

**BERNADETA WIECZOREK¹ , LUIZA WOLSKA²,
ANNA EKNER-GRZYB³ , JAGNA CHMIELOWSKA-BĄK¹ **

* Autor korespondencyjny / corresponding author: jagna.chmielowska@amu.edu.pl

¹ Zakład Ekofizjologii Roślin, Wydział Biologii, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu,
ul. Uniwersytetu Poznańskiego 6, 61-614 Poznań, Polska

Department of Plant Ecophysiology, Faculty of Biology, Adam Mickiewicz University, Uniwersytetu Poznańskiego 6,
61-614 Poznań, Poland

² Zakład Genetyki, Wydział Biologii, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu,
ul. Uniwersytetu Poznańskiego 6, 61-614 Poznań, Polska

Department of Genetics, Faculty of Biology, Adam Mickiewicz University, Uniwersytetu Poznańskiego 6,
61-614 Poznań, Poland

³ Zakład Biologii Komórki, Wydział Biologii, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu,
ul. Uniwersytetu Poznańskiego 6, 61-614 Poznań, Polska

Department of Cell Biology, Faculty of Biology, Adam Mickiewicz University, Uniwersytetu Poznańskiego 6,
61-614 Poznań, Poland

Plastik w ekosystemach lądowych – nowe wyzwanie dla roślin

Plastic in terrestrial ecosystems – a new challenge for plants

DOI: <http://dx.doi.org/10.12775/KOSMOS.2026.008>

Abstrakt

Plastik jest polimerem o bardzo wszechstronnym zastosowaniu. Jednak jego wszechobecność i trwałość prowadzi do zanieczyszczenia środowiska, którego konsekwencje nie są jeszcze do końca poznane. Obecne w środowisku

cząstki plastiku są uważane za czynnik stresowy wykazujący toksyczny wpływ na rośliny. Ekspozycja na działanie plastiku prowadzi do hamowania kiełkowania nasion, obniżenia wzrostu i wydajności fotosyntetycznej oraz zmian w materiale genetycznym. Ponadto cząstki plastiku mogą negatywnie wpływać na strukturę gleby, co przekłada się na zaburzenia w pobieraniu wody i związków mineralnych przez rośliny. Z kolei negatywny wpływ plastiku na mikroorganizmy glebowe może prowadzić do obniżonej odporności roślin na inne czynniki stresowe.

Badania nad oddziaływaniem plastiku na rośliny mają istotne znaczenie dla ludzi. Rośliny są głównym źródłem pokarmu, a ich obniżony wzrost przekłada się na spadek produkcji żywności. Ponadto, pobierany przez rośliny uprawne plastik może trafić do łańcucha pokarmowego ludzi, stanowiąc zagrożenie dla ich zdrowia.

Słowa kluczowe: polistyren, polietylen, rośliny uprawne, toksyczność, stres oksydacyjny, fotosynteza

Abstract

Plastic is a polymer with highly versatile applications. However, its ubiquity and durability lead to environmental pollution, the consequences of which are not yet fully understood. Plastic particles present in the environment are considered a stress factor that exerts a toxic effect on plants. Exposure to plastic leads to the inhibition of seed germination, a reduction in growth and photosynthetic efficiency, and alterations in genetic material. Furthermore, plastic particles can negatively affect soil structure, which leads to disruptions in water and mineral nutrient uptake by plants. In turn, plastic's negative impact on soil microorganisms can lead to reduced plant resistance to other stressors.

Research on the impact of plastic on plants is of significant importance to humans. Plants are the primary source of food, and their reduced growth is associated with decline in food production. Moreover, plastic taken up by crops can enter the human food chain, posing a threat to human health.

Keywords: polystyrene, polyethylene, crops, toxicity, oxidative stress, photosynthesis

WPROWADZENIE

W pierwszej połowie XX wieku opracowano wytrzymałe, trwałe i stosunkowo tanie tworzywo, które szybko znalazło wszechstronne zastosowania w różnych gałęziach przemysłu – plastik. Obecnie plastik jest stosowany między innymi w budownictwie, rolnictwie i przemyśle transportowym oraz w produkcji opakowań, urządzeń elektrycznych i elektronicznych, zabawek, tekstyliów, a nawet kosmetyków. Jednak trwałość tego tworzywa ma również poważne wady. Długi czas rozkładu plastiku prowadzi do jego akumulacji w środowisku (Kijowska i Koziara 2024; Rana i in., 2025; Stanley i in., 2025). Początkowe badania nad potencjalnym niekorzystnym wpływem plastiku na przyrodę dotyczyły środowiska wodnego. Cząstki plastiku wykryto nie tylko w wodzie, ale także w różnych organizmach wodnych takich jak krewetki, kraby, czy ryby (Thushari i Seneviratna, 2020).

Opisano nawet oddzielną jednostkę chorobową ptaków z rodziny burzykowatych, wywołaną przez plastik. Wspomnianą jednostkę chorobową nazwano plastikozą (ang. *plasticosis*) (Charlton-Howard i in., 2023). W nieco późniejszym czasie plastik odkryto również w glebie w różnych regionach Ziemi (Okoffo i in., 2021). Szczególnie niepokojący jest fakt, że plastik występuje także w glebach rolniczych, skąd może przenikać do roślin uprawnych, a drogą pokarmową również do organizmów ludzi. Niniejsza praca stanowi przegląd współczesnej literatury naukowej dotyczącej pobierania przez rośliny cząstek plastiku i wpływu tych cząstek na wzrost i funkcjonowanie roślin. Szczególną uwagę zwrócono na rośliny uprawne, które stanowią kluczowe źródło pokarmu dla ludzi.

PRODUKCJA I RODZAJE PLASTIKU

Plastik to wyjątkowe odkrycie, bez którego trudno wyobrazić sobie współczesną cywilizację. Jak

wspomniano we wstępie jest to materiał o niezwykle wszechstronnym zastosowaniu, wykorzystywany w produkcji wielu przedmiotów codziennego użytku. Niektóre rodzaje plastiku znalazły zastosowanie również w mniej oczywistych gałęziach przemysłu np. w inżynierii biomedycznej (Rusu i in., 2020). Ta wszechstronność sprawia, że zapotrzebowanie na plastik cały czas gwałtownie rośnie. Dane wskazują, że od roku 1950 do 2018 produkcja plastiku wzrosła aż 180 razy, a w 2022 roku wynosiła ponad 430 milionów ton (Rafey, 2021; Houssini, 2025). Produkcja plastiku jest zróżnicowana w różnych regionach świata, dla przykładu udział Europy i Ameryki Północnej w całkowitej światowej produkcji jest szacowany na 19%, podczas gdy Azja odpowiedzialna jest aż za 49%. W 2013 roku wyprodukowano aż 78 milionów ton jednorazowych opakowań, przewiduje się, że do 2050 roku produkcja jednorazowego plastiku wzrośnie aż czterokrotnie, sięgając 318 milionów ton rocznie (Agenda, 2016).

Masowa produkcja tego tworzywa stanowi znaczące zagrożenie dla środowiska. Aż 99% produkowanego plastiku powstaje z paliw kopalnych, do których należy ropa naftowa, gaz ziemny i węgiel kamienny. Odpowiada to około 9% globalnej konsumpcji tych surowców (Hopewell i in., 2009). Ponadto, trwałość tego tworzywa prowadzi do jego znaczącej akumulacji w środowisku. Szacuje się, że między 1950 a 2015 rokiem

powstało łącznie 6300 Mt odpadów plastiku, z czego 12% zostało spalonych, 9% poddanych procesowi recyklingu, a 10% było recyklingowane więcej niż jeden raz. Oznacza to, że ponad 60% plastiku wyprodukowanego przez te 65 lat, czyli 4900 Mt, zostało wyrzucone i gromadzi się na wysypiskach, lub w środowisku naturalnym (Geyer i in., 2017).

Plastik możemy podzielić na syntetyczny i biopochodny, przy czym syntetyczny stanowi 99% światowej produkcji. Główne rodzaje syntetycznego plastiku, przedstawione w tabeli 1, to politereftalan etylenu (PETE), polietylen wysokiej gęstości (HDPE), polietylen o niskiej gęstości (LDPE), polichlorek winylu (PVC), polistyren (PS) i polipropylen (PP). Chociaż aktualna produkcja bioplastiku jest szacowana jedynie na 1%, zainteresowanie tym tworzywem stale rośnie (Pilapitiya i Ratnayake, 2024). Bioplastik jest produkowany z odnawialnych materiałów takich jak skrobia lub tłuszcze roślinne. W większości przypadków materiał roślinny, z którego powstaje taki plastik pozyskuje się z roślin uprawianych w celach konsumpcyjnych, przykładowo z kukurydzy, soi, manioka, pszenicy lub ziemniaków. W wyniku tego procesu pojawia się konkurencja między produkcją bioplastiku, a produkcją żywności. Jednym z proponowanych rozwiązań problemu jest skupienie się na polimerach pochodzących z alg, do których należy polilaktyd (PLA) czy polihydroksyalkany (PHA). Algi

Tabela 1. Główne typy polimerów obecnych w przemyśle, ich identyfikatory oraz monomery (zgodnie z Resin Identification Code)

Kod identyfikacyjny tworzywa sztucznego	Polimer	Monomer
07-1 PETE	politereftalan etylenu	glikol etylenowy i tereftalan dimetylu
07-2 HDPE	polietylen wysokiej gęstości	etylen
07-3 PVC/V	polichlorek winylu	chlorek winylu
07-4 LDPE	polietylen o niskiej gęstości	etylen
07-5 PP	polipropylen	propylen
07-6 PS	polistyren	styren
07-7 OTHER, np. PLA, PC, ABS, nylon i tworzywa wielowarstwowe	pozostałe tworzywa	różne monomery specyficzne dla danego polimeru

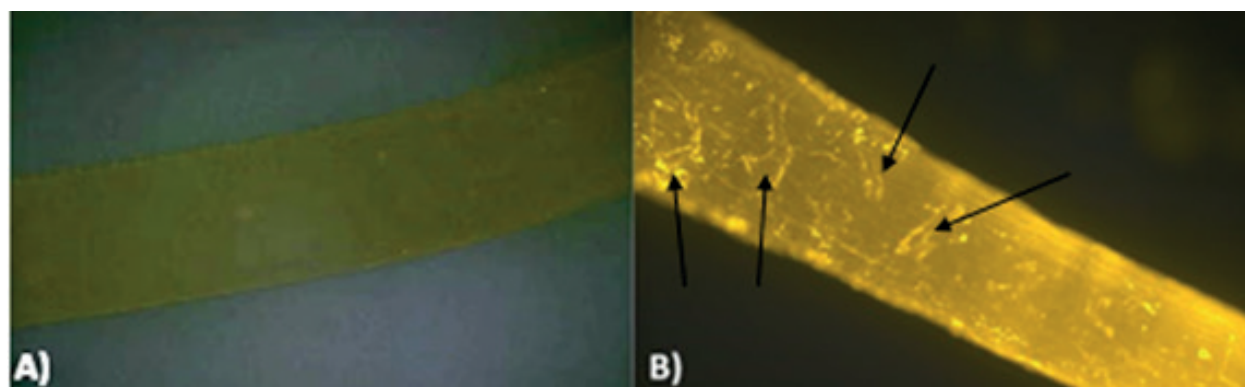
są prostsze w hodowli, potrafią zwiększać masę nawet o 20% w ciągu 24 h, a powstały materiał biologiczny można pozyskiwać przez cały rok (Machmud i in., 2013).

POBIERANIE PLASTIKU PRZEZ ROŚLINY

Nagromadzony w środowisku plastik może przedostawać się do wody, gleby lub unosić się w powietrzu w postaci pyłu. Z czasem większe cząstki plastiku ulegają degradacji do cząstek mikroplastiku (MP) i nanoplastiku (NP). Za cząstki mikroplastiku powszechnie uważa się cząstki o średnicy poniżej 5 mm. O nanoplastiku mówimy, gdy średnica cząstek nie przekracza 100 nm. Mikro- i nanoplastik może stanowić szczególne zagrożenie dla organizmów, ponieważ jest łatwiej pobierany i transportowany w ich wnętrzu (Wang i in., 2022).

Jedną z większych trudności przy badaniu wpływu cząstek plastiku na rośliny jest detekcja tych cząstek w tkankach roślinnych. Ich wykrywanie w roślinach jest utrudnione między innymi ze względu na małe rozmiary, trudność w odróżnieniu od naturalnych składników komórkowych oraz brak wystandaryzowanych metod. Do wykrycia cząstek plastiku w roślinach najpowszechniej stosuje się techniki mikroskopowe. Dla ułatwienia cząstki te często znakuje się np. przy pomocy znaczników fluorescencyjnych (emitujących światło po wzbudzeniu światłem o określonej długości fali) (Li i in., 2020). Przykładowe zdjęcia obrazujące detekcję nanocząstek plastiku na powierzchni korzeni siewek soi zostały

Detekcja cząstek w tkankach roślinnych jest kluczowym etapem badań – pozwala pokazać, w jakim stopniu rośliny pobierają cząstki plasti-



Ryc. 1. Zdjęcia przedstawiające kontrolny korzeń siewki (A, lewa strona) soi oraz korzeń siewki traktowanej przez 72 h nanocząstkami plastiku znakowanymi znacznikiem fluorescencyjnym o stężeniu 100 mg/l (B, prawa strona). Czarne strzałki wskazują przykładowe nanocząstki plastiku. Obrazy zostały uzyskane przy pomocy mikroskopu fluorescencyjnego Axiovert 200M (Zeiss)

ku z otoczenia oraz gdzie je transportują i kumulują. Proces pobierania plastiku przez rośliny zależy od wielu czynników, włączając wielkość cząstek, ich stężenie oraz rodzaj tworzywa. Dane literaturowe pokazują, że do tkanek roślinnych łatwiej przedostają się mniejsze cząstki. Badania na zawiesinie komórkowej tytoniu wykazały, że do komórek przenikają cząstki znakowanego fluorescencyjnie polistyrenu o średnicy 20 i 40 nm. Z kolei cząstki o średnicy 100 nm nie były już wykrywane we wnętrzu komórek (Bandman i in.,

2012). Nanocząstki polistyrenu zostały wykryte nie tylko w zawiesinie komórkowej, ale również w tkankach całych roślin takich jak ryż siewny (*Oryza sativa*), kukurydza zwyczajna (*Zea mays*), ogórek siewny (*Cucumis sativus*), cebula zwyczajna (*Allium cepa*), sałata siewna (*Lactuca sativa*), kapusta właściwa (*Brassica rapa*), czy pieprzyc siewna (*Lepidium sativum*). Cząstki plastiku są najczęściej pobierane z gleby przez korzenie i transportowane do innych części roślin wiązkami przewodzącymi. Chociaż pobiera-

nie plastiku z gleby przez korzenie wydaje się być najpowszechniejszą drogą, szereg badań pokazuje, że cząstki plastiku mogą przedostawać się do wnętrza roślin również przez liście, a nawet owoce (Azeem i in., 2021; Wang i in., 2022). Dla przykładu, niedawne badania udokumentowały przedostawanie się cząstek mikro- i nanoplastiku przez skórę truskawek. Proces ten był powiązany ze spadkiem wielkości i zwiększoną kwasowością owoców (Zhang i in., 2026). We wnętrzu rośliny cząstki plastiku mogą być transportowane do jej różnych części i przedostawać się do komórek. W badaniach na cebuli pokazano, że nanocząstki plastiku są obecne nawet w jądrach komórkowych, co jest szczególnie niepokojące ze względu na możliwość interakcji z zawartym w jądrze komórkowym materiałem genetycznym. Interakcje te mogą potencjalnie prowadzić do uszkodzeń materiału genetycznego (Giorgetti i in., 2020). Większe cząstki plastiku są słabiej pobierane przez rośliny. Mogą jednak przedostawać się do ich wnętrza np. przez uszkodzenia, rany i pęknięcia. Ponadto cząstki plastiku mogą osadzać się na nasionach, korzeniach i liściach utrudniając pobieranie wody i związków mineralnych (Wang i in., 2022). Co ciekawe obecność plastiku w glebie wpływa na kierunek wzrostu korzeni. Badania na 29 gatunkach roślin pokazały, że generalnie rośliny unikały regionów gleby z wysoką zawartością plastiku modulując wzrost korzeni w kierunku regionów wolnych od zanieczyszczeń (Speißer i Kleunen, 2023).

TOKSYCZNY WPŁYW PLASTIKU NA ROŚLINY

Cząstki plastiku są uważane za czynnik stresowy, który negatywnie wpływa na wzrost, rozwój oraz funkcjonowanie roślin. W licznych badaniach wykazano, że ich obecność w środowisku może prowadzić do ograniczenia kiełkowania nasion, zahamowania wydłużania korzeni, obniżenia zawartości chlorofilu, zaburzeń w poborze składników odżywczych, a także do modyfikacji ekspresji genów oraz ogólnego spowolnienia wzrostu roślin. W konsekwencji dochodzi do zakłócenia podstawowych procesów rozwoju roślin (Maity i Pramanick, 2020; Ekner-Grzyb i in., 2022; Mészáros i in., 2023; Yu i in., 2024).

Jednym z kluczowych mechanizmów toksycznego oddziaływania mikroplastiku jest jego wpływ na system korzeniowy. Korzenie stanowią główne miejsce kontaktu rośliny z zanieczyszczeniami, a cząstki MP mogą akumulować się na ich powierzchni oraz wnikać do tkanek. Badania wykazały, że cząstki polietylenu o średnicy 25 µm mogą blokować dostępną przestrzeń dla wzrostu korzeni bocznych oraz przylegać do ich powierzchni, co prowadzi do ograniczenia pobierania wody i składników odżywczych oraz zahamowania wzrostu roślin (Liu i in., 2025). Kolejnym ważnym mechanizmem jest wpływ MP na substancje wydzielane przez korzenie. W odpowiedzi na stres środowiskowy rośliny wydzielają niskocząsteczkowe kwasy organiczne, które odgrywają istotną rolę w adaptacji do niekorzystnych warunków. Jednak obecność MP może prowadzić do zmniejszenia całkowitej ilości tych związków oraz zaburzenia ich składu (Liu i in., 2025). Zmiany te wpływają na zdolność roślin do regulacji środowiska ryzosfery oraz ograniczają ich odporność na stres.

Badania wskazują, że obecność MP w glebie skutkuje obniżeniem zdolności kiełkowania nasion, przy czym efekt ten ulega nasileniu wraz ze wzrostem stężenia cząstek plastiku w podłożu. Dla przykładu wykazano, że w przypadku soi (*Glycine max*) obserwuje się wyraźny spadek zdolności kiełkowania w warunkach zwiększonego stężenia MP w glebie w porównaniu z próbami kontrolnymi (Li i in., 2021). Spadek zdolności kiełkowania jest bezpośrednio zależny od uszkodzeń, których nasilenie zależy od wielkości cząstek, im mniejsze frakcje, tym większą wykazują zdolność penetracji tkanek roślinnych, co przekłada się na silniejsze działanie hamujące na procesy kiełkowania i wzrostu (Yu i in., 2024). W przypadku sałaty siewnej wykazano, że wzrastające stężenie MP powoduje zmniejszenie masy liści, wysokości roślin oraz liczby liści (Mészáros i in., 2023). Co istotne, toksyczne działanie mikroplastiku nie zawsze wymaga jego bezpośredniego przenikania do tkanek roślinnych. Negatywny wpływ plastiku może wynikać także z oddziaływania powierzchniowego na rośliny. Większe cząstki mogą blokować pory w łupinie nasiennej, utrudniając dostęp wody i gazów, co bezpośrednio ogranicza kiełko-

wanie i wzrost młodych siewek (Maity i Pramanick, 2020).

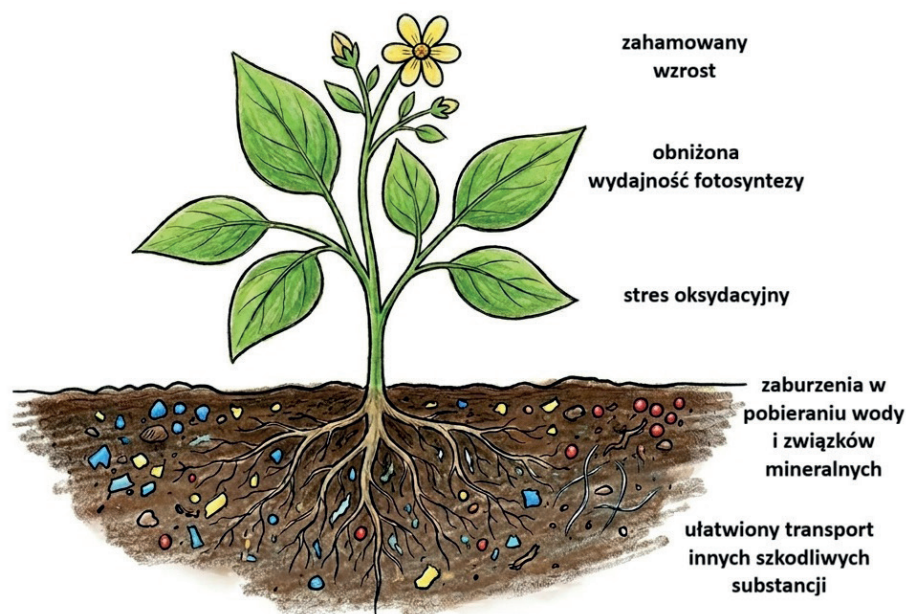
Obecność MP w środowisku wpływa istotnie na przebieg kluczowych procesów fizjologicznych roślin, w szczególności wykazuje silny wpływ na proces fotosyntezy. Wykazano, że ekspozycja na cząstki plastiku jest powiązana ze spadkiem wydajności fotosyntezy, a w konsekwencji, z obniżeniem produkcji energii oraz związków organicznych (Maity i Pramanick, 2020; Ekner-Grzyb i in., 2022; Mészáros i in., 2023). Zahamowanie procesu fotosyntezy może wynikać, przynajmniej częściowo, z degradacji chlorofilu. W badaniach eksperymentalnych wykazano, że wysokie stężenia polietylenu mogą obniżać zawartość chlorofilu nawet o ponad 30%, co bezpośrednio przekłada się na spadek biomasy oraz zahamowanie wzrostu roślin (Liu i in., 2025). Co więcej, MP może doprowadzić do zmniejszenia powierzchni liści, zwłaszcza przy wyższych stężeniach, co bezpośrednio ogranicza zdolność roślin do asymilacji dwutlenku węgla. Obserwuje się redukcję całkowitej biomasy roślin, szczególnie w późniejszych fazach ich rozwoju, co wskazuje na długofalowy charakter oddziaływania mikroplastiku na organizmy roślinne (Li i in., 2021).

Kluczowym mechanizmem leżącym u podstaw toksycznego oddziaływania plastiku na rośliny jest indukcja stresu oksydacyjnego. Mikroplastik oraz nanoplastik prowadzą do zwiększenia produkcji reaktywnych form tlenu (RFT), co z kolei skutkuje nasileniem występowania efektów cytotoksycznych i genotoksycznych. Reaktywne formy tlenu w warunkach fizjologicznych pełnią istotne funkcje sygnalizacyjne. Jednak ich nadmiar prowadzi do uszkodzeń struktur komórkowych, w tym lipidów, białek oraz kwasów nukleinowych. Szczególnie istotnym procesem jest peroksydacja lipidów błonowych, która prowadzi do utraty integralności błon komórkowych oraz zaburzeń transportu substancji (Ekner-Grzyb i in., 2022). Nadmiar RFT może również prowadzić do uszkodzenia materiału genetycznego. U roślin narażonych na działanie plastiku obserwuje się liczne zaburzenia w przebiegu cyklu komórkowego, w tym spadek aktywności mitotycznej oraz występowanie nieprawidłowo-

ści chromosomowych. Do najczęściej opisywanych należą powstawanie mikrojąder, zaburzenia segregacji chromosomów oraz deformacje struktury chromatyny. Zjawiska te wskazują na zdolność nanoplastiku do uszkodzania materiału genetycznego, co może prowadzić do mutacji oraz zaburzeń funkcjonowania komórek. Długofalowe konsekwencje takich zmian mogą obejmować obniżenie żywotności roślin oraz zaburzenia ich rozwoju (Ekner-Grzyb i in., 2022).

Toksyczność plastiku może mieć również charakter pośredni, wynikający z jego wpływu na środowisko glebowe. Cząstki mikroplastiku przyczyniają się do zmian właściwości fizykochemicznych gleby, prowadząc między innymi do pogorszenia jej napowietrzenia, zmiany pH, ograniczenia dostępności składników odżywczych oraz aktywności enzymatycznej. Prowadzi to do ograniczenia dostępności składników odżywczych dla roślin, a także wpływa negatywnie na mikroorganizmy glebowe, odgrywające kluczową rolę w utrzymaniu jej żyzności. Przykładowo, zmiany w zespołach mikroorganizmów mogą wpływać na proces wiązania azotu (N_2), co bezpośrednio przekłada się na dostępność składników odżywczych dla roślin (Maity i Pramanick, 2020; Mészáros i in., 2023). Oddziaływanie plastiku na środowisko glebowe obejmuje również zmiany w strukturze gleby oraz zdolności retencji wody (Li i in., 2021). Ponadto cząstki plastiku mogą zaburzać procesy obiegu materii, w tym cykle biogeochemiczne (Yu i in., 2024). Istotnym elementem toksyczności plastiku jest także jego zdolność do transportowania innych zanieczyszczeń. Cząstki mikroplastiku mogą adsorbować na swojej powierzchni metale ciężkie oraz pestycydy, a następnie wprowadzać je do środowiska zasiedlanego przez roślinę, nasilając efekt toksyczny (Maity i Pramanick, 2020). Przykładem jest wykazana w badaniach nad ryżem interakcja MP z arsenem. W cytowanych badaniach pokazano, że jednoczesna ekspozycja na oba czynniki prowadziła do silniejszego spadku biomasy części nadziemnych niż w przypadku działania samego arsenu (Mészáros i in., 2023).

Negatywny wpływ cząstek plastiku na rośliny został zobrazowany na Ryc. 2.



Ryc. 2. Schemat przedstawiający negatywny wpływ cząstek plastiku na rośliny obejmujący zaburzenia w pobieraniu wody i związków mineralnych, ułatwione pobieranie niektórych szkodliwych substancji, np. metali ciężkich, obniżoną wydajność procesu fotosyntezy i stres oksydacyjny, prowadzące do obniżenia wzrostu roślin. Schemat wykonany przy pomocy narzędzia AI (<https://gemini.google.com/>), zmodyfikowany

PODSUMOWANIE I PERSPEKTYWY DALSZEGO ROZWOJU BADAŃ

Podsumowując, mikroplastik i nanoplastik stanowią nową, wciąż niedostatecznie poznaną grupę zanieczyszczeń środowiska. Ich obecność w glebie prowadzi do szeregu negatywnych efektów, obejmujących, m.in. zaburzenia kiełkowania, ograniczenie wzrostu, obniżenie wydajności fotosyntezy oraz indukcję stresu oksydacyjnego. Dodatkowo mikroplastik oddziałuje pośrednio na rośliny poprzez modyfikację właściwości gleby oraz wpływ na mikroorganizmy glebowe.

Pomimo dynamicznego rozwoju badań w tym obszarze, nadal istnieją istotne luki w wiedzy. W szczególności ograniczenia metodologiczne związane z detekcją mikroplastiku w tkankach roślinnych, utrudniają jednoznaczną ocenę skali ich akumulacji. Niewystarczająco poznane pozostają również mechanizmy transportu tych cząstek w roślinach oraz ich długo-

terminowy wpływ na metabolizm i stabilność genomu. W perspektywie dalszych lat kluczowe będzie opracowanie czułych metod analitycznych umożliwiających ilościową oraz jakościową ocenę obecności plastiku w roślinach. Istotne będzie prowadzenie badań w warunkach zbliżonych do naturalnych, które pozwolą lepiej odzwierciedlić rzeczywiste narażenie roślin uprawnych na mikroplastik. Szczególnej uwagi wymagają także interakcje plastiku z innymi zanieczyszczeniami środowiska. W kontekście ograniczania skali zanieczyszczenia środowiska istotnym kierunkiem wydaje się również zainteresowanie w źródło problemu, czyli masową produkcję tworzyw sztucznych. Obecna dominacja polimerów syntetycznych opartych na paliwach kopalnych sprzyja powstawaniu trwałych odpadów, które ulegają fragmentacji do MP i NP. W związku z tym szczególnego znaczenia nabiera rozwój bioplastików otrzymywanych z odnawialnych surowców, takich jak biomasa roślinna czy algi.

Niezwykle istotna jest ocena znaczenia MP i NP w kontekście bezpieczeństwa żywności. Wyniki dotychczasowych badań wskazują, że związki chemiczne obecne w tworzywach sztucznych mogą negatywnie oddziaływać na zdrowie człowieka, przyczyniając się między innymi do zaburzeń hormonalnych, metabolicznych oraz immunologicznych (Monclús i in., 2025). Pogłębienie naszej wiedzy na ten temat może stanowić podstawę do opracowania strategii ograniczającej postępujące zanieczyszczenie środowiska plastikami, a co z tego wynika, minimalizację jego negatywnego wpływu na rolnictwo oraz zdrowie ludzi.

Jednocześnie należy zaznaczyć, że oddziaływanie MP i NP na rośliny nie jest jednoznacznie negatywne. Zaobserwowano, że ich wpływ na rośliny ma charakter złożony, niekiedy wykazujący brak istotnych efektów toksycznych (Urbański i in., 2024). Skutki wpływu tworzyw sztucznych na rośliny zależą między innymi od rodzaju polimeru, wielkości cząstek, stężenia oraz gatunku rośliny (Azeem i in., 2021; Jadhav i Medyńska-Juraszek, 2024).

OŚWIADCZENIA AUTORÓW

Wszyscy autorzy deklarują wkład w powstawanie artykułu, zaakceptowali kolejność autorów i ostateczną wersję artykułu.

Autorzy deklarują brak konfliktu interesów.

BIBLIOGRAFIA

- Agenda, I., 2016, January. The new plastics economy rethinking the future of plastics (Vol. 36). *The World Economic Forum*.
- Azeem, I., Adeel, M., Ahmad, M.A., Shakoor, N., Jiangcuo, G.D., Azeem, K., Ishfaq, M., Shakoor, A., Ayaz, M., Xu, M., & Rui, Y., 2021. Uptake and Accumulation of Nano/Microplastics in Plants: A Critical Review. *Nanomaterials* 11, 2935. <https://doi.org/10.3390/nano11112935>
- Bandmann, V., Müller, J.D., Köhler, T., Homann, U., 2012. Uptake of fluorescent nano beads into BY2-cells involves clathrin-dependent and clathrin-independent endocytosis. *FEBS Letters* 19;(20), 3626–32. <https://doi.org/10.1016/j.febslet.2012.08.008>
- Charlton-Howard, H.S., Bond, A.L., Rivers-Auty, J., Lavers, J.L., 2023. 'Plasticosis': Characterising macro- and microplastic-associated fibrosis in seabird tissues. *Journal of Hazardous Materials* 450, 131090. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131090>
- Datashvili, T., Das, D., Sam, S.T., 2016. Natural Polymers: Industry techniques and applications. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-26414-1>
- Ekner-Grzyb, A., Duka, A., Grzyb, T., Lopes, I., & Chmielowska-Bąk, J., 2022. Plants oxidative response to nanoplastic. *Frontiers in Plant Science*, 13, 1027608. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1027608>
- Geyer, R., Jambeck, J., Lav, K.L., 2017 Production, use, and fate of all plastics ever made. *Sci. Adv.* 3,e1700782. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>
- Giorgetti, L., Spanò, C., Muccifora, S., Bottega, S., Barbieri, F., Bellani, L., Ruffini Castiglione M., 2020. Exploring the interaction between polystyrene nanoplastics and *Allium cepa* during germination: Internalization in root cells, induction of toxicity and oxidative stress. *Plant Physiology and Biochemistry*, 149:170–177. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.02.014>
- Hopewell, J., Dvorak, R., Kosior, E., 2009. Plastics recycling: challenges and opportunities. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. 364, 2115–2126. <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0311>
- Houssini, K., Li, J., Tan, Q., 2025. Complexities of the global plastics supply chain revealed in a trade-linked material flow analysis. *Commun Earth Environ.* 6, 257. <https://doi.org/10.1038/s43247-025-02169-5>
- Jadhav, B., Medyńska-Juraszek, A., 2024. Microplastic and Nanoplastic in Crops: Possible Adverse Effects to Crop Production and Contaminant Transfer in the Food Chain. *Plants*, 13(17), 2526. <https://doi.org/10.3390/plants13172526>
- Kijowska, M., Koziara, N., 2024. Mikroplastik w kosmetykach – wpływ na nasze życie. *Analit* 14, 83–87.
- Li, B., Huang, S., Wang, H., Liu, M., Xue, S., Tang, D., Cheng, W., Fan, T., Yang, X., 2021. Effects of plastic particles on germination and growth of soybean (*Glycine max*): A pot experiment under field condition. *Environmental Pollution*, 272, 116418. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116418>

- Li, L., Luo, Y., Peijnenburg, W.J.G.M., Li, R., Yang, J., Zhou, Q., 2020. Confocal measurement of microplastics uptake by plants. *MethodsX*, 7, 100750.
<https://doi.org/10.1016/j.mex.2019.11.023>
- Liu, W., Huang, J., Feng, F., Liang, C., Rong, S., Ji, C., Li, D., Wang, S., 2025. Toxic effects of larger sized polyethylene microplastics on cucumber root secretion and oxidative stress. *Scientific Reports*.
<https://doi.org/10.1038/s41598-025-25800-z>
- Machmud, M.N., Fahmi, R., Abdullah, R., Kokar-kin, C., 2013. Characteristics of Red Algae Bioplastics/Latex Blends under Tension. *International Journal of Science and Engineering*, 5(2), 81–88.
<https://doi.org/10.12777/ijse.5.2.81-88>
- Maity, S., Pramanick, K., 2020. Perspectives and challenges of micro/nanoplastics-induced toxicity with special reference to phytotoxicity. *Global Change Biology*, 26, 3241–3250.
<https://doi.org/10.1111/gcb.15074>
- Mészáros, E., Bodor, A., Kovács, E., Papp, S., Kovács, K., Perei, K., & Feigl, G., 2023. Impacts of plastics on plant development: Recent advances and future research directions. *Plants*, 12(18), 3282.
<https://doi.org/10.3390/plants12183282>
- Monclús, L., Arp, H.P.H., Groh, K.J., Faltynkova, A., Løseth, M.E., Muncke, J., Wang, Z., Wolf, R., Zimmermann, L., Wagner, M., 2025. Mapping the chemical complexity of plastics. *Nature*, 643(8071), 349–355.
<https://doi.org/10.1038/s41586-025-09184-8>
- Okoffo, E.D., O'Brien, S., Ribeiro, F., Burrows, S.D., To-apanta, T., Rauert, C., O'Brien, J.W., Tschärke, B.J., Wang, X., Thomas, K.V., 2021. Plastic particles in soil: state of the knowledge on sources, occurrence and distribution, analytical methods and ecological impacts. *Environmental Science: Processes and Impacts*, 23, 240–274.
<https://doi.org/10.1039/D0EM00312C>
- Pilapitiya, N.T., Ratnayake, A.S., 2024. The world of plastic waste: A review. *Cleaner Materials*, Volume 11, 100220.
<https://doi.org/10.1016/j.clema.2024.100220>
- Rafey, A., 2021. A review of plastic waste management in India – challenges and opportunities. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*.
<https://doi.org/10.1080/03067319.2021.1917560>
- Rana, R., Mishra, A., Goswami, R., Ahmad, A., Ahmad, W., 2025. Plastics and the environment: challenges, impacts, and pathways to sustainability. *Integrated Environmental Assessment and Management*, vjaf193.
<https://doi.org/10.1093/inteam/vjaf193>
- Rusu, L., Ardelean, L., Jitariu, A. & Miu, C. Streian, C., 2020. An Insight into the Structural Diversity and Clinical Applicability of Polyurethanes in Biomedicine. *Polymers*. 12. 1197.
<https://doi.org/10.3390/polym12051197>
- Speißer, B., van Kleunen, M., 2023. Plants forage for soil patches free of plastic pollution but cannot bag the profits. *Scientific Reports* 13, 18506.
<https://doi.org/10.1038/s41598-023-45662-7>
- Stanley, J., Culliton, D., Jovani-Sancho, A.-J., Neves, A.C., 2025. The Journey of Plastics: Historical Development, Environmental Challenges, and the Emergence of Bioplastics for Single-Use Products. *Eng* 6, 17.
<https://doi.org/10.3390/eng6010017>
- Thushari, G.G.N., Senevirathna, J.D.M., 2020. Plastic pollution in the marine environment. *Heliyon* 27;6(8):e04709.
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04709>
- Urbański, M., Yiğit, B., Ekner-Grzyb, A., Chmielowska-Bąk, J., 2024. Physiological and oxidative status of soybean seedlings exposed to short term treatment with polystyrene nanoparticles. *Ecotoxicology*, 34, 241–247.
<https://doi.org/10.1007/s10646-024-02833-0>
- Wang, F., Feng, X., Liu, Y., Adams, C.A., Sun, Y., & Zhang, S. 2022. Micro(nano)plastics and terrestrial plants: Up-to-date knowledge on uptake, translocation, and phytotoxicity. *Resources Conservation and Recycling*, 185, 106503.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106503>
- Zhang, C., Li, S., Wang, H., Li, X., An, L., Fen, J., 2026. Microplastics enter strawberry fruit tissues directly through the epidermis. *Journal of Hazardous Materials*, 509, 141994.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2026.141994>