



## Celuloza bakteryjna - zastosowanie

### Bacterial cellulose - applications

Dominika Bednarczyk<sup>a</sup>, *ORCID: 0000-0003-0533-8118*  
Izabela Betlej<sup>b</sup>, *ORCID: 0000-0001-6867-0383*  
Piotr Boruszewski<sup>b,\*</sup>, *ORCID: 0000-0002-6500-0680*

<sup>a</sup>Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, Wydział Technologii Drewna, ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa, Polska

<sup>b</sup> Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, Instytut Nauk Drzewnych i Meblarstwa, ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa, Polska

\*Osoba do korespondencji: [piotr\\_boruszewski@sggw.edu.pl](mailto:piotr_boruszewski@sggw.edu.pl)

---

#### Streszczenie

W pracy przedstawiono możliwości zastosowania celulozy bakteryjnej w licznych dziedzinach przemysłu. Dane literaturowe wskazują na bardzo dobre parametry wytrzymałości mechanicznej i fizycznej biopolimeru bakteryjnego, takie jak wysoka wytrzymałość na rozciąganie, elastyczność, chłonność oraz znacznie wyższy stopień polimeryzacji i krystaliczności w porównaniu do celulozy pochodzenia roślinnego. Dokonana kwerenda potwierdza, że celuloza bakteryjna jako polimer pozbawiony ligniny i hemiceluloz może być w zdecydowanie łatwiejszy sposób przetwarzana i wykorzystywana do różnych celów aplikacyjnych w różnych branżach i sektorach gospodarki, od medycyny po przemysł papierniczy czy elektroniczny.

#### Abstract

The paper presents the possibilities of using bacterial cellulose in numerous branches of industry. Literature data indicate very good mechanical and physical strength parameters of the bacterial biopolymer, such as high tensile strength, flexibility, absorbency, and a much higher degree of polymerization and crystallinity compared to plant-derived cellulose. The conducted query confirms that bacterial cellulose, as a polymer devoid of lignin and hemicelluloses, can be much easier processed and used for various applications in various industries and sectors of the economy, from medicine to the paper and electronic industry.

**Słowa kluczowe:** celuloza bakteryjna, zastosowanie, aplikacyjność, przemysł, gospodarka

**Keywords:** bacterial cellulose, application, applicability, industry, economy

## **Wprowadzenie**

Możliwości technologicznego wykorzystania celulozy są ogromne, jednakże pozyskanie czystej celulozy, czyli oddzielenie jej od składników inkrustujących wymaga obróbki chemicznej, która może powodować trwałe zmiany w strukturze, wpływające na jej właściwości fizyczne i mechaniczne. Interesująca zatem wydaje się możliwość wykorzystania celulozy pochodzenia bakteryjnego (BC), która chemicznie jest takim samym polimerem co celuloza roślinna, jednak w przeciwieństwie do niej pozbawiona innych polimerów i inaczej usieciowana. Wyjątkowe właściwości mechaniczne i fizykochemiczne celulozy bakteryjnej oraz możliwość tworzenia kompozytów z szeroką gamą innych materiałów sprawiają, że wykazuje ona szerokie spektrum zastosowań w różnych obszarach. Do tej pory najwięcej badań poświęcono możliwościom wykorzystania celulozy bakteryjnej w medycynie, inżynierii tkankowej, przemyśle spożywczym i papierniczym. Biofilm celulozowy zaczyna jednak zyskiwać na znaczeniu także w przemyśle elektronicznym, tekstylnym, w produkcji opakowań, czy w ochronie środowiska w przetwarzaniu odpadów przemysłowych (Chawla i in. 2009; Huang i in. 2013; Antolak i Kręgiel 2015; Gallegos i in. 2016; Kołaczkowska i in. 2019; Skočaj 2019).

Wyjątkowe cechy i właściwości celulozy bakteryjnej sprawiają, że jest ona potencjalnie obiecującym biomateriałem w kontekście zastosowań w różnych dziedzinach życia oraz gałęziach gospodarki. Bardzo duże znaczenie w docelowym zastosowaniu biopolimeru tego typu ma sposób prowadzenia jego hodowli. Celuloza wytwarzana w warunkach dynamicznych ma postać sferycznych kul, charakteryzuje się znacznie większą powierzchnią, porowatością i hydrofilowością w stosunku do celulozy syntetyzowanej w warunkach statycznych, która wytwarzana jest w formie płata. Większa powierzchnia czynna kulistej celulozy oraz jej wyższa chłonność ułatwia adsorbcję wielu substancji chemicznych. Próby adsorbcji i sieciowania w strukturze celulozy bakteryjnej takich związków jak enzymy, antybiotyki, a także jony metali ciężkich, były prowadzone przez licznych badaczy (Sunasee i in. 2016; Karimian i in. 2019). Próby modyfikacji celulozy bakteryjnej nanorurkami węglowymi i nanorurkami karboksylowymi prowadzili Nie i in. (2019). Autorzy badań poprzez modyfikacje obniżyli hydrofilowość polimeru, dzięki czemu zmodyfikowany żelowy kompozyt celulozowy uzyskał lepsze właściwości absorpcji związków hydrofobowych. Inny rodzaj modyfikacji celulozy bakteryjnej prowadzili Dai i in. (2019). Wprowadzając kolagen pomiędzy włókna celulozy nie zmienili jej struktury, ale zwiększyli stabilność termiczną i poprawili adhezję komórek fibroblastów. Znane są też modyfikacje celulozy żelatyną, agarem, chitozanem (Bae i in. 2004; Ciechańska 2004; Chang i in. 2012). W każdym ze wskazanych przypadków uzyskano poprawę właściwości mechanicznych i zdolności hydratacji biopolimeru. Opracowywane w ostatnich latach modyfikacje celulozy bakteryjnej wpływają na poprawę jej wybranych właściwości, umożliwiając poszerzenie oraz dywersyfikację obszarów jej zastosowań.

## **Cel i zakres pracy**

Celem pracy było przedstawienie różnych aspektów możliwości implementacji celulozy bakteryjnej, w zdwersyfikowanej działalności wybranych gałęzi przemysłu.

Zakres pracy obejmuje analizę literaturową określającą potencjał aplikacyjny celulozy bakteryjnej w obszarze wytwórczym poszczególnych branż, takich jak:

- biomedycyna,
- przemysł celulozowo-papierniczy,
- ochrona środowiska,
- elektronika,
- przemysł tekstylny,
- przemysł opakowaniowy.

## Biomedycyna

Celuloza pochodzenia mikrobiologicznego jest materiałem biodegradowalnym i biokompatybilnym, zatwierdzonym przez Amerykańską Agencję ds. Żywności i Leków (FDA), jako bezpieczny materiał do zastosowań biomedycznych (Rebelo i in. 2008). Nanowłóknista sieć włókienek celulozy bakteryjnej naśladuje do pewnego stopnia strukturę i właściwości macierzy komórkowej tkanek ssaków, dzięki czemu może być wykorzystywana w medycynie i inżynierii tkankowej (Huang i in. 2013). Błona, która nie została jeszcze poddana suszeniu po zakończeniu procesu fermentacji, wykazuje podobieństwo właściwości do tkanki miękkiej, a dobierając odpowiednie warunki i metodę hodowli, można uformować ją w praktycznie dowolny kształt, rozmiar i grubość (Wang i in. 2019).

Gojenie się ran jest długotrwałym biologicznym procesem, który ma za zadanie przywrócić skórze jej funkcje fizjologiczne i strukturalne oraz zapobiegać tworzeniu się tkanki bliznowatej. Rany po oparzeniach oraz rany przewlekłe, takie jak chroniczne owrzodzenia żyłne, odleżyny lub owrzodzenia cukrzycowe, stanowią wyzwanie do wyleczenia dla personelu medycznego. Nowoczesne materiały opatrunkowe powinny wykazywać jak największe podobieństwo do ludzkiej skóry, pod względem funkcjonalnym i strukturalnym. W tym celu stosowane są specjalne hydrożele, plastry hydrokoloidowe, czy membrany syntetyczne (Chawla i in. 2009). Opatrunki mają za zadanie utworzyć barierę ochronną przed potencjalną infekcją, utrzymywać wilgotne środowisko w ranie, zabezpieczać przed nadmierną utratą płynów, wchłaniać wysięki w ranach zapalnych, odznaczać się odpowiednią wytrzymałością i elastycznością umożliwiającą łatwą aplikację na ranę, a także umożliwić wprowadzanie związków leczniczych stymulujących proces regeneracji. Dzięki dużej elastyczności i wytrzymałości, przy jednoczesnej zdolności do zatrzymywania znacznych ilości wody, celuloza bakteryjna spełnia kryteria materiału opatrunkowego, pozwalającego na przeprowadzanie skutecznego i możliwie bezbolesnego procesu gojenia się ran (Huang i in. 2013). Wysoka porowatość celulozy bakteryjnej pozwala na wprowadzenie do rany antybiotyków i innych leków, zapewniając fizyczną

ochronę przed infekcjami z zewnątrz. Dodatkowo celuloza bakteryjna w kontakcie ze skórą nie powoduje reakcji alergicznych i mutagennych, a jej właściwości przeciwbakteryjne można zwiększyć poprzez modyfikacje błony nanocząstkami srebra (Rzesutek i in. 2014). Inne substancje, takie jak glukoza czy dekstryna, również są wykorzystywane do wzbogacania pożywek hodowlanych, w celu uzyskania kompozytów opatrunkowych (Stumpf i in. 2013). Dotychczasowe badania wykazały, że wykorzystanie membran na bazie celulozy bakteryjnej przyspiesza regenerację tkanek i proces nabłonkowania w porównaniu do konwencjonalnych opatrunków z materiałów syntetycznych (Ullah i in. 2016).

Powszechność występowania w dzisiejszym świecie chorób wieńcowych (chorób niedokrwienności serca) powoduje niekiedy konieczność całkowitej wymiany naczyń krwionośnych pobranych z ciała samego pacjenta, ciała dawcy lub wykorzystując materiały syntetyczne. Przeszczepy naturalnych naczyń krwionośnych mogą pociągać za sobą inne potencjalne problemy zdrowotne i powikłania pooperacyjne, a także ryzyko odrzucenia obcej tkanki w przypadku pobrania jej od dawcy (Ullah i in. 2016). Badacze opracowują sztuczne naczynia krwionośne z wykorzystaniem tworzyw syntetycznych, takich jak politereftalan etylenu (PET), ekspandowany politetrafluoroetylen (ePTFE) lub dakron, czyli włókno poliestrowe (Parveen i in. 2006). Materiały syntetyczne mogą być z powodzeniem wykorzystywane jedynie przy naczyniach o średnicach powyżej 6 mm, ze względu na niedostateczną biokompatybilność z krwią i ryzyko powstawania zakrzepicy (Fink i in. 2010). W tym wypadku podatność celulozy bakteryjnej na formowanie podczas wzrostu jest ważną cechą, która rozszerza jej zakres zastosowań na polu biomedycznym. Wykorzystanie celulozy bakteryjnej zmniejsza ryzyko wystąpienia skrzepów krwi (Keshk 2014; Kołaczowska i in. 2019). Stosując odpowiednie metody hodowli można uzyskać celulozę bakteryjną w kształcie rurek o praktycznie dowolnej długości i średnicy (Bodin i in. 2007b), które swoimi właściwościami mechanicznymi przypominają naturalne tętnice (Bäckdahl i in. 2006). Wewnętrzna powierzchnia implantu na bazie celulozy bakteryjnej może zostać zmodyfikowana, w celu zwiększenia jej biogodności w kontakcie z krwią, a warunki hodowli udoskonalone, aby otrzymać nanowłóknistą sieć o pożądanej mikroporowatości (Bodin i in. 2007a; Bäckdahl i in. 2008). Wan i in. (2010) opracowali wykorzystanie heparyny do modyfikacji celulozy bakteryjnej, jako koagulantu, który zapobiega powstawaniu zakrzepów. W innych badaniach wykorzystano karboksymetylocelulozę do utworzenia rurek kompozytowych BC-CMC (Orelma i in. 2014). Dodatek tlenu grafenu (GO) do kultury bakterii syntetyzującej celulozę i utworzenie kompozytu BC-GO o zwiększonej biokompatybilności, dodatkowo stymulującego proliferację komórek (Zhu i in. 2015).

Wyjątkowe właściwości celulozy bakteryjnej umożliwiają przeprowadzanie badań nad wykorzystaniem jej w inżynierii tkankowej, jako rusztowania komórkowego. Ze względu na swoją nanostrukturę i morfologiczne podobieństwo do kolagenu, celuloza bakteryjna może naśladować trójwymiarową macierz zewnątrzkomórkową tkanki kostnej (Torgbo i Sukai 2018). Polimer ten wykazuje również potencjał do zastosowania w okulistyce, jako podłoże do hodowania sztucznej rogówki (Ullah i in. 2016). Sztuczna rogówka produkowana

z użyciem celulozy bakteryjnej stanowi alternatywę dla keratoplastyki, która jest powszechną techniką przywracającą wzrok w wyniku następstw schorzeń narządu wzroku. Właściwości mechaniczne i przepuszczalność światła błony celulozowej stanowią o jej potencjale do leczenia skutków chorób oczu (Wang i in. 2013).

Potencjał wykorzystania celulozy bakteryjnej w medycynie znacznie przekracza wspomniane możliwości zastosowania. Nanokompozyty produkowane na bazie polimeru bakteryjnego mogą być wykorzystywane jako implanty tchawicy, substytut chrząstki stawowej przy leczeniu ortopedycznym, implanty łąkotki i więzadeł, sztuczne zastawy serca, czy jako rusztowanie do regeneracji komórek nerwowych (Bodin i in. 2007c; Mohammadi 2011; Pértile i in. 2012; Mathew i in. 2013).

### Przemysł celulozowo-papierniczy

Mając na uwadze ochronę zasobów leśnych i zwiększenie wykorzystania pozostałości rolno-przemysłowych, promuje się produkcję materiałów papierniczych z włókien niedrzewnych lub pochodzących z recyklingu (Xiang i in. 2017). Szczególny potencjał celulozy bakteryjnej upatruje się w wykorzystaniu jej w przemyśle celulozowo-papierniczym, jako przyjazny środowisku substytut włókien roślinnych oraz dodatkowy składnik wyrobów papierniczych, który mógłby poprawić żywotność i właściwości papieru recyklingowego (Gallegos i in. 2016).

Nanowłókna celulozy bakteryjnej charakteryzują się lepszymi właściwościami mechanicznymi, w porównaniu z celulozą pochodzenia roślinnego (Osong i in. 2015). Polimer może być stosowana jako środek wzmacniający papier lub jako jedyny surowiec do jego produkcji (Yousefi i in. 2013; Campano i in. 2018). Pomimo nadal wysokich kosztów biosyntezy, zyskuje ona na znaczeniu w produkcji papieru specjalnego przeznaczenia o większych wymaganiach wytrzymałościowych lub o pożądanym specyficznym cechach fizykochemicznych (Huang i in. 2013). Obecność celulozy bakteryjnej w półproduktach papierniczych prowadzi do poprawy ich właściwości wytrzymałościowych i trwałości gotowych wyrobów (Surma-Ślusarska i in. 2008b). W badaniach porównujących wytrzymałość bielonych mas włóknistych brzoźowych i sosnowych wykazano, że połączenie włókien roślinnych z celulożą bakteryjną zwiększa ich wytrzymałość na rozerwanie (Surma-Ślusarska i in. 2008a; Xiang i in. 2017). Charakteryzowany surowiec może również zwiększyć odporność papieru na wilgoć. Względna zdolność arkuszy papieru do absorpcji wody maleje wraz ze wzrostem zawartości włókien celulozy bakteryjnej (Gao i in. 2010). Tłumaczy się to częściowym zniszczeniem nanowłóknistej sieci polimeru bakteryjnego i przerwanyimi wiązaniami wodorowymi, które po dyspergowaniu w masie włóknistej z drewna iglastego prawie nie tworzyły nowych wiązań z cząsteczkami wody, przez co materiał wchłaniał tym mniej wilgoci, im większa była zawartość celulozy bakteryjnej. W celu uzyskania papieru o zmniejszonej palności wprowadzono do pożywki hodowlanej fosfor, zastępując czystą glukozę fosforanem glukozy, będącego źródłem węgla dla wzrastających bakterii (Basta i El-Saied 2009). Stwierdzono, że dodatek 5% fosforylowanej celulozy (PBC)

do miazgi włóknistej podczas formowania arkuszy zwiększa wytrzymałość i trwałość masy oraz ogniochronność gotowych produktów, jednocześnie utrzymując wysoką wydajność syntezy na zmodyfikowanym medium. Dodatkowo, wykorzystanie celulozy bakteryjnej, jako przyjaznego dla środowiska substytutu włókien drzewnych, niesie za sobą obiecującą poprawę w zachowaniu zasobów leśnych. W badaniach porównujących wydajność wzrostu włókien pochodzenia roślinnego i mikrobiologicznego obliczono, że 1ha plantacji drzewa eukaliptusowego po 7 latach uprawy daje 80 ton celulozy, podczas gdy taka sama ilość biopolimeru może zostać wyprodukowana przez bakterie w bioreaktorach o pojemności 500 m<sup>3</sup> w ciągu 22 dni (Donini i in. 2018).

### Ochrona środowiska

Zanieczyszczenie środowiska stanowi obecnie globalny problem, przyczyniający się do licznych powikłań zdrowotnych ludzi, degradacji ekosystemów naturalnych i postępujących niekorzystnych zmian klimatycznych. Pozbywanie się ścieków, zawierających metale ciężkie, barwniki i inne związki organiczne, bez wcześniejszego oczyszczenia, ma toksyczny wpływ na środowisko. Celuloza bakteryjna stanowi atrakcyjny materiał adsorbujący, ze względu na wysoką porowatość drobnej sieci nanowłókien i dużą powierzchnię właściwą, która jest bezpośrednio związana z wydajnością adsorpcji (Huang i in. 2013). Przewyższa ona także inne naturalne sorbenty, jak błony chitozanowe, pod względem stabilności chemicznej (Mladenova i in. 2011). Galdino i in. (2020) zbadali zdolność błon celulozowych do oczyszczania wody z substancji oleistych. Przetestowano filtry zawierające celulozę bakteryjną pod kątem skuteczności separacji oleju silnikowego od wody w stężeniach 10, 150 i 230 ppm. Eksperymenty wykazały, że testowane membrany całkowicie oczyszczają wodę z obecnych substancji oleistych, zachowując przy tym wysoką wytrzymałość mechaniczną, elastyczność i stabilność termiczną. Inne badania wykazały zdolność fosforylowanej błony celulozowej (PBC) do adsorbowania jonów lantanowców i jonów metali przejściowych (Oshima i in. 2008). Stwierdzono także, że PBC skuteczniej adsorbuje makrocząsteczki, takie jak białka, niż fosforylowana celuloza roślinna (PPC) w takich samych warunkach, dzięki większej powierzchni właściwej. Aby zwiększyć adsorpcję metali ze ścieków, przeprowadza się modyfikacje chemiczne błon celulozowych, wprowadzając do pożywek inne substancje, jak karboksymetyloceluloza (Chen i in. 2009), lub poddając polimer modyfikacji w środowisku alkalicznym, tworząc amidoksymowaną celulozę bakteryjną AM-BC. Dodatkowo, zmodyfikowana celuloza może być z powodzeniem zregenerowana bez istotnego wpływu na jej skuteczność adsorpcji (Chen i in. 2010).

Pył zawieszony oraz wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne to tylko niektóre z toksycznych zanieczyszczeń obecnych powszechnie w powietrzu. Konieczne jest wytworzenie przyjaznych dla środowiska filtrów, które nie powodowałyby wtórnego zanieczyszczenia środowiska. Liu i in. (2017) opracowali kompozyt na bazie celulozy bakteryjnej połączonej z izolatem białka sojowego, który z niemal stuprocentową skutecznością zatrzymuje cząstki stałe w powietrzu. Skuteczność ta związana jest

z nanostrukturą celulozy bakteryjnej, która w sposób fizyczny wstępnie wychwytuje cząstki stałe, podczas gdy grupy funkcyjne obecne w białku sojowym działają dodatkowo, poprzez przyciąganie elektrostatyczne i dipolowe między materiałem filtrującym i cząstkami zanieczyszczeń.

### Elektronika

W szeroko pojętej dziedzinie elektroniki, celuloza bakteryjna pełni funkcję elastycznej matrycy do opracowywania materiałów o pożądanych właściwościach elektrycznych i magnetycznych wykorzystywanych do produkcji czujników, elastycznych elektrod, czy wyświetlaczy. Jednym z nich jest kompozyt zawierający celulozę bakteryjną oraz nanocząsteczki krzemu (SiNP) i polianilinę (PANI), który wykazuje wysoką elastyczność i stałą przewodność nawet po wielokrotnym poddaniu go obciążeniom zginającym, dzięki czemu może posłużyć jako anoda w akumulatorach litowo-jonowych (Park i in. 2016). Innym przykładem jest kompozyt ZnS-BC-ES6 na bazie włókien celulozy bakteryjnej, zmodyfikowanych za pomocą siarczku cynku i żywicy epoksydowej (Guan i in. 2017). Nanomateriały zawierające ZnS są znane jako półprzewodniki o wysokim współczynniku załamania światła i właściwościach optycznych, wykorzystywanych w technikach optoelektronicznych oraz urządzeniach emitujących i detekujących światło. Uzyskany kompozyt ZnS-BC-ES6 charakteryzował się zwiększoną elastycznością, przy zachowaniu stabilności termicznej, wysoką przepuszczalnością światła widzialnego rzędu 70% i dobrymi właściwościami fotochemicznymi (Guan i in. 2017). Ma i in. (2016) otrzymali membranę przewodzącą na bazie celulozy bakteryjnej z wykorzystaniem grafenu i polipirołu PPY-RGO-BC, która może mieć zastosowanie w elastycznych elektrodach superkondensatorów o dużej pojemności powierzchniowej. Matryca z nanowłókien celulozy bakteryjnej posłużyć może również do syntezy nanorurek ferrytu kobaltowego  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  o właściwościach magnetycznych w temperaturze pokojowej, które można zastosować jako nanoprzewody w układach elektronicznych (Menchaca-Nal i in. 2016). Inne podejście zakłada wykorzystanie membrany celulozowej do opracowywania glukozywnych ogniwno paliwowych (Cacicedo i in. 2016). Poprzez wprowadzenie w strukturę celulozy bakteryjnej nanocząsteczek srebra (AgNP) uzyskano membranę elektrodę o większej gęstości prądu niż elektrody Ag i AgNP, o wysokiej aktywności katalitycznej, dużej stabilności i biokompatybilności, dzięki czemu może ona posłużyć w ogniwnach, które wykorzystują glukozę i tlen do zasilania implantów medycznych (Zhang i in. 2015).

### Przemysł tekstylny

Pomysł wykorzystania celulozy bakteryjnej w branży tekstylnej i obuwniczej ma na celu sprostanie zapotrzebowaniu na nowe, wysokowydajne materiały naturalne, które zmniejszyłyby wpływ branży ubraniowej na środowisko. Skóra zwierzęcą powszechnie wykorzystywana w sektorze tekstylnym znacząco podnosi koszty wyrobów i wymaga stosowania często toksycznych substancji w procesie garbowania. Szacuje się, że

pojedyncza para skórzanego obuwia wymaga do produkcji 50 m<sup>2</sup> ziemi i 25 000 litrów wody (García i Prieto 2019). Zarówno wytworzenie, jak i utylizacja zużytych tekstyliów jest problematyczna pod względem negatywnego wpływu na środowisko. Elastyczna błona celulozowa o odpowiedniej grubości charakteryzuje się podobnymi właściwościami do skóry zwierzęcej. Fernandes i in. (2019a) wprowadzili do nanowłóknistej struktury celulozy bakteryjnej substancje zmiękczające i hydrofobizujące biofilm do uzyskania plastycznych, oddychających, a jednocześnie nieprzepuszczających wody materiałów, o potencjale do zastosowania jako substytut konwencjonalnych tekstyliów. Kompozyt otrzymany w wyniku wprowadzenia do statycznej hodowli akrylowanego epoksydowanego oleju sojowego (AESO) charakteryzował się dobrą hydrofobowością, stabilnością termiczną do temperatury 200°C i zwiększonym wydłużeniu przy zerwaniu, dając obiecujące wyniki, jako potencjalna alternatywa dla skóry. W 2014r. projektantka Suzanne Lee zaprezentowała odzież i obuwie wykonane z celulozy bakteryjnej na konferencji Wearable Futures w Londynie, podkreślając jej skóropodobne właściwości i kompostowalność, jako niezaprzeczalne korzyści, które mogą promować rozwój technologii biomateriałów w przemyśle tekstylnym (Fernandes i in. 2019b). Konieczne jest jednak poszerzanie modyfikacji celulozy bakteryjnej, celem zwiększenia jej wodoodporności, aby zyskała ona na znaczeniu w rozwoju branży tekstylnej.

### Przemysł opakowaniowy

Według doniesień Xie i in. (2022), w ostatnich latach skrobia (Dai i in. 2020), chitozan (Zhang i in. 2021), celuloza (Francisco i in. 2020), żelatyna (Shahvalizadeh i in. 2021) oraz inne biopolimery były szeroko stosowane w badaniach i rozwoju biodegradowalnych materiałów opakowaniowych. Celuloza ze względu na swoje zalety, takie jak łatwa dostępność, niska cena i przyjazność dla środowiska ma doskonale perspektywy w rozwoju biodegradowalnych materiałów opakowaniowych (Qasim in. 2021). Jednak należy mieć na uwadze, że dotychczas opracowane materiały opakowaniowe na bazie celulozy wykazują wyjątkowo wysoką absorpcję wody i przepuszczalność pary wodnej ze względu na obecność dużej liczby grup hydroksylowych (Pan i in. 2016). Dlatego konieczne jest opracowanie technologii modyfikacji folii celulozowych umożliwiającej otrzymanie błon o wysokiej odporności hydrofobowej, w celu poprawy ich zastosowań komercyjnych.

Wyjątkowa różnorodność właściwości celulozy bakteryjnej i względna łatwość ich modyfikacji sprawia, że cieszy się ona coraz szerszym zainteresowaniem kolejnych gałęzi przemysłu. Zwiększająca się świadomość szkodliwości dla środowiska tworzyw sztucznych, powszechnie stosowanych w przemyśle spożywczym oraz ich nieracjonalny proces produkcji skłaniają do poszukiwania nowych rozwiązań opakowaniowych. Wyjątkowe właściwości celulozy bakteryjnej (w tym przede wszystkim jej biodegradowalność), wpisują się w obszar poszukiwań przyjaznych dla ekosystemu bionanomateriałów z odnawialnych źródeł. Celuloza bakteryjna może posłużyć do stworzenia opakowań żywności, które będą nieprzepuszczalne dla gazów, cieczy, tłuszczów, czy mikroorganizmów. Arkusze celulozowe wzbogacone karboksymetylocelulozą lub gumą guar zostały przetestowane pod kątem



pakowania świeżych owoców. Ograniczony dopływ tlenu i zmniejszona przepuszczalność pary wodnej pozwoliła utrzymać świeżość owoców przez 15 dni, podczas gdy folie z tworzywa PET doprowadziły w tym samym czasie do ich całkowitego wyschnięcia. Dodatkowo uzyskane podczas badania materiały kompozytowe ulegały w 80% rozkładowi w ciągu 28 dni (Bandyopadhyay i in. 2019). Daje to obiecujące wyniki do prowadzenia dalszych badań nad zastosowaniem celulozy bakteryjnej w przemyśle spożywczym.

## Podsumowanie

W przedstawionym studium literatury wskazano, że celuloza bakteryjna, dzięki swoim wyjątkowym właściwościom może mieć ogromne znaczenie aplikacyjne w różnych gałęziach przemysłu. Wyjątkowość cech i właściwości implikuje możliwości zastosowania biopolimeru od medycyny aż po przemysł elektroniczny. Na uwagę jej potencjalnego wykorzystania zwraca dodatkowo fakt, że jest to polimer naturalny, nietoksyczny i biodegradowalny, przez co przyjazny dla środowiska. Wydaje się, że najważniejszym aspektem jej technologicznego wykorzystania jest opracowanie efektywnego sposobu syntezy, najlepiej z wykorzystaniem odpowiednich, ale i tanich surowców odpadowych bogatych w azot i węgiel, aby zniwelować wysokie koszty użycia standardowych odczynników mikrobiologicznych.

## Literatura

Antolak H., Kręgiel D., 2015: Bakterie kwasu octowego - taksonomia, ekologia oraz wykorzystanie przemysłowe. *Żywność. Nauka. Technologia. Jakość* 4, 21-35. DOI: 10.15193/ZNTJ/2015/101/053

Bäckdahl H., Esguerra M., Delbro D., Risberg B., Gatenholm P., 2008: Engineering microporosity in bacterial cellulose scaffolds. *Journal of Tissue Engineering and Regenerative Medicine* 2, 320-330. DOI: 10.1002/term.97

Bäckdahl H., Helenius G., Bodin A., Nannmark U., Johansson B.R., Risberg B., Gatenholm P., 2006: Mechanical properties of bacterial cellulose and interactions with smooth muscle cells. *Biomaterials* 27, 2141-2149. DOI: 10.1016/j.biomaterials.2005.10.026

Bae S., Sugano Y., Shoda M., 2004: Improvement of bacterial cellulose production by addition of agar in a jar fermentor. *Journal of Bioscience and Bioengineering* 97, 33-38. DOI: 10.1016/S1389-1723(04)70162-0

Bandyopadhyay S., Saha N., Brodnjak U.V., Saha P., 201: Bacterial cellulose and guar gum based modified PVP-CMC hydrogel films: Characterized for packaging fresh berries. *Food Packaging and Shelf Life* 22, 100402. DOI:10.1016/j.fpsl.2019.100402

Basta A.H., El-Saied H., 2009: Performance of improved bacterial cellulose application in the production of functional paper. *Journal of Applied Microbiology* 107, 2098-2107. DOI: 10.1111/j.1365-2672.2009.04467.x

Bodin A., Ahrenstedt L., Fink H., Brumer H., Risberg B., Gatenholm P., 2007a: Modification of Nanocellulose with a Xyloglucan-RGD Conjugate Enhances Adhesion and

Proliferation of Endothelial Cells: Implications for Tissue Engineering. *Biomacromolecules* 8, 3697-3704. DOI: 10.1002/term.334

Bodin A., Bäckdahl H., Fink H., Gustafsson L., Risberg B., Gatenholm P., 2007b: Influence of cultivation conditions on mechanical and morphological properties of bacterial cellulose tubes. *Biotechnology and Bioengineering* 97, 425-434. DOI: 10.1002/bit.21314

Bodin A., Concaro S., Britberg M., Gatenholm P., 2007c: Bacterial cellulose as a potential meniscus implant. *Journal of Tissue Engineering and Regenerative Medicine* 1, 406-408. DOI: 10.1002/term.51

Cacicedo M., Castro M., Servetas I., Bosnea L., Boura K., Tsafrakidou P., Dima A., Terpou A., Koutinas A., Castro G., 2016: Progress in bacterial cellulose matrices for biotechnological applications. *Bioresource Technology* 213, 172-180. DOI: 10.1016/j.biortech.2016.02.071

Campano C., Merayo N., Balea A., Tarrés Q., Delgado-Aguilar M., Mutjé P., Negro C., Blanco A., 2018: Mechanical and chemical dispersion of nanocelluloses to improve their reinforcing effect on recycled paper. *Cellulose* 25, 269-280. DOI: 10.1007/s10570-017-1552-y

Chang S.T., Chen L.C., Lin S.B., Chen H.H., 2012: Nano-biomaterials application: Morphology and physical properties of bacterial cellulose/gelatin composites via crosslinking. *Food Hydrocolloids* 27, 137-144. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2011.08.004

Chawla P., Bajaj I., Survase S., Singhal R., 2009: Microbial Cellulose: Fermentative Production and Applications. *Food Technology and Biotechnology* 47, 107-124.

Chen S., Shen W., Yu F., Hu W., Wang H., 2010. Preparation of amidoximated bacterial cellulose and its adsorption mechanism for Cu<sup>2+</sup> and Pb<sup>2+</sup>. *Journal of Applied Polymer Science* 117, 8-15. DOI: 10.1002/app.31477

Chen S., Zou Y., Yan Z., Shen W., Shi S., Zhang X., Wang H., 2009: Carboxymethylated-bacterial cellulose for copper and lead ion removal. *Journal of Hazardous Materials* 161, 1355-1359. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2008.04.098

Ciechańska D., 2004. Multifunctional bacterial cellulose/chitosan composite materials for medical applications. *Fibres & Textiles in Eastern Europe* 12(4): 69-72.

Dai L., Nan J., Tu X., He L., Wei B., Xu Ch., Xu Y., Li S., Wang H., Zhang J., 2019: Improved thermostability and cytocompatibility of bacterial cellulose/collagen composite by collagen fibrillogenesis. *Cellulose* 26, 6713-6724. DOI: 10.1007/s10570-019-02530-w

Dai L., Zhang J., Cheng, F., 2020: Cross-linked starch-based edible coating reinforced by starch nanocrystals and its preservation effect on graded Huangguan pears. *Food Chemistry* 311, 125891. DOI: 10.1016/j.foodchem.2019.125891

Donini Í.A.N., De Salvi D.T.B., Fukumoto F.K., Lustrì W.R., Barud H.D.S., Marchetto R., Messaddeq Y., Ribeiro S.J.L., 2018: Biosynthesis and recent advances in production of bacterial cellulose. *Eclética Química Journal* 35, 165-178. DOI: 10.26850/1678-4618eqj.v35.4.2010.p165-178

Fernandes M., Gama M., Dourado F., Souto A.P., 2019a: Development of novel bacterial cellulose composites for the textile and shoe industry. *Microbial Biotechnology* 12, 650-661. DOI: 10.1111/1751-7915.13387

Fernandes M., Souto A.P., Gama M., Dourado F., 2019b: Bacterial Cellulose and Emulsified AESO Biocomposites as an Ecological Alternative to Leather. *Nanomaterials* 9, 1710. DOI: 10.3390/nano9121710

Fink H., Faxälv L., Molnár G.F., Drotz K., Risberg B., Lindahl T.L., Sellborn A., 2010: Real-time measurements of coagulation on bacterial cellulose and conventional vascular graft materials. *Acta Biomaterialia* 6, 1125-1130. DOI: 10.1016/j.actbio.2009.09.019

Francisco C. B., Pellá M. G., Silva O. A., Raimundo K. F., Caetano J., Linde G. A., Colauto N.B, Dragunski D. C., 2020: Shelf-life of guavas coated with biodegradable starch and cellulose-based films. *International Journal of Biological Macromolecules* 152, 272-279. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2020.02.249

Galdino C.J.S., Maia A.D., Meira H.M., Souza T.C., Amorim J.D.P., Almeida F.C.G., Costa A.F.S., Sarubbo L.A., 2020: Use of a bacterial cellulose filter for the removal of oil from wastewater. *Process Biochemistry* 91, 288-296. DOI:10.1016/j.procbio.2019.12.020

Gallegos A.M.A., Herrera Carrera S., Parra R., Keshavarz T., Iqbal H.M.N., 2016: Bacterial Cellulose: A Sustainable Source to Develop Value-Added Products - A Review. *BioResources* 11, 5641-5655. DOI: 10.15376/biores.11.2.Gallegos

Gao W., Chen K., Yang R., Yang F., Han W., 2010: Properties of bacterial cellulose and its influence on the physical properties of paper. *BioResources* 6, 144-153. DOI: 10.15376/biores.6.1.144-153

García C., Prieto M.A., 2019: Bacterial cellulose as a potential bioleather substitute for the footwear industry. *Microbial Biotechnology* 12, 582-585. DOI: 10.1111/1751-7915.13306

Guan F., Chen S., Yao J., Zheng W., Wang H. 2017: ZnS/Bacterial Cellulose/Epoxy Resin (ZnS/BC/E56) Nanocomposites with Good Transparency and Flexibility. *Journal of Materials Science & Technology* 32, 153-157. DOI: 10.1016/j.jmst.2015.08.014

Huang Y., Zhu C., Yang J., Nie Y., Chen C., Sun D., 2013: Recent advances in bacterial cellulose. *Cellulose* 21, 1-30. DOI: 10.1007/s10570-013-0088-z

Karimian A., Parsian H., Majidina M., Rahimi M., Mir S.M., Kafil H.S., Shafiei-Irannejad V., Kheyrollah M., Ostadi H., Yousefi B., 2019: Nanocrystalline cellulose: Preparation, physicochemical properties, and applications in drug delivery systems. *International Journal of Biological Macromolecules* 133, 850-859. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2019.04.117

Keshk S., 2014: Bacterial Cellulose Production and its Industrial Applications, *Journal of Bioprocessing & Biotechniques* 4. DOI: 10.4172/2155-9821.1000150

Kończowska M., Siondalski P., Kowalik M.M., Pęksa R., Długa A., Zając W., Dederko P., Kołodziejska I., Malinowska-Pańczyk E., Sinkiewicz I., Staroszczyk H., Śliwińska A., Stanisławska A., Szkodo M., Pałczyńska P., Jabłoński G., Borman A., Wilczek P., 2019: Assessment of the usefulness of bacterial cellulose produced by *Gluconacetobacter xylinus*

E25 as a new biological implant. *Materials Science and Engineering: C* 97, 302-312. DOI: 10.1016/j.msec.2018.12.016

Liu X., Souzandeh H., Zheng Y., Xie Y., Zhong W., Wang C., 2017: Soy protein isolate/bacterial cellulose composite membranes for high efficiency particulate air filtration. *Composites Science and Technology* 138, 124-133. DOI: 10.1016/j.compscitech.2016.11.022

Ma L., Liu R., Niu H., Zhao M., Huang Y., 2016: Flexible and freestanding electrode based on polypyrrole/graphene/bacterial cellulose paper for supercapacitor. *Composites Science and Technology* 137, 87-93. DOI: 10.1016/j.compscitech.2016.10.027

Mathew A. P., Oksman K., Pierron D., Harmand M., 2013: Biocompatible fibrous networks of cellulose nanofibres and collagen crosslinked using genipin: Potential as artificial ligament/tendons. *Macromolecular Bioscience* 13, 289-298. DOI: 10.1002/mabi.201200317

Menchaca-Nal S., Londoño-Calderón C.L., Cerrutti P., Foresti M.L., Pampillo L., Bilovol V., Candal R., Martínez-García R., 2016: Facile synthesis of cobalt ferrite nanotubes using bacterial nanocellulose as template. *Carbohydrate Polymers* 137, 726-731. DOI: 10.1016/j.carbpol.2015.10.068

Mladenova E.K., Dakova I.G., Karadjova I.B., 2011: Chitosan membranes as sorbents for trace elements determination in surface waters. *Environmental Science and Pollution Research* 18, 1633-1643. DOI: 10.1007/s11356-011-0529-x

Mohammadi H., 2011: Nanocomposite biomaterial mimicking aortic heart valve leaflet mechanical behaviour. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine* 225, 718-722. DOI: 10.1177/09544119111399826

Nie X., Lv P., Stanley S.L., Wang D., Wu S., Wei Q., 2019. Ultralight nanocomposite aerogels with interpenetrating network structure of bacterial cellulose for oil absorption. *Journal of Applied Polymers Science* 136, 1-8. DOI: 10.1002/app.48000

Orelma H., Morales L.O., Johansson L., Hoeger I.C., Filpponen I., Castro C., Rojas O.J., Laine J., 2014: Affibody conjugation onto bacterial cellulose tubes and bioseparation of human serum albumin. *RSC Advances* 4, 51440-51450. DOI: 10.1039/C4RA08882D

Oshima T., Kondo K., Ohto K., Inoue K., Baba Y., 2008: Preparation of phosphorylated bacterial cellulose as an adsorbent for metal ions. *Reactive and Functional Polymers* 68, 376-383. DOI: 10.1016/j.reactfunctpolym.2007.07.046

Osong S.H., Norgren S., Engstrand P., 2015: Processing of wood-based microfibrillated cellulose and nanofibrillated cellulose, and applications relating to papermaking: a review. *Cellulose* 23, 93-123. DOI:10.1007/s10570-015-0798-5

Pan Y., Wang F., Wei T., Zhang C., Xiao H. 2016: Hydrophobic modification of bagasse cellulose fibers with cationic latex: Adsorption kinetics and mechanism. *Chemical Engineering Journal* 302, 33-43. DOI: 10.1016/j.cej.2016.05.022

Park M., Lee D., Shin S., Kim H.J., Hyun J., 2016: Flexible conductive nanocellulose combined with silicon nanoparticles and polyaniline. *Carbohydrate Polymers* 140, 43-50. DOI: 10.1016/j.carbpol.2015.12.046

Parveen S., Krishnakumar K., Sahoo S., 2006: New era in health care: Tissue engineering. *Journal of Stem Cells & Regenerative Medicine* 1, 8-24. DOI: 10.46582/jsrm.0101003

Pértile R., Moreira S., Andrade F., Domingues L., Gama M., 2012: Bacterial cellulose modified using recombinant proteins to improve neuronal and mesenchymal cell adhesion. *Biotechnology Progress* 28, 526-532. DOI: 10.1002/btpr.1501

Qasim U., Osman A. I., Al-Muhtaseb A. H., Farrell C., Al-Abri M., Ali M., Vo D.-V.N., Jamil F., Rooney D. W., 2021: Renewable cellulosic nanocomposites for food packaging to avoid fossil fuel plastic pollution: A review. *Environmental Chemistry Letters* 19, 613-641. DOI: 10.1007/s10311-020-01090-x

Rebello A., Archer A.J., Chen X., Liu C., Yang G., Liu Y., 2018: Dehydration of bacterial cellulose and the water content effects on its viscoelastic and electrochemical properties. *Science and Technology of Advanced Materials* 19, 203-211. DOI: 10.1080/14686996.2018.1430981

Rzeszutek J., Matysiak - Kucharek M., Czajka M., Sawicki K., Rachubik P., Kruszewski M., Kapka L., 2014: Zastosowanie nanocząstek i nanomateriałów w medycynie. *Hygeia Public Health* 49, 449-457.

Shahvalizadeh R., Ahmadi R., Davandeh I., Pezeshki A., Seyed Moslemi S. A., Karimi S., Rahimi M., Hamishehkar H., Mohammadi, M., 2021: Antimicrobial bio-nanocomposite films based on gelatin, tragacanth, and zinc oxide nanoparticles - Microstructural, mechanical, thermo-physical, and barrier properties. *Food Chemistry* 354, 129492. DOI: 10.1016/j.foodchem.2021.129492

Skočaj M., 2019: Bacterial nanocellulose in papermaking. *Cellulose* 26, 6477-6488. DOI: 10.1007/s10570-019-02566-y

Stumpf T.R., Pértile R.A.N., Rambo C.R., Porto L.M., 2013: Enriched glucose and dextrin mannitol-based media modulates fibroblast behavior on bacterial cellulose membranes. *Materials Science and Engineering: C* 33, 4739-4745. DOI: 10.1016/j.msec.2013.07.035

Sunasee R., Hemraz U.D., Ckless K., 2016: Cellulose nanocrystals: a versatile nanoplatform for emerging biomedical applications. *Expert Opinion on Drug Delivery* 13, 1243-1256. DOI: 10.1080/17425247.2016.1182491

Surma-Ślusarska B., Danielewicz D., Presler S., 2008a: Properties of Composites of Unbeaten Birch and Pine Sulphate Pulps with Bacterial Cellulose. *Fibres & Textiles in Eastern Europe* 16, 127-129.

Surma-Ślusarska B., Presler S., Danielewicz D., 2008b: Characteristics of Bacterial Cellulose Obtained from *Acetobacter Xylinum* Culture for Application in Papermaking. *Fibres & Textiles in Eastern Europe* 16, 108-111.

Torgbo S., Sukyai P., 2018: Bacterial cellulose-based scaffold materials for bone tissue engineering. *Applied Materials Today* 11, 34-49. DOI: 10.1016/j.apmt.2018.01.004

Ullah H., Wahid F., Santos H.A., Khan T., 2016: Advances in biomedical and pharmaceutical applications of functional bacterial cellulose-based nanocomposites. *Carbohydrate Polymers* 150, 330-352. DOI: 10.1016/j.carbpol.2016.05.029

Wan Y., Gao C., Han M., Liang H., Ren K., Wang Y., Luo H., 2010: Preparation and characterization of bacterial cellulose/heparin hybrid nanofiber for potential vascular tissue engineering scaffolds. *Polymers for Advanced Technologies* 22, 2643-2648. DOI: 10.1002/pat.1692

Wang H.Y., Wei R.H., Zhao S.Z., 2013: Evaluation of corneal cell growth on tissue engineering materials as artificial cornea scaffolds. *International Journal of Ophthalmology* 6, 873-878. DOI: 10.3980/j.issn.2222-3959.2013.06.23

Wang J., Tavakoli J., Tang Y., 2019: Bacterial cellulose production, properties and applications with different culture methods - A review. *Carbohydrate Polymers* 219, 63-76. DOI: 10.1016/j.carbpol.2019.05.008

Xiang Z., Jin X., Liu Q., Chen Y., Li J., Lu F., 2017: The reinforcement mechanism of bacterial cellulose on paper made from woody and non-woody fiber sources. *Cellulose*: 24, 5147-5156. DOI: 10.1007/s10570-017-1468-6

Xie Y., Pan Y., Cai P., 2022: Cellulose-based antimicrobial films incorporated with ZnO nanopillars on surface as biodegradable and antimicrobial packaging. *Food Chemistry* 368, 130784. DOI: 10.1016/j.foodchem.2021.130784

Yousefi H., Faezipour M., Hedjazi S., Mousavi M.M., Azusa Y., Heidari A.H., 2013: Comparative study of paper and nanopaper properties prepared from bacterial cellulose nanofibers and fibers/ground cellulose nanofibers of canola straw. *Industrial Crops and Products* 43, 732-737. DOI: 10.1016/j.indcrop.2012.08.030

Zhang H., Chen C., Zhu C., Sun D., 2016: Production of Bacterial Cellulose by *Acetobacter Xylinum*: Effects of Carbon/Nitrogen-ratio on Cell Growth and Metabolite Production. *Cellulose Chemistry and Technology* 50, 997-1003.

Zhang L., Zhang Z., Chen Y., Ma X., Xia, M., (2021): Chitosan and procyanidin composite films with high antioxidant activity and pH responsivity for cheese packaging. *Food Chemistry* 338, 128013. DOI: 10.1016/j.foodchem.2020.128013

Zhu W., Li W., He Y., Duan T., 2015: In-situ biopreparation of biocompatible bacterial cellulose/graphene oxide composites pellets. *Applied Surface Science* 338, 22-26. DOI: 10.1016/j.apsusc.2015.02.030

---

*Artykuł recenzowany / Reviewed paper*

*Zgłoszony / Submitted: 11.03.2022*

*Opublikowany online / Published online: 08.04.2022*