

DANUTA SOLECKA 

e-mail: d.solecka@uw.edu.pl

Zakład Ekofizjologii Molekularnej Roślin, Instytut Biologii Eksperymentalnej i Biotechnologii Roślin,
Wydział Biologii, Uniwersytet Warszawski, Miecznikowa 1, 02-096 Warszawa, Polska

Department of Plant Molecular Ecophysiology, Institute of Plant Experimental Biology and Biotechnology,
Faculty of Biology, University of Warsaw, Miecznikowa 1, 02-096 Warsaw, Poland

Nanoceluloza roślinna – ekologiczny polimer przyszłości?

Plant nanocellulose – the eco-friendly polymer of our future?

DOI: <https://doi.org/10.12775/KOSMOS.2025.023>

Abstrakt

Artykuł poświęcony jest nanocelulozie roślinnej jako perspektywicznemu, ekologicznemu materiałowi przyszłości. Przedstawia właściwości, metody pozyskiwania oraz zastosowania różnych typów nanocelulozy, podkreślając ich odnawialność, biodegradowalność i niski wpływ na środowisko. W artykule omówiono źródła surowców, techniki ekstrakcji oraz potencjał modyfikacji chemicznej, która umożliwia dostosowanie nanocelulozy do potrzeb medycyny, inżynierii materiałowej, energetyki, przemysłu spożywczego czy remediacji środowiskowej. Szczególną uwagę poświęcono zastosowaniom w medycynie (opatrunki, rusztowania tkankowe) i technologii magazynowania energii (superkondensatory, materiały PCM). Artykuł analizuje także aspekty związane z regulacjami prawnymi oraz wyzwania technologiczne i ekonomiczne związane z wdrażaniem nanocelulozy na skalę przemysłową, wskazując na jej strategiczne znaczenie dla gospodarki o obiegu zamkniętym i zrównoważonego rozwoju.

Słowa kluczowe: biopolimery, inżynieria środowiska, magazynowanie energii, nanoceluloza roślinna, nanotechnologia, zastosowania medyczne

Abstract

The article focuses on plant nanocellulose as a promising green material for the future. It presents the properties, extraction methods and applications of various types of nanocellulose. The article highlights the renewability, biodegradability and low environmental impact of these materials. It also discusses the sources of raw materials, extraction techniques, and the potential for chemical modification to adapt nanocellulose for use in medicine, materials engineering, energy production, the food industry, and environmental remediation. Particular attention is given to its use in medicine, for example in dressings and tissue scaffolds, and in energy storage technology, for instance in supercapacitors and PCM materials. Finally, the article examines the regulatory aspects, technological challenges and economic considerations of implementing nanocellulose on an industrial scale, emphasizing its strategic importance for a circular economy and sustainable development.

Keywords: bio-based polymers, biomedical applications, energy storage materials, environmental remediation, nanotechnology, plant nanocellulose

WPROWADZENIE

W dobie rosnącej potrzeby poszukiwania zrównoważonych, odnawialnych i przyjaznych dla środowiska materiałów, szczególne zainteresowanie budzi nanoceluloza – naturalny nanomateriał otrzymywany głównie z biomasy roślinnej lub produkowany przez mikroorganizmy. Nanoceluloza łączy w sobie doskonałe właściwości mechaniczne, dużą powierzchnię właściwą, lekkość, przezroczystość, niską toksyczność oraz łatwość modyfikacji chemicznej (James i in., 2024; Shah i Hakim, 2025; Yang i in., 2024b). Dzięki temu znajduje szerokie zastosowanie w biomedycynie, inżynierii materiałowej, ochronie środowiska, przemyśle spożywczym, elektronice czy energetyce (Li i in., 2025; Lv i in., 2024; Olędzki i Walaszczyk, 2020).

Nanoceluloza posiada również istotną wartość ekologiczną, ponieważ w kontekście współczesnych wyzwań związanych z ochroną środowiska i redukcją emisji gazów cieplarnianych, jako materiał w pełni biodegradowalny i nietoksyczny, nie generuje trwałych zanieczyszczeń w środowisku. Może być wytwarzana z odnawialnych źródeł, w tym z szybko rosnących roślin, odpadów rolniczych, spożywczych czy resztek celulozowych z przemysłu papierniczego, co przyczynia się do efektywnego zagospodarowania biomasy i ograniczenia ilości odpadów, co wpisuje się w koncepcję gospodarki o obiegu zamkniętym (Olędzki i Walaszczyk, 2020; Shah

i Hakim, 2025). Produkcja nanocelulozy metodami „zielonej chemii” – z ograniczonym użyciem agresywnych chemikaliów – dodatkowo zmniejsza jej ślad środowiskowy i czyni ją poszukiwaną alternatywą dla syntetycznych polimerów ropopochodnych (Yang i in., 2024c).

Obecne badania nad nanocelulozą koncentrują się nie tylko na ulepszaniu metod jej otrzymywania – obejmujących zarówno procesy mechaniczne, chemiczne, biologiczne, jak i hybrydowe – ale również na poszerzaniu zakresu zastosowań tego materiału (Liu i in., 2025; Lv i in., 2024b; Yang i in., 2024b). Przykładowo, nanoceluloza może pełnić funkcję rusztowań w inżynierii tkankowej (Yang i in., 2024a), nośników leków (Islam i in., 2014), komponentów czujników i elektrod (Li i in., 2025; Lv i in., 2024a), stabilizatorów emulsji, nośników ciepła (Liu i in., 2025) czy naturalnych dodatków do żywności o przedłużonej trwałości (Olędzki i Walaszczyk, 2020). Innowacyjne połączenia nanocelulozy z innymi nanomateriałami (np. grafenem, tlenkami metali, nanocząstkami srebra) prowadzą do powstawania nowej klasy funkcjonalnych biomateriałów (James i in., 2024; Lv i in., 2024).

Celem artykułu jest przedstawienie aktualnego stanu wiedzy na temat właściwości, metod otrzymywania oraz zastosowań nanocelulozy w różnych sektorach nauki i przemysłu. Artykuł obejmuje również klasyfikację typów nanocelulozy i stosowanych modyfikacji oraz per-

spektywy komercyjnego rozwoju tej technologii. Szczególną uwagę poświęcono nanocelulozie roślinnej, jej zastosowaniom medycznym oraz w przechowywaniu energii, które wydają się być najdynamiczniej rozwijającymi się obszarami wprowadzania nanocelulozy (Liu i in., 2025; Shah i Hakim, 2025; Yang i in., 2024a). Osoby zainteresowane właściwościami i wykorzystaniem nanocelulozy pochodzenia bakteryjnego, mogą rozwinąć swoją wiedzę zapoznając się z informacjami zamieszczonymi w zeszłorocznym zeszycie „Kosmosu” (Snopek i in., 2024).

KLASYFIKACJA NANOCELULOZY

Nanoceluloza to termin zbiorczy określający formy celulozy o strukturze nanometrycznej, (czyli o jednym z wymiarów poniżej 100 nm), uzyskiwany z biomasy roślinnej, alg, grzybów, a także w drodze biosyntezy mikrobiologicznej (Olędzki i Walaszczyk, 2020). Charakteryzuje się wysoką powierzchnią właściwą, dużym stosunkiem wytrzymałości do masy, wysoką krystalicznością oraz bogactwem grup hydroksylowych, co umożliwia jej dalsze dostosowanie chemiczne (tzw. funkcjonalizacja, James i in., 2024; Yang i in., 2024c).

Nanoceluloza jest nietoksyczna, odnawialna i biodegradowalna, dzięki czemu wpisuje się w założenia zrównoważonego rozwoju. W zależności od metody pozyskiwania i źródła surowca, wyróżnia się kilka typów nanocelulozy roślinnej, które różnią się strukturą, wła-

ściwościami i potencjalnymi zastosowaniami (Tab. 1).

STRUKTURA I WŁAŚCIWOŚCI NANOCELULOZY

Nanoceluloza roślinna to materiał pochodzenia naturalnego, w którym można wyróżnić nanometryczne struktury celulozowe – nanowłókna (CNF) i nanokryształy (CNC). Występuje również nanoceluloza bakteryjna (BNC), wytwarzana przez mikroorganizmy. Główne źródło nanocelulozy stanowią ściany komórkowe roślin i glonów, wielowarstwowe, złożone struktury, zawierająca głównie polisacharydy, ligninę oraz białka. Jej podstawową jednostką strukturalną są mikrofibryle celulozowe – pakiety równolegle ułożonych łańcuchów β -1,4-głukozy, połączonych wiązaniami wodorowymi. Mikrofibryle tworzą szkielet mechaniczny ściany i są odpowiedzialne za jej wytrzymałość i sztywność (Solecka, 2015; Somerville i in., 2004). W skład pierwotnej ściany komórkowej wchodzi również hemicelulozy, głównie ksyloglukany, które wiążą się z powierzchnią mikrofibrili celulozy i regulują ich organizację przestrzenną. Pektyny, zbudowane głównie z kwasu galakturonowego, nadają ścianie elastyczność oraz uczestniczą w adhezji komórek roślinnych. W ścianach wtórnych, szczególnie u roślin drzewiastych, obecna jest lignina, która dodatkowo usztywnia strukturę (Solecka, 2015).

Celuloza – najpowszechniej występujący polisacharyd w biosferze – była przez dziesię-

Tab. 1. Formy nanocelulozy roślinnej, ich właściwości i zastosowania

Forma nanocelulozy	Proces produkcji	Właściwości	Zastosowania
Nanowłókna celulozowe (CNF)	Homogenizacja wysokociśnieniowa, mikrofluidyzacja	Długie, elastyczne włókna, znakomite właściwości mechaniczne	Wzmocnienia kompozytów, materiały strukturalne, opakowania, motoryzacja, lotnictwo, farby, powłoki, kosmetyki, przemysł spożywczy
Nanokryształy celulozy (CNC)	Intensywna hydroliza kwasowa	Wysoka krystaliczność, jednolita budowa prętowa, dwójłomność, iryzacja, unikalne właściwości optyczne	Powłoki, folie, optoelektronika, systemy dostarczania leków, inżynieria tkankowa, hydrożele, rusztowania

ciolecia wykorzystywana głównie w przemyśle papierniczym i tekstylnym. Jednak dopiero rozwój nanotechnologii i nowoczesnych metod izolacji pozwolił na uzyskanie jej nanostrukturalnych form (Yang i in., 2024b). Materiały te charakteryzują się wyjątkowym stosunkiem wytrzymałości do masy oraz możliwością tworzenia kompozytów i struktur o określonych właściwościach (James i in., 2024; Lv i in., 2024).

Z punktu widzenia produkcji nanocelulozy, istotna jest struktura mikrofibryli celulozowych – składają się one z regionów krystalicznych i amorficznych. Hydroliza kwasowa umożliwia selektywne usunięcie części amorficznej, dając w efekcie sztywne, krótkie nanokryształy (CNC). Z kolei metody mechaniczne pozwalają na uzyskanie nanowłókien (CNF) poprzez rozwarstwienie mikrofibryli. Właściwości ściany komórkowej roślin, takie jak procentowy udział ligniny i hemiceluloz, wpływają na wybór metody ekstrakcji oraz jakość otrzymanej nanocelulozy (James i in., 2024).

Nanowłókna celulozowe (CNF)

Nanowłókna celulozowe (ang. Cellulose Nanofibrils, CNF) to długie, elastyczne włókna o średnicy 5–50 nm i długości sięgającej kilku mikrometrów. Powstają głównie w wyniku obróbki mechanicznej, takiej jak homogenizacja wysokociśnieniowa, ultradźwięki czy mielenie, często wspomaganą obróbką chemiczną (Yang i in., 2024b). CNF zawierają zarówno fazę amorficzną, jak i krystaliczną. Są dobrze rozproszone w wodzie, co ułatwia ich przetwórstwo, a ich wysokie właściwości reologiczne sprawiają, że świetnie nadają się do produkcji żeli, folii czy kompozytów.

Nanokryształy celulozowe (CNC)

Nanokryształy celulozowe (ang. Cellulose Nanocrystals, CNC) to krótkie, sztywne, igielkowate struktury o średnicy 3–20 nm i długości 100–500 nm. Otrzymywane są zwykle poprzez hydrolizę kwasową (np. siarkową), która selektywnie usuwa części amorficzne z włókien celulozy, pozostawiając uporządkowane regiony

krystaliczne (Islam i in., 2014). CNC cechują się bardzo wysoką krystalicznością (do 90%) oraz dużą sztywnością. Ich regularna struktura czyni je idealnym dodatkiem wzmacniającym w nanokompozytach. W niektórych pracach można również spotkać określenie „cellulose nanowhiskers” (CNW, np. Al-Zu’bi i Fan, 2025; Hutten, 2016) na określenie nanokryształów celulozy.

Nanoceluloza bakteryjna (BNC)

Nanoceluloza bakteryjna, określana także jako bionanoceluloza, to forma nanocelulozy syntetyzowana przez bakterie, głównie z rodzaju *Komagataeibacter xylinus* (Olędzki i Walaszczyk, 2020). W przeciwieństwie do roślinnych form celulozy, BNC powstaje jako polimer wolny od ligniny i hemiceluloz, co ułatwia jej dalsze wykorzystanie bez potrzeby intensywnej obróbki (Tab. 2). Charakteryzuje się bardzo wysoką czystością chemiczną, wytrzymałością mechaniczną, elastycznością oraz dużą zawartością wody. Struktura przestrzenna BNC przypomina sieć nanowłókien o średnicy 20–100 nm, co czyni ją atrakcyjnym materiałem m.in. w biomedycynie i inżynierii tkankowej (Lv i in., 2024; Yang i in., 2024a).

WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNE I CHEMICZNE NANOCELULOZY

Struktura nanocelulozy zależy od jej rodzaju – CNC są sztywne i krystaliczne, CNF mają bardziej włóknistą i elastyczną strukturę, zaś nanoceluloza bakteryjna tworzy gęste, trójwymiarowe sieci. Wszystkie typy wykazują dużą powierzchnię właściwą (do kilkuset m²/g), co wpływa na ich zdolność sorpcyjną i reaktywność (Lv i in., 2024b).

Nanoceluloza, zwłaszcza CNC i BNC, wykazuje doskonałą wytrzymałość mechaniczną, np. CNC osiąga moduł Younga rzędu 100–150 GPa, co jest porównywalne z wartościami dla stali, przy jednoczesnym znacznie niższym ciężarze (James i in., 2024). BNC, dzięki swojej strukturze, może być elastyczna przy zachowaniu wysokiej wytrzymałości na rozciąganie.

Tab. 2. Porównanie nanocelulozy roślinnej i bakteryjnej

Kryterium	Nanoceluloza roślinna (CNF, CNC)	Nanoceluloza bakteryjna (BNC)
Typ materiału	CNF – nanowłókna celulozowe CNC – nanokryształy celulozy	BNC – produkowana przez <i>Komagataeibacter</i> sp.
Metody pozyskiwania	Mechaniczne, chemiczne, enzymatyczne	Fermentacja, biosynteza mikrobiologiczna
Struktura	Włókna z celulozy z obecnością ligniny i hemiceluloz	Czysta celuloza, brak ligniny i hemiceluloz
Czystość materiału	Niska – wymaga oczyszczania chemicznego	Wysoka – brak zanieczyszczeń naturalnych
Wytrzymałość mechaniczna	Wysoka (19–201 MPa)	Bardzo wysoka (do 320 MPa)
Krystaliczność	Średnia (40–60%)	Wysoka (84–89%)
Zastosowania	Kompozyty, folie, opakowania, sensory, elektronika	Opatrunki, implanty, opakowania, inżynieria tkankowa, sensory
Modyfikowalność	Tak – ale często z użyciem chemii	Bardzo wysoka – <i>in situ</i> i <i>ex situ</i> , bez użycia toksycznych substancji
Aspekt ekologiczny	Ograniczony – procesy wymagają energii i chemikaliów	Wysoki – niskie zużycie chemikaliów, łatwe oczyszczanie
Dostępność surowca	Wysoka – odpady roślinne, drewno	Wymaga specjalistycznych warunków hodowli

ZRÓŻNICOWANIE ŹRÓDEŁ NANOCELULOZY I ICH WPŁYW NA WŁAŚCIWOŚCI MATERIAŁU

Źródła nanocelulozy mają kluczowy wpływ na jej właściwości morfologiczne, chemiczne i mechaniczne. W szczególności roślinna nanoceluloza może być pozyskiwana z wielu gatunków roślin o różnym składzie ściany, co przekłada się na zmienność jej parametrów (Tab. 3).

Drzewa liściaste (np. brzoza, dąb, klon) oraz iglaste (np. sosna, świerk) są klasycznymi źródłami pulpy drzewnej bogatej w celulozę. W zależności od typu drewna, zawartość ligniny i hemiceluloz różni się znacząco, co wpływa na konieczność odpowiedniego doboru metod obróbki chemicznej i mechanicznej. Nanoceluloza uzyskana z drewna wykazuje dobrą wytrzymałość mechaniczną i wysoką czystość, zwłaszcza po procesie „bleachingu” (usuwanie zanieczyszczeń z użyciem nadtlenu wodoru) (Poulouze i in., 2022). Zielona chemia promuje wykorzystanie odpadów, takich jak słoma ryżowa, liście kukurydzy, łuski orzechów, wytloki owocowe, czy łupiny

nasion. Przykładem może być uzyskiwanie nanocelulozy z wytlóków buraczanych (Yahya i in., 2018) lub łusek ryżu, gdzie wysoka zawartość ligniny wymaga intensywnej wstępnej obróbki alkalicznej (Hernandez Perez i in., 2023).

W badaniach wykazano, że włókna z agawy i konopi po obróbce TEMPO mają dobrą dyspersyjność i dużą powierzchnię właściwą, przy zachowaniu ekologicznego profilu produkcji (Rajinipriya i in., 2018).

Rośliny takie, jak: len, juta, konopie i ramia, charakteryzują się wysoką zawartością celulozy (do 80%) oraz niską zawartością ligniny (da Silva i in., 2022). Dzięki temu są szczególnie efektywne jako surowce do produkcji nanowłókien celulozowych (CNF). Nanoceluloza z lnu jest stosowana m.in. w produkcji kompozytów polimerowych o podwyższonej wytrzymałości mechanicznej. Szybkorosnące rośliny, takie jak bambus, bananowiec, miskant, a także materiały odpadowe z przemysłu palmowego (np. włókna z łodyg palmy olejowej) stanowią alternatywne źródła nanocelulozy. Nanowłókna z tych

Tab. 3. Przykładowe źródła surowców do produkcji nanocelulozy

Źródło	Zawartość celulozy [%]	Charakterystyka
Drzewa liściaste	40–45	Wysoka zawartość celulozy, stosunkowo łatwe w otrzymywaniu i przetwarzaniu
Drzewa iglaste	35–40	Średnia zawartość celulozy, łatwe w otrzymywaniu i przetwarzaniu
Bambus	40–50	Szybki wzrost, wysoki stosunek wytrzymałości do masy
Konopie	60–70	Wysoka zawartość celulozy, odporność na trudne warunki
Len	65–75	Delikatne włókna, łatwe w obróbce
Juta	60–70	Wysoka wytrzymałość na rozciąganie, biodegradowalność
Kenaf (ketmia konopiovata)	45–55	Szybki wzrost, niski wpływ na środowisko
Łuski ryżowe	30–35	Wysoka zawartość krzemionki, duża dostępność
Skórki bananów	10–20	Bogate w celulozę, łatwe w przetwarzaniu
Bagassa z trzciny cukrowej	40–50	Wysoka zawartość celulozy, produkt uboczny przemysłu cukrowniczego
Słoma pszeniczna	30–45	Wysoka zawartość celulozy i hemicelulozy
Pozostałości kukurydzy	35–40	Powszechnie dostępne, tanie

źródeł wykazują wysoką wytrzymałość i mogą być stosowane jako wypełniacze w lekkich kompozytach dla budownictwa i motoryzacji (Ferreira i in., 2019; Wang i in., 2020).

Nanoceluloza może być również otrzymywana z mniej typowych źródeł, jak trzcina cukrowa i odpady po jej obróbce (bagassa), liście ananasa, słoma pszeniczna czy pozostałości po przetwórstwie spożywczym. Ich przetwarzanie może wymagać szczególnej obróbki, ale daje wartościowe włókna o specyficznych właściwościach (Das i in., 2023)

W zależności od źródła roślinnego i zastosowanych technik izolacji, nanoceluloza może różnić się stopniem krystaliczności, długością

włókien, zawartością grup funkcyjnych i zdolnością do formowania żeli. Różnorodność źródeł jest zatem zarówno wyzwaniem, jak i szansą na dostosowanie materiału do konkretnej aplikacji (Tab. 4).

Zaletami stosowania biomasy roślinnej jako źródła nanocelulozy jest wysoka dostępność i odnawialność oraz redukcja kosztów produkcji i wpływu na środowisko poprzez możliwość przetwarzania materiałów odpadowych. Zastosowanie specjalistycznych technologii, np. mieszanin eutektycznych, umożliwia uzyskanie materiału o wysokiej czystości i krystaliczności, przy jednoczesnej minimalizacji zużycia energii i chemikaliów (Thomas i in., 2018).

Tab. 4. Wpływ materiału źródłowego na właściwości nanocelulozy

Materiał źródłowy	Zawartość celulozy [%]	Wytrzymałość na rozciąganie (MPa)	Temperatura rozkładu (°C)
Drewno liściaste (np. dąb)	40–45	150–300	220–300
Drewno iglaste (np. sosna)	35–40	120–250	200–270
Pozostałości rolnicze	30–50	90–150	180–240

METODY POZYSKIWANIA NANOCELULOZY

Pozyskiwanie nanocelulozy jest procesem złożonym, który można przeprowadzać przy użyciu metod mechanicznych, chemicznych, enzymatycznych lub zintegrowanych (hybrydowych). Wybór konkretnej metody zależy od rodzaju ma-

teriału wyjściowego, pożądaných właściwości końcowego produktu oraz uwarunkowań środowiskowych i ekonomicznych (Islam i in., 2014; Yang i in., 2024c). Celem obróbki jest rozdzielenie włókien celulozowych przy jednoczesnym zachowaniu ich integralności chemicznej i strukturalnej (Tab. 5).

Tab. 5. Porównanie metod uzyskiwania nanocelulozy – zalety i ograniczenia

Metoda	Zalety	Ograniczenia
Mechaniczna	Prosta, bez odczynników chemicznych	Wysokie zużycie energii, potrzeba wstępnej obróbki
Chemiczna	Wysoka czystość CNC, selektywność	Toksyczność odczynników, potrzeba neutralizacji
Enzymatyczna	Przyjazna środowisku, łagodna dla struktury	Długi czas reakcji, wysoki koszt enzymów
Biologiczna (BNC)	Czystość produktu, niskie koszty substratu	Wrażliwość na warunki hodowli, długi czas syntezy

Metody mechaniczne

Procesy mechaniczne są najczęściej stosowane do otrzymywania nanowłókien celulozowych (CNF). Najpopularniejsze techniki to homogenizacja wysokociśnieniowa (przepuszczanie zawiesiny celulozowej przez szczeliny pod wysokim ciśnieniem, co prowadzi do rozdrobnienia włókien na poziomie nano), mielenie mechaniczne (wykorzystanie sił ścinających do rozdzielania struktury włókien celulozowych) oraz sonikacja (ultradźwięki powodują kawitację, prowadzącą do rozbicia włókien).

Chociaż metody te są efektywne, wymagają dużych nakładów energii i mogą prowadzić do częściowego uszkodzenia struktury celulozy, jeśli nie są odpowiednio kontrolowane (James i in., 2024).

Metody chemiczne

Najbardziej znaną metodą chemiczną pozyskiwania CNC jest hydroliza kwasowa, najczęściej z użyciem stężonego kwasu siarkowego. Proces ten selektywnie usuwa amorficzne regiony włókien celulozowych, pozostawiając fazę krystaliczną. Otrzymany produkt charakteryzuje się wysoką czystością i krystaliczno-

ścią, ale wymaga neutralizacji oraz usunięcia resztek kwasu (Islam i in., 2014).

Inne metody chemiczne obejmują:

- Oksydację TEMPO – przekształcenie grup hydroksylowych w karboksylowe, co sprzyja rozwarstwieniu włókien i obniża zużycie energii w dalszym procesie mechanicznym.
- Użycie cieczy jonowych (ionic liquids) – nowoczesne rozpuszczalniki umożliwiają selektywne rozpuszczenie celulozy i jej regenerację w formie nanostruktur (James i in., 2024). Alternatywą jest zastosowanie systemów cieczy eutektycznych, często stosowanych w procesach zgodnych z zieloną chemią.

Metody enzymatyczne i biologiczne

W tej metodzie stosuje się enzymy celolityczne, które częściowo rozkładają strukturę makrocząsteczek celulozy, umożliwiając ich łatwiejsze rozdrobnienie mechaniczne. Proces ten jest łagodny i przyjazny środowisku, ale stosunkowo wolny i trudny do zastosowania w większej skali (Yang i in., 2024c). Jest on jednak coraz częściej łączony z technikami mechanicznymi w systemach hybrydowych (Tab. 5a).

Produkcja nanocelulozy bakteryjnej

Nanoceluloza bakteryjna (BNC) nie wymaga rozdrabniania – jest syntetyzowana bezpośrednio przez bakterie w trakcie fermentacji cukrów prostych. Proces ten może odbywać się w warunkach powierzchniowych (fermentacja statyczna) lub wglębnych (z wymuszoną cyrkulacją) (Olędzki i Walaszczyk, 2020).

Produkcja BNC ma wiele zalet, ponieważ nie wymaga oczyszczania z ligniny i hemiceluloz, jest wysoce skalowalna i zgodna z zasadami zielonej biotechnologii oraz może wykorzystywać odpady organiczne jako substraty (np. odpady owocowe, melasa, serwatka) (Shah i Hakim, 2025).

MODYFIKACJE NANOCELULOZY

Jedną z interesujących cech nanocelulozy, zwłaszcza z punktu widzenia nowoczesnych zastosowań technologicznych, jest jej wyjątkowa podatność na modyfikacje chemiczne. Wszystkie typy nanocelulozy (CNF, CNC, nanoceluloza bakteryjna) zawierają na swojej powierzchni dużą liczbę wolnych grup hydroksylowych ($-OH$), które mogą wchodzić w różne reakcje chemiczne, umożliwiając dostosowanie właściwości fizykochemicznych materiału do określonych potrzeb aplikacyjnych (James i in., 2024; Lv i in., 2024). Takie zmiany określa się pojęciem „funkcjonalizacji” – kiedy proces przemian chemicznych przeprowadzany jest w ograniczonym zakresie. W wyniku tych przemian struktura pierwotnego materiału zostaje zachowana, natomiast całość uzyskuje nowe właściwości.

Najczęściej stosowane metody funkcjonalizacji obejmują:

- Oksydację TEMPO – selektywna oksydacja grup hydroksylowych w pozycji C6 do grup karboksylowych. Zwiększa hydrofilowość i nadaje nanocelulozie ujemny ładunek powierzchniowy, co poprawia jej stabilność koloidalną oraz zdolność do wiązania metali i białek (Islam i in., 2014).
- Estryfikację i acetylację – modyfikacje hydrofobowe polegające na podstawieniu grup hydroksylowych estrami (np. z kwasami

mi tłuszczowymi), co pozwala na zastosowanie nanocelulozy w materiałach wodoodpornych i bioplastikach (James i in., 2024).

- Modyfikacje silanowe i amidowe – dzięki tym reakcjom nanoceluloza może być łączona z polimerami syntetycznymi, cząstkami nieorganicznymi lub związkami aktywnymi biologicznie. Silanizacja polega na przyłączaniu grup silanowych (R_3Si-) do grup hydroksylowych nanocelulozy, co prowadzi do powstania trwałych wiązań krzem-tlen-węgiel. Zwiększa to hydrofobowość i poprawia kompatybilność polimeru z żywicami epoksydowymi (Yang i in., 2024b). Silanowe środki sprzęgające, oparte na związkach krzemu zawierających dwie grupy funkcyjne, łączą się odpowiednio, z substratem nieorganicznym (np. szkłem, metalem lub ceramiką) oraz z materiałem organicznym (np. polimerem, powłoką lub klejem). Materiały te dodatkowo zwiększają odporność kompozytów na korozję (Gan i in., 2019). Zastosowanie aminopochodnych silanów o różnej długości łańcucha aminowego wykazało, że wydajność procesu silanizacji oraz właściwości antybakteryjne są silnie zależne od obecności grup NH_2 (Pacaphol i Aht-ong, 2017). Tak zmodyfikowane CNF znalazły potencjalne zastosowanie w materiałach opakowaniowych o działaniu przeciwbakteryjnym.
- Przyłączanie łańcuchów polimerowych do powierzchni nanocelulozy, albo podczas polimeryzacji zachodzącej bezpośrednio na powierzchni nanocząstek (co umożliwia uzyskanie dużej gęstości przyłączeń), albo poprzez sprzęganie gotowego polimeru z materiałem (Chin i in., 2018; Tang i in., 2015).
- Znakowanie nanocelulozy fluoroforami, takimi jak fluoresceina czy rodamina B. Zmodyfikowana nanoceluloza nie wykazuje cytotoxyczności, a jej ładunek powierzchniowy zmienia się w odpowiedzi na zmiany pH w środowisku, co umożliwia optymalizację penetracji komórkowej i może znaleźć zastosowanie w kontrolowanym dostarczaniu leków czy biosensorach (Chen i in., 2015).

- Powlekanie polimerami przewodzącymi (np. PEDOT:PSS, polianilina) – pozwala stworzyć bioelektrody i sensory elektrochemiczne na bazie nanocelulozy (Li i in., 2025; Lv i in., 2024).
- Modyfikacje z udziałem nanocząstek – np. srebra (AgNPs), złota, tlenków cynku lub grafenu. Takie kompozyty charakteryzują się właściwościami antybakteryjnymi, przewodnictwem elektrycznym lub selektywną absorpcją promieniowania (James i in., 2024; Liu i in., 2025).

Funkcjonalizacja nanocelulozy bakteryjnej

Nanoceluloza bakteryjna (BNC) stanowi szczególnie atrakcyjny materiał do modyfikacji, ponieważ jest pozbawiona ligniny i hemiceluloz, a jej struktura jest bardziej jednorodna i czystsza niż w przypadku nanocelulozy roślinnej. Dzięki temu modyfikacja chemiczna może być bardziej kontrolowana i przewidywalna (Olędzki i Walaszczyk, 2020).

BNC może być modyfikowana:

- związkami antybakteryjnymi, np. chitozaniem, który nadaje jej właściwości przeciwbakteryjne przy zachowaniu biokompatybilności (Yang i in., 2024a),
- cząstkami srebra lub miedzi, co umożliwia stosowanie w opatrunkach aktywnych oraz membranach filtracyjnych (Lv i in., 2024),
- materiałami przewodzącymi, dzięki czemu możliwe jest stworzenie rusztowania np. dla wzrostu neuronów lub mięśni (Li i in., 2025).

Szeroka gama wprowadzanych modyfikacji powoduje, że bardzo szybko rozwijają się kolejne technologie, wykorzystujące zmodyfikowaną nanocelulozę:

- sensory i biosensory – np. urządzenia do wykrywania glukozy, jonów metali ciężkich, oceny parametrów środowiskowych (Lv i in., 2024),
- inteligentne opatrunki – np. z dodatkiem substancji przeciwzapalnych lub antybakteryjnych (Yang i in., 2024a),
- materiały do magazynowania energii – nanoceluloza z domieszką boru, grafenu lub tlenków metali jest używana jako rusztowa-

nie w superkondensatorach i akumulatorach (Liu i in., 2025),

- funkcjonalne folie i błony – np. błony protonoprzewodzące w ogniwach paliwowych (Shah i Hakim, 2025),
- inteligentne materiały opakowaniowe – zmieniają kolor, informując o stanie produktu spożywczego (Olędzki i Walaszczyk, 2020).

Pomimo dużego potencjału, funkcjonalizacja nanocelulozy niesie też pewne wyzwania: zachowanie równowagi między modyfikacją a biodegradowalnością, kontrola toksyczności nowych dodatków, skalowalność procesów chemicznych oraz zgodność z regulacjami (James i in., 2024).

ZASTOSOWANIA NANOCELULOZY

Nanoceluloza jest wszechstronnym materiałem, który znajduje zastosowanie w biomedycynie, inżynierii materiałowej, energetyce, elektronice, przemyśle spożywczym oraz w ochronie środowiska. Jej funkcjonalność zwiększa się znacznie dzięki możliwościom modyfikacji powierzchni, co powoduje rosnące zainteresowanie komercjalizacją tej technologii (Tab. 6).

Zastosowania w biomedycynie

Nanoceluloza wykazuje wysoką zgodność biologiczną i nie wykazuje działania toksycznego na komórki, co czyni ją idealnym materiałem w zastosowaniach biomedycznych – np. jako opatrunki, nośniki leków czy rusztowania dla hodowli komórek (Yang i in., 2024a). Biokompatybilność nanocelulozy została potwierdzona w licznych badaniach *in vitro* i *in vivo* (Li i in., 2025; Čolić i in., 2020). Przykładowo, BNC wykazuje doskonałą tolerancję w kontaktach ze skórą i tkanką mięśniową, a jej zastosowanie jako opatrunku przyspiesza regenerację ran bez wywoływania reakcji zapalnych (Nishiguchi i Taguchi, 2020). Dodatkowo, CNC modyfikowane aminokwasami, były testowane jako rusztowania dla osteoblastów i komórek śródbłónki z pozytywnym wynikiem w zakresie adhezji komórkowej i proliferacji (Nishiguchi i Taguchi 2019). Poniżej przedstawione są niektóre przykłady zastosowania nanocelulozy.

Tab. 6. Porównanie metod pozyskiwania nanocelulozy – efektywność i koszty

Metoda	Efektywność	Koszt	Złożoność procesu	Wpływ na środowisko
Mechaniczna	wysoka	niski	wysoka	niski
Chemiczna (kwasy)	wysoka	wysoki	wysoka	bardzo wysoki
Enzymatyczna	niska	wysoki	niska	bardzo niski
Kompleksowa (kompozytowa)	bardzo wysoka	wysoki	bardzo wysoka	wysoki

Opatrunki na rany i regeneracja tkanek

Bionanoceluloza (BNC), produkowana przez bakterie, charakteryzuje się wysokim stopniem uwodnienia, zdolnością szczelnego przylegania do powierzchni rany oraz nanofibrylarną strukturą, co sprzyja procesowi gojenia. Komercyjnie dostępne opatrunki Epiprotect® wykorzystują nanocelulozę bakteryjną jako elastyczną, chłonną i sterylną matrycę, skracając czas leczenia, przyspieszając proces gojenia i regenerację skóry oraz zmniejszając ryzyko wystąpienia powikłań infekcyjnych szczególnie w leczeniu oparzeń i ran przewlekłych (Snopek i in., 2024, Yang i in., 2024a).

Implanty i inżynieria tkankowa

Dzięki swojej biokompatybilności i zdolności do formowania trójwymiarowych struktur, nanoceluloza jest wykorzystywana w inżynierii tkankowej. Może służyć jako materiał do tworzenia rusztowań wspomagających regenerację tkanek, takich jak chrząstka czy kość (Li i in., 2025; Szustak i Gendaszewska-Darmach, 2021). Ponadto, nanoceluloza może być stosowana jako powłoka implantów kostnych, zwiększając ich integrację z tkanką kostną i minimalizując ryzyko odrzutu. Możliwe jest także użycie nanocelulozy modyfikowanej jako biotuszu (ang. *bioink*) w drukarkach 3D do tworzenia rusztowań skóry i naczyń (Kim i in., 2024).

Systemy dostarczania i dozowania leków

Nanoceluloza, dzięki dużej powierzchni właściwej i możliwości modyfikacji chemicznej, jest badana jako nośnik dla kontrolowanego dostarczania leków. Może być wykorzystana do

tworzenia systemów dostarczania leków, które zapewniają kontrolowane uwalnianie substancji aktywnych w miejscu docelowym, minimalizując efekty uboczne i zwiększając efektywność terapii (Babaei-Ghazvini i in., 2024)

Materiały antybakteryjne

Modyfikacja nanocelulozy za pomocą związków o działaniu przeciwdrobnoustrojowym pozwala na tworzenie materiałów o właściwościach antybakteryjnych. Takie materiały mogą być stosowane w opatrunkach, implantach czy systemach dostarczania leków, redukując ryzyko infekcji i wspomagając proces gojenia (Kupnik i in., 2020).

Biosensory i diagnostyka

Dzięki swojej przewodności i zdolności do funkcjonalizacji, nanoceluloza znajduje zastosowanie w tworzeniu biosensorów. Może być używana do wykrywania biomarkerów chorób, monitorowania parametrów fizjologicznych czy diagnozowania stanów patologicznych, co otwiera nowe możliwości w medycynie precyzyjnej (Subhedar i in., 2021).

Nanoceluloza w inżynierii materiałowej i kompozytach

Nanoceluloza pochodzenia roślinnego (głównie CNF i CNC) staje się kluczowym materiałem w inżynierii nowoczesnych sensorów i elektroniki elastycznej, dzięki swojej przejrzystości, mechanicznej elastyczności i możliwości modyfikacji chemicznej. Poniżej zebrano przykłady zastosowań nanocelulozy:

- Elektrody do jednoczesnej rejestracji ultrasonograficznej i elektromiograficznej

(US-sEMG): CNF uzyskane z drewna (przy użyciu m.in. utleniania TEMPO lub kwasem octowym) zostały wykorzystane jako podłoże dla elektrod powlekanych PEDOT:PSS, które umożliwiają jednocześnie obrazowanie US i zapis sygnałów EMG podczas skurczu mięśnia. Uzyskano wysoką transparentność ultradźwiękową i stabilne przewodnictwo elektryczne, co otwiera nowe możliwości diagnostyczne w neurologii i rehabilitacji (Li i in., 2025a).

- Czujniki fizykochemiczne: CNF i CNC modyfikowane grupami funkcyjnymi (karboksylowymi, siarczanowymi, aminowymi) tworzą stabilne kompozyty z nanorurkami węglowymi, poprawiając selektywność i czułość sensorów wykrywających np. wilgotność, ciśnienie, pH, jony metali ciężkich lub biomarkery, takie jak glukoza czy neuroprzekazniki (Lv i in., 2024a; Sheraz i in., 2025).
- Przezroczyste folie i ekrany elastyczne: dzięki przezroczystości i giętkości BNC możliwe jest tworzenie ekranów OLED i warstw dotykowych (Gao i in., 2024; Santos i in., 2025),
- Nanogeneratory: nanoceluloza może być stosowana jako dielektryk i materiał wibracyjny do konwersji energii mechanicznej na elektryczną (Lv i in., 2024a).
- Drukowane sensory elastyczne: CNF jako matryca dla przewodzących tuszy (PEDOT:PSS, srebro) służy do produkcji termoczułych i dotykowych powierzchni sensorych, które mogą być integrowane w e-skorach czy systemach noszonych (Zhou i Hsieh, 2018). Kompozyty CNC z nanorurkami węglowymi używane są do wykrywania par amoniaku i acetonu – testowane jako czujniki noszone w ubraniach sportowych i medycznych (Lv i in., 2024a).
- Folie ochronne PLA/CNC: Mieszanki polilaktidu (kwasu mlekowego) z CNC są wykorzystywane do produkcji biodegradowalnych opakowań o zwiększonej odporności na wilgoć i tlen, testowanych przez Nestlé i Tetra Pak (Olędzki i Walaszczyk, 2020).
- Cement z CNF: Dodatek nanowłókien celulozowych do cementu poprawia jego odpor-

ność na pękanie i wilgoć – prowadzone są badania prototypów materiałów budowlanych przez instytuty inżynierii lądowej (Goncalves i in., 2019).

Magazynowanie energii i systemy PCM

Nanoceluloza, dzięki swojej porowatej strukturze, wysokiej powierzchni właściwej i możliwości funkcjonalizacji, znajduje coraz szersze zastosowanie w nowoczesnych technologiach magazynowania energii, w tym w systemach akumulacji ciepła oraz komponentach elektrochemicznych:

- Aerożele nanocelulozowe do magazynowania ciepła: aerożele stworzone z nanowłókien celulozowych i domieszek materiałów zmiennofazowych (PCM, ang. pulse-code modulation), takich jak parafina czy heksadekan, umożliwiają efektywne przechowywanie i powolne uwalnianie energii cieplnej. Ahmed i Khalifa (2024) opisali przykładowe struktury CNF/PCM z dodatkiem związków nieorganicznych, które wykazywały wysoką entalpię topnienia (ponad 120 J/g) i dobrą stabilność cykliczną (ponad 100 cykli).
- Aerożele modyfikujące temperaturę i chłodzenie pasywne: Badania Zhang i in. (2025a) wykazały, że nanocelulozowe aerożele wzbogacone na przykład o związki boru oraz barwniki refleksyjne mogą redukować temperaturę wewnętrzną budynków o kilka stopni dzięki efektowi chłodzenia radiacyjnego i izolacji termicznej.
- Nanoceluloza w superkondensatorach: CNC oraz CNF modyfikowane kwasem fosforowym lub grafenem są stosowane jako warstwy separatorów lub składniki elektrod w superkondensatorach. Takie systemy charakteryzują się wysoką gęstością energii i dużą stabilnością (James i in., 2024; Liu i in., 2022).
- Izolacja cieplna i akustyczna: nanocelulozowe aerożele, dzięki niskiej gęstości i wysokiej porowatości, wykazują doskonałe właściwości izolacyjne. Przykładowo, modyfikowane CNF w formie kompozytowych aerożeli z TiO₂ osiągają współczynnik przewodnictwa cieplnego poniżej 0,030 W/mK, zachowując jednocześnie wysoką efektyw-

- ność pochłaniania dźwięku (nawet ponad 90%) (He i in., 2022, Sharma i Manik 2025).
- Alternatywa dla membran PEM w ogniwach paliwowych: Shah i Hakim (2025) opisałi kompozytowe membrany protonoprzewodzące na bazie CNF, które wykazały przewodność zbliżoną do Nafionu (jonomer, kopolimerowa cienka folia, przewodząca protony a nie przewodząca elektronów lub anionów, stosowana m.in. w ogniwach paliwowych), przy znacznie niższym koszcie i lepszej stabilności termicznej.
 - Aerożele z nanocelulozy i azotku boru, nasycone materiałami zmiennofazowymi (PCM), wykorzystywane są jako medium do akumulacji ciepła w budynkach energooszczędnych (Liu i in., 2025).
 - Superkondensatory: modyfikowana CNC pełni funkcję warstwy separatora w superkondensatorach – poprawia stabilność cykliczną i zwiększa przewodnictwo elektrolitu (James i in., 2024).

Te przykłady wskazują, że nanoceluloza roślinna, w szczególności modyfikowana CNF i CNC, znajduje coraz więcej zastosowań w technologiach związanych z zarządzaniem energią cieplną i elektrochemiczną. Jej potencjał jako materiału bazowego dla systemów PCM, ogniw paliwowych, izolacji cieplnych i komponentów superkondensatorów jest obecnie intensywnie rozwijany zarówno w badaniach akademickich, jak i we wczesnych etapach wdrożeń przemysłowych.

Przemysł spożywczy

Nanoceluloza, ze względu na swoje wyjątkowe właściwości, takie jak wysoka wytrzymałość mechaniczna, zdolność do żelowania i tworzenia stabilnych emulsji, staje się atrakcyjną substancją dla rozwoju przemysłu spożywczego (Qin i in., 2024). Materiał ten może być pozyskiwany zarówno z surowców roślinnych (np. włókien celulozowych), jak i poprzez fermentację mikrobiologiczną (np. przez bakterie z rodzaju *Komagataeibacter*) (Olędzki i Walaszczyk, 2020).

Nanoceluloza jako składnik żywności

Nanoceluloza znajduje zastosowanie m.in. jako stabilizator, zagęstnik, błonnik pokar-

mowy oraz środek strukturotwórczy. Szczególne znaczenie mają tu jej właściwości powierzchniowe i zdolność do tworzenia stabilnych emulsji typu olej-woda (Bai i in., 2021). Takie emulsje, określane jako emulsje Pickeringa, są stabilizowane fizycznie dzięki obecności nanocząstek na granicy faz, co umożliwia ich zastosowanie np. w produktach mięsnych typu surimi (Olędzki i Walaszczyk, 2020). Nanoceluloza może również pełnić funkcję zamiennika tłuszczu w produktach dietetycznych, co pozwala na redukcję wartości energetycznej żywności bez pogorszenia jej cech sensorycznych (Prabsan-gob, 2023). Dodatkowo, dzięki odporności na trawienie w przewodzie pokarmowym, może działać jako błonnik wspomagający rozwój korzystnej mikroflory jelitowej (Qin i in., 2024).

W przemyśle spożywczym stosuje się również pochodne nanocelulozy, takie jak karboksymetyloceluloza czy hydroksypropylometyloceluloza. Związki te poprawiają teksturę i stabilność wyrobów piekarniczych, deserów mlecznych i produktów bezglutenowych, a także ograniczają retrogradację skrobi (Olędzki i Walaszczyk, 2020).

Przedłużanie trwałości produktów spożywczych i "smart packaging"

Jednym z ciekawszych aspektów zastosowania nanocelulozy jest jej zastosowanie w ochronie produktów przed niekorzystnym wpływem środowiska. Pokrywanie owoców (np. papryki) warstwą karboksymetylocelulozy ogranicza utratę jędrności i wody oraz spowalnia dojrzewanie, nawet przy przechowywaniu w temperaturze pokojowej. Analogicznie, metyloceluloza stosowana jako powłoka dla jaj wydłuża ich świeżość do ponad 28 dni (Olędzki i Walaszczyk, 2020).

Dodatkowo, oksydowana nanoceluloza wykazuje aktywność przeciwdrobnoustrojową, co pozwala na jej zastosowanie jako składnika aktywnych materiałów opakowaniowych (Qin i in., 2024). Możliwe jest także jej wykorzystanie jako matrycy do kontrolowanego uwalniania substancji bioaktywnych lub aromatycznych, co otwiera drogę do tworzenia inteligentnych systemów pakowania (Bai i in., 2021). Dynamiczny rozwój badań nad materiałami opakowaniowy-

mi doprowadził do opracowania biodegradowalnych kompozytów na bazie nanocelulozy i biopolimerów, takich jak polilaktyd (PLA) i pektyna. Substancje takie charakteryzują się wysoką wytrzymałością mechaniczną, niską przepuszczalnością dla gazów i pary wodnej oraz aktywnością przeciwdrobnoustrojową, co czyni je efektywną alternatywą dla tworzyw sztucznych (Maitra i in., 2025; Vilarinho i in., 2018). Takie folie PLA modyfikowane nanocelulozą i pektyną pozwoliły m.in. na znaczące wydłużenie trwałości owoców truskawek, dzięki ograniczeniu transmisji promieniowania UV oraz zahamowaniu wzrostu *E. coli* i *B. subtilis* (Maitra i in., 2025). Dodatkowo, dzięki właściwościom fizycznym, nanoceluloza może stanowić istotny składnik polimerów, przeznaczonych do tzw. „smart packaging”, czyli opakowań wyposażonych w sensory jakości produktu (Perdani i Gunawan, 2021).

Pomimo obiecujących właściwości, zastosowanie nanocelulozy w żywności i opakowaniach wymaga dalszych badań w zakresie bezpieczeństwa zdrowotnego. Choć nanoceluloza roślinna oraz bakteryjna uznawane są obecnie za nietoksyczne i biodegradowalne, to niektóre formy modyfikowane chemicznie mogą wykazywać inne właściwości biologiczne (Qin i in., 2024). Szczegółnej uwagi wymagają procesy, którym podlega nanoceluloza podczas trawienia oraz interakcje jej nanocząstek z komórkami przewodu pokarmowego.

Obecnie w Unii Europejskiej oraz Stanach Zjednoczonych trwają prace nad stworzeniem reguł dla stosowania nanomateriałów w produktach spożywczych oraz materiałach mających kontakt z żywnością (Qin i in., 2024).

Remediacja środowiska

Nanoceluloza, dzięki swojej dużej powierzchni właściwej, obecności reaktywnych grup hydroksylowych oraz możliwości chemicznej funkcjonalizacji, staje się coraz częściej wykorzystywana jako bioadsorbent i składnik inteligentnych membran filtracyjnych w remediacji środowiska. Zastosowanie jej w oczyszczaniu wody, powietrza i gleby stanowi innowacyjną i zrównoważoną alternatywę wobec tradycyjnych sorbentów chemicznych.

Usuwanie metali ciężkich i barwników

Modyfikowana chemicznie nanoceluloza roślinna, np. CNF i CNC, wykazuje wysoką zdolność sorpcyjną względem jonów metali ciężkich, takich jak Pb^{2+} , Cd^{2+} , Cu^{2+} czy Cr^{6+} . W badaniu Norizan i in. (2022) wykazano, że CNF modyfikowane grupami karboksylowymi skutecznie adsorbują jony ołowiu z wody, osiągając wydajność sorpcji powyżej 95%. Z kolei funkcjonalizacja aminowa ($-NH_2$) poprawia selektywność wobec jonów kadmu i cynku (Akhter i in., 2025).

Nanoceluloza wykazuje również skuteczność w usuwaniu barwników tekstylnych. Przykładowo, nanokompozyty z CNC i tlenkiem grafenu adsorbują błękit metylenowy i czerwien kongo z wód ściekowych w bardzo krótkim czasie, nawet poniżej 30 min (Frank i in., 2021).

Usuwanie farmaceutyków i pestycydów

Zanieczyszczenia nowej generacji, takie jak pozostałości leków (np. antybiotyki, hormony), są coraz częściej wykrywane w wodach powierzchniowych. Badania wykazały, że nanoceluloza zmodyfikowana grupami aromatycznymi (np. aldehydowymi) może skutecznie wiązać związki takie jak ibuprofen czy karbamazepina poprzez oddziaływania π - π oraz wiązania wodorowe (Qin i in., 2024).

Z kolei hydrożele oparte na CNF wykazują zdolność do wiązania pestycydów chlorowanych i fosforoorganicznych, co czyni je użytecznymi materiałami do oczyszczania rolniczych wód spływowych (Ahmed i in., 2024).

Remediacja gazów i powietrza

Nanocelulozowe aerożele i pianki wykazują również zastosowanie w absorpcji gazów cieplarnianych (np. CO_2) oraz lotnych związków organicznych (VOC). Nanokompozyty CNF z tlenkami metali (np. MgO , ZnO) zostały протестоване jako skuteczne pochłaniacze formaldehydu i benzo[a]pirenu (Gopinath i in., 2021).

Przemysł motoryzacyjny

Zwrot ku zrównoważonym rozwiązaniom w przemyśle motoryzacyjnym jest związany z aktualnym trendem „zielonej motoryzacji”, mającym na celu zarówno ochronę środowiska,

jak i obniżenie kosztów produkcji. W związku z tym wielu producentów samochodów podejmuje próby zastosowania włókien naturalnych w całości lub w postaci materiałów kompozytowych, do produkcji elementów samochodowych, takich jak zderzaki, kierownice, deski rozdzielcze, poduszki siedzeń, systemy wygłuszania czy wewnętrzne panele drzwiowe. Na przykład model BMW serii 7 zdobył w 2010 roku Nagrodę Innowacyjności przyznaną przez Society of Plastics Engineers za zastosowanie aż 70% włókien naturalnych w panelach drzwiowych, co przełożyło się na zmniejszenie masy, kosztów i śladu węglowego (Chin i in., 2018). Firma Ford natomiast wykorzystała słomę pszenną jako środek wzmacniający w wewnętrznej pokrywie i schowku modelu Flex typu crossover (Chin i in., 2018). Badania wykazały, że zastąpienie kompozytu z włókna szklanego i polipropylenu kompozytem z włókna celulozowego i polipropylenu pozwoliło zaoszczędzić ok. 7% energii oraz zmniejszyć emisję gazów cieplarnianych nawet o 16% (Chin i in., 2018). Nanoceluloza, szczególnie ze względu na swoją niską masę i wysoką wytrzymałość mechaniczną, jest jednym z najbardziej obiecujących materiałów poszukiwanych przez naukowców. Takie materiały można wykorzystać m.in. w częściach wnętrza samochodu, takich jak poduszki siedzeń, wypełniacze kolumn kierownicy, wzmocnienia kolanowe czy pianki tapicerskie. Wyniki testów rozciągania i zginania wykazały, że np. dodatek CNC do kompozytu z włókna szklanego i żywicy epoksydowej umożliwia redukcję masy stosowanego włókna szklanego o 7,5%, przy zachowaniu właściwości mechanicznych (Chin i in., 2018). Może to mieć istotne znaczenie w masowej produkcji konwencjonalnych kompozytów.

Jednak nadal istnieją ograniczenia związane z właściwościami nanocelulozy po wysuszeniu, jej słabą kompatybilnością z hydrofobowymi matrycami polimerowymi i niską stabilnością termiczną ograniczającą szerokie zastosowanie w motoryzacji. Opracowanie techniki łączenia CNC z poliamidem w niskiej temperaturze, umożliwiającej przetwarzanie mokrej nanocelulozy bez jej wcześniejszego suszenia, pozwoliło na wytworzenie kompozytów litych

i piankowych, w których dodatek CNC nie tylko poprawił właściwości mechaniczne, ale także zwiększył gęstość komórek pianki i zmniejszył ich rozmiar, co zapobiegało ich pękaniu (Chin i in., 2018). Obiecujące wyniki uzyskane tą metodą otwierają możliwości zastosowania nanocelulozy z innymi popularnymi tworzywami termoplastycznymi, takimi jak polietylen czy poliuretan, w celu dalszego ulepszania ich właściwości mechanicznych.

ZWIĄZKI Z IDEĄ ZRÓWNOWAŻONEGO ROZWOJU

W dobie kryzysu klimatycznego, rosnącego zużycia surowców kopalnych oraz potrzeby redukcji odpadów, nanoceluloza roślinna, dzięki odnawialności, biodegradowalności, możliwości wytwarzania z odpadów rolniczych i przemysłowych oraz kompatybilności z zasadami zielonej chemii, staje się materiałem o strategicznym znaczeniu dla gospodarki o obiegu zamkniętym i neutralności klimatycznej (de Amorim i in., 2020). Ponieważ nanoceluloza może być efektywnie pozyskiwana z odpadów roślinnych – łusek ryżowych, słomy pszennej, wytlóków owocowych czy liści ananasa, zastosowanie biomasy pozostałej po zbiorach lub przetwórstwie pozwala ograniczyć ilość odpadów, a jednocześnie uzyskać wysoko funkcjonalny materiał o dużym potencjale aplikacyjnym (de Amorim i in., 2020; Kumar i in., 2022).

Kompozyty PLA/CNF oraz folie pektanowe wzmocnione nanocelulozą wykazują właściwości barierowe i mechaniczne porównywalne do tworzyw sztucznych, ale produkty na bazie nanocelulozy mogą być kompostowane lub ulegać biodegradacji w środowisku naturalnym bez produkcji mikroplastiku. Czas ich rozkładu w glebie wynosi od kilku tygodni do kilku miesięcy, w zależności od formy i dodatków (Vilarinho i in., 2018; Lv i in., 2024). Roślinna nanoceluloza może stanowić także platformę nośnikową dla enzymów w procesach biotechnologicznych – np. w oczyszczaniu ścieków, biodegradacji związków fenolowych czy fermentacji biomasy odpadowej (de Amorim i in., 2020).

Nanoceluloza w postaci aerozeli może być używana jako materiał izolacyjny cieplny i akustyczny – lżejszy i mniej energochłonny niż tradycyjne pianki poliuretanowe czy wełna mineralna, co jest już testowane w budownictwie niskoenergetycznym (Zhang i in., 2025b; Gan i in., 2019).

Jedną z ważniejszych zalet nanocelulozy, jest możliwość stosowania jej jako składnika biodegradowalnych smarów, zagęszczaczy, powłok ochronnych, klejów czy tuszów drukarskich – w miejsce syntetycznych dodatków opartych na polimerach ropopochodnych (Norizan i in., 2022).

Jak widać z powyższych przykładów, zastosowanie nanocelulozy prowadzi do zmniejszenia emisji CO₂, zużycia energii i wody w procesach technologicznych, a także ogranicza zależność od surowców nieodnawialnych. Produkty celulozowe mogą być włączane do biologicznych cykli degradacji, wspierając cele zrównoważonego rozwoju ONZ – zwłaszcza SDG 9 (innowacje), SDG 12 (odpowiedzialna produkcja) i SDG 13 (działania na rzecz klimatu) (Alić i in., 2024).

OGRANICZENIA STOSOWANIA NANOCELULOZY I REGULACJE PRAWNE

Zastosowanie nanocelulozy w różnych gałęziach przemysłu i nauki budzi duże zainteresowanie ze względu na jej unikalne właściwości i potencjał proekologiczny. Mimo wielu zalet, pełne wdrożenie nanocelulozy w zastosowaniach komercyjnych napotyka również istotne ograniczenia, związane m.in. z kosztami otrzymywania nanomateriałów czy problemami regulacji ich stosowania.

Obecne metody pozyskiwania nanocelulozy, zwłaszcza CNC i CNF, są kosztowne ze względu na zużycie energii i konieczność zastosowania zaawansowanych urządzeń mechanicznych lub chemicznych (Islam i in., 2014). W dodatku brak powszechnych standardów produkcji sprawia, że właściwości fizykochemiczne nanocelulozy mogą różnić się w zależności od źródła, metody otrzymywania i warunków procesowych. Utrudnia to jej szerokie wdrożenie w przemyśle, gdzie niezbędna jest powtarzalność (Yang

i in., 2024b). Część form nanocelulozy, zwłaszcza niewzmocnionych chemicznie, wykazuje ograniczoną stabilność termiczną oraz odporność na działanie wody. Może to ograniczać ich użycie w zastosowaniach wymagających trwałości w zmiennych warunkach środowiskowych (James i in., 2024).

Chociaż większość badań potwierdza nietoksyczność nanocelulozy, nadal potrzeba długoterminowych badań, szczególnie dla form modyfikowanych nanocząstkami metali lub związkami chemicznymi, szczególnie w zastosowaniach medycznych, farmaceutycznych i spożywczych (Lv i in., 2024b). Dlatego tak ważne jest wprowadzenie szczegółowych i powszechnie stosowanych przepisów prawnych dla nanomateriałów. W Unii Europejskiej nanoceluloza podlega obecnie ogólnym regulacjom dotyczącym chemikaliów, w tym przede wszystkim rozporządzeniu REACH (Registration, Evaluation, Authorization and Restriction of Chemicals – Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego nr 1907/2006).

Zgodnie z przepisami REACH, nanoceluloza pochodzenia roślinnego klasyfikowana jest jako substancja chemiczna. Jeżeli jest ona produkowana lub importowana w ilościach przekraczających 1 tonę rocznie, wymagana jest rejestracja w Europejskiej Agencji Chemikaliów (ECHA). Obejmuje to przedstawienie szczegółowej dokumentacji dotyczącej identyfikacji substancji, danych toksykologicznych, charakterystyki fizykochemicznej oraz potencjalnych zagrożeń dla zdrowia i środowiska. Dodatkowe wymogi dotyczą substancji w formie *nano* (tzw. nanoformy), które muszą być zgłaszane osobno (Mishra i in., 2022).

Nanoceluloza roślinna, w przeciwieństwie do bakteryjnej, może zawierać pozostałości ligniny, hemiceluloz czy reagentów chemicznych, które mogą wpływać na czystość materiału a także wywoływać zaniepokojenie konsumentów. W związku z tym produkty wykorzystujące nanocelulozę roślinną mogą być klasyfikowane jako substancje o niepewnym profilu bezpieczeństwa, co utrudnia ich szybkie dopuszczenie do obrotu.

W obszarze farmaceutycznym, rejestracja produktów leczniczych, w których nanocelulo-

Tab. 7. Przykładowe zastosowania różnych form nanocelulozy

Typ nanocelulozy	Obszar zastosowania	Przykład produktu	Właściwości
CNF	Opakowania	Biodegradowalne folie	Elastyczność, biodegradowalność
CNF	Budownictwo	Kompozyty cementowe	Wysoka wytrzymałość mechaniczna
CNC	Elektronika	Nanokompozyty przewodzące	Wysoka sztywność, uporządkowanie krystaliczne
CNC	Farmacja	Nośniki leków	Funkcjonalizacja, biokompatybilność
BNC	Medycyna	Opatrunki, sztuczne naczynia krwionośne	Czystość, sterylność, wysoka retencja wody
BNC	Kosmetyka	Hydrożele pielęgnacyjne	Miękkość, przyleganie do skóry, nawilżanie

za pełni funkcję nośnika, dodatku lub materiału opakowaniowego, odbywa się zgodnie z procedurami Europejskiej Agencji Leków (EMA). Nanoceluloza może być wykorzystywana jako substancja pomocnicza (*excipient*), jednak jej zastosowanie wymaga wykazania zgodności z przepisami dotyczącymi bezpieczeństwa, czystości i skuteczności. W przypadku nowych substancji lub nowych zastosowań wymagane jest złożenie odpowiednich danych rejestracyjnych i uzyskanie pozwolenia na dopuszczenie do obrotu na poziomie unijnym (Mishra i in., 2022).

Mimo rosnącego zainteresowania przemysłu i nauki, brak ujednoliconej regulacji dotyczącej nanomateriałów powoduje niepewność prawnoadministracyjną i spowalnia proces wdrażania innowacyjnych produktów z udziałem nanocelulozy. Parlament Europejski wielokrotnie wzywał Komisję Europejską do rewizji przepisów REACH z uwzględnieniem specyfiki nanotechnologii. Jednocześnie, dla materiałów stosowanych w badaniach naukowych i eksperymentalnych, możliwe jest skorzystanie z wyjątku umożliwiającego czasowe zwolnienie z obowiązku rejestracji, o ile spełnione są odpowiednie warunki, łącznie z powiadomieniem ECHA.

PERSPEKTYWY ROZWOJU I PRZYSZŁE KIERUNKI BADAŃ

Z uwagi na coraz szybszy rozwój inżynierii materiałowej, biotechnologii i zielonej chemii,

nanoceluloza jest materiałem o ogromnym potencjale. Mimo istniejących barier technologicznych i regulacyjnych, obserwuje się stały wzrost liczby badań i zastosowań prototypowych. Dalsze innowacje koncentrują się przede wszystkim na poprawie wydajności produkcji, funkcjonalizacji, integracji z innymi materiałami oraz zastosowaniach w ramach gospodarki o obiegu zamkniętym.

Jednym z głównych kierunków rozwoju jest optymalizacja procesów pozyskiwania nanocelulozy – w szczególności rozwój metod niskoenergetycznych i o zmniejszonej toksyczności (James i in., 2024), zastosowanie cieczy jonowych jako bardziej ekologicznych rozpuszczalników (Islam i in., 2014) oraz produkcja nanocelulozy roślinnej i bakteryjnej z przemysłowych odpadów organicznych, jako sposobu na zmniejszenie kosztów i emisji (Olędzki i Walaszczyk, 2020),

Intensywnie rozwijane są również techniki funkcjonalizacji nanocelulozy, umożliwiające dostosowanie jej właściwości do konkretnych zastosowań, w tym modyfikacje powierzchniowe z użyciem nanocząstek przewodzących, bioaktywnych lub magnetycznych, umożliwiające wykorzystanie nanocelulozy np. w opatrunkach reagujących na pH, czy bioelektrodach dostosowujących się do impulsów nerwowych (Li i in., 2025). Inną modyfikacją jest tworzenie biohybryd z grafenem, MXenami i nanocząstkami metali do zastosowań w elastycznej elektronice.

ce, systemach wykrywania i magazynowania energii (Lv i in., 2024). Na uwagę zasługują także próby uzyskania samoorganizujących się struktur (*self-assembly structures*) do tworzenia nano- i mikroarchitektur o kontrolowanej porowatości i funkcjonalności (Liu i in., 2025).

Przyszłość stosowania nanocelulozy w nowoczesnej medycynie wykracza poza obecne użycie w opatrunkach i rusztowaniach tkankowych. Prowadzone są intensywne badania nad wykorzystaniem jej jako materiału do druku biologicznego personalizowanych opatrunków, narządów i struktur funkcjonalnych – biotusze na bazie modyfikowanej nanocelulozy bakteryjnej (z dodatkiem np. alginianu lub kolagenu) umożliwiają tworzenie rusztowań 3D o precyzyjnej architekturze, wspierających procesy angiogenezy oraz wzrost komórek skóry, chrząstki czy wątroby (Yang i in., 2024a). Technologia ta może znaleźć zastosowanie w tworzeniu struktur typu „organ-on-chip”, personalizowanych przeszczepów oraz w testach toksykologicznych *in vitro*.

Nanoceluloza może być modyfikowana tak, aby reagowała na bodźce mikrośrodowiska guza (pH, temperatura, enzymy), co pozwalałoby na selektywne i długoterminowe uwalnianie leków przeciwnowotworowych, przeciwzapalnych lub antybiotyków. Badania nad BNC z modyfikacją kwasami organicznymi wykazują możliwość uzyskania kapsulek gastroodpornych oraz systemów dostarczania leków doustnie (James i in., 2024).

Nanoceluloza powlekana materiałami przewodzącymi (np. PEDOT, grafenem) może działać jako biomateriał do regeneracji nerwów obwodowych, stymulacji mięśni lub budowy elektroaktywnych interfejsów neuronowych (Li i in., 2025), a nanoceluloza z domieszką cząstek srebra, miedzi, cynku lub naturalnych związków fenolowych (np. kurkuminy, chitozanu) może być używana do produkcji powierzchni implantu, kateterów czy opakowań sterylnych (Yang i in., 2024a).

Te kierunki badań pozwalają sądzić, że nanoceluloza odegra kluczową rolę w medycynie regeneracyjnej, terapii celowanej i inżynierii biomateriałów nowej generacji.

PODSUMOWANIE

Nanoceluloza roślinna wydaje się jednym z najbardziej obiecujących materiałów przyszłości – zarówno z perspektywy technologicznej, jak i ekologicznej. Rodzaje nanocelulozy różnią się strukturą, metodami otrzymywania i właściwościami, ale łączy je wspólna cecha: możliwość zastosowania w wielu sektorach gospodarki.

W pracy dokonano szczegółowego przeglądu trzech głównych typów nanocelulozy – nanowłókien celulozowych (CNF), nanokryształów celulozowych (CNC) oraz nanocelulozy bakteryjnej (BNC) – ze szczególnym uwzględnieniem ich struktury, właściwości oraz metod otrzymywania. Omówiono także możliwości chemicznej i biologicznej funkcjonalizacji nanocelulozy, które pozwalają dostosować jej właściwości do specyficznych wymagań aplikacyjnych. Przemysł biomedyczny, opakowaniowy, elektroniczny czy energetyczny to tylko niektóre obszary, w których nanoceluloza już znajduje zastosowanie.

Co szczególnie istotne, nanoceluloza wpisuje się w aktualne dążenia do zrównoważonego rozwoju. Może być pozyskiwana z odnawialnych surowców roślinnych, jest biodegradowalna i nietoksyczna, a procesy jej produkcji – przy odpowiedniej optymalizacji – mogą być znacznie mniej obciążające dla środowiska niż technologie oparte na tworzywach sztucznych. Tym samym staje się realną alternatywą dla materiałów syntetycznych, których nadprodukcja i utylizacja stanowią poważne wyzwanie ekologiczne.

Artykuł pokazał nie tylko wszechstronność zastosowań nanocelulozy, lecz także zarysował możliwości jej wykorzystania – jako ogniwa w procesie przekształcania gospodarki liniowej w gospodarkę o obiegu zamkniętym. Nanoceluloza może wspierać rozwój nowoczesnych biomateriałów, systemów dostarczania leków, inteligentnych opakowań, kompozytów nowej generacji czy innowacyjnych rozwiązań w zakresie magazynowania energii. W nadchodzących latach warto skoncentrować się na rozwijaniu efektywnych, niskoemisyjnych metod wytwarzania nanocelulozy oraz opracowaniu

modeli włączania jej w istniejące procesy przemysłowe. Równolegle, istotne będzie również prowadzenie działań edukacyjnych i popularyzatorskich – aby wiedza o potencjale nanocelulozy nie pozostała domeną wyłącznie środowisk akademickich.

Jednocześnie nie sposób pominąć wyzwań, które stoją na drodze jej szerokiego wdrożenia. Są to przede wszystkim koszty produkcji, ograniczenia technologiczne (np. związane ze skalowaniem procesów) oraz konieczność dostosowania do wymogów regulacyjnych.

Choć nanoceluloza roślinna wciąż pozostaje dla wielu pojęciem niszowym, nie sposób ignorować jej rosnącego znaczenia w świecie nauki i technologii. To, co dziś opisujemy jako „materiał przyszłości”, może już niebawem stać się codziennością – pod warunkiem, że jako społeczeństwo zdecydujemy się inwestować w wiedzę, innowację i zrównoważony rozwój. W obliczu narastających problemów środowiskowych i konieczności odejścia od gospodarki opartej na surowcach nieodnawialnych, warto zadać sobie pytanie: czy potrafimy wykorzystać to, co oferuje nam natura, z poszanowaniem jej rytmu i równowagi? Nanoceluloza daje ku temu realną szansę. Warto tę szansę zauważyć – i wykorzystać z rozwagą.

BIBLIOGRAFIA

- Ahmed, M.K., Khalifa, A.J.N., 2024. Improving the Thermal Properties of Phase Change Materials Using Different Types of Additives: A Review. *Library Progress International*, 44(2s), 1475–1499. ISSN 0970 1052
- Ahmed, S., Islam, M.S., Antu, U.B., Islam, M.M., Rajput, V.D., i in., 2024. Nanocellulose: A novel pathway to sustainable agriculture, environmental protection, and circular bioeconomy. *International Journal of Biological Macromolecules*, 137979. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.137979>
- Akhter, F., Pinjaro, M.A., Ahmed, J., Ahmed, M., Arain, H.J., i in., 2025. Recent advances and synthesis approaches for enhanced heavy metal adsorption from wastewater by silica-based and nanocellulose-based 3D structured aerogels: a state of the art review with adsorption mechanisms and prospects. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 15(5), 6585–6614. <https://doi.org/10.1007/s13399-024-05469-6>
- Alić, J., Schlegel, M.C., Emmerling, F., Stolar, T., 2024. Meeting the UN sustainable development goals with mechanochemistry. *Angewandte Chemie International Edition*, 63(50), e202414745. <https://doi.org/10.1002/anie.202414745>
- Al-Zu'bi, M., Fan, M., 2025. Nanocellulose Technologies: Production, Functionalization, and Applications in Medicine and Pharmaceuticals – A Review *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, 113(5), e35585. <https://doi.org/10.1002/jbm.b.35585>
- Babaei-Ghazvini, A., Patel, R., Vafakish, B., Yazdi, A.F.A., Acharya, B., 2024. Nanocellulose in targeted drug delivery: A review of modifications and synergistic applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, 135200. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.135200>
- Bai, L., Huan, S., Zhu, Y., Chu, G., McClements, D.J., Rojas, O.J., 2021. Recent Advances in Food Emulsions and Engineering Foodstuffs Using Plant-Based Nanocelluloses. *Annual Review of Food Science and Technology*, 12, 383–406. <https://doi.org/10.1146/annurev-food-061920-123242>
- Chin, K.M., Sung Ting, S., Ong, H.L., Omar, M., 2018. Surface functionalized nanocellulose as a veritable inclusionary material in contemporary bioinspired applications: A review. *Journal of Applied Polymer Science*, 135(13), 46065. <https://doi.org/10.1002/app.46065>
- Čolić, M., Tomić, S., Bekić, M., 2020. Immunological aspects of nanocellulose. *Immunology Letters*, 222, 80–89. <https://doi.org/10.1016/j.imlet.2020.04.004>
- da Silva, R.N.A., de Macedo Neto, J.C., Kimura, S.P.R., 2022. Natural fiber for reinforcement

- in matrix polymeric. *Independent Journal of Management Production*, 13(1), 154–167. <https://doi.org/10.14807/ijmp.v13i1.1475>
- Das, R., Lindström, T., Khan, M., Rezaei, M., Hsiao, B.S., 2023. Nanocellulose preparation from diverse plant feedstocks, processes, and chemical treatments: A review emphasizing non-woods. *BioResources*, 19(1). <https://doi.org/10.15376/biores.19.1.das>
- de Amorim, J.D.P., de Souza, K.C., Duarte, C.R., da Silva Duarte, I., de Assis Sales Ribeiro, i in., 2020. Plant and bacterial nanocellulose: production, properties and applications in medicine, food, cosmetics, electronics and engineering. A review. *Environmental Chemistry Letters*, 18, 851–869. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-00989-9>
- Ferreira, F.V., Pinheiro, I.F., de Souza, S.F., Mei, L.H., Lona, L.M., 2019. Polymer composites reinforced with natural fibers and nanocellulose in the automotive industry: A short review. *Journal of Composites Science*, 3(2), 51. <https://doi.org/10.3390/jcs3020051>
- Frank, B.P., Smith, C., Caudill, E.R., Lankone, R.S., Carlin, K., i in., 2021. Biodegradation of functionalized nanocellulose. *Environmental Science Technology*, 55(15), 10744–10757. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c07253>
- Gan, P.G., Sam, S.T., Abdullah, M.F.B., Omar, M.F., 2019. Thermal properties of nanocellulose-reinforced composites: A review. *Journal of Applied Polymer Science*, 137(11), 48544. <https://doi.org/10.1002/app.48544>
- Gao, W., Tu, Q., Wang, P., Zeng, J., Li, J., i in., 2024. Conductive polymer/nanocellulose composites as a functional platform for electronic devices: A mini-review. *Polymer Reviews*, 64(1), 162–191. <https://doi.org/10.1080/15583724.2023.2220018>
- Goncalves, J., El-Bakkari, M., Boluk, Y., Bindiganavile, V., 2019. Cellulose nanofibres (CNF) for sulphate resistance in cement based systems. *Cement and Concrete Composites*, 99, 100–111. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.03.005>
- Gopinath, K.P., Rajagopal, M., Krishnan, A., Sreerama, S.K., 2021. A review on recent trends in nanomaterials and nanocomposites for environmental applications. *Curr Anal Chem*, 17(2), 202–243. <https://doi.org/10.2174/1573411016666200102112728>
- Han, S., Li, J., Zang, J., Ding, Q., Yu, Z., Lu, Y., 2025. Effects of cellulose nanofibrils on the mechanical and thermal properties of phase change foams based on polyethylene glycol/cellulose nanofibrils/waterborne polyurethane. *International Journal of Biological Macromolecules*, 287, 138655. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.138655>
- He, R., Xie, C., Chen, Y., Guo, Z.X., Guo, B., Tuo, X., 2022. Robust and highly resilient waterborne polyurethane-based composite aerogels prepared by blending with aramid nanofibers. *Current Analytical Chemistry*, 228, 109622. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2022.109622>
- Hernandez Perez, R., Olarte Paredes, A., Salgado Delgado, R., Salgado Delgado, A.M., 2023. Rice husk Var. 'Morelos A-2010' as an eco-friendly alternative for the waste management converting them cellulose and nanocellulose. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 103(19), 7571–7586. <https://doi.org/10.1080/03067319.2021.1972991>
- Hutten, I.M., 2016. Standards for Nonwoven Filter Media. *Handbook of Nonwoven Filter Media*, 563–588. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-098301-1.00011-3>
- Islam, M.T., Alam, M.M., Patrucco, A., Montarsolo, A., Zoccola, M., 2014. Preparation of nanocellulose: A review. *AATCC Journal of Research*, 1(5), 17–23. <https://doi.org/10.14504/ajr.1.5.3>
- James, A., Rahman, M.R., Mohamad Said, K.A., Kanakaraju, D., Sueraya, A.Z., i in., 2024. A review of nanocellulose modification and compatibility barrier for various applications. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 37(6), 2149–2199. <https://doi.org/10.1177/08927057231205451>

- Kim, H., Dutta, S.D., Randhawa, A., Patil, T.V., Ganguly, K., i in., 2024. Recent advances and biomedical application of 3D printed nanocellulose-based adhesive hydrogels: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 130732. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.130732>
- Kumar, S., Ngasainao, M.R., Sharma, D., Sengar, M., Gahlot, A.P.S., i in., 2022. Contemporary nanocellulose-composites: A new paradigm for sensing applications. *Carbohydrate Polymers*, 298, 120052. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.120052>
- Kupnik, K., Primožič, M., Kokol, V., Leitgeb, M., 2020. Nanocellulose in drug delivery and antimicrobially active materials. *Polymers (Basel)*, 12(12), 2825. <https://doi.org/10.3390/polym12122825>
- Li, J., Wu, R., Wang, W.J., Lim, K.H., Yang, X., 2025a. Papers with high filler contents enabled by nanocelluloses as retention and strengthening agents. *Carbohydrate Polymers*, 358, 123506. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2025.123506>
- Li, L., Su, Y., Klein, F., Garemark, J., Li, Z., i in., 2025b. Synchronized ultrasonography and electromyography signals detection enabled by nanocellulose based ultrasound transparent electrodes. *Carbohydrate Polymers*, 347, 122641. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2024.122641>
- Li, L., Zhong, D., Wang, S., Zhou, M., 2025c. Plant-derived materials for biomedical applications. *Nanoscale*, 17(2), 722–739. <https://doi.org/10.1039/d4nr03057e>
- Liu, C., Wang, H., Lei, T., He, Y., Zhu, F., i in., 2025. Design of boron nitride/nanocellulose aerogel-stabilized phase change materials for efficient thermal energy capture and storage. *International Journal of Biological Macromolecules*, 295, 139572. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.139572>
- Liu, H., Du, H., Zheng, T., Liu, K., Ji, X., i in., 2021. Cellulose based composite foams and aerogels for advanced energy storage devices. *Chemical Engineering Journal*, 426, 130817. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.130817>
- Liu, H., Xu, T., Cai, C., Liu, K., Liu, W., i in., 2022. Multifunctional superelastic, superhydrophilic, and ultralight nanocellulose-based composite carbon aerogels for compressive supercapacitor and strain sensor. *Advanced Functional Materials*, 32(26), 2113082. <https://doi.org/10.1002/adfm.202113082>
- Liu, L., Zheng, K., Yan, Y., Cai, Z., Lin, S., i in., 2018. Graphene Aerogels Enhanced Phase Change Materials prepared by one-pot method with high thermal conductivity and large latent energy storage. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 185, 487–493. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2018.06.005>
- Lv, Q., Ma, X., Zhang, C., Han, J., He, S., i in., 2024a. Nanocellulose-based nanogenerators for sensor applications: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 259, 129268. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.129268>
- Lv, X., Huang, Y., Hu, M., Wang, Y., Dai, D., i in., 2024b. Recent advances in nanocellulose based hydrogels: Preparation strategy, typical properties and food application. *International Journal of Biological Macromolecules*, 134015. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.134015>
- Maitra, M., Adari, R., Radha, P., 2025. Sustainable packaging films: polylactic acid-surface-modified nanocellulose-pectin biocomposite to extend shelf life of strawberry fruit. *Journal of Food Science and Technology*, 1–15. <https://doi.org/10.1007/s13197-024-06195-7>
- Mishra, P.K., Pavelek, O., Rasticova, M., Mishra, H., Ekielski, A., 2022. Nanocellulose-based biomedical scaffolds in future bioeconomy: a techno-legal assessment of the state-of-the-art. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 9, 789603. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.789603>
- Nishiguchi, A., Taguchi, T., 2019. Osteoclast-responsive, injectable bone of bisphosphonated-nanocellulose that regulates osteoclast/osteoblast activity for bone regeneration. *Biomacromolecules*, 20(3), 1385–1393. <https://doi.org/10.1021/acs.biomac.8b01767>
- Nishiguchi, A., Taguchi, T., 2020. Designing an anti-inflammatory and tissue-adhesive collo-

- dal dressing for wound treatment. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 188, 110737. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2019.110737>
- Norizan, M.N., Shazleen, S.S., Alias, A.H., Sabaruddin, F.A., Asyraf, M.R.M., i in., 2022. Nanocellulose-based nanocomposites for sustainable applications: a review. *Nanomaterials (Basel)*, 12(19), 3483. <https://doi.org/10.3390/nano12193483>
- Olędzki, R., Walaszczyk, E., 2020. Bionanocellulose-properties, acquisition and perspectives of application in the food industry/ Bionanoceluloza-właściwości, pozyskiwanie i perspektywy zastosowania w przemyśle spożywczym. *Advancements of Microbiology*, 59(1), 87–103. <https://doi.org/10.21307/pm-2020.59.1.008>
- Pacaphol, K., Aht-Ong, D., 2017. The influences of silanes on interfacial adhesion and surface properties of nanocellulose film coating on glass and aluminum substrates. *Surface and Coatings Technology*, 320, 70–81. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.01.111>
- Perdani, C.G., Gunawan, S., 2021. A short review: Nanocellulose for smart biodegradable packaging in the food industry. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 924, 012032. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/924/1/012032>
- Poulouse, A., Parameswaranpillai, J., George, J.J., Gopi, J.A., Krishnasamy, S., i in., 2022. Nanocellulose: a fundamental material for science and technology applications. *Molecules*, 27(22), 8032. <https://doi.org/10.3390/molecules27228032>
- Prabsangob, N., 2023. Plant-based cellulose nanomaterials for food products with lowered energy uptake and improved nutritional value. *NFS Journal*, 31, 39–49. <https://doi.org/10.1016/j.nfs.2023.03.002>
- Qin, Z., Ng, W., Ede, J., Shatkin, J.A., Feng, J., i in., 2024. Nanocellulose and its modified forms in the food industry: Applications, safety, and regulatory perspectives. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 23, e70049. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.70049>
- Rajinipriya, M., Nagalakshmaiah, M., Robert, M., Elkoun, S., 2018. Importance of agricultural and industrial waste in the field of nanocellulose and recent industrial developments of wood based nanocellulose: a review. *ACS Sustainable Chemical Engineering*, 6(3), 2807–2828. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b03437>
- Santos, M.V., Pugina, R.S., Fontes, M.L., Onishi, B.S. D., Torres, F.R., i in., 2025. Nanocellulose-based materials for photonic applications. *Optical Materials Express*, 15(5), 977–1004. <https://doi.org/10.1364/ome.548069>
- Shah, M., Hakim, N.U.D., 2025. Advances in nanocellulose proton conductivity and applications in polymer electrolyte membrane fuel cells. *Next Materials*, 6, 100484. <https://doi.org/10.1016/j.nxmte.2025.100484>
- Sharma, T., Manik, G., 2025. Sustainable UV-resistant and anti-bacterial wood coating reinforced with cellulose nanofibers (CNF) and titanium dioxide nanoparticles: Synthesis, characterization and properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, 140533. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.140533>
- Sheraz, M., Sun, X.F., Siddiqui, A., Wang, Y., Hu, S., i in., 2025. Cellulose-Based Electrochemical Sensors (Basel). *Sensors (Basel)*, 25(3), 645. <https://doi.org/10.3390/s25030645>
- Snopek, K., Broda, M., Żywicka, A., 2024. Celuloza bakteryjna – nanobiomateriał przyszłości. *Kosmos (Wars)*, 73(3), 297–316. https://doi.org/10.36921/kos.2024_3034
- Solecka, D., 2015. Ściana komórki roślinnej – struktura z przyszłością. *Kosmos (Wars)*, 64(3), 415–429.
- Somerville, C., Bauer, S., Brininstool, G., Facette, M., Hamann, T., i in., 2004. Toward a systems approach to understanding plant cell walls. *Science*, 306(5705), 2206–2211. <https://doi.org/10.1126/science.1102765>
- Subhedar, A., Bhadauria, S., Ahankari, S., Kargazadeh, H., 2021. Nanocellulose in biomedical and biosensing applications: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 166, 587–600. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.10.217>

- Szustak, M., Gendaszewska-Darmach, E., 2021. Nanocellulose-based scaffolds for chondrogenic differentiation and expansion. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 9, 736213. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.736213>
- Tang, J., Bao, L., Li, X., Chen, L., Hong, F.F., 2015. Potential of PVA-doped bacterial nano-cellulose tubular composites for artificial blood vessels. *Journal of Materials Chemistry B*, 3(43), 8537–8547. <https://doi.org/10.1039/c5tb01144b>
- Thomas, B., Raj, M.C., Joy, J., Moores, A., Drisko, G.L., Sanchez, C., 2018. Nanocellulose, a versatile green platform: from biosources to materials and their applications. *Chemical Reviews*, 118(24), 11575–11625. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.7b00627>
- Vilarinho, F., Sanches Silva, A., Vaz, M.F., Farinha, J.P., 2018. Nanocellulose in green food packaging. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 58(9), 1526–1537. <https://doi.org/10.1080/10408398.2016.1270254>
- Wang, D., Peng, H., Wu, Y., Zhang, L., Li, M., i in., 2020. Bioinspired lamellar barriers for significantly improving the flame-retardant properties of nanocellulose composites. *ACS Sustainable Chemistry Engineering*, 8(11), 4331–4336. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b07745>
- Yahya, M., Chen, Y.W., Lee, H.V., Hassan, W.H.W., 2018. Reuse of selected lignocellulosic and processed biomasses as sustainable sources for the fabrication of nanocellulose via Ni (II)-catalyzed hydrolysis approach: a comparative study. *Journal of Polymers and the Environment*, 26, 2825–2844. <https://doi.org/10.1007/s10924-017-1167-2>
- Yang, C., Zhu, Y., Tian, Z., Zhang, C., Han, X., i in., 2024a. Preparation of nanocellulose and its applications in wound dressing: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 254, 127997. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.127997>
- Yang, Y., Dang, B., Wang, C., Chen, Y., Chen, K., i in., 2024b. Ultrastrong lightweight nanocellulose-based composite aerogels with robust superhydrophobicity and durable thermal insulation under extremely environment. *Carbohydrate Polymers*, 323, 121392. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2023.121392>
- Yang, Y., Li, X., Wan, C., Zhang, Z., Cao, W., i in., 2024c. A comprehensive review of cellulose nanomaterials for adsorption of wastewater pollutants: focus on dye and heavy metal Cr adsorption and oil/water separation. *Collagen and Leather*, 6(1), 35. <https://doi.org/10.1186/s42825-024-00179-1>
- Zhang, E., Ma, C., Wang, T., Mu, L., Yang, Y., Chen, G., 2025a. Anisotropic nanocellulose-based aerogels for radiative cooling. *International Journal of Biological Macromolecules*, 295, 139580. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.139580>
- Zhang, Y., Wu, Y., Liu, Z., Zhang, Q., Lu, J., i in., 2025b. Preparation and properties of waterborne polyurethane/nanocellulose/sepiolite composite aerogel for sound absorption and heat insulation. *International Journal of Biological Macromolecules*, 298, 140015. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.140015>
- Zhou, J., Hsieh, Y.L., 2018. Conductive polymer protonated nanocellulose aerogels for tunable and linearly responsive strain sensors. *ACS applied materials interfaces*, 10(33), 27902–27910. <https://doi.org/10.1021/acsami.8b10239>

NANOCELULOZA ROŚLINNA

ekologiczny polimer przyszłości

WŁAŚCIWOŚCI



- odnawialna
- biodegradowalna
- wysoka wytrzymałość mechaniczna
- nietoksyczna
- łatwa modyfikacja chemiczna

EKOLOGICZNOŚĆ

- niski wpływ na środowisko
- alternatywa dla polimerów syntetycznych
- gospodarka o obiegu zamkniętym

ŹRÓDŁA I POZYSKIWANIE



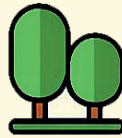
uprawy



odpady
rolne



resztki
z przemysłu
papierniczego



ZASTOSOWANIA



zastosowania
medyczne



magazynowanie
energii



przemysł
spożywczy



remediacja
środowiska

REGULACJE PRAWNE



