ŻYWNOŚĆ. NAUKA. TECHNOLOGIA. JAKOŚĆ, 2025, 32, 4 (145), 5 – 17

DOI: 10.15193/ zntj/2025/145/555

OSKAR MICHALSKI

PERSPEKTYWY ZASTOSOWANIA ROŚLIN RZĘSOWYCH W ZRÓWNOWAŻONYM PRZEMYŚLE SPOŻYWCZYM

S t r e s z c z e n i e

Wprowadzenie. Rośliny z podrodziny rzęsowych (*Lemnoideae*), potocznie nazywane rzęsą wodną, stanowią obiecujące źródło białka roślinnego o wysokiej wartości odżywczej i szerokim potencjale zastosowań w przemyśle spożywczym i biotechnologicznym. Zawartość białka w biomasie może sięgać 50 % suchej masy, przy korzystnym profilu aminokwasowym i wysokiej przyswajalności. Rośliny te dostarczają także mikroelementów, błonnika oraz bioaktywnych związków, takich jak karotenoidy, polifenole i tokoferole, co nadaje im status żywności funkcjonalnej o potencjale prozdrowotnym. Wyniki badań wskazują na możliwość korzystnego wpływu spożycia produktów z roślin rzęsowych na wskaźniki metaboliczne i mikrobiotę jelitową.

Wyniki i wnioski. Z perspektywy producenta rośliny rzęsowe oferują wyjątkowo wysoką produktywność biomasy, krótki cykl wzrostu i łatwość adaptacji do systemów zamkniętych, co umożliwia całoroczną produkcję niezależną od warunków klimatycznych. Biomasa może być kierowana do bezpośredniego spożycia lub wykorzystana jako surowiec do ekstrakcji białek, produkcji dodatków paszowych i wytwarzania biogazu lub bioetanolu. Wprowadzenie rzęsowych do przemysłu spożywczego napotyka jednak na wyzwania, takie jak ograniczona akceptacja konsumencka i zmienność składu surowca. Hodowle otwarte wymagają kontroli zawartości metali ciężkich i skażenia biologicznego, ewentualna ucieczka roślin do środowiska może prowadzić do kolonizacji wód naturalnych. Rośliny rzęsowe wyróżniają się niskim zapotrzebowaniem na wodę, energię i powierzchnię uprawną, a ich hodowla może być zintegrowana z systemami oczyszczania ścieków i recyklingu składników odżywczych. Połączenie wysokiej wartości odżywczej, efektywności produkcyjnej i niewielkiego wpływu środowiskowego czyni je surowcem o strategicznym znaczeniu dla zrównoważonej produkcji żywności.

Słowa kluczowe: rzęsowe, *Lemnoideae, Lemna, Wolffia,* zrównoważony rozwój

Wprowadzenie

Rośliny z podrodziny rzęsowych (*Lemnoideae*), potocznie określane jako rzęsa wodna (*ang. duckweed*), należą do najbardziej produktywnych źródeł biomasy roślinnej. Charakteryzują się zdolnością do akumulacji znacznych ilości białka i związków

Dr O. Michalski ORCID: 0000-0002-1952-3034, Katedra Chemii, Wydział Technologii Żywności, Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie, al. Mickiewicza 21, 31-120 Kraków.
Kontakt: e-mail: oskar.michalski@urk.edu.pl

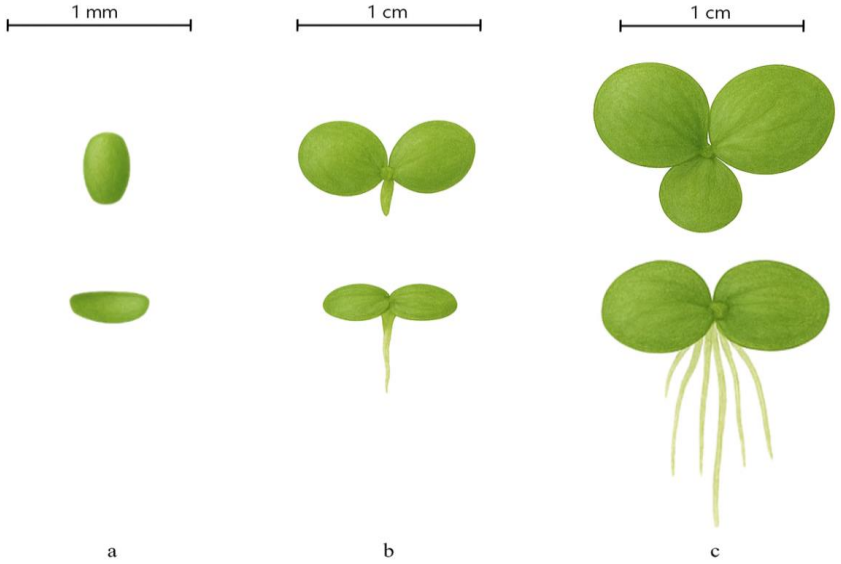
mineralnych przy minimalnym zużyciu zasobów, a także wyjątkowo szybkim tempem wzrostu i szeroką tolerancją środowiskową [1, 11]. Możliwość wykorzystania wód poprodukcyjnych oraz integracji z systemami recyrkulacyjnymi czyni z rzęsowych obiecujący surowiec dla zrównoważonego przemysłu spożywczego.

W ostatnich latach opublikowano szereg badań dotyczących optymalizacji warunków uprawy, przetwarzania oraz wartości odżywczej roślin rzęsowych. Jednakże niewiele uwagi poświęcono zintegrowanej ocenie ich potencjału w trzech komplementarnych aspektach zrównoważonego rozwoju: społecznym, ekonomicznym i środowiskowym. Celem niniejszej pracy jest omówienie perspektyw zastosowania roślin rzęsowych w przemyśle spożywczym z uwzględnieniem tych aspektów.

Charakterystyka rzęsowych

Rzęsowe (*Lemnoideae*) występują w warunkach naturalnych w stawach, kanałach i wolno płynących ciekach na wszystkich kontynentach, we wszystkich strefach klimatycznych z wyjątkiem podbiegunowych. Często tworzą mieszane populacje gatunków. W obrębie tej podrodziny opisano 38 gatunków. Wg aktualnych baz taksonomicznych World Flora Online oraz Plants of the World Online gatunki te usystematyzowano w cztery rodzaje: *Wolffia* Horkel ex Schleid (pol.: wolfia), *Lemna* L. (pol.: rzęsa), *Spirodela* Schleid. i *Wolffiella* Hegelm. Alternatywnie wyróżniany jest też monotypowy rodzaj *Landoltia* Les & Crawford reprezentowany przez *Landoltia punctata* (synonim: *Spirodela punctata*) [5]. Gatunki, które obecnie są uprawiane i jednocześnie intensywnie badane, to *Wolffia arrhiza* (L.) Horkel ex Wimm., *Wolffia globosa* (Roxb.) Hartog and Plas, *Lemna gibba* L., *Lemna minor* L., *Spirodela polyrhiza* (L.) Schleid. i *Spirodela punctata* (G.Mey.) C.H.Thomps. [31].

Wszystkie gatunki roślin z podrodziny rzęsowych są zdolne do rozmnażania płciowego, jednak w warunkach naturalnych rzadko wytwarzają kwiaty, a rozmnażanie ma charakter niemal wyłącznie wegetatywny: roślina wytwarza potomny liść, który łatwo ulega oddzieleniu. Dominujący udział rozmnażania wegetatywnego umożliwia długotrwałą hodowlę klonów o pożądanych cechach użytkowych. W sprzyjających warunkach podwojenie biomasy następuje w czasie $1 \div 3$ dni, przy czym największą szybkość przyrostu biomasy obserwuje się w przypadku roślin z rodzaju *Wolffia* [2]. Wolfie są najmniejszymi znanymi roślinami okrytonasiennymi, zwykle osiągają poniżej 1 mm długości (Ryc. 1). Ich budowa jest skrajnie uproszczona: pojedynczy, owalny organ liściopodobny (*ang. frond*) pozbawiony korzeni, niemal w całości zbudowany jest z tkanki miękiszowej. Podobną szybkość przyrostu biomasy uzyskuje się również w akwakulturach mikroalg, takich jak *Chlorella vulgaris*, *Spirulina platensis* i *Haematococcus pluvialis* [19], jednak uprawa i zbiór rzęsy wodnej są znacznie prostsze i tańsze, gdyż rośliny unoszą się przy powierzchni wody i mogą być łatwo zbierane przy pomocy sit.



Rycina 1. Schemat budowy wybranych roślin rzęsowych: a) *Wolffia globosa*; b) *Lemna minor*; c) *Spirodela polyrhiza*.

Figure 1. Schematic diagram of the structure of selected duckweed plants: a) *Wolffia globosa*; b) *Lemna minor*; c) *Spirodela polyrhiza*

Rośliny rzęsowe od stuleci stanowią element diety ludności w krajach Azji Południowo-Wschodniej, zwłaszcza w Tajlandii, Laosie i Wietnamie, gdzie spożywane są jako warzywo pod nazwą *khai-nam*. Wykorzystywane są w formie świeżej w zupach i sałatkach, a także w postaci suszonej jako dodatek białkowy [1, 16].

Korzyści dla konsumenta

Rośliny z podrodziny rzęsowych stanowią bogate źródło białka roślinnego. Typowa zawartość białka wynosi 20 ÷ 40 % suchej masy całych roślin (Tab. 1), jednak optymalizując warunki uprawy osiągane są wartości nawet do 50 %, co stawia je wśród roślin najzasobniejszych w białko [31]. Profil aminokwasowy jest zbliżony do wzorca WHO/FAO, a udział aminokwasów egzogennych może przekraczać 40 % puli białkowej [15, 25]. Duże zróżnicowanie wyników dotyczących zawartości lipidów i węglowodanów wynika zarówno z różnic pomiędzy badanymi gatunkami i ich klonami, jak i z odmiennych metod oznaczeń oraz różnego sposobu klasyfikowania tych grup związków [31].

Lemnoideae charakteryzują się relatywnie niską zawartością substancji antyodżywczych mogących ograniczać przyswajalność białka. W dostępnej literaturze brak jest przekonujących dowodów na obecność silnych, naturalnych inhibitorów proteaz

w roślinach rzęsowych, co dodatkowo wspiera obserwowaną wysoką przyswajalność ich frakcji białkowej. Dotychczasowe badania koncentrowały się przede wszystkim na oznaczaniu innych klas związków antyodżywczych. Falaye i wsp. odnotowali w *Lemna minor* obecność saponin (0.72 % s.m.), tanin (4 mg/100g s.m.), cyjanidów (4.88 mg/100g s.m.), fitynianów (0.73 % s.m.), alkaloidów (4.1 % s.m.) i szczawianów (0.22 % s.m.) [7]. W innych badaniach, obejmujących materiał roślinny pozyskany ze stanowiska naturalnego w Nigerii, stwierdzono: fityniany - 1.03 % s.m., szczawiany - 0.18 % s.m., saponiny - 2.32 % s.m. oraz alkaloidy - 0.64 % s.m. [13]. Warto nadmienić, że przedstawiciele rodzajów *Lemna* i *Spirodela* tworzą w tkankach kryształy szczawianu wapnia (tzw. rafidy), podczas gdy gatunki z rodzajów *Wolffia* i *Wolffiella* ich nie wytwarzają [1, 12].

Tabela 1. Przybliżony skład wybranych roślin rzęsowych (% s.m.)
Table 1. Approximate composition of selected eyelash plants (% of dry matter)

Gatunek	Białka / Proteins [%]	Lipidy / Lipids [%]	Węglowodany / Carbohydrates [%]	Popiół / Ash [%]
Wolffia arrhiza	17 ÷ 51	9,0 (LP) 0,5 ÷ 6,1 (T) 8,9 (KT)	9,4 ÷ 44,0 (W) 2,4 ÷ 15,0 (B) 2,4 ÷ 17,0 (S)	12,0 ÷ 25,0
Wolffia globosa	21 ÷ 48	0,5 ÷ 4,9 (LP) 2,1 ÷ 9,6 (T) 11,0 (KT)	37,0 ÷ 48,0 (W) 8,4 ÷ 21,0 (B) 10,0 ÷ 29,0 (S)	7,7 ÷ 24,0
Lemna gibba	25 ÷ 34	3,4 ÷ 4,7 (T) 11,0 (KT)	3,3 (W) 9,4 ÷ 26,0 (B) 1,9 ÷ 14,0 (S)	3,3 ÷ 18,0
Lemna minor	7.5 ÷ 42	1,5 ÷ 9,0 (LP) 1,3 ÷ 4,7 (T) 11,0 (KT)	34,0 ÷ 61,0 (W) 8,2 ÷ 27,0 (B) 1,7 ÷ 48,0 (S)	10,0 ÷ 23,0
Spirodela polyrhiza	24 ÷ 36	2,2 ÷ 7,2 (LP) 1,7 ÷ 4,7 (T) 7,5 (KT)	38,0 ÷ 42,0 (W) 8,8 ÷ 15,6 (B) 1,7 ÷ 7,1 (S)	9,7 ÷ 21,0
Spirodela punctata	14 ÷ 38	6,0 (LP) 3,8 ÷ 5,5 (T) 7,8 ÷ 8,4 (KT)	9,2 (B) 1,1 ÷ 25,0 (S)	14,0

Oznaczenia/ Explanatory notes :
(LP) – lipidy / lipids; (T) – tłuszcze / fats; (KT) – kwasy tłuszczowe / fatty acids; (W) – węglowodany / carbohydrates; (B) – błonnik / fiber; (S) – skrobia / starch.

Poza wysoką zawartością białka, rzęsowe charakteryzują się korzystnym profilem mikro- i makroskładników. W badaniach Appenrotha i wsp. dotyczących 16 klonów z rodzaju *Wolffia* zawartość żelaza w suchej masie wahała się od 110 do 400 mg/kg,

a zawartość cynku wykazano w zakresie 22,5 ÷ 92,4 mg/kg [2]. Różnice były istotne zarówno między gatunkami, jak i pomiędzy klonami tego samego gatunku, co podkreśla znaczenie doboru klonu i warunków uprawy przy kształtowaniu profilu mineralnego surowca. Rośliny z podrodziny *Lemnoideae* są również bogate w błonnik pokarmowy (nawet około 45 % suchej masy) przy jednocześnie niskiej zawartości skrobi, zwykle poniżej 10 % suchej masy [3]. Takie proporcje węglowodanów sprawiają, że rzęsowe są surowcem o niskiej wartości energetycznej i potencjalnie niskim indeksie glikemicznym, co zwiększa ich atrakcyjność jako składnika żywności funkcjonalnej, zwłaszcza w dietach ukierunkowanych na kontrolę masy ciała i metabolizmu glukozy.

Rośliny rzęsowe zawierają również liczne związki o właściwościach przeciwutleniających. Wykazano obecność karotenoidów, m.in. luteiny (40 ÷ 80 mg/100g s.m.), wiolaksantyny (46 mg/100g s.m.), β-karotenu (10 ÷ 30 mg/100g s.m.) oraz zeaksantyny (4.3 mg/100g s.m.) [1, 25]. Stwierdzono także kwasy fenolowe, takie jak kwas wanilinowy, kwas 2,3-dihydroksybenzoesowy i kwas kawowy [18], a ponadto flawonoidy (83 mg/100g s.m. [25] oraz tokoferole, w tym α-tokoferol w ilości do 13 mg/100 g s.m.) [2]. Zawartość poszczególnych metabolitów zależy jednak istotnie od gatunku i warunków hodowli.

Wstępne badania wskazują, że włączenie roślin rzęsowych do diety może przynieść korzystne efekty zdrowotne. W badaniach z 2019 r. wykazano, że u szczurów z anemią dieta zawierająca dodatek *W. globosa* poprawiła stężenie hemoglobiny w porównaniu z grupą kontrolną [26]. Z kolei białka wyizolowane z tego gatunku w badaniach *in vitro* na ludzkich komórkach THP-1 wykazały działanie przeciwzapalne poprzez zahamowanie szlaku NF-κB [14]. Opublikowano również wyniki badań klinicznych wskazujące, że spożycie produktów zawierających susz z *W. globosa* lub *W. arrhiza* może prowadzić do umiarkowanego obniżenia poziomu glukozy i lipidów we krwi oraz zwiększenia uczucia sytości. Efekt ten przypisywany jest zarówno wysokiej gęstości odżywczej, jak i wysokiej zawartości polifenoli współwystępujących z błonnikiem pokarmowym [28]. Wyniki te sugerują, że rośliny rzęsowe mogą pełnić rolę nie tylko źródła wysokiej jakości białka, lecz także funkcjonalnego składnika żywności o potencjale prozdrowotnym, choć dane kliniczne u ludzi są wciąż ograniczone i wymagają dalszych badań. Więcej informacji dotyczących właściwości prozdrowotnych żywności z dodatkiem rzęsowych zebrano w pracy przeglądowej Zięć i wsp. [31].

Pod względem sensorycznym, rośliny rzęsowe charakteryzują się łagodnym smakiem i neutralnym zapachem, co ułatwia włączanie jej do różnych produktów spożywczych – od smoothie i zup po produkty piekarnicze i jako alternatywy dla mięsa [17]. Wysoka zawartość chlorofilu nadaje produktom barwę zieloną, co w przypadku niektórych zastosowań, np. słodkich deserów, może wymagać zmiany przyzwyczajeń konsumentów lub korekty recepturowej dla zapewnienia akceptacji konsumenckiej.

Korzyści dla producenta

Rośliny rzęsowe mogą być uprawiane zarówno z przeznaczeniem do bezpośredniego spożycia w postaci świeżej biomasy, jak ma to miejsce w krajach Azji Południowo-Wschodniej (np. *W. globosa* w Tajlandii i Laosie), jak i do celów przemysłowych – przede wszystkim jako surowiec do pozyskiwania ekstraktów białkowych. Te dwa kierunki zagospodarowania różnią się nie tylko wymaganiami hodowlanymi, lecz także potencjałem ekonomicznym: biomasa przeznaczona do spożycia świeżego wymaga zachowania czystości mikrobiologicznej, natomiast w przypadku ekstrakcji białka dopuszczalne są systemy uprawy na pożywkach recyrkulacyjnych o niższym koszcie. Dzięki dużej zawartości białka (do 50 % suchej masy) i łatwości separacji frakcji białkowej rośliny rzęsowe stanowią konkurencyjną alternatywę dla soi i mikroalg w produkcji składników żywności wysokobiałkowej [24]. Wartość rynkowa izolatu białkowego z tych roślin może znacznie przewyższać cenę nieprzetworzonej biomasy, co czyni ten kierunek szczególnie atrakcyjnym dla producentów z branży żywności funkcjonalnej.

Jedną z najważniejszych zalet roślin rzęsowych z punktu widzenia producenta jest bardzo wysoka wydajność biomasy w przeliczeniu na jednostkę powierzchni uprawnej. W optymalnych warunkach rośliny te mogą podwajać swoją masę w ciągu 24 ÷ 48 godzin, osiągając plony rzędu 10 ÷ 30 t s.m./ha/rok [2, 4]. Dla porównania, wydajność soi wynosi przeciętnie 3 t s.m./ha/rok. Dodatkowo, uprawy rzęsowych mogą być prowadzone w systemach zamkniętych (bioreaktory, zbiorniki recyrkulacyjne) niezależnie od pory roku i warunków pogodowych, co pozwala uzyskać stabilną podaż surowca przez cały rok. Istotnym jest fakt, że skład chemiczny biomasy pozostaje stosunkowo stabilny między kolejnymi cyklami wzrostu, zwłaszcza w kulturach klonalnych prowadzonych w warunkach kontrolowanych, co umożliwia precyzyjne zarządzanie jakością surowca [25].

Z ekonomicznego punktu widzenia, wysoka produktywność przekłada się na możliwość prowadzenia intensywnych, krótkookresowych cykli produkcyjnych, pozwalających na elastyczne dostosowanie podaży biomasy do bieżącego zapotrzebowania rynku. Dzięki temu rośliny rzęsowe mogą stanowić efektywną alternatywę dla tradycyjnych źródeł białka roślinnego, szczególnie w systemach miejskich i zautomatyzowanych mikrofarmach.

Systemy upraw roślin z podrodziny rzęsowych są wyjątkowo elastyczne technologicznie. Mogą być prowadzone w prostych, otwartych zbiornikach lub w zamkniętych bioreaktorach z pełną kontrolą parametrów środowiskowych. Taka skalowalność sprawia, że uprawa może być dostosowana zarówno do warunków krajów rozwijających się, jak i do wysokospecjalistycznych zakładów biotechnologicznych. Zbiór biomasy jest prosty i może być całkowicie zautomatyzowany, ponieważ rośliny unoszą się na powierzchni wody i tworzą zwartą warstwę. Zastosowanie systemów przepływo-

wych pozwala utrzymywać ciągłą produkcję, co znacząco skraca cykl uprawowy i zwiększa efektywność wykorzystania przestrzeni produkcyjnej [25].

Oprócz zastosowań spożywczych, rośliny rzęsowe znajdują coraz szersze zastosowanie jako dodatek do pasz dla zwierząt hodowlanych, w tym drobiu, ryb i świń. Ich białko charakteryzuje się wysoką wartością odżywczą i dobrą strawnością, a ponadto obecność naturalnych przeciwutleniaczy może poprawiać odporność zwierząt i jakość mięsa. W wielu krajach azjatyckich i w Europie prowadzone są badania nad częściowym zastąpieniem poekstrakcyjnej śruty sojowej roślinami z podrodziny rzęsowych w żywieniu akwakulturowym i drobiarskim [20]. Dla producentów pasz stanowi to atrakcyjną możliwość obniżenia kosztów białka oraz dywersyfikacji surowców, co zwiększa odporność łańcucha dostaw na wahania cenowe.

Rozwój technologii upraw roślin rzęsowych wpisuje się w koncepcję gospodarki obiegu zamkniętego, w której ich biomasa stanowi element łańcucha wartości obejmującego zarówno sektor spożywczy, paszowy oraz biotechnologiczny. W zależności od przyjętego modelu komercyjnego, rośliny te mogą być wykorzystywane jako produkt końcowy (świeża żywność lub susz) bądź jako surowiec dla przemysłu ekstrakcyjnego – jako źródło białek oraz pektyn [10].

Pektyny izolowane z roślin z podrodziny rzęsowych cechują się dużą zmiennością składu nie tylko między gatunkami, ale nawet między różnymi klonami czy też liniami tkankowymi w hodowli *in vitro* [22]. Dzięki takiej różnorodności węglowodany te mogą znaleźć zastosowanie nie tylko w przemyśle spożywczym (składnik o właściwościach żelujących i emulgacyjnych oraz jako prebiotyk), ale i w przemyśle farmaceutycznym jako nośnik leków uwalnianych w odpowiednim miejscu przewodu pokarmowego [27]. Zróżnicowanie zastosowań tych roślin otwiera możliwości dywersyfikacji przychodów, a szybki cykl produkcyjny pozwala na dynamiczne dostosowanie podaży do popytu.

Nadmierna produkcja biomasy roślin rzęsowych lub okresowe spadki popytu na surowiec spożywczy mogą być częściowo kompensowane poprzez jej wykorzystanie w innych gałęziach gospodarki, przede wszystkim w produkcji biogazu i bioetanolu. Biomasa ta, ze względu na wysoką zawartość białka oraz umiarkowaną ilość węglowodanów, wykazuje dobre właściwości fermentacyjne w procesach metanogenezy, co pozwala na uzyskanie energii w postaci biogazu. W badaniach eksperymentalnych osiągano wydajność biogazu sięgającą 468 cm^3/g VS [9]. W przypadku produkcji bioetanolu biomasa roślin rzęsowych wymaga wstępnej hydrolizy enzymatycznej, aby uwolnić cukry fermentowalne. Z uwagi na umiarkowaną zawartość węglowodanów, wydajność procesu jest niższa niż w przypadku surowców bogatych w skrobię lub celulozę, takich jak kukurydza czy trzcina cukrowa, jednak w połączeniu z produkcją biogazu może stanowić wartościowe uzupełnienie ekonomiczne w zrównoważonym modelu wykorzystania roślin z podrodziny rzęsowych.

Rośliny rzęsowe oferują producentom unikalne połączenie wysokiej wydajności, elastyczności technologicznej i niskich kosztów operacyjnych. Dodatkową korzyścią jest możliwość integracji jej hodowli z systemami oczyszczania wód i zagospodarowania składników odżywczych, co pozwala znacząco zmniejszyć wpływ na środowisko.

Korzyści środowiskowe

Uprawa roślin z podrodziny rzęsowych niesie ze sobą szereg istotnych korzyści środowiskowych, które czynią je jednymi z najbardziej zrównoważonych roślin użytkowych. W odróżnieniu od tradycyjnych upraw roślin białkowych, takich jak soja czy groch, rzęsowe charakteryzują się minimalnymi wymaganiami w zakresie ilości wody, energii i powierzchni uprawnej. Do pełnego cyklu wzrostu potrzebują zaledwie kilku centymetrów warstwy wody, a ich biomasa podwaja się co $1 \div 3$ dni, pozwala to na uzyskanie wysokiego plonu z jednostki powierzchni przy bardzo niskim zużyciu zasobów naturalnych [3]. Dzięki możliwości uprawy w systemach hydroponicznych i półzamkniętych, rośliny rzęsowe mogą być produkowane nawet w regionach o ograniczonych zasobach wodnych lub na terenach nieprzydatnych rolniczo.

Kolejną zaletą rzęsowych jest zdolność do wykorzystania odpadów z innych sektorów produkcji rolnej, zwłaszcza pochodzących z hodowli zwierząt (drobiu, trzody, bydła). W kontrolowanych warunkach możliwe jest przekształcanie tych strumieni odpadowych w wartościową biomasę białkową, przy jednoczesnym usuwaniu z wody nadmiaru azotu, fosforu i związków organicznych [21, 23]. Takie zintegrowane systemy obiegu zamkniętego (*ang. circular bioeconomy systems*) pozwalają na odzyskiwanie składników odżywczych i ograniczenie eutrofizacji wód, co ma bezpośredni wymiar ekologiczny.

Rośliny rzęsowe wykazują również wyjątkowe właściwości fitoremediacyjne, co oznacza, że mogą być wykorzystywane do oczyszczania wód z metali ciężkich i innych zanieczyszczeń nieorganicznych. Badania potwierdzają skuteczność przedstawicieli rzęsowych w usuwaniu jonów takich jak kadm, ołów, miedź, nikiel, chrom czy cynk z wód powierzchniowych i przemysłowych [8, 30]. Dzięki dużej tolerancji na warunki środowiskowe, szybkiemu wzrostowi i łatwości zbioru biomasy, rośliny te stanowią atrakcyjną alternatywę dla klasycznych metod oczyszczania wody.

W kontekście zmian klimatycznych szczególnie ważny jest niski ślad węglowy upraw rzęsowych. Rośliny te charakteryzują się wysoką efektywnością fotosyntetyczną i niskim zapotrzebowaniem na energię w całym cyklu produkcyjnym. W systemach zamkniętych emisje gazów cieplarnianych można dodatkowo ograniczyć poprzez integrację z biogazowniami lub instalacjami odzysku energii z odpadów organicznych.

Dodatkowo, rośliny rzęsowe mogą wspierać lokalne systemy gospodarowania wodą i bioróżnorodność. W małych zbiornikach i systemach retencyjnych ograniczają one parowanie wody, stabilizują temperaturę i działają jako biologiczny filtr, co sprzy-

ja utrzymaniu równowagi mikrobiologicznej ekosystemu [6]. Wprowadzenie rzęsowych do zintegrowanych systemów rolniczo-wodnych stanowi więc element strategii zrównoważonego rozwoju, łączącej produkcję żywności z ochroną środowiska.

Rośliny z podrodziny rzęsowych łączą w sobie zdolność do efektywnego wykorzystania zasobów, oczyszczania środowiska i ograniczania emisji gazów cieplarnianych, co czyni je wyjątkowo atrakcyjnym komponentem gospodarki cyrkularnej. Ich uprawa może odgrywać kluczową rolę w transformacji systemów żywnościowych w kierunku niskoemisyjnych, samowystarczalnych i ekologicznie zrównoważonych modeli produkcji.

Wyzwania i ograniczenia w wykorzystaniu roślin rzęsowych w przemyśle spożywczym

Rośliny z podrodziny rzęsowych postrzegane są jako surowiec o dużym potencjale żywieniowym, jednak ich wprowadzenie do sektora spożywczego napotyka szereg wyzwań dotyczących akceptacji konsumenckiej. Mimo wysokiej wartości odżywczej i korzystnego profilu aminokwasowego, wciąż kojarzą się głównie z rzęsą wodną, postrzeganą jako chwast zbiorników wodnych. Percepcja ta może wpływać na decyzje zakupowe – wielu konsumentów nie jest świadomych, że rośliny rzęsowe są jadalne, a dla części odbiorców stanowią surowiec egzotyczny lub budzący niepewność. Z tego względu skuteczne wprowadzenie na rynek produktów bazujących na roślinach rzęsowych może wymagać działań informacyjno-edukacyjnych oraz standaryzacji jakości sensorycznej surowca. Wyzwania związane z wprowadzeniem tych roślin do diety ludności krajów zachodnich, w tym europejskich, zebrano w pracy Zięć i wsp. [31].

Z perspektywy producentów jednym z głównych ograniczeń jest heterogeniczność surowca. Rośliny rzęsowe charakteryzują się znaczną zmiennością składu w zależności od warunków wzrostu, takich jak oświetlenie, temperatura, zasolenia i dostępności składników mineralnych. Dodatkowym problemem jest zdolność tych roślin do akumulowania metali ciężkich, w tym arsenu, kadmu i ołowiu, jeśli rosną w zanieczyszczonym środowisku [8, 29]. W systemach akwakultury przeznaczonych do celów spożywczych i paszowych stężenia metali ciężkich muszą być zatem stale monitorowane, zarówno w wykorzystywanej wodzie, jak i otrzymywanej biomasie. Kontrola ta nabiera jeszcze większego znaczenia w hodowli prowadzonej w otwartych zbiornikach wodnych, stosowanych m.in. w gospodarstwach ekologicznych, gdzie stabilność parametrów środowiska jest trudniejsza do utrzymania.

Kolejnym wyzwaniem technologicznym jest stabilność biomasy po zbiorze. Świeże rośliny rzęsowe, ze względu na wysoką zawartość wody oraz enzymatycznie aktywną tkankę, szybko ulegają zmianom metabolicznym, co ogranicza czas między zbiorem a przetworzeniem lub konsumpcją. W przypadku przetwórstwa wymusza to stosowanie energochłonnych etapów stabilizacji, takich jak suszenie lub fermentacja,

co zwiększa koszty produkcji i wpływa na końcową cenę produktu. Z drugiej strony, przy produkcji biomasy przeznaczonej do spożycia w postaci świeżej konieczne jest stworzenie krótkiego i efektywnego łańcucha dostaw. Ponadto hodowla roślin rzęsowych na większą skalę wymaga zaawansowanych systemów cyrkulacji i kontroli parametrów środowiskowych, a prowadzona w warunkach otwartych narażona jest na ryzyko skażenia biologicznego, co czyni koszty infrastrukturalne istotną barierą wejścia.

Z punktu widzenia środowiska naturalnego kluczowym problemem jest potencjalna ucieczka materiału roślinnego poza obszar hodowli. Rośliny rzęsowe, w sprzyjających warunkach, mogą bardzo szybko kolonizować zbiorniki wodne i konkurować z lokalnymi gatunkami, prowadząc do ich wypierania. Dotyczy to zwłaszcza sytuacji, w których do produkcji wprowadza się odmiany wyselekcjonowane pod kątem szybkiego wzrostu lub odporności na specyficzne warunki. Zarówno lokalny ekosystem, jak i sieć hydrologiczna mogą być wrażliwe na takie zmiany, co sprawia, że protokoły bioasekuracji są koniecznym elementem przemysłowej hodowli roślin rzęsowych. Wreszcie, mimo wysokiej efektywności konwersji składników odżywczych, produkcja biomasy na dużą skalę i z zachowaniem powtarzalności jej parametrów wymaga dostępu do wody o stabilnym składzie mineralnym. Jej utrzymanie może pociągać za sobą koszty środowiskowe związane z filtracją i uzdatnianiem, szczególnie w regionach narażonych na niedobory wody.

Podsumowanie

Rośliny z podrodziny rzęsowych (*Lemnoideae*) stanowią unikalny surowiec o potencjale istotnie wykraczającym poza tradycyjne ujęcie upraw wodnych. Łączą one w sobie wysoką wartość odżywczą, efektywność produkcyjną oraz niewielki wpływ na środowisko, co czyni je jednym z najbardziej obiecujących kierunków rozwoju rolnictwa przyszłości. Z punktu widzenia konsumenta, przedstawiciele rzęsowych oferują pełnowartościowe białko roślinne, bogaty profil mikroelementów i związków bioaktywnych, a także niską kaloryczność i potencjał prozdrowotny. Włączenie ich do diety może wspierać zrównoważony model żywienia, odpowiadający na rosnące zapotrzebowanie na źródła białka o ograniczonym śladzie środowiskowym.

Dla producentów przedstawiciele podrodziny rzęsowych stanowią surowiec o wyjątkowej stabilności produkcyjnej i elastyczności technologicznej. Szybki wzrost, wysoka zawartość białka oraz możliwość całorocznej uprawy w systemach zamkniętych czynią z tych roślin atrakcyjny obiekt zarówno dla sektora spożywczego, jak i paszowego czy biotechnologicznego. Zróżnicowane kierunki przetwórstwa – od żywności wysokobiałkowej, przez dodatki paszowe, po substraty biopaliwowe – pozwalają na efektywne wykorzystanie biomasy i minimalizację strat produkcyjnych. Rzęsowe mogą być integrowane z istniejącymi systemami gospodarczymi, tworząc nowe modele

cyrkularnej produkcji białka, oparte na ponownym wykorzystaniu wody i składników odżywczych.

Pełne wdrożenie rzęsowych do przemysłu spożywczego wymaga jednak uwzględnienia pewnych ograniczeń i wyzwań. Zmienność składu biomasy zależna od warunków uprawy, ryzyko akumulacji metali ciężkich w systemach otwartych oraz konieczność ścisłej kontroli mikrobiologicznej stanowią kluczowe zagadnienia technologiczne. Równie ważna jest kwestia postrzegania konsumenckiego, ponieważ rzęsowe wciąż bywają traktowane jako egzotyczny surowiec lub chwast wodny. Niezbędne jest także zapewnienie zabezpieczeń środowiskowych, ograniczających ryzyko niekontrolowanego rozprzestrzeniania się roślin do ekosystemów naturalnych. Pokonanie tych barier będzie decydować o stopniu, w jakim rośliny rzęsowe mogą zostać włączone do głównego nurtu produkcji żywności.

Z perspektywy środowiskowej, rzęsowe wyróżniają się niskimi wymaganiami wodnymi i energetycznymi, możliwością wykorzystania odpadów rolniczych jako źródła biogenów oraz zdolnością do fitoremediacji i sekwestracji zanieczyszczeń. Ich uprawa nie wymaga terenów rolnych wysokiej jakości, co ogranicza presję na grunty orne i pozwala zagospodarować obszary dotychczas nieproduktywne. Dodatkowo, systemy hodowli oparte na recyrkulacji wody i biogenów pozwalają znacząco obniżyć ślad węglowy i azotowy w porównaniu z tradycyjnymi uprawami roślin białkowych, np. soi.

Zintegrowane spojrzenie na rośliny z podrodziny rzęsowych ujawnia ich potencjał jako kluczowego elementu przyszłych strategii zrównoważonej produkcji żywności. Łącząc zalety żywieniowe, ekonomiczne i środowiskowe z rosnącą wiedzą dotyczącą bezpieczeństwa, stabilności i akceptacji konsumenckiej, *Lemnoideae* mogą stać się podstawą rozwoju nowych modeli gospodarki białkowej – wydajnej, niskoemisyjnej i zgodnej z zasadami gospodarki obiegu zamkniętego. Dalszy rozwój technologii hodowli, zbioru i przetwarzania biomasy będzie kluczowy dla pełnego wykorzystania tego potencjału.

Literatura

[1] Appenroth K.-J., Sree K.S., Böhm V., Hammann S., Vetter W., Leiterer M., Jahreis G.: Nutritional value of duckweeds (*Lemnaceae*) as human food. Food Chem., 2017, 217, 266-273.

[2] Appenroth K.-J., Sree K.S., Bog M., Ecker J., Seeliger C., Böhm V. i wsp.: Nutritional value of the duckweed species of the genus *Wolffia* (*Lemnaceae*) as human food. Front. Chem., 2018, 6, #483.

[3] Appenroth K.-J., Ziegler P., Sree K.S.: Accumulation of starch in duckweeds (*Lemnaceae*), potential energy plants. Physiol. Mol. Biol. Plants, 2021, 27, 2621-2633.

[4] Baek G., Saeed M., Choi H.K.: Duckweeds: their utilization, metabolites and cultivation. Appl. Biol. Chem., 2021, 64, 73.

[5] Bog M., Appenroth K.-J., Sree K.S.: Duckweed (*Lemnaceae*): its molecular taxonomy. Front. Sustain. Food Syst., 2019, 3, #117.

[6] Cheng J., Stomp A.-M.: Growing duckweed to recover nutrients from wastewaters and for production of fuel etanol and Animals feed. Clean Soil Air Water, 2009, 37, 17-26.
[7] Falaye A.E., Ojo-Daniel H.A., Sule S.O.: Effects of processing on duckweed (*Lemna minor*) as fish feedstuff. Sci. Rep. Life Sci., 2022, 3, 53-67.
[8] Fallahizadeh S., Vaezzadeh M., Naghipour D.: Comparison of the efficiency of duckweed in heavy metal removal from aqueous solutions in combined and separate forms. J. Adv. Environ. Res., 2019, 7, 225-232.
[9] Gaur R.Z., Khan A.A., Suthar S.: Effect of thermal pre-treatment on co-digestion of duckweed (*Lemna gibba*) and waste activated sludge on biogas production. Chemosphere, 2017, 174, 754-763.
[10] Gyunter E.A., Popeiko O.V.: Gel-forming properties of pectins from callus culture of *Lemna minor*. Chem. Nat. Compd. 2021, 57, 799-802.
[11] Hasan M.R., Chakrabarti R., Use of algae and aquatic macrophytes as feed in small-scale aquaculture. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper, FAO Rome, 2009, #531.
[12] Hu Z., Fang Y., Yi Z.., Tian X., Li J., Jin Y., He K., Liu., Du A., Huang Y., Zhao H.: Determining the nutritional value and antioxidant capacity of duckweed (*Wolffia arriza*) under artificial conditions. LWT-Food Sci. Technol. 2022, 153, #112477.
[13] Ifie I., Olatunde S., Ogbon O., Umukoro J.E.: Processing techniques on phytochemical content proximate composition, and toxic components in duckweed. Int. J. Veg. Sci., 2020, 27, 294-302.
[14] Khonkarn R., Daowtak K., Kraseasintra O., Luetragoon T., Usuwanthim K., Taynawa K., Chanphong K.: Bioactive potential of protein extracts derived from dried Wolffia globosa on *in vitro* antioxidant activities and pro-inflammatory cytokine production. Molecules, 2025, 30. #4092.
[15] Miltko R., Majewska M.P., Wojtak W., Białek M., Kowalik B., Czuderna M. Comparing the chemical composition of lesse duckweed (*Lemna minor* L.) grown in natural and laboratory settings. J. Anim. Feed Sci., 2024, 33, 357-367.
[16] Ofoedu C.E., Bozkurt H., Mortimer J.C.: Towards sustainable food security: Exploring the potential of duckweed (*Lemnaceae*) in diversifying food systems. Trends Food Sci. Technol., 2025, 161, #105073.
[17] On-Nom, N., Promdang, P., Inthachat, W., Kanoongon, P., Sahasakul, Y., Chupeerach, C i wsp.: *Wolffia globosa*-based nutritious snack formulation with high protein and dietary fiber contents. Foods, 2023, 12, 2647.
[18] Petrova-Tacheva V., Ivanov V., Atanasov A.: *Lemna minor* L. as a source of antioxidants. Trakia J. Sci., 2020, 18, 157-162.
[19] Singh N., Rathilal S.: Cultivation of *Scenedesmus* sp., *Chlorella vulgaris* and *Spirulina platensis* in Sewage industrial wastewater: bench-scale optimization for biofuel production. Chem. Engin. Transact., 2024, 113, 409-414.
[20] Sońta M., Rekiel A., Batorska M.: Use of duckweed (*Lemna* L.) in sustainable livestock production and aquaculture – a review. Ann. Anim. Sci., 2019, 19, 257-271.
[21] Sońta M., Więcek J., Szara E., Rekiel A., Zalewska A., Batorska M.: Quantitative and Qualitative Traits of Duckweed (*Lemna minor*) Produced on Growth Media with Pig Slurry. Agronomy, 2023, 13, #1951.
[22] Sowinski E.E., Gilbert S., Lam E., Carpita N.C.: Linkage structure of cell-wall polysaccharides from three duckweed species. Carbohydr. Polym., 2019, 223, #115119
[23] Stadtlander T, Bandy J., Rosskothen D., Pietsch C., Tschudi F., Sigrist M i wsp.: Dilution rates of cattle slurry affect ammonia uptake and protein production of duckweed grown in recirculating systems. J. Cleaner Prod.,, 2022, 357, #131916.
[24] Takacs, K.; Vegh, R.; Mednyanszky, Z.; Haddad, J.; Allaf, K.; Du, M.; Chen, K.; Kan, J.; Cai, T.; Molnar, P. New Insights into Duckweed as an Alternative Source of Food and Feed: Key Components and Potential Technological Solutions to Increase Their Digestibility and Bioaccessibility. Appl. Sci. 2025, 15, #884.
[25] Xu, J., Shen Y., Zheng Y., Smith G., Sun X.S., Wang D. i wsp.: Duckweed (*Lemnaceae*) for potentially nutritious human food: a review. Food Rev. Int., 2021, 39, 3620-3634.

[26] Yaskolka Meir, A., Tsaban, G., Zelicha, H., Rinott, E., Kaplan, A., Youngster, I. i wsp.: A Green-Mediterranean Diet, Supplemented with Mankai Duckweed, Preserves Iron-Homeostasis in Humans and Is Efficient in Reversal of Anemia in Rats. J. Nutr. 2019, 149, 1004-1011.
[27] Zaitseva O., Khudyakov A., Sergushkina M., Solomina O., Polezhaeva T.: Pectins as a universal medicine. Fitoterapia, 2020, 146, #104676.
[28] Zelicha K., Kaplan A., Yaskolka Meir A., Tsaban G., Rinott E., Shelef I. i wsp.: The effect of *Wolffia globosa* Mankai, a green aquatic plant, on postprandial glycemic response: a randomized crossover controlled trial. Diab. Care, 2019, 42, 1162-1169.
[29] Zhang X., Zhao F.-J., Huang Q., Williams P.N., Sun G.-X., Zhu Y.-G.: Arsenic uptake and speciation in the rootless duckweed *Wolffia globosa*. New Phytol., 2009, 182, 421-428.
[30] Zhou Y., Stepanenko A., Kishchenko O., Xu J., Borisjuk N.: Duckweeds for phytoremediation of polluted water. Plants, 2023, 12, #589.
[31] Zięć G., Michalski O., Konieczna-Molenda A., Dera T., Tkaczewska J.: Nutritional Value, Health Properties, Safety Considerations, and Consumer Acceptance of *Lemnoideae* as Human Food. Nutrients, 2025, 17, #3026.

PROSPECTS FOR THE APPLICATION OF DUCKWEED IN THE SUSTAINABLE FOOD INDUSTRY

S u m m a r y

Background. Plants of the *Lemnoideae* subfamily, commonly known as duckweed, represent a promising source of plant protein with high nutritional value and broad potential applications in the food and biotechnology industries. The protein content in their biomass can reach up to 50 % of dry weight, with a favorable amino acid profile and high digestibility. These plants also provide trace minerals, dietary fiber, and bioactive compounds such as carotenoids, polyphenols and tocopherols, giving them the status of functional food with potential health benefits. Results of studies indicate that the consumption of duckweed-derived products may positively influence metabolic indicators and gut microbiota.
Results and conclusions. From a producer's perspective, duckweed offers exceptionally high biomass productivity, a short growth cycle and easy adaptation to closed cultivation systems, enabling year-round production independent of climatic conditions. Biomass can be used for direct consumption or serve as a raw material for protein extraction, feed additive production and the generation of biogas or bioethanol.
However, the introduction of duckweed into the food industry faces challenges, such as limited consumer acceptance and variability in raw material composition. Open cultivation systems require the monitoring of heavy metals and biological contamination, while accidental escape of plants into the environment may result in the colonization of natural water bodies. Duckweed is characterized by low demand for water, energy and cultivation area, and its production can be integrated with wastewater treatment and nutrient recycling systems. The combination of high nutritional value, production efficiency and low environmental impact makes *Lemnoideae* a resource of strategic importance for sustainable food production.

Key words: duckweed, *Lemnoideae*, *Lemna*, *Wolffia*, sustainable development