Fig. own study based on https://www.european-bioplastics.org/bioplastics/materials/available on 20.05.2026

rzyw sztucznych będzie się zwiększał i rzeczywiście w latach 2023–2024 produkcja bioplastików była na poziomie 2,6–3,0 mln ton rocznie, co daje udział 0,6 – 0,7% wszystkich wyprodukowanych rocznie tworzyw sztucznych [1]. Dla porównania, w 2018 r. wynosiła ona 1,2 mln ton, co stanowiło ok. 0,3% światowej produkcji tworzyw sztucznych [2].

Wśród tworzyw sztucznych wyprodukowanych z surowców kopalnych w 2024 r. największy udział miał polipropylen (PP) – 19%, a następnie polietylen o małej gęstości (LDPE) – 13,9%, polichlorek winylu (PVC) – 12.8%, polietylen o dużej gęstości (HDPE) – 12,1% [1]. Kolejne miejsce zajmują politereftalan etylenu (PET), poliuretany (PU), polistyren (PS) oraz inne tworzywa, których udział w światowej produkcji tworzyw sztucznych wynosi mniej niż 10% [1]. Wśród bioplastików najwięcej produkuje się natomiast polilaktydu (PLA), choć jego udział zmniejszył się z 31,1% w 2023 r. do 26,4% w 2025 r. [2]. Oprócz PLA do biodegradowalnych biotworzyw, produkowanych w największych ilościach na świecie, należą polimery zawierające skrobię, bursztynian polibutylenu (PBS), politereftalan adypinianu butylenu (PBAT), a do biotworzyw niebiodegradowalnych m.in. poliamid, politereftalan trimetylenu, polietylen [2] (rysunek 2).

Tworzywa sztuczne wykorzystywane są przede wszystkim do produkcji opakowań. Na ten cel przeznacza się ok. 44% wyprodukowanych na świecie tworzyw sztucznych. Na drugim miejscu znajduje się budownictwo, które wykorzystuje ok. 18% światowej produkcji [3], a na kolejnych motoryzacja (8%), branża elektryczna i elektroniczna (7%), gospodarstwa domowe (7%) [3]. W budownictwie tworzywa sztuczne są używane do produkcji m.in. termoizolacji, hydroizolacji, okien, drzwi, dachówek, a także w wykańczaniu wnętrz, jako główny komponent, np. wykładzin podłogowych, paneli ściennych, czy listew przypodłogowych.

component of items like flooring, wall panels, and skirting boards.Taking into account that nearly one-fifth of global plastic production is allocated to construction purposes, and considering the diverse applications of plastics across the construction sector, it is worth examining their properties not only in terms of physicochemical or performance characteristics but also from a biological perspective, including their susceptibility to microbial degradation.

The aim of this study is to assess the biodegradability of plastics most commonly used in the construction industry. While materials derived from fossil fuels predominate, bioplastics have also been increasingly used over the last two decades. Therefore, this paper discusses the biodegradability of plastics, first those produced from fossil feedstocks (so-called conventional plastics) and subsequently bioplastics. The attention is primarily paid in both cases to materials used in the largest quantities in the construction sector. The discussion on the biodegradability of plastics was preceded by an overview of international standards used to assess the susceptibility of plastics to microbial degradation.

In this literature review, two databases were searched: EBSCO host Web and Web of Science. Two sets of keywords were used: (1) "plastics", "biodegradability", "construction"; and (2) "bioplastics", "biodegradability", "construction". For both sets, the logical operator "AND" was applied, and the presence of each keyword in the "Abstract" was required. The timeframe covered the period from 2015 to the present.

Review of the guidelines used for evaluation of plastic biodegradability

Biodegradation is the whole of biochemical processes driven by microorganisms, in which a material serving as a substrate is converted into simple inorganic compounds, primarily carbon dioxide and water, accompanied by the synthesis of microbial biomass. Biodegradation can run under aerobic and anaerobic conditions. In the latter case, in addition to carbon dioxide and water, methane is one of the main products. Plastics are stable, durable materials that, as is well known, do not readily decompose since that would exclude their use in many areas. The time required for the complete decomposition of plastics is estimated at several hundred years. Plastics left in the natural environment undergo physical, chemical, and biological transformations, and consequently, slow biodegradation. Four main stages of the biological decomposition of plastic materials can be distinguished [4]. The first stage is biodeterioration, during which a biofilm forms on the plastic. The next stage is biofragmentation. At this point, extracellular enzymes secreted by microorganisms convert long-chain polymers into oligomers. The third stage is the assimilation of oligomers by microorganisms, which typically occurs via β-oxidation and the citric acid cycle. The fourth stage is mineralization into simple inorganic compounds (CO_2, H_2O) and, optionally, methane [4].

In order to determine whether a given material, in this case, a plastic or bioplastic, is biodegradable, one of the methodologies described in international or national standards should be used. Although these standards differ from one another, each specifies the

Biorąc pod uwagę, że prawie jedna piąta światowej produkcji tworzyw sztucznych przeznaczana jest na cele budowlane oraz uwzględniając ich różnorodne zastosowanie w budownictwie, warto jest przyjrzeć się właściwościom tworzyw sztucznych nie tylko od strony ich cech fizykochemicznych, czy użytkowych, ale także biologicznych, w tym podatności na rozkład mikrobiologiczny.

W artykule omówiono podatność na biodegradację tworzyw sztucznych najczęściej wykorzystywanych w budownictwie. Dominują wśród nich wyprodukowane z surowców kopalnych, ale coraz częściej w ostatnich dwóch dekadach stosowane są również biotworzywa, dlatego też zostaną zaprezentowane obie te grupy, a więc tworzywa sztuczne wyprodukowane z surowców kopalnych, tzw. konwencjonalne, a następnie biotworzywa, przy czym w obydwu przypadkach szczególną uwagę poświęcono materiałom stosowanym w największych ilościach w budownictwie. Omówienie biodegradowalności tworzyw sztucznych zostało poprzedzone przeglądem międzynarodowych norm stosowanych do oceny podatności tworzyw sztucznych na rozkład mikrobiologiczny.

W ramach przeglądu danych literaturowych przeszukano dwie bazy danych, tj. EBSCO host Web i Web of Science, pod kątem dwóch zestawów słów kluczowych: 1) „plastiki", „biodegradowalność", „budownictwo" oraz 2) „bioplastiki", „biodegradowalność", „budownictwo". W przypadku obu zestawów zastosowano operator logiczny „AND" i wymagano użycia każdego ze słów kluczowych w „Abstrakcie". Określono przedział czasowy od 2015 r. do chwili obecnej.

Przegląd wytycznych stosowanych do oceny biodegradowalności tworzyw sztucznych

Biodegradacja to przemiany biochemiczne przebiegające przy udziale mikroorganizmów, w wyniku których dany materiał stanowiący substrat przekształcany jest do prostych związków nieorganicznych, przede wszystkim do dwutlenku węgla i wody, czemu towarzyszy synteza biomasy mikroorganizmów. Biodegradacja może przebiegać w warunkach tlenowych i beztlenowych. W przypadku tych drugich, oprócz dwutlenku węgla i wody, jednym z głównych produktów jest metan. Tworzywa sztuczne to materiały stabilne, trwałe, które jak wiadomo nie podlegają łatwo procesom rozkładu, ponieważ wykluczyłoby to ich zastosowanie w wielu obszarach. Czas całkowitego rozkładu tworzyw sztucznych szacuje się na kilkaset lat. Pozostawione w środowisku przyrodniczym plastiki będą ulegały przemianom fizycznym, chemicznym i biologicznym, a zatem też powolnej biodegradacji. Można wyróżnić **cztery główne etapy biologicznej dekompozycji tworzyw sztucznych** [4]. Pierwszy etap to **biodeterioracja**, podczas której na plastiku tworzy się biofilm, a następny **biofragmentacja**. Wówczas wydzielane przez mikroorganizmy enzymy zewnątrzkomórkowe konwertują długołańcuchowe polimery do oligomerów. Trzecim etapem jest **asymilacja oligomerów przez mikroorganizmy**. Odbywa się ona zwykle na drodze ß-oksydacji i cyklu kwasu cytrynowego. Czwarty etap to mineralizacja do prostych związków nieorganicznych (CO_2, H_2O) i opcjonalnie metanu [4].

conditions for conducting the biodegradability test, the required level of biodegradation, and the precise or approximate timeframe within which that level should be achieved. Only the meticulous performance of biodegradability tests by appropriate, ideally accredited, laboratories makes it possible to determine whether a given material is susceptible to microbial decomposition.

Table 1 presents an overview of standards for assessing the biodegradability of plastics, developed and published by international organizations such as the International Organization for Standardization (ISO), European Standards (EN), and the American Society for Testing and Materials (ASTM). As this overwiew shows, standards for plastic biodegradability recommend testing for susceptibility to biodegradation under aerobic and/or anaerobic conditions. In the case of aerobic biodegradation, the suitability of composting as a method for processing plastic waste is typically evaluated (e.g., ISO 14855:2018). Conversely, assessing plastic biodegradability under anaerobic conditions it is recommended to check, whether methanogenic fermentation and biogas production would be appropriate solution for plastic waste management (e.g., ISO 15985:2014). When evaluating susceptibility to biodegradation, it is useful to compare the material's degradation rate in the liquid phase (freshwater, e.g., ISO 14851, or seawater, e.g., ISO 18830:2017) against that in soil or compost environments (Table 1).

Various indicators are used to assess biodegradability. For tests conducted under aerobic conditions, the biochemical oxygen demand (BOD_5) is frequently used, whereas CO_2 production is often measured under anaerobic conditions. Plastic mass loss is a significant and frequently recommended indicator. The degree of biodegradation is calculated based on these indicators. Criteria for classifying a material as biodegradable vary depending on the standard. A key factor is the duration of the test required to achieve the necessary level of biological degradation.

Despite meeting the specific test conditions included in the standard, applying a given biodegradation test to assess the susceptibility of a single homopolymer to biochemical degradation can yield varying results, which sometimes failing to provide a definitive answer as to whether a specific (bio) plastic is biodegradable. The next two sections of this paper will present examples of results from various biodegradation tests performed on conventional plastics and bioplastics.

Biodegradability of plastics produced from fossil raw materials

To date, three types of plastics known as the „Big Three", i.e. polyvinyl chloride (PVC), polyethylene (PE), and polystyrene (PS) have primarily been used in construction. PVC is a key component of many construction products, such as window frames, floor and wall coverings, cable sheathing, and water or sewage piping. Chemically, PVC is an amorphous vinyl polymer consisting of repeating units with the chemical formula (C_2H_3Cl) n and it is a thermoplastic material characterized by high mechanical strength and resistance to many solvents. What distinguishes it from other polymers is the presence of chlorine in the molecule, a factor that influences its subsequent processing when it becomes waste. PE is a linear hydrocarbon

Chcąc ocenić, czy dany materiał, w tym przypadku tworzywo sztuczne lub biotworzywo, jest biodegradowalny, należy użyć jednej z metod opisanych w międzynarodowych lub krajowych normach. Normy te, choć różnią się między sobą, to każda z nich określa warunki przeprowadzania testu biodegradowalności, wymagany poziom biodegradacji i dokładny lub przybliżony czas, w którym ten poziom biodegradacji powinien być osiągnięty. Dopiero skrupulatne wykonanie testów biodegradowalności przez odpowiednie, najlepiej akredytowane laboratoria, pozwala stwierdzić, czy dany materiał jest podatny na rozkład mikrobiologiczny.

W tabeli 1 przedstawiono przegląd norm do oceny biodegradowalności plastików, opracowanych i opublikowanych przez międzynarodowe organizacje, takie jak International Organization for Standarization (ISO), European Standards (EN) oraz American Society for Testing and Materials (ASTM). Jak wynika z niego, normy biodegradowalności tworzyw sztucznych zalecają sprawdzić podatność na biodegradację w warunkach tlenowych i/lub beztlenowych. W przypadku tych pierwszych ocenia się zwykle przydatność kompostowania jako metody przekształcania odpadów z tworzyw sztucznych (np. ISO 14855:2018). Oceniając biodegradowalność plastiku w warunkach beztlenowych, można natomiast sprawdzić, czy fermentacja metanowa i produkcja biogazu będzie dobrym rozwiązaniem w zagospodarowaniu odpadów z tworzyw sztucznych (np. norma ISO 15985:2014). Oceniając podatność na biodegradację warto też ocenić, jaki jest poziom rozkładu materiału złożonego z plastiku w fazie ciekłej (woda słodka, np. 14851 lub morska, np. 18830:2017), a jaki w środowisku glebowym lub kompoście (tabela 1).

Do oceny biodegradowalności wykorzystywane są różne wskaźniki. W przypadku testów prowadzonych w warunkach tlenowych często jest to **biochemiczne zapotrzebowanie na tlen** (BZT_5), a w warunkach beztlenowych – **produkcja CO_2**. Istotnym i często zalecanym wskaźnikiem jest **ubytek masy plastiku**. Na podstawie tych wskaźników obliczany jest stopień biodegradacji. Kryteria uznania danego materiału za biodegradowalny są różne w zależności od normy. Istotnym czynnikiem jest czas trwania testu, po którym osiągnięto wymagany poziom rozkładu biologicznego.

Pomimo zachowania określonych w normie warunków prowadzenia testów biodegradowalności, stosując dany test do oceny podatności na rozkład biochemiczny jednego homopolimeru, można otrzymać różne wyniki, które czasem nie dają jednoznacznej odpowiedzi, czy dany (bio) plastik jest biodegradowalny.

Podatność na biodegradację tworzyw sztucznych produkowanych z surowców kopalnych

Dotychczas w budownictwie miały zastosowanie przede wszystkim trzy rodzaje tworzyw sztucznych nazywane tzw. wielką trójką, czyli polichlorek winylu (PVC), polietylen (PE) i polistyren (PS). PVC jest głównym składnikiem wielu produktów budowlanych, takich jak ramy okienne, pokrycia podłóg i ścian, osłony kabli, przewody wodociągowe czy

Table 1. Review of standards for assessing biodegradability of plastics
Tabela 1. Przegląd norm dotyczących oceny biodegradowalności tworzyw sztucznych

No. of standard	Title	Conditions of biodegradation. The test validity criteria.
ISO 14851:2019	Original title: „Determination of the ultimate aerobic biodegradability of plastic materials in an aqueous medium – Method by measuring the oxygen demand in a closed respirometer.”	The material under test is exposed to water under laboratory conditions, using activated sludge microorganisms as the inoculum. Biochemical oxygen demand is measured in a respirometer, and the degree of plastic biodegradation is calculated based on this measurement. Validity criteria include, among others, achieving 60% biodegradation of the reference material (e.g., cellulose) after 60 days of testing.
ISO 18830:2016	Original title: „Plastics – Determination of aerobic biodegradation of non-floating plastic materials in a seawater/sandy sediment interface – Method by measuring the oxygen demand in closed respirometer”	Test conditions and validity criteria are analogous to those in ISO 14851:2019.
ASTM D5988–03	Original title: „Standard Test Method for Determining Aerobic Biodegradation in Soil of Plastic Materials or Residual Plastic Materials After Composting.”	The method is based on measuring the CO_2 produced during the aerobic biodegradation of plastic in soil over time. Validity criteria include, among others, the reference material achieving at least 70% of the theoretical maximum CO_2 yield within the six-month test period.
EN 14995:2006	Original title: „Plastics – Evaluation of compostability – Test scheme and specifications.”	The standard establishes a European framework for assessing plastics in terms of their compostability or anaerobic degradation. It covers four key aspects: biodegradability, disintegration during biological treatment, the impact of plastics on biological treatment processes, and their effect on compost quality. A material is considered compostable if 90% of it is converted into CO_2 within six months. A material is deemed to undergo disintegration if 90% of it breaks down into fragments smaller than 2 mm within three months.
ASTM D6954–18	Original title: „Standards guide for exposing and testing plastics that degrade in the environment by a combination of oxidation and biodegradation.”	The method comprises three levels of assessment regarding the loss of properties and molecular mass of plastics in the natural environment. The first level addresses abiotic processes, such as photo-oxidation and thermal degradation. The second focuses on biological processes, particularly biodegradation. The third involves assessing the impact of products resulting from biological or abiotic degradation on the biotic component of the ecosystem. The duration is not strictly defined. The first and second stages typically take a combined total of six months to two years.
ISO 15985:2014 is equivalent to ASTM D5511	Original title: „Plastics – Determination of the ultimate anaerobic biodegradation under high-solids anaerobic-digestion conditions – Method by analysis of released biogas”	The method simulates typical anaerobic biodegradation conditions for the organic fraction of mixed household waste. The test material is subjected to a methanogenic inoculum derived from an anaerobic bioreactor, such as a closed fermentation chamber. The test is conducted at a high solids concentration (above 20%) under static conditions, without mixing. Biodegradability is assessed based on biogas production yield. The duration is not fixed. It lasts a minimum of 15 days, or longer, until a plateau is reached. 90% biodegradation should be achieved within this period.
ASTM D 5338-15 (2021) equivalent to ISO 14855:2018	Original title: „Standard Test Method for Determining Aerobic Biodegradation of Plastic Materials Under Controlled Composting Conditions, Incorporating Thermophilic Temperatures.”	The method is used to determine the degree and rate of aerobic biodegradation of plastic materials under controlled laboratory conditions simulating composting. The inoculum consists of compost derived from the organic fraction of municipal solid waste. The degree of biodegradation is calculated based on the CO_2 released. The duration is not strictly defined but typically ranges from 45 days to 6 months. 90% biodegradation should be achieved within this period.
ISO 14853:2016	Original title: „Plastics-Determination of the ultimate anaerobic biodegradation of plastic materials in an aqueous system – Method by measurement of biogas production.”	This test is used to determine the biodegradability of plastic materials in the liquid phase. It is based on measuring the conversion of organic carbon compounds into CO_2 and CH_4 under anaerobic conditions analogous to those found in closed fermentation chambers. The test duration should be between 25 and 30 days, but it may be extended to 90 days. A biodegradation level of 90% should be achieved within this timeframe.

polymer with the composition $(C_2H_4)n$. Depending on the polymerization conditions, materials such as high-density polyethylene (HDPE) and low-density polyethylene (LDPE) are distinguished. PE is used to manufacture pipes and other durable products, as well as for cable insulation. PS, on the other hand, is primarily used in its foamed form, known as styrofoam, to produce various types of insulation. PS is an amorphous, hard, thermoplastic aromatic polymer with limited ductility, composed of styrene monomers $[CH_2CH (C_6H_5)]$ n.The plastics most commonly used in construction also dominate the to-

kanalizacyjne. Pod względem chemicznym PVC, to amorficzny polimer winylowy, składający się z powtarzających się grup etynylowych o wzorze chemicznym $(C_2H_3Cl)_n$, odporny na działanie wielu rozpuszczalników, o dużej wytrzymałości mechanicznej, termoplastyczny. Na tle innych polimerów wyróżnia go obecność chloru w cząsteczce, która ma wpływ na późniejszą przeróbkę, gdy staje się odpadem. PE jest liniowym polimerem węglowodorowym o składzie $(C_2H_4)n$. W zależności od warunków prowadzenia reakcji polimeryzacji wyróżnia się m.in. polietylen o dużej gęsto-

tal mass of construction waste. Among plastic waste from the construction sector, PVC accounts for the largest share, making up approximately half of the total mass. In 2018 its contribution was 51.7% [5]. Polyethylene, both LDPE and HDPE, accounted for 17.9% of plastic waste from construction, while PS (including expanded polystyrene) accounted for 9.7% [5].

Based on the results of standardized tests assessing plastic biodegradability, all three above mentioned polymers, i.e. PVC, PE, and PS, are non-biodegradable materials [6]. However, researchers continue to attempt to identify microorganisms and/or enzymes capable of the biological degradation of these plastics. For this purpose microbial strains are typically isolated from various habitats, where they have been exposed to plastic such as soil, landfills, composting facilities, and marine environments and their metabolic capabilities regarding plastic degradation are assessed. Bacteria, their consortia and fungi are the organisms most frequently employed in research on plastic biodegradation. Studies have frequently focused on bacterial genera such as *Pseudomonas*, *Bacillus*, and *Alcanivorax* [4]. There are also numerous studies in which actinomycetes classified as bacteria have been used for biodegradation [4]. Due to their filamentous morphology, fungi are capable of colonizing sites and materials that are difficult for other organisms to access. They also secrete exoenzymes, such as laccase and cutinase, which catalyze the biological degradation of polymers. These enzymes are particularly significant in the breakdown of polymers containing aromatic rings, such as PS, though the utility of laccase in PVC degradation has also been confirmed [4, 7].

In Table 2 a series of examples of studies on biodegradation of polymers PVC, PE and PS conducted in the last 12 years are presented.

Biodegradability of bioplastics

Over the last two decades, bioplastics have increasingly found application in construction and architecture. They are used, for example, as additives for concrete, tiles, insulation, flooring, and 3D printing materials, as well as in the production of windows and roofing [3]. The bioplastics most commonly used in construction include polyhydroxyalkanoates (PHA), polylactic acid (PLA), and polybutylene succinate (PBS) [3]. Therefore, this study focuses on comparing the biodegradability results of these three bioplastics under various conditions, applying the guidelines set out in the previously discussed international standards.

Apart from biodegradability studies conducted according to standard methodology, research is being carried out to select microorganisms or microbial consortia capable of biodegrading bioplastics in the form of pure polymers, copolymers, blends, or materials enriched with additives, such as plasticizers and colorants [4, 19]. For example, Di et al. (2019) demonstrated that PHB could be completely degraded by bacteria of the genus *Pseudomonas* within 21 days when serving as the sole carbon source in the medium [19]. Meanwhile, Wang et al. (2023) isolated the bacterium *Bacillus safensis* from soil near a landfill [20]. This bacterium was capable of biodegrading PLA under mesophilic conditions [20]. An 8% loss in PLA mass was observed after 30 days of incubation [20].

ści (HDPE) i o małej gęstości (LDPE). PE stosowany jest do budowy rur i innych wytrzymałych produktów, a także do izolacji kabli, natomiast PS wykorzystywany jest przede wszystkim w formie spienionej, nazywanej styropianem, do produkcji różnego rodzaju izolacji. PS jest polimerem aromatycznym składającym się z monomerów styrenu [$CH_2CH(C_6H_5)$]n, amorficznym, twardym, termoplastycznym, o ograniczonej plastyczności.

Najczęściej używane w budownictwie tworzywa sztuczne dominują też w masie odpadów budowlanych. Wśród odpadowych tworzyw sztucznych z sektora budowlanego najwięcej jest PVC, który stanowi ok. połowy masy tych odpadów. W 2018 r. było to 51,7% [5]. Polietylen, biorąc pod uwagę łącznie LDPE i HDPE, stanowił 17,9% odpadów plastikowych z budownictwa, a PS, w tym polistyren ekspandowany, 9,7% [5].

Biorąc pod uwagę wyniki znormalizowanych testów oceny biodegradowalności tworzyw sztucznych, to PVC, PE i PS są materiałami niebiodegradowalnymi [6]. Naukowcy podejmują jednak wciąż próby znalezienia mikroorganizmów i/lub enzymów, które byłyby zdolne do biologicznego rozkładu tych tworzyw sztucznych. W tym celu zazwyczaj izolują szczepy mikroorganizmów z różnych siedlisk, w których miały one kontakt z plastikiem, jak gleba, składowiska odpadów, kompostownie, środowisko morskie i sprawdzają ich zdolności metaboliczne w kierunku degradacji tworzyw sztucznych. W badaniach nad biodegradacją tworzyw sztucznych najczęściej wykorzystywane są bakterie, ich konsorcja lub grzyby. Wśród bakterii wielokrotnie prowadzono badania z bakteriami z rodzaju *Pseudomonas*, *Bacillus* czy *Alcanivorax* [4]. Istnieje też wiele prac, w których do biodegradacji wykorzystywano promieniowce zaliczane do bakterii [4]. Grzyby dzięki swojej nitkowatej morfologii mają zdolności zasiedlania materiałów trudno dostępnych w przypadku innych organizmów. Wydzielają też egzoenzymy, jak lakaza czy kutynaza, które katalizują biologiczny rozkład polimerów. Szczególne znaczenie mają one przy rozkładzie polimerów zawierających pierścień aromatyczny, takich jak PS, ale także potwierdzono przydatność lakazy w rozkładzie PVC [4, 7]. W tabeli 2 przedstawiono przykłady badań nad biodegradacją polimerów PVC, PE i PS z ostatnich dwunastu lat.

Podatność na biodegradację biotworzyw

Oprócz badań nad biodegradowalnością biotworzyw, prowadzone są prace naukowe mające na celu dobór mikroorganizmów lub konsorcjów mikroorganizmów do biodegradacji czystych polimerów, kopolimerów, blend lub materiałów wzbogaconych dodatkami, w tym m.in. plastyfikatorami, barwnikami [4, 19]. Na przykład Di i in. wykazali, że PHB może być całkowicie zdegradowany przy udziale bakterii z rodzaju *Pseudomonas* w ciągu 21 dni stanowiąc jedyne źródło węgla w pożywce [19]. Z kolei Wang i in. wyizolowali z gleby przy składowisku odpadów bakterię *Bacillus safensis* zdolną do biodegradacji PLA w warunkach mezofilowych [20]. Stwierdzono 8% ubytku masy PLA po trzydziestu dniach inkubacji [20].

Table 2. Biodegradation of conventional plastics most commonly used in construction
Tabela 2. Biodegradacja konwencjonalnych tworzyw sztucznych najczęściej stosowanych w budownictwie

Plastic/ Tworzywo sztuczne	Microorganisms/ Mikroorganizm	Site of microorganism isolation/ Miejsce izolacji mikroorganizmów	Degree of biodegradation or other indicator of degradation and time of biodegradation/ Stopień biodegradacji lub inny wskaźnik degradacji i czas biodegradacji	Reference/ Źródło
PE	*Pseudomonas aeruginosa*	Waste landfill (India)/ składowisko odpadów (Indie)	6.5–8.7% within 60 days/ 6,5–8,7% w ciągu 60 dni	[8]
LDPE	Consortium of *Pseudomonas putida* and *Pseudomonas stutzeri*/ Konsorcjum *Pseudomonas putida* i *Pseudomonas stutzeri*	Bangalore Lake (India)/ jezioro Bangalore (Indie)	90% of mass loss within 40 days/ 90% ubytku masy w ciągu 40 dni	[9]
HDPE	*Bacillus cereus*	Waste landfill (The Czech Republic)/ składowisko odpadów (Czechy)	1,8% within 30 days/ 1,8% w ciągu 30 dni	[10]
LDPE	*Alcanivora* sp.	Waste from the sea (the beach La Rinconada, Antofagasta, Chile)/ odpady z morza (plaża La Rinconada, Antofagasta, Chile)	0.9% of mass loss after 34 days/ 0,9% ubytku masy po 34 dniach	[11]
LDPE	*Streptomyces gougerotti*	Atlantic Ocean/Ocean Atlantycki	0.5% mass loss within 180 days/ 0,5% ubytku masy w ciągu 180 dni	[12]
LDPE	*Alcaligenes faecalis*	Soil from the vicinity of landfill in Multan (Pakistan)/ gleba z okolic składowiska odpadów w Multan (Pakistan)	3.5% within 40 days/ 3,5% w ciągu 40 dni	[13]
HDPE	*Alcaligenes faecalis*	Soil from the vicinity of landfill in Multan (Pakistan)/ gleba z okolic składowiska odpadów w Multan (Pakistan)	5.8% within 40 days/ 5,8% w ciągu 40 dni	[13]
LDPE	*Aspergillus nomius*	Soil from the vicinity of landfill in Medan (Indonesia)/ gleba z okolic składowiska odpadów w Medan (Indonezja)	6.6% within 45 days/ 6,6% w ciągu 45 dni	[14]
PS	*Bacillus paralicheniformis* G1	Deep-seated bottom sediments of the Arabian Sea/ głęboko położone osady denne Morza Arabskiego	34% within 60 days/ 34% w ciągu 60 dni	[15]
PS	*Acinetobacter bacterium*	mikroflora jelitowa larw Tribolium castaneum	12.1% within 60 days/ 12,1% w ciągu 60 dni	[16]
PS	*Streptomyces gougerotti*	Atlantic Ocean/ Ocean Atlantycki	0.67% mass loss within 180 days/ 0,67% ubytku masy w ciągu 180 dni	[12]
PCV	*Cochliobolus* sp. used for laccase biosynthesis/ *Cochliobolus* sp. posłużył do biosyntezy lakkazy	Soil from the vicinity of landfill/ gleba z okolic składowiska odpadów	Biodegradation after one year/ Biodegradacja po ponad roku	[17]
PCV	*Klebsiella* sp. EMBL-1	Larval gut of *Spodoptera frugiperda*/ jelito larw *Spodoptera frugiperda*	15% within 90 days/ 15% w ciągu 90 dni	[18]

Taking the limited scope of this work and the intended audience into account, the focus has been placed on the biodegradability of bioplastics as assessed through standardized tests. The results of these biodegradability tests are summarized in Table 3. They vary and depend on a number of factors. Key factors include the morphological form of the bioplastic, its degree of fragmentation, and in the case of films its thickness. Powdered material will degrade more easily and rapidly than granules. Biodegradation in the liquid phase generally takes less time than in soil. However, the degree of biodegradation achieved is often, though not always, higher in soil or compost than in water. The chemical composition of the bioplastic plays a key role in its susceptibility to biodegradation. Biodegradability test results obtained till now indicate that polyhydroxybutyrate (PHB) is the most

W artykule skoncentrowano się na biodegradowlności bioplastików ocenianej za pomocą testów znormalizowanych. Wyniki tych testów są zróżnicowane i zależne od wielu czynników. Jednym z najważniejszych jest forma morfologiczna biotworzywa, stopień jego defragmentacji, a w przypadku biofilmu jego grubość. Proszek będzie ulegał rozkładowi łatwiej w krótszym czasie niż granulki. Biodegradacja prowadzona w fazie ciekłej trwa zazwyczaj krócej niż w glebie, ale osiągany stopień biodegradacji jest często, choć nie zawsze, wyższy w glebie lub kompoście niż w wodzie. Kluczową rolę w podatności na biodegradację odgrywa skład chemiczny biotworzywa. Uzyskane dotychczas wyniki testów biodegradowalności wskazują, że polihydroksymaślan (PHB) jest najłatwiej biodegradowalnym materiałem.

readily biodegradable material. Regarding the biodegradability of PLA, the literature presents widely varying data, while some research groups classify PLA as a biodegradable polymer, it does not readily undergo microbial degradation under all conditions [21]. It biodegrades most easily in compost under aerobic conditions at a temperature of approximately 60°C (Table 3) [21].

Out of the three bioplastics used in construction, PBS is the polymer that undergoes biodegradation less readily than PHB and PLA (Table 3). PBS is more susceptible to biodegradation processes in soil or compost, especially when it enters the soil environment in powdered form, than in water (Table 3).

Summary and conclusions

Plastics are polymer-based materials widely used in construction including the building, finishing, and interior design stages. The most commonly used plastics are those derived from fossil-based raw materials, with PVC, PE, or PS as their main components. All three of these polymers are classified as non-biodegradable under currently applicable international standards for plastic biodegradability. Nevertheless, scientists continue to seek microorganisms or enzymes capable of enabling at least partial biodegradation of these polymers.

Over the last two decades, bioplastics that are synthesized from renewable feedstocks or are biodegradable, or possess both these features have played an increasingly important role in plastics production. Bioplastics based on PHA, PLA, or PBS are the most commonly used in the construction industry. These three polymers are classified as biodegradable accoding to international standards for plastics. However, complete transformation into simple inorganic compounds typically requires a long time (around 180 days), adequate fragmentation, and specific environmental conditions, such as temperature and oxygen availability. In general, they undergo biodegradation more readily in soil and compost than in water. Among the three aforementioned bioplastics, polyhydroxyalkanoates and PHB, which belongs to this group, biodegrade the most easily.

There is a vast number of standards used to assess the biodegradabil-

W przypadku biodegradowalności PLA są bardzo różne dane w literaturze i wg niektórych grup badawczych PLA jest biodegradowlanym polimerem, ale nie w każdych warunkach ulega łatwo rozkładowi mikrobiologicznemu [21]. Najłatwiej ulega biodegradacji w kompoście, w warunkach aerobowych i w temperaturze ok. 60°C (tabela 3) [21]. PBS słabiej ulega rozkładowi biologicznemu niż PHB i PLA (tabela 3), natomiast łatwiej zachodzą w nim procesy biodegradacji w glebie lub kompoście, niż w wodzie, szczególnie jeżeli trafia do środowiska glebowego w postaci sproszkowanej (tabela 3).

Podsumowanie

Tworzywa sztuczne to materiały na bazie polimerów, które są powszechnie stosowane w budownictwie zarówno na etapie budowy, wykańczania, jak i aranżacji wnętrz. Najczęściej wykorzystywane są tworzywa sztuczne produkowane z surowców kopalnych, których głównym składnikiem jest PVC, PE lub PS. Te trzy polimery są klasyfikowane jako niebiodegradowlane wg obowiązujących międzynarodowych norm biodegradowalności dotyczących tworzyw sztucznych. Naukowcy wciąż podejmują próby wyizolowania mikroorganizmów lub enzymów pozwalających na choćby częściową biodegradację tych polimerów.

W ostatnich dwóch dekadach coraz większe znaczenie w produkcji tworzyw sztucznych odgrywają biotworzywa. W budownictwie najczęściej znajdują zastosowanie biotworzywa składające się z PHA, PLA lub PBS. Te trzy polimery są klasyfikowane jako biodegradowalne wg międzynarodowych norm, ale do pełnego przekształcenia w proste związki nieorganiczne potrzeba zwykle dużo czasu (ok. 180 dni), odpowiedniego rozdrobnienia i spełnienia określonych warunków środowiskowych, jak temperatura, czy dostęp do tlenu. Na ogół lepiej ulegają rozkładowi biologicznemu w glebie i kompoście niż w wodzie. Spośród trzech biotworzyw najłatwiej ulegają biodegradacji polihydroksyalkaniany i należący do tej grupy PHB.

Norm stosowanych do oceny biodegra-

Table 3. Biodegradation of bioplastics most commonly used in construction
Tabela 3. Biodegradacja biotworzyw najczęściej stosowanych w budownictwie

Bioplastic/ Biotworzywo	Methodology/ Metoda badań wg	Degree of biodegradation/ Stopień biodegradacji	Reference/ Źródło
PLA (film)	ASTM 5338 (compost)/ ASTM 5338 (kompost)	90% after 140 days/ 90% po 140 dniach	[22]
PHB (film)	ASTM 5338 (compost)/ ASTM 5338 (kompost)	80% after 28 days/ 80% po 28 dniach	[23]
PLA (film)	ASTM D5998–03 (soil)/ ASTM D5998–03 (gleba)	16% after 180 days/ 16% po 180 dniach	[24]
PBS (powder)/ PBS (proszek)	ASTM D5998–03 (soil)/ ASTM D5998–03 (gleba)	90% after 212 days/ 90% po 212 dniach	[25]
PHB (powder)/ PHB (proszek)	ASTM D5998–03 (soil)/ ASTM D5998–03 (gleba)	96.4% after 170 days/ 96,4% po 170 dniach	[25]
PLA (powder)/ PLA (proszek)	ISO 14853 (water)/ ISO 14853 (woda)	4.6% after 77 days/ 4,6% po 77 dniach	[26]
PHB (powder)/ PHB (proszek)	ISO 14853 (water)/ ISO 14853 (woda)	83.9% after 77 days/ 83,9% po 77 dniach	[26]
PBS (powder)/ PBS (proszek)	ISO 14853 (water)/ ISO 14853 (woda)	3.1% after 77 days/ 3,1% po 77 dniach	[26]
PHB (powder)/ PHB (proszek)	ISO 14852 (water)/ ISO 14852 (woda)	83% after 117 days/ 83% po 117 dniach	[26]
PLA (powder)/ PLA (proszek)	ISO 19679 (seawater)/ ISO 19679 (woda morska)	54% after 28 days/ 54% po 28 dniach	[27]
PHB (film)/ PHB (film)	ISO 19679 (sea water)/ ISO 19679 (woda morska)	57% after 180 days/ 57% po 180 dniach	[28]
PBS (fibers)/ PBS (włókna)	ISO 19679 (seawater)/ ISO 19679 (woda morska)	27.3% after 180 days/ 27,3% po 180 dniach	[29]
PLA (granules)/ PLA (granulki)	ISO 14851 (water)/ ISO 14851 (woda)	44% after 60 days/ 44% po 60 dniach	[30]

ity of plastics, and the criteria they propose vary. Therefore, it would be beneficial for organizations such as ISO or ASTM to review these standards, subsequently refine or even harmonize the biodegradability criteria, and reduce the number of applicable guidelines, if it were possible.

dowalności biotworzyw jest bardzo dużo i proponowane w nich kryteria różnią się między sobą. Dobrym rozwiązaniem byłby więc przegląd tych norm przez organizacje, takie jak ISO czy ASTM, a następnie doprecyzowanie, czy nawet ujednolicenie kryteriów biodegradowalności oraz, o ile to możliwe, redukcja liczby obowiązujących wytycznych.

Received: 05.06.2026
Revised: 08.07.2026
Published: 21.10.2026

Artykuł wpłynął do redakcji: 05.06.2026 r.
Otrzymano poprawiony po recenzjach: 08.07.2026 r.
Opublikowano: 21.10.2026 r.

Literatura

[1] Plastics Europe 2025. Plastics – the fast Facts 2025. https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-fast-facts-2025/Dostęp 03 czerwca 2026

[2] European Bioplastics 2024. Bioplastic materials. https://www.european-bioplastics.org/bioplastics/materials/Dostęp 03 czerwca 2026

[3] Mousavi S, Brown T, Malmsheimer RW. Sustainable bioplastic products for building applications: recent trends and future opportunities – A systematic review. Biofuels Bioprod Bioref. 2025; https://doi.org/10.1002/bbb.70005

[4] Lv S. Li Y, Zhao S, Shao Z. Biodegradation of Typical Plastics: From Microbial Diversity to Metabolic Mechanisms. Int J Mol Sci 2024; https://doi.org/10.3390/ijms25010593

[5] Plastics Europe 2021. Overview plastic waste from building & construction by polymer type and by recycling, energy recovery and disposal – 1 https://plasticseurope.org/wp-content/uploads/2021/10/BC_Table.pdf Dostęp 03 czerwca 2026

[6] Lee WS, Kim JH, Lee TG. Certifications and testing methods for biodegradable plastics. Reviews in Chemical Engineering. 2025; https://doi.org/10.1515/revce-2024–0061

[7] Koller M, Matsumoto K, Wang Z, Li F, Shah AA. Editorial: Biodegradation of plastics. Front Bioeng Biotechnol. 2023; https://doi.org/10.3389/fbioe.2023.1150078

[8] Gupta KK, Devi D. Characteristics investigation on biofilm formation and biodegradation activities of *Pseudomonas aeruginosa* strain ISJ14 colonizing low density polyethylene (LDPE) surface. Heliyon 2020; https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04398

[9] Skariyachan S, Megha M, Kini MN, Mukund KM, Rizvi A, Vasist K. Selection and screening of microbial consortia for efficient and ecofriendly degradation of plastic garbage collected from urban and rural areas of Bangalore. India Environ Monit Assess 2015; https://doi.org/10.1007/s10661–014–4174-y

[10] Kopecká R, Kubinová I, Sovová K, Mravcova L, Vitez T, Vitezova M. Microbial degradation of virgin polyethylene by bacteria isolated from a landfill site. SN Appl Sci. 2022; https://doi.org/10.1007/s42452–022–05182-x

[11] Zadjelovic V, Erni-Cassola G, Obrador-Viel T, Lester D, Eley Y, Gibson MI, Dorador C, Golyshin PN, Black S, Wellington EMH i in.. A mechanistic understanding of polyethylene biodegradation by the marine bacterium Alcanivorax. J Hazard Mater. 2022; https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129278

[12] Oliveira J, Almeida PL, Sobral RG, Lourenco ND, Gaudencio SP. Marine-Derived Actinomycetes: Biodegradation of Plastics and Formation of PHA Bioplastics–A Circular Bioeconomy Approach. Mar Drugs. 2022; https://doi.org/10.3390/md20120760

[13] Tareen A, Saeed S, Iqbal A, Batool R, Jamil N. Biodeterioration of Microplastics: A Promising Step towards Plastics Waste Management. Polymers. 2022; https://doi.org/10.3390/polym14112275

[14] Munir E, Harefa RSM, Priyani N, Suryanto D. Plastic degrading fungi Trichoderma viride and Aspergillus nomius isolated from local landfill soil in Medan. In Proceedings of the 4th International Conference on Friendly City–From Research to Implementation for Better Sustainability, Medan, Indonesia, 11–12 October 2017.

[15] Kumar AG, Hinduja M, Sujitha K, Rajan NN, Dharani G. Biodegradation of polystyrene by deep-sea *Bacillus paralicheniformis* G1 and genome analysis. Sci Total Environ. 2021; https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145002

[16] Wang Z, Xin X, Shi X, Zhang Y. A polystyrene-degrading *Acinetobacter bacterium* isolated from the larvae of *Tribolium castaneum*. Sci Total Environ. 2020; https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138564

[17] Sumathi T, Viswanath B, Sri Lakshmi A, SaiGopal DVR. Production of Laccase by Cochliobolus sp. Isolated from Plastic Dumped Soils and Their Ability to Degrade Low Molecular Weight PVC. Biochem Res Int. 2016; https://doi.org/10.1155/2016/9519527

[18] Zhang Z, Peng H, Yang D, Zhang G, Zhang J, Ju F. Polyvinyl chloride degradation by a bacterium isolated from the gut of insect larvae. Nat Commun. 2022; https://doi.org/10.1038/s41467–022–32903-y

[19] Di Y, Xia H, Jiao Y, Zhang X, Fang Q, Li F, Chen S. Biodegradation of polyhydroxybutyrate by Pseudomonas sp. DSDY0501 and purification and characterization of polyhydroxybutyrate depolymerase. 3 Biotech. 2019; https://doi.org/10.1007/s13205–019–1871–9.

[20] Wang Y, Hu T, Zhang W, Lin J, Wang Z, Lyu S, Tong H. Biodegradation of polylactic acid by a mesophilic bacteria *Bacillus safensis*. Chemosphere. 2023; https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.137991

[21] Hajilou N, Mostafayi SS, Yarin AL, Shokuhfar TA. Comparative Review on Biodegradation of Poly (Lactic Acid) in Soil, Compost, Water, and Wastewater Environments: Incorporating Mathematical Modeling Perspectives. Applied Chem. 2025; https://doi.org/10.3390/appliedchem5010001

[22] Kalita NK, Bhasney SM, Mudenur C, Kalamdhad A, Katiyar V. End-of-life evaluation and biodegradation of poly (lacticacid) (PLA)/polycaprolactone (PCL)/microcrystalline cellulose (MCC) polyblends under composting conditions. Chemosphere. 2020; https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.125875

[23] Tabasi RY, Ajji A. Selective degradation of biodegradable blends in simulated laboratory composting. Polym Degrad Stab. 2015; https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2015.07.020

[24] Pasikowski PA, Kuchnier CN, Pinheiro IF, Morales AR. Biodegradation in soil of PLA/PBAT blends compatibilized with chain extender. J Polym Environ. 2018; https://doi.org/10.1007/s10924–017–0951–3

[25] Šerá J, Serbruyns L, De Wilde B, Koutný M. Accelerated biodegradation testing of slowly degradable polyesters in soil. Polym Degrad Stab. 2020; https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2019.109031

[26] García-Depraect O, Lebrero R, Rodriguez-Vega S, Bordel S, Santos-Beneit F, Martínez-Mendoza LJ, Börner RA, Börner T, Munoz R. Biodegradation of bioplastics under aerobic and anaerobic aqueous conditions: kinetics, carbon fate and particle size effect. Bioresour Technol. 2022; https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126265

[27] Hino S, Kawasaki N, Yamano N, Nakamura T, Nakayama A. Effects of particle size on marine biodegradation of poly (l-lactic acid) and poly (ε-caprolactone). Mater Chem Phys. 2023; https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2023.127813

[28] Briassoulis D, Pikasi A, Papardaki NG, Mistriotis A. Aerobic biodegradation of bio-based plastics in the seawater/sediment interface (sublittoral) marine environment of the coastal zone – test method under controlled laboratory conditions. Sci Total Environ. 2020; https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137748

[29] Kim J, Park S, Jung S, Yun H, Choi K, Heo G, Jin HJ, Park S, Kwak HW. Biodegradation behavior of polybutylene succinate (PBS) fishing gear in marine sedimentary environments for ghost fishing prevention. Polym Degrad Stab. 2023; https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2023.110490

[30] Poli V, Lavagnolo MC, Basaglia M, Bonato T, Zanatta S, Modesti M, Assessment of the biodegradability of polylactic acid (PLA) in freshwater using EN ISO 14851:2019: Challenges and outcomes. J Hazard Mater. 2025; https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.137974