

Żywność pochodzenia roślinnego - białka, ekstrakty i ich znaczenie prozdrowotne

„Wykaz źródeł wykorzystanych przy opracowaniu materiałów” ma charakter wyłącznie dokumentacyjny. Wymieniono w nim publikacje naukowe i opracowania, z których korzystano przy przygotowaniu treści poszczególnych rozdziałów. Zapoznanie się z wymienionymi pozycjami nie jest wymagane. Zakres merytoryczny konkursu obejmuje wyłącznie treść zawartą w niniejszych materiałach.

Natomiast „Materiały audio i wideo” stanowią część materiałów konkursowych i należy się z nimi zapoznać.

1. Wprowadzenie - dlaczego żywność roślinna zyskuje na znaczeniu

Autor: dr Ewa Zapora, Politechnika Białostocka, Katedra Hodowli i Użytkowania Lasu; natureTech Centrum Badań Produktów Naturalnych PB

Sposób odżywiania się ludzi zmienia się dziś szybciej niż jeszcze dekadę temu. Coraz więcej osób sięga po produkty pochodzenia roślinnego. Powodem nie jest całkowita rezygnacja z mięsa i nabiału, ale chęć ograniczenia ich udziału w codziennej diecie. Skąd bierze się ten kierunek zmian? Ile osób trzeba będzie wyżywić za kilkadziesiąt lat, ile pieniędzy Polacy wydają dziś na żywność roślinną, kto po nią sięga i jakie przepisy regulują pojawianie się nowych produktów na sklepowych półkach - to najczęstsze pytania.

Ilu ludzi trzeba będzie wyżywić?

Według najnowszej rewizji prognoz ludnościowych ONZ z 2024 r. Ziemię zamieszkiwało w tym roku 8,2 mld ludzi, a liczba ta ma osiągnąć szczyt na poziomie ok. 10,3 mld w 2084 r., po czym zacznie powoli spadać.

Przy obecnych nawykach żywieniowych i rosnącej liczbie ludzi popyt na żywność może wzrosnąć do 2050 r. nawet o 70-90%, przy czym najbardziej zwiększy się popyt na mięso. To, dlatego pytanie, kto już dziś jest gotowy zmienić swój talerz, staje się równie ważne jak pytanie, ilu będzie tych, których trzeba nakarmić.

Rynek żywności roślinnej w Polsce i Europie

Wartość detalicznego rynku żywności roślinnej w Polsce wyniosła w 2023 r. 1,08 mld zł, a licząc razem ze sprzedażą w sektorze HoReCa (branża hotelarsko-restauracyjno-cateringowa), e-commerce i sklepach specjalistycznych - 1,465 mld zł. To wciąż niewielki wycinek rynku: zaledwie ok. 0,5% całego polskiego rynku spożywczego, który w tym samym roku wart był 200,5 mld zł. Największą część tej sprzedaży - 45,4% - stanowią napoje roślinne, stosowane jako zamienniki mleka. Z kolei „burgery roślinne” należą do najmniejszego segmentu rynku.

Na tle Europy Polska wypada skromnie. Polak wydaje na żywność roślinną średnio 4,23 EUR rocznie, podczas gdy mieszkaniec Danii, Niemiec, Holandii, Szwecji, Austrii czy Belgii - średnio 20,85 EUR, niemal pięć razy więcej. Jedną z głównych przyczyn jest cena. Produkty roślinne bywają wyraźnie droższe od swoich odzwierzęcych odpowiedników - np. roślinne zamienniki mleka kosztują średnio 215% ceny mleka krowiego, a „wędliny roślinne” - 196% ceny wędlin tradycyjnych.

Kto sięga po żywność roślinną?

Od 2019 r. ok. 40% Polaków deklaruje ograniczanie spożycia mięsa, a ok. 30% - nabiału. Nie są to więc głównie wegetarianie czy weganie, lecz tzw. fleksitarianie (osoby, które nie rezygnują całkowicie z produktów odzwierzęcych, ale świadomie ograniczają ich udział w diecie). Aż 58% badanych Polaków przynajmniej raz spróbowało roślinnej alternatywy mięsa, a głównym motywem pierwszego zakupu jest zwykła ciekawość, nie decyzja dietetyczna czy światopoglądowa. Największe bariery zakupowe to cena (38% wskazań), niezadowolający smak (30%), brak wiedzy o produktach (25%), obawy zdrowotne (24%) i niechęć do zmiany nawyków (23%).

Kto zmienia dietę: kobiety czy mężczyźni, młodzi czy starsi?

W deklaracjach diety roślinnej widoczny jest wyraźny wzorzec płci i wieku. Fleksitarianizm deklaruje 4% dorosłych Polaków, ale w grupie do 29. roku życia odsetek ten rośnie do 9%; podobnie wegetarianizm - 1% w populacji ogólnej wobec 5% wśród najmłodszych dorosłych. Kobiety częściej niż mężczyźni

deklarują różne odmiany wegetarianizmu, mężczyźni zaś częściej wybierają dodatkowo dietę fleksiwegetariańską, czyli łączącą ograniczenie mięsa z jego okazjonalnym spożyciem.

Różnica widoczna jest też w przekonaniach: kobiety silniej wierzą w wartość diety roślinnej i w to, że soja, fasola czy groch mogą skutecznie zastąpić mięso, mężczyźni zaś częściej uważają mięso za niezbędne dla zdrowia. Gotowość do zastąpienia mięsa roślinnymi produktami białkowymi deklaruje 44% dorosłych Polaków, ale w grupie 16-29 lat odsetek ten sięga 64%.

Prawo i instytucje

Nowe produkty roślinne podlegają też unijnym przepisom o tzw. nowej żywności (ang. *novel food*). Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2015/2283 wymaga, by każdy składnik żywności niespożywany w Unii Europejskiej w znaczącym stopniu przed 15 maja 1997 r. przeszedł ocenę bezpieczeństwa przeprowadzoną przez EFSA (Europejski Urząd ds. Bezpieczeństwa Żywności, ang. *European Food Safety Authority*) i uzyskał zatwierdzenie Komisji Europejskiej. Dotyczy to nie tylko owadów jadalnych czy grzybów, lecz również niektórych nasion i ekstraktów roślinnych, jak np. otrzymywany metodą ekstrakcji nadkrytycznej CO₂ ekstrakt z żółtego pomidora.

Osobną kwestią jest nazewnictwo. W wyroku z 4 października 2024 r. w sprawie Protéines France i in. Trybunał Sprawiedliwości Unii Europejskiej (TSUE) orzekł, że państwo członkowskie nie może zakazać używania nazw kojarzonych z mięsem (np. „stek”, „kielbasa”) dla produktów roślinnych, jeśli samo nie ustanowiło dla nich odrębnej nazwy prawnej. W Polsce branża wciąż nie doczekała się też własnej klasy PKD (Polska Klasyfikacja Działalności) - działa w ramach ogólnej kategorii 10.89.Z, „pozostałe artykuły spożywcze”, a produkty roślinne objęte są 8-procentową stawką VAT, wyższą niż 5% obowiązującą dla ich odzwierzęcych odpowiedników.



Materiał audio i wideo

- Audycja radiowa: „*Alternatywne źródła białka*”, Radiowa Akademia Zdrowego Odżywiania vol. 2, dr inż. Michał Janiak (Instytut Rozrodu Zwierząt i Badań Żywności PAN w Olsztynie, projekt EIT Food). Obejmuje również pojęcie fleksitarianizmu. [pan.olsztyn.pl → alternatywne-zrodla-bialka](http://pan.olsztyn.pl/alternatywne-zrodla-bialka)
- Film: „*Białko roślinne - krótko i na temat*”, kanał Dietetyka oparta na faktach, Radosław Smolik (dyplomowany dietetyk, treści oparte na dowodach naukowych). Zwięzłe, przystępne wprowadzenie do tematu białka roślinnego, dobre otwarcie tematu przed punktem 2. youtube.com/watch?v=sqS2bLSCaIU

2. Technologie pozyskiwania białek roślinnych

Autorzy: mgr inż. Ewelina Gołębowska, Politechnika Białostocka, Katedra Chemii, Biologii i Biotechnologii; dr hab. Monika Kalinowska, prof. PB, Politechnika Białostocka, Katedra Chemii, Biologii i Biotechnologii; natureTECH Centrum Badań Produktów Naturalnych PB

Białka roślinne jako alternatywne źródło makroskładników

Szacuje się, że do połowy XXI wieku światowe zapotrzebowanie na surowce rolnicze, w tym żywność, pasze i włókna, wzrośnie o około 70%. Wynika to nie tylko z rosnących potrzeb żywieniowych, ale również z faktu, iż uprawy są w coraz większym stopniu wykorzystywane do celów przemysłowych oraz do produkcji bioenergii. Zjawiska te generują znaczną presję na ograniczone zasoby ziem uprawnych, a kluczową rolę w tym procesie odgrywa czynnik demograficzny (wzrost światowej populacji). W odpowiedzi na te globalne wyzwania **białka roślinne** zyskują kluczowe znaczenie w obszarze nowoczesnej technologii żywności. Stanowią alternatywę dla białek zwierzęcych ze względu na mniejszy ślad węglowy oraz niższe zużycie zasobów wodnych.

Oprócz powszechnie wykorzystywanych roślin strączkowych, takich jak groch, bób, soja, fasola, soczewica, ciecierzycy czy łubin, istotnym źródłem białka są nasiona oleiste oraz zboża. Szczególnie

surowce różnią się jednak profilem aminokwasowym, a zawarte w nich białko nie zawsze dostarcza wszystkich kluczowych składników w optymalnych proporcjach. Przykładowo, białka obecne w zbożach charakteryzują się stosunkowo niewielką zawartością lizyny, natomiast rośliny strączkowe mogą zawierać ograniczone ilości aminokwasów siarkowych, takich jak metionina i cysteina. Ponadto na zawartość i jakość białka w roślinie istotny wpływ wywierają warunki uprawy, w tym warunki środowiskowe, rodzaj gleby oraz stosowane praktyki rolnicze. Należy jednak pamiętać, że o ostatecznej wartości odżywczej białka decyduje nie tylko jego skład aminokwasowy, ale również poziom jego strawności, biodostępności i bioaktywności. Pod tym względem surowce roślinne często ustępują białkom pochodzenia zwierzęcego, w których proporcje aminokwasów egzogennych są bardziej optymalne z punktu widzenia potrzeb żywieniowych człowieka.

Wybrane technologie pozyskiwania białek roślinnych

I. Przygotowanie surowca

Etap ten często decyduje o wyniku silniej niż sama technika ekstrakcji, ponieważ białka roślinne są zamknięte w organellach wewnątrz komórek o grubej ścianie i osadzone w matrycy skrobiowej lub tłuszczowej.

- Rozdrobnienie - mielenie zwiększa powierzchnię kontaktu z rozpuszczalnikiem i skraca drogę, jaką muszą pokonać cząsteczki białka. Zbyt drobne mielenie działa niekorzystnie: podnosi temperaturę materiału, uszkodzając białko, i uwalnia skrobię, która zagęszcza zawiesinę i utrudnia późniejsze oddzielenie osadu.
- Usunięcie łuski - łuska zawiera niewiele białka, za to koncentruje włókno, garbniki i barwniki. Jej usunięcie podnosi czystość preparatu i poprawia jego smak oraz barwę.
- Odtłuszczenie - konieczne dla surowców oleistych, ponieważ tłuszcz blokuje dostęp rozpuszczalnika i zaburza separację faz. Klasyczna ekstrakcja heksanem jest tania i skuteczna, ale częściowo niszczy strukturę białka; tłoczenie na zimno i ekstrakcja ditlenkiem węgla CO₂ w stanie nadkrytycznym lepiej chronią białko, kosztem wyższej ceny lub niepełnego usunięcia lipidów.

II. Techniki ekstrakcyjne

- **Ekstrakcja alkaliczna** - należy do najpowszechniej stosowanych technik konwencjonalnych. Jej mechanizm działania opiera się na zwiększeniu rozpuszczalności białek zawartych w materiale roślinnym poprzez podwyższenie pH środowiska powyżej ich punktu izoelektrycznego (pI, wartość pH roztworu, przy której cząsteczka białka ma całkowity ładunek elektryczny równy zero), zazwyczaj do zakresu pH 8-11. Następnie mieszaninę poddaje się wirowaniu w celu usunięcia frakcji nierozpuszczalnej, a rozpuszczone w roztworze białka wytrąca się poprzez zakwaszenie środowiska do wartości pI, która dla większości białek roślinnych mieści się w granicach pH 4-5. Do głównych zalet tej techniki należą prostota wykonania, wysoka wydajność oraz niskie koszty procesu. Do istotnych wad należy zaliczyć generowanie znacznych ilości ścieków, wynikające ze stosowania reagentów alkalicznych (KOH, NaOH) oraz konieczności ich późniejszej neutralizacji kwasami. Ponadto skrajnie zasadowe środowisko może obniżać strawność pozyskiwanych białek, prowadzić do degradacji cennych aminokwasów (zwłaszcza lizyny), indukować powstawanie niepożądanych produktów ubocznych, takich jak lizynoalanina, oraz wywoływać gorzki posmak w gotowym izolacie.
- **Ekstrakcja kwasowa** - w przeciwieństwie do wariantu alkalicznego, metoda polega na ekstrakcji roztworem o pH poniżej punktu pI białek. Następnie po odseparowaniu frakcji nierozpuszczalnej, rozpuszczone białka wytrąca się poprzez podniesienie pH do wartości pI i odzyskuje na drodze wirowania lub filtracji. Do wad tej metody należy zaliczyć niższą wydajność odzysku w porównaniu z metodą alkaliczną, generowanie znacznych ilości ścieków, oraz wywoływanie denaturacji kwasowej pogarszającej rozpuszczalność rehydracyjną i właściwości żelujące wyekstrahowanych białek.
- **Ekstrakcja wspomagana ultradźwiękami (UAE, *Ultrasound-Assisted Extraction*)** - opiera się na generowaniu fal ultradźwiękowych o częstotliwości powyżej 20 kHz. Podstawą

mechanizmu jest zjawisko kawitacji, w której w roztworze formują się mikropęcherzyki gazu, które gwałtownie rosną i implodują. Prowadzi to do uwalniania dużych ilości energii mechanicznej i termicznej, wywołując powstawanie mikrostrumieni, które niszczą ściany komórkowe i ułatwiają penetrację rozpuszczalnika oraz uwalnianie białek. Do ograniczeń tej metody zalicza się ryzyko lokalnego przegrzania oraz możliwość generowania wolnych rodników tlenowych, które mogą indukować utlenianie i denaturację białek.

- **Ekstrakcja wspomagana enzymami (EAE, *Enzyme-Assisted Extraction*)** - polega na zastosowaniu pojedynczego enzymu lub mieszaniny enzymów do hydrolizy polisacharydowych ścian komórkowych roślin. Powszechnie stosowanymi enzymami są pektynazy, celulazy, hemicelulazy, amylazy i proteazy.

3. Ekstrakty roślinne i związki bioaktywne

Autorzy: mgr inż. Ewelina Gołębiewska, Politechnika Białostocka, Katedra Chemii, Biologii i Biotechnologii; dr hab. Monika Kalinowska, prof. PB, Politechnika Białostocka, Katedra Chemii, Biologii i Biotechnologii; natureTECH Centrum Badań Produktów Naturalnych PB

Znaczenie żywieniowe i charakterystyka związków bioaktywnych

Warzywa i owoce są jednym z kluczowych elementów prawidłowo zbilansowanej diety. Zgodnie z aktualnymi zaleceniami Narodowego Centrum Edukacji Żywieniowej, opartymi na wytycznych Narodowego Instytutu Zdrowia Publicznego PZH - Państwowego Instytutu Badawczego, warzywa i owoce powinny stanowić połowę objętości codziennego talerza żywieniowego, przy czym zaleca się przewagę ilościową warzyw nad owocami. Podobne rekomendacje formułuje Światowa Organizacja Zdrowia (WHO), wskazując na konieczność spożywania przez osoby powyżej 10. roku życia co najmniej 400 g warzyw i owoców dziennie w celu redukcji ryzyka wystąpienia niezakaźnych chorób przewlekłych, w tym schorzeń układu krążenia oraz nowotworów. Warzywa i owoce dostarczają organizmowi nie tylko podstawowych składników odżywczych, takich jak białka, tłuszcze, węglowodany, ale przede wszystkim witamin, składników mineralnych, błonnika pokarmowego oraz szerokiej gamy substancji fitoaktywnych o udokumentowanym potencjale prozdrowotnym.

Do najważniejszych grup roślinnych związków bioaktywnych zalicza się polifenole, karotenoidy, glukozynolany, alkaloidy, saponiny czy fitosterole. Szczególne miejsce w badaniach żywieniowych zajmują polifenole reprezentujące najliczniejszą grupę metabolitów wtórnych. Wśród polifenoli wyróżnia się m.in. kwasy fenolowe (pochodne kwasu cynamonowego i benzoowego), flawonoidy (flawonole, flawony, flawanony, izoflawony), antocyjany, stilbeny (np. resweratrol) oraz lignany. W tkankach roślinnych pełnią one funkcje adaptacyjne i obronne: chronią przed czynnikami środowiskowymi (np. promieniowaniem UV czy suszą), nadają barwę kwiatom i owocom, a także stanowią barierę chemiczną przeciwko patogenom i szkodnikom. Substancje te nie są syntetyzowane przez organizm człowieka, dlatego muszą być dostarczane wraz z pożywieniem. W organizmie człowieka wykazują one silne właściwości przeciwutleniające, polegające na wygaszaniu wolnych rodników i chelatowaniu jonów metali przejściowych, co przekłada się na ich działanie przeciwzapalne, przeciwcukrzycowe, kardioprotekcyjne oraz antykancerogenne. Istotnym źródłem tych substancji nasiona zbóż, zioła, warzywa, owoce, przyprawy oraz napary z kawy i herbaty. Zawartość i profil związków bioaktywnych w surowcach roślinnych wykazują dużą zmienność. Zależą od czynników genetycznych (odmiana, genotyp), środowiskowych (insolacja, dostępność wody, struktura gleby) oraz agrotechnicznych (warunki uprawy, zbioru i przechowywania). Wyniki niektórych badań naukowych wskazują, że owoce i warzywa pochodzące z upraw ekologicznych charakteryzują się wyższą zawartością metabolitów wtórnych, w tym polifenoli i kwasów fenolowych, w porównaniu z surowcami z produkcji konwencjonalnej. Zjawisko to tłumaczy się brakiem stosowania syntetycznych środków ochrony roślin w rolnictwie ekologicznym, co

indukuje naturalne mechanizmy obronne rośliny i stymuluje szlak kwasu szikimowego odpowiedzialny za syntezę związków fenolowych.

Zagospodarowanie produktów ubocznych w gospodarce o obiegu zamkniętym

Gospodarowanie produktami ubocznymi przemysłu rolno-spożywczego stanowi jeden z najważniejszych filarów transformacji w kierunku gospodarki o obiegu zamkniętym. Polska jako jeden z czołowych producentów rolnych w Unii Europejskiej, silnie wyspecjalizowany m.in. w uprawie zbóż, warzyw oraz sadownictwie, corocznie zbiera ogromne wolumeny plonów, czemu towarzyszy generowanie masowych ilości organicznych pozostałości przetwórczych. Sam tylko globalny sektor przetwórstwa jabłek generuje rocznie około 4 milionów ton wyłoków, co w realiach polskiego sektora rolno-spożywczego przekłada się na konkretne, lokalne wyzwania logistyczne i środowiskowe. Ponieważ surowce te charakteryzują się wysoką wilgotnością przekraczającą 70% oraz znaczną koncentracją cukrów i kwasów organicznych, ich tradycyjne składowanie lub masowe wywożenie na pola prowadzi do błyskawicznej fermentacji mikrobiologicznej. Proces ten nie tylko może obniżyć zawartość azotu w glebie poprzez zaburzenie naturalnego stosunku węgla do azotu, ale staje się także źródłem poważnego zanieczyszczenia wód gruntowych.

W obliczu tych zagrożeń współczesna biogospodarka rezygnuje z prostego modelu utylizacji produktów ubocznych z przemysłu rolno-spożywczego na rzecz zaawansowanego odzyskiwania surowców i biokomponentów. Wyłoki oraz inne pozostałości przetwórcze przestały być traktowane jak kłopotliwy odpad, stanowiąc wyjątkowo cenny surowiec bogaty w fitozwiązki. Nowoczesne podejście obejmuje odzyskiwanie cennych składników, takich jak białka, polifenole, błonnik czy pektyny, bezpośrednio z organicznych pozostałości generowanych przez krajowe rolnictwo i przetwórstwo, a następnie wykorzystanie ich do produkcji żywności funkcjonalnej, kosmetyków czy ekologicznych opakowań. Pełne wdrożenie tych substancji do ponownego obiegu wymaga rygorystycznych standardów analitycznych, obejmujących ścisłą kontrolę czystości mikrobiologicznej oraz monitorowanie ewentualnych zanieczyszczeń chemicznych, takich jak pozostałości środków ochrony roślin czy metale ciężkie.

Metody ekstrakcji związków bioaktywnych z materiału roślinnego

Skuteczna izolacja związków bioaktywnych z matrycy roślinnej (surowca) wymaga dopasowania techniki ekstrakcyjnej oraz rodzaju rozpuszczalnika do chemicznej natury ekstrahowanych substancji. Na przykład, związki fenolowe, obejmujące m.in. kwasy fenolowe, flawonoidy i antocyjany, charakteryzują się zróżnicowaną polarnością (od polarnych do średnio polarnych), dlatego najczęściej do ich pozyskiwania stosuje się roztwory wodno-alkoholowe, w tym etanol o stężeniach 50-80%. Ponadto coraz większą popularnością w zielonej chemii cieszą się naturalne rozpuszczalniki głęboko eutektyczne (DES), stanowiące nietoksyczną alternatywę dla klasycznych rozpuszczalników organicznych.

Fracje lipofilowe, w tym oleje roślinne, karotenoidy oraz witaminy rozpuszczalne w tłuszczach wymagają zastosowania rozpuszczalników o charakterze całkowicie niepolarnym. Tradycyjnym medium przemysłowym jest heksan, chętnie wykorzystywany w ekstrakcji tłuszczów z nasion i makuchów ze względu na wysoki współczynnik ekstrakcyjny. Niemniej jednak, ze względu na rygorystyczne normy bezpieczeństwa żywności i potencjalną toksyczność resztkową heksanu, nowoczesny przemysł odchodzi od tego związku na rzecz ditlenku węgla CO₂ w stanie nadkrytycznym.

Tradycyjne metody pozyskiwania substancji roślinnych, takie jak wielogodzinna maceracja czy digestia, coraz częściej ustępują miejsca nowoczesnym technologiom „zielonej” chemii. Konwencjonalne podejścia wiążą się z niską selektywnością, długim czasem trwania procesu czy też zużyciem toksycznych rozpuszczalników organicznych. Współczesny przemysł i nauka stawiają na metody, które nie tylko chronią przed degradacją składniki bioaktywne surowców roślinnych, ale także drastycznie skracają czas ekstrakcji i maksymalizują wydajność odzysku.

- **Maceracja/digestia/ekstrakcja konwencjonalna** - standardowe podejścia oparte na długotrwałym kontakcie surowca z rozpuszczalnikiem organicznym. Maceracja prowadzona jest w temperaturze pokojowej, statycznie lub z okresowym mieszaniem; digestia w temperaturze podwyższonej, poniżej temperatury wrzenia rozpuszczalnika, co zwiększa rozpuszczalność analitów i współczynnik dyfuzji, obniżając jednocześnie lepkość rozpuszczalnika i poprawiając zwilżanie surowca. Mieszanie

zapobiega lokalnemu nasyceniu roztworu na granicy faz, podtrzymując gradient stężeń stanowiący siłę napędową procesu, nie narusza jednak integralności struktur komórkowych. Technika ta charakteryzuje się ograniczoną selektywnością, znacznym zużyciem rozpuszczalników oraz wydłużonym czasem trwania procesu.

- **Ekstrakcja wspomagana mikrofalami (MAE, *Microwave-Assited Extraction*)** - mikrofałe wprawiają cząsteczki wody zawarte w materiale roślinnym (surowcu) w gwałtowny ruch, przez co ekstrahowany materiał nagrzewa się „od środka”, a nie od zewnątrz. Woda uwięziona wewnątrz komórek zamienia się w parę, ciśnienie rośnie i ściany komórkowe pękają. Zawartość komórek trafia wtedy wprost do rozpuszczalnika, zamiast powoli przez nie przenikać. Dzięki temu ekstrakcja trwa minuty zamiast godzin i wymaga znacznie mniej rozpuszczalnika. Zastosowanie tej techniki pozwoliło na zwiększenie wydajności ekstrakcji białka z mleka sojowego o 33,18% w porównaniu do tradycyjnej ekstrakcji alkalicznej.
- **Ekstrakcja wspomagana ultradźwiękami (UAE)** - patrz rozdział 2.
- **Ekstrakcja nadkrytycznym CO₂ (SFE, *Supercritical Fluid Extraction*)** - patrz rozdział 4.

4. Ekstrakcja nadkrytyczna CO₂ - technologia „zielonej chemii”

Autor: dr hab. Monika Kalinowska, prof. PB, Politechnika Białostocka, Katedra Chemii, Biologii i Biotechnologii; natureTECH Centrum Badań Produktów Naturalnych PB

Czym jest stan nadkrytyczny?

Wyobraźmy sobie szczelne, wytrzymałe naczynie wypełnione do połowy cieczą, nad którą znajduje się jej para. Podgrzewamy je. Ciecz paruje, więc ciśnienie rośnie, a jej gęstość maleje. Jednocześnie para staje się coraz gęstsza. W pewnym momencie obie fazy osiągają identyczną gęstość – granica między nimi po prostu znika. Nie ma już menisku, nie ma powierzchni cieczy, nie ma wrzenia. Zostaje jedna substancja o właściwościach pośrednich, nazywana płynem nadkrytycznym. Warunki, w których to następuje, to punkt krytyczny – charakterystyczny dla każdej substancji. Zjawisko zaobserwował w 1822 roku Charles Cagniard de la Tour, a zbadał je Thomas Andrews w latach 70-tych XIX wieku.

Płyn nadkrytyczny łączy dwie cechy: gęstość zbliżoną do cieczy (a więc zdolność rozpuszczania substancji) oraz lepkość i dyfuzyjność zbliżoną do gazu (a więc zdolność wnikania w głąb materiału). To właśnie ta kombinacja czyni go doskonałym rozpuszczalnikiem ekstrakcyjnym – wnika w rozdrobniony surowiec roślinny tak łatwo jak gaz, a rozpuszcza substancje tak dobrze jak ciecz.

Dlaczego ditlenek węgla?

Dla wody punkt krytyczny znajduje się przy 374°C i 221 barach – warunki, w których każda cząsteczka biologicznie czynna uległaby zniszczeniu. Ditlenek węgla CO₂ ma parametry krytyczne wyjątkowo łagodne: 31,0 °C i 73,8 bara. To temperatura zaledwie nieco wyższa od pokojowej, a więc taka, w której nie degradują się związki termolabilne.

Do tego dochodzą zalety praktyczne. CO₂ jest gazem całkowicie niepalnym i nietoksycznym, a jego niskie parametry krytyczne sprawiają, że chętnie wykorzystuje się go do ekstrakcji cennych związków z surowców roślinnych. Jest tani, dostępny jako produkt uboczny innych procesów przemysłowych i – co najważniejsze dla jakości produktu – po zakończeniu ekstrakcji odparowuje samoczynnie. Wystarczy obniżyć ciśnienie, a rozpuszczalnik dosłownie ulatnia się z ekstraktu, nie zostawiając po sobie ani śladu. Ekstrakty otrzymane tą metodą mają status GRAS nadany przez amerykańską FDA.

Warto uświadomić sobie kontrast z metodą tradycyjną. Klasyczna ekstrakcja heksanem czy dichlorometanem

Frakcjonowanie

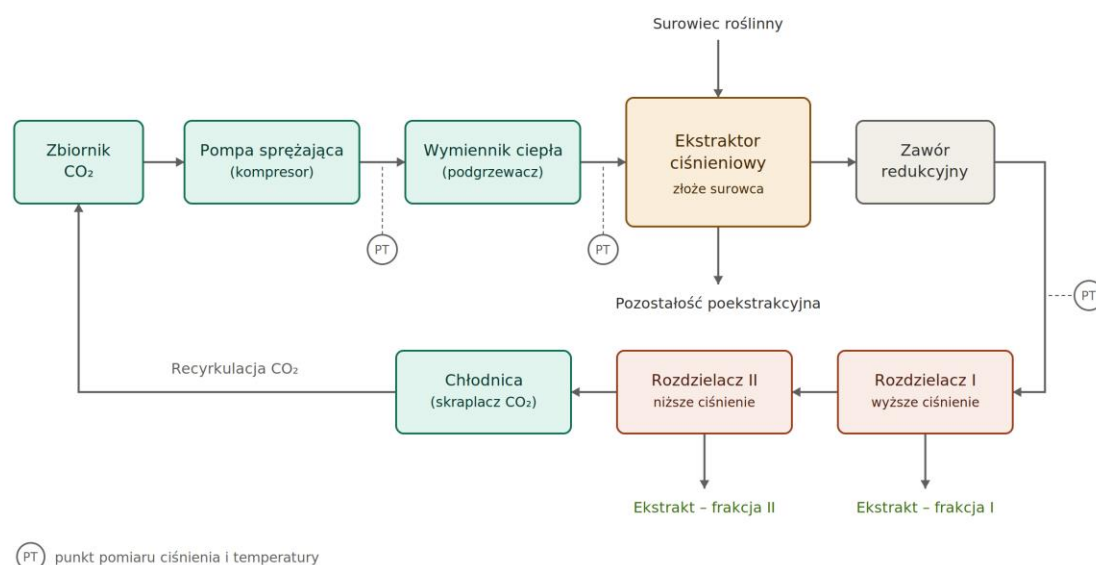
Zdolność rozpuszczania nadkrytycznego CO₂ zależy od jego gęstości, którą reguluje się ciśnieniem i temperaturą. Pozwala to na frakcjonowanie, czyli wybiórcze wydobywanie kolejnych grup związków z tego samego surowca. Ograniczeniem jest niepolarny charakter CO₂, co uniemożliwia ekstrakcję

polarnych i średnio polarnych związków, np. polifenoli, glikozydów. Rozwiązaniem jest dodatek kilku procent np. etanolu jako kosolwentu.

Jak zbudowana jest instalacja do ekstrakcji nadkrytycznej?

Instalacja do ekstrakcji nadkrytycznej składa się najczęściej z czterech zasadniczych elementów:

- Pompa sprężająca rozpuszczalnik lub kompresor - element wymuszający obieg i odpowiadający za osiągnięcie wymaganego ciśnienia. Pompę stosuje się, gdy CO₂ jest podawany w postaci ciekłej, kompresor gdy w postaci gazowej.
- System pomiarowy ciśnienia i temperatury - to element sterujący selektywnością całego procesu. Ponieważ zdolność rozpuszczania płynu nadkrytycznego zależy bezpośrednio od tych dwóch parametrów, dokładność ich pomiaru i regulacji decyduje o powtarzalności składu ekstraktu.
- Ekstraktor ciśnieniowy - grubościenny zbiornik, w którym umieszcza się surowiec i w którym zachodzi właściwy proces wydobywania składników.
- Rozdzielacz - aparat, w którym ekstrahowany składnik zostaje oddzielony od rozpuszczalnika.



Schemat instalacji do ekstrakcji nadkrytycznej ditlenkiem węgla. PT punkt pomiaru ciśnienia i temperatury. Opracowanie własne.

Przebieg procesu

Surowiec dostarcza się do ekstraktora ciśnieniowego. Rozpuszczalnik doprowadza się do warunków nadkrytycznych przez ogrzanie i zmianę ciśnienia, a następnie wprowadza do ekstraktora, gdzie styka się on z surowcem i ekstrahuje (wydobywa z niego) pożądane składniki. Powstała mieszanina opuszcza ekstraktor i trafia do rozdzielacza, w którym rozpuszczalnik przechodzi w stan gazowy, uwalniając ekstrahowaną substancję. Rozdział można przeprowadzić na dwa sposoby.

- Przez zmianę temperatury. Mieszanina przechodzi przez wymiennik ciepła, gdzie zostaje schłodzona do temperatury, w której dany składnik jest najslabiej rozpuszczalny. Składnik wytrąca się i zostaje wydzielony w rozdzielaczu.
- Przez redukcję ciśnienia. Obniżenie ciśnienia powoduje spadek gęstości rozpuszczalnika, a wraz z nim gwałtowny spadek jego zdolności rozpuszczania i wytrącenie składnika.

W praktyce najczęściej stosuje się jednoczesną zmianę obu parametrów. Niezależnie od wybranego wariantu rozpuszczalnik jest regenerowany i po ponownym doprowadzeniu do warunków nadkrytycznych wraca do ekstraktora, a wydzielona substancja jest usuwana z rozdzielacza. Obieg CO₂ jest więc zamknięty, co oznacza, że ten sam rozpuszczalnik krąży w instalacji wielokrotnie, co odróżnia tę technologię od ekstrakcji klasycznej, gdzie zużyty rozpuszczalnik trzeba zagospodarować jako odpad. Jeżeli z jednego surowca ekstrahuje się kilka składników, rozdział przeprowadza się stopniowo. Kolejne

rozdzielacze pracują przy różnych ciśnieniach i temperaturach, dzięki czemu w jednym cyklu można selektywnie wydzielić kilka frakcji ekstraktu o odmiennym składzie, np. osobno olejki eteryczne, osobno frakcję tłuszczową.

Przykłady zastosowań

Dekofeinizacja kawy to zastosowanie historycznie pierwsze. Wcześniej kofeinę usuwano dichlorometanem; dziś dominuje CO₂.

Ekstrakty chmielowe mają w Polsce znaczenie szczególne. Ekstrakt chmielowy otrzymany metodą nadkrytyczną zawiera gorzkie kwasy, część tłuszczów i olejki eteryczne, natomiast polarne pestycydy nie ulegają ekstrakcji; zawartość wymienionych związków w ekstrakcie wynosi około 90%, w tym olejki eteryczne stanowią 10% całości. Zastosowanie nadkrytycznego CO₂ umożliwiło wyeliminowanie ekstrakcji olejków chmielowych dichlorometanem. Instalacja Sieci Badawczej Łukasiewicz - Instytutu Nowych Syntezy Chemicznych w Puławach produkuje ekstrakt chmielowy od 2000 roku, w ilości od 50 do 100 ton rocznie.

Ekstrakty ziołowe o działaniu przeciwdrobnoustrojowym. W badaniach nad jedenastoma gatunkami roślin krwawnikiem pospolitym, nagietkiem lekarskim, rumiankiem, kocankami piaskowymi, chmielem, mniszkiem lekarskim, jałowcem pospolitym, dziurawcem zwyczajnym, kocimiętka, głogiem i bżem czarnym wykazano, że *Botrytis cinerea* był najbardziej wrażliwy na działanie ekstraktów SFE-CO₂, natomiast grzyby z rodzaju *Fusarium* najmniej. Otwiera to perspektywę stosowania ekstraktów roślinnych jako alternatywy dla syntetycznych fungicydów w ochronie plonów.

Inne kierunki. Technologia znajduje zastosowanie w ekstrakcji suszu konopnego, pozyskiwaniu naturalnych barwników, aromatów i związków smakowych, usuwaniu związków lipidowych oraz otrzymywaniu oleożywic, olejków eterycznych, tłuszczów roślinnych i polifenoli.



Materiały multimedialne

Ekstrakcja nadkrytycznym dwutlenkiem węgla. <https://www.youtube.com/watch?v=TIJiNtWgu18>

5. Wyzwania: bioprzyswajalność, antynutrienty i bezpieczeństwo

Autor: dr Ewa Zapora, Politechnika Białostocka, Katedra Hodowli i Użytkowania Lasu; natureTech Centrum Badań Produktów Naturalnych PB

Wysoka wydajność ekstrakcji i potwierdzona aktywność biologiczna związku to dopiero połowa sukcesu. Żeby substancja aktywna faktycznie zadziałała w organizmie, musi pokonać jeszcze trzy przeszkody: dotrzeć do miejsca wchłaniania w formie, którą organizm może ją wykorzystać, nie zostać zablokowana w przewodzie pokarmowym przez inne substancje spożyte razem z nią, i nie zaszkodzić osobom, które reagują na nią alergicznie.

Czy wysoka wydajność ekstrakcji wystarczy?

Wysoka wydajność ekstrakcji i potwierdzona bioaktywność związku chemicznego w testach *in vitro* nie oznaczają automatycznie takiego samego efektu w organizmie. Kluczowe pojęcie to bioprzyswajalność (ang. *bioaccessibility*), czyli część całkowitej zawartości związku w produkcie, która uwalnia się z matrycy pokarmowej w trakcie trawienia i staje się teoretycznie dostępna do wchłonięcia. Związki fenolowe, jedna z najczęściej badanych grup związków bioaktywnych roślin, cechują się generalnie niską bioprzyswajalnością ze względu na złożoność struktury chemicznej, ograniczoną rozpuszczalność, oddziaływanie z innymi składnikami matrycy oraz tendencję do polimeryzacji (Calleja-Gómez i in., 2024). Poziom bioprzyswajalności zależy też od tego, z której części rośliny pochodzi surowiec: bioprzyswajalność flawanoli pochodzących ze skórki jabłka była o 14% niższa niż flawanoli pochodzących z miąższu tego samego owocu, mimo zastosowania tej samej technologii przetwarzania

(Calleja-Gómez i in., 2024). To pokazuje, że o końcowym efekcie decyduje nie tylko metoda przetworzenia, ale i skład chemiczny konkretnej części surowca.

Co ogranicza wartość odżywczą roślinnych ekstraktów?

Rośliny wytwarzają szereg substancji jako naturalną ochronę przed szkodnikami i roślinożercami. Część z nich utrudnia też ludziom trawienie i wchłanianie składników odżywczych - to tzw. antynutrienty (czynniki antyodżywcze). Do najważniejszych należą: taniny, kwas fitynowy (fityniany), saponiny, alkaloidy, szczawiany, inhibitory trypsyny i innych enzymów trawiennych oraz glukozynolany. Mechanizm ich działania jest różny: inhibitory trypsyny i proteaz utrudniają trawienie białek, szczawiany i fityniany wiążą minerały (wapń, żelazo, cynk) i ograniczają ich wchłanianie, a glukozynolany (tzw. goitrogeny) zakłócają wychwyt jodu przez tarczycę.

Zawartość antynutrientów bywa bardzo zróżnicowana nawet w obrębie jednej rośliny strączkowej. Na przykład w komosie ryżowej aktywność inhibitorów trypsyny wynosi 1,36-5,04 UTI/mg białka (*Unit Trypsin Inhibitor*; jednostka inhibitora trypsyny), ale w soi aż 24,5-41,5 UTI/mg białka.

Większość antynutrientów można jednak skutecznie ograniczyć zwykłą obróbką technologiczną. Autoklawowanie nasion roślin strączkowych obniżało zawartość tanin o 33-46% i kwasu fitynowego o 28-52%, a gotowanie ciecierzycy przez 90 minut zmniejszało aktywność inhibitorów trypsyny o ponad 80%. Podobnie działa fermentacja z udziałem bakterii kwasu mlekowego (*Lactobacillus bulgaricus*) - w przypadku komosy ryżowej fermentacja trwająca 4 dni w temperaturze 30°C obniżyła zawartość fitynianów z 11,06 do 3,02 mg/g (ponad 3-krotnie), a saponin z 11,20 do 0,15 mg/g (niemal 75-krotnie).

Alergie i inne ograniczenia zdrowotne

Alergie pokarmowe dotyczą nawet 10% populacji, i może je wywoływać ponad 170 różnych produktów spożywczych. Do najczęstszych alergenów roślinnych można zaliczyć orzechy, soję, pszenicę i orzeszki ziemne, a w Unii Europejskiej osobno wymienia się też łubin i gorczycę. Białka wywołujące reakcje alergiczne należą do czterech głównych rodzin (klasyfikacja oparta na podobieństwie budowy białka, nie na grupie chemicznej): nadrodziny kupin, nadrodziny prolamin, profilin oraz rodziny Bet v 1. Ponad połowa wszystkich alergenów białek roślinnych należy do dwóch pierwszych z nich.

Osobnym wyzwaniem jest celiakia. Jest to choroba autoimmunologiczna, w której organizm reaguje uszkodzeniem jelita cienkiego na białka glutenu obecne w pszenicy, jęczmieniu i życie. Bywa ona wymieniana jako jeden z ważniejszych skutków ubocznych związanych ze spożyciem żywności roślinnej bazującej na zbożach glutenowych. Przykładem takiego produktu jest seitan, czyli koncentrat glutenu pszennego popularny jako imitacja mięsa. Dlatego też sam fakt, że produkt jest roślinny, nie oznacza, że może być spożywany przez każdego konsumenta. Wątpliwości budziły też izoflawony sojowe, które słabo wiążą się z receptorami estrogenowymi - niektóre wcześniejsze badania sugerowały możliwe zaburzenia hormonalne, jednak metaanaliza obejmująca mężczyzn spożywających 60 g białka sojowego dziennie nie wykazała wpływu ani na poziom testosteronu, ani na parametry nasienia. To właśnie dlatego nowe produkty roślinne, zanim trafią na rynek, przechodzą ocenę bezpieczeństwa EFSA.

Czy sama technologia ekstrakcji może być źródłem zagrożenia?

Wybór technologii ekstrakcji ma znaczenie nie tylko dla wydajności, ale i dla bezpieczeństwa końcowego produktu. Rozpuszczalniki organiczne stosowane w klasycznej ekstrakcji, takie jak heksan, nie są usuwane z produktu w 100% - ich dopuszczalne pozostałości reguluje unijna dyrektywa 2009/32/WE, która dla heksanu w olejach i tłuszczach roślinnych ustala maksymalny limit na poziomie 1 mg/kg. Wartość ta opiera się na dawce NOEL (ang. *No-Observed-Effect Level*; poziom bez obserwowanego działania niepożądanego) dla n-heksanu wynoszącej 23 mg/kg masy ciała, ustalonej w 1996 r. przez ówczesny Komitet Naukowy ds. Żywności. W 2024 r. EFSA uznała jednak, że konieczne jest ponowne przeprowadzenie oceny bezpieczeństwa heksanu jako rozpuszczalnika do ekstrakcji, i w 2025 r. ogłosiła formalne wezwanie do przedstawienia nowych danych skierowane do przedsiębiorstw spożywczych, krajowych organów ds. żywności oraz instytucji badawczych - m.in. dlatego, że niemowlęta i małe dzieci mogą być narażone na relatywnie wyższe dawki heksanu niż dorośli.

W odpowiedzi na te ograniczenia coraz szerzej rozwijane są tzw. zielone technologie ekstrakcji, które znacząco eliminują to ryzyko. Ekstrakcja nadkrytyczna (ang. *Supercritical Fluid Extraction*) wykorzystuje

nietoksyczny rozpuszczalnik (m.in. CO₂) przy niskiej temperaturze, a ekstrakcja wspomagana ciśnieniem (ang. *Accelerated Solvent Extraction*) najczęściej opiera się na wodzie lub mieszaninie etanol-woda. Żadna z tych technologii nie wymaga rozpuszczalników objętych limitami z dyrektywy 2009/32/WE.

6. Prozdrowotne znaczenie ekstraktów roślinnych

Autor: dr hab. Monika Kalinowska, prof. PB, Politechnika Białostocka, Katedra Chemii, Biologii i Biotechnologii; natureTECH Centrum Badań Produktów Naturalnych PB

Czym jest ekstrakt roślinny?

W prawie żywnościowym nie funkcjonuje jedna definicja „ekstraktu roślinnego”. O kwalifikacji preparatu przesądza przede wszystkim jego funkcja w produkcie, a także historia spożycia, sposób prezentacji oraz przepisy krajowe, ponieważ dopuszczanie substancji roślinnych do żywności pozostaje kompetencją państw członkowskich. Szeroko stosowana w tym sektorze jest definicja przyjęta przez Komitet Naukowy Europejskiego Urzędu ds. Bezpieczeństwa Żywności. Definicja rozróżnia **surowce roślinne** (ang. botanicals) całe, rozdrobnione lub pocięte rośliny, części roślin, algi, grzyby i porosty, zwykle w postaci nieprzetworzonej, najczęściej suszonej oraz **preparaty roślinne** (ang. botanical preparations), otrzymywane z surowców roślinnych w różnych procesach, m.in. przez tłoczenie, wyciskanie, ekstrakcję, frakcjonowanie, destylację, zagęszczanie, suszenie lub fermentację. Do preparatów roślinnych zalicza się surowce rozdrobnione i sproszkowane, nalewki, wyciągi, olejki eteryczne (z wyłączeniem olejów i tłuszczów przeznaczonych do bezpośredniego spożycia), wyciśnięte soki. Ekstrakt jest zatem jednym z rodzajów preparatu roślinnego, powstającym przez ekstrakcję surowca rozpuszczalnikiem, z ewentualnym zagęszczeniem lub odparowaniem rozpuszczalnika. W zależności od uzyskanej konsystencji wyróżnia się wyciągi płynne, gęste i suche. Warto podkreślić, że zwłaszcza przy zastosowaniu rozpuszczalników polarnych przechodzą do niego nie tylko metabolity wtórne (często determinujące aktywność biologiczną ekstraktu), lecz również cukry, kwasy organiczne, lipidy, białka i składniki mineralne, a w preparatach suchych często obecny jest nośnik, np. maltodekstryna.

Wybrane grupy związków decydujące o aktywności prozdrowotnej ekstraktów

Grupa	Przykłady związków	Wybrane aktywności
Związki fenolowe	kwasy fenolowe, flawonoidy (flawonole, katechiny, antocyjany, izoflawony)	przeciwutleniające
Terpenoidy	mono- i seskwiterpeny olejków eterycznych, triterpeny	przeciwdrobnoustrojowe
Związki siarkowe	glukozynolany i izotiocyjaniiny, związki siarkoorganiczne czosnku	przeciwdrobnoustrojowe
Alkaloidy	kofeina, nikotyna, teobromina	pobudzające
Polisacharydy	pektyny, β-glukany, inulina	prebiotyczne
Lipidy i związki towarzyszące	niezbędne nienasycone kwasy tłuszczowe, tokoferole,	regulacja gospodarki lipidowej, antyutleniające

Użyty do ekstrakcji rozpuszczalnik determinuje skład ekstraktu: np. woda i rozpuszczalniki wodno-etanolowe wydobywają związki fenolowe, saponiny i polisacharydy, rozpuszczalniki lipofilowe - karotenoidy, fitosterole i olejki eteryczne.

Przykłady ekstraktów roślinnych w suplementach diety

Surowiec (gatunek)	Organ i związek aktywny	Deklarowane zastosowanie
Ostropest plamisty (<i>Silybum marianum</i>)	owoc; sylimaryna	wspomaganie funkcji wątroby
Karczoch zwyczajny (<i>Cynara scolymus</i>)	liść; kwasy kawoilochinowe, cynaryna	wspomaganie trawienia i wydzielania żółci
Miłorząd japoński (<i>Ginkgo biloba</i>)	liść; glikozydy flawonoidowe, laktony terpenowe	wspomaganie pamięci i koncentracji
Żeń-szeń właściwy (<i>Panax ginseng</i>)	korzeń; ginsenozydy	zmniejszenie uczucia zmęczenia
Żurawina wielkoowocowa (<i>Vaccinium macrocarpon</i>)	owoc; proantocyjanidyny typu A	wspomaganie funkcji dróg moczowych
Aronia czarnoowocowa (<i>Aronia melanocarpa</i>)	owoc; antocyjany	działanie przeciwutleniające, wspierające funkcjonowanie układu krążenia
Zielona herbata (<i>Camellia sinensis</i>)	liść; galusan epigallokatechiny	wspomaganie metabolizmu
Kurkuma (<i>Curcuma longa</i>)	kłącze; kurkuminoidy	wspomaganie układu kostno-stawowego

Wykaz źródeł wykorzystanych przy opracowaniu materiałów do rozdz. 1

- EFSA Panel on Nutrition, Novel Foods and Food Allergens (NDA). (2021a). Safety of dried yellow mealworm (*Tenebrio molitor* larva) as a novel food pursuant to Regulation (EU) 2015/2283. *EFSA Journal*, 19(1), e06343. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2021.6343>
- EFSA Panel on Nutrition, Novel Foods and Food Allergens (NDA). (2021b). Safety of Vitamin D2 mushroom powder (*Agaricus bisporus*) as a Novel food pursuant to Regulation (EU) 2015/2283. *EFSA Journal*, 19(4), e06516. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2021.6516>
- EFSA Panel on Nutrition, Novel Foods and Food Allergens (NDA). (2022). Safety of hydrothermally treated kernels from edible *Jatropha curcas* L. (Chuta) as a novel food pursuant to Regulation (EU) 2015/2283. *EFSA Journal*, 20(1), e06998. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2022.6998>
- EFSA Panel on Nutrition, Novel Foods and Food Allergens (NDA). (2023). Safety of yellow/orange tomato extract as a novel food pursuant to Regulation (EU) 2015/2283. *EFSA Journal*, 21(5), e07994. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2023.7994>
- Polski Związek Producentów Żywności Roślinnej. (2024). *Branża żywności roślinnej w Polsce 2024 - dane, szanse i wyzwania*. <https://roslinniproducenci.org/wp-content/uploads/2024/10/Branza-Zywnosci-Roslinnej-w-Polsce-2024-dane-szanse-i-wyzwania-.pdf>
- United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. (2024). *World Population Prospects 2024: Summary of Results*. https://population.un.org/wpp/assets/Files/WPP2024_Summary-of-Results.pdf
- Interdyscyplinarne Centrum Analiz i Współpracy Żywność dla Przyszłości / Danone Polska. (2023). *Talerz przyszłości. Raport otwarcia Think Tanku*. Badanie: Zymetria, „Talerz Polaka - nawyki żywieniowe polskiego społeczeństwa”, marzec 2023. https://danone.pl/assets/interdyscyplinarne/Raport_Talerz_Przyszlosci_2023.pdf
- Trybunał Sprawiedliwości Unii Europejskiej, wyrok z dnia 4 października 2024 r., Protéines France i in., C-438/23, ECLI:EU:C:2024:826.

Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 24 grudnia 2007 r. w sprawie Polskiej Klasyfikacji Działalności (PKD). Dz.U. 2007 nr 251 poz. 1885.

<https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=WDU20072511885>

Ustawa z dnia 11 marca 2004 r. o podatku od towarów i usług. Dz.U. 2004 nr 54 poz. 535, z późn. zm., załącznik nr 3 i załącznik nr 10.

<https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=WDU20040540535>

Wykaz źródeł wykorzystanych przy opracowaniu materiałów do rozdz. 2 i 3

Carbonaro M, Mattera M, Nicoli S, Bergamo P, Cappelloni M. Modulation of antioxidant compounds in organic vs. conventional fruit (peach *Prunus persica* L., and pear *Pyrus communis* L.). *J Agric Food Chem* 2002, 50: 9-11.

FAO. How to Feed the World in 2050. (2009). Dostępne online:

http://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/expert_paper/How_to_Feed_the_World_in_2050.pdf.

Gołębiewska, E., Kalinowska, M., & Yildiz, G. (2022). Sustainable Use of Apple Pomace (AP) in Different Industrial Sectors. *Materials*, 15(5), 1788. <https://doi.org/10.3390/ma15051788>

Grudniewska, A., de Melo, E. M., Chan, A., Gniłka, R., Boratyński, F., & Matharu, A. S. (2018). Enhanced protein extraction from oilseed cakes using glycerol-choline chloride deep eutectic solvents: A biorefinery approach. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 6(11), 15791-15800.

<https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b04359>

Hewage, A., Olatunde, O. O., Nimalaratne, C., Malalgoda, M., Aluko, R. E., & Bandara, N. (2022). Novel extraction technologies for developing plant protein ingredients with improved functionality. *Trends in Food Science & Technology*, 129, 492-511. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.10.016>

Langyan S, Yadava P, Khan FN, Dar ZA, Singh R and Kumar A (2022) Sustaining Protein Nutrition Through Plant-Based Foods. *Front. Nutr.* 8:772573. doi: 10.3389/fnut.2021.772573

NCEŻ. Talerz zdrowego żywienia (2025) Dostępne online: <https://ncez.pzh.gov.pl/abc-zywienia/talerz-zdrowego-zywienia/>

Rashwan, A. K., Osman, A. I., Abdelshafy, A. M., Mo, J., & Chen, W. (2025). Plant-based proteins: advanced extraction technologies, interactions, physicochemical and functional properties, food and related applications, and health benefits. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 65(4), 667-694.

<https://doi.org/10.1080/10408398.2023.2279696>

Romina O Coniglio, Gabriela V Díaz, Ramona C Barua, Edgardo Albertó, Pedro D Zapata, Enzyme-assisted extraction of phenolic compounds and proteins from sugarcane bagasse using a low-cost cocktail from *Auricularia fuscus*, *International Journal of Food Science and Technology*, Volume 57, Issue 2, February 2022, Pages 1114-1121, <https://doi.org/10.1111/ijfs.15477>

Sikorska, A.; Gugala, M.; Zarzecka, K.; Domański, Ł. Substancje antyodżywcze w wybranych roślinach leczniczych. *Herbalism* 2022, 8, 119-129.

Tang, J., Yao, D., Xia, S., Cheong, L., & Tu, M. (2024). Recent progress in plant-based proteins: From extraction and modification methods to applications in the food industry. *Food Chemistry: X*, 23, 101540.

<https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101540>

WHO. Healthy diet (2026). Dostępne online: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/healthy-diet>

Young JE, Zhao X, Carey EE, Welti R, Yang S-S, Wang W. Phytochemical phenolics in organically grown vegetables. *Mol Nutr Food Res* 2005, 49: 1136-1142.

Wykaz źródeł wykorzystanych przy opracowaniu materiałów do rozdz. 4

Janiszewska E., Witrowa-Rajchert D. (2005). Ekstrakcja nadkrytyczna w przemyśle spożywczym. *Żywność. Nauka. Technologia. Jakość*, 4(45), 5-16.

Janiszewska E., Witrowa-Rajchert D., Rój E. (2013). Metody i kierunki wykorzystania mikronizacji nadkrytycznej. *Żywność. Nauka. Technologia. Jakość*, 5-15.

Dobrzyńska-Inger A., Rój E. (2014). Ekstrakcja nadkrytyczna olejów z nasion roślin jagodowych. *Instytut Nowych Syntezy Chemicznych, Puławy*.

Kowalczyk D. i wsp. (2017). Ekstrakcja pyłku kwiatowego ditlenkiem węgla w stanie nadkrytycznym. *Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego*, 1/2017, 66-70.

Herrero M., Sánchez-Camargo A.P., Cifuentes A., Ibáñez E. (2015). Plants, seaweeds, microalgae and food by-products as natural sources of functional ingredients obtained using pressurized liquid extraction and supercritical fluid extraction. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 71, 26-38.

Wykaz źródeł wykorzystanych przy opracowaniu materiałów do rozdz. 5

- Calleja-Gómez, M., Roig, P., Pateiro, M., Domínguez-Valencia, R., Lorenzo, J. M., Fernández-López, J., Viuda-Martos, M., Pérez-Álvarez, J. Á., Martínez-Zamora, L., Nieto, G., Peñalver, R. i Carrillo, C. (2024). Health-promoting benefits of plant-based by-product extracts obtained by innovative technologies. *Current Opinion in Food Science*, 57, 101161. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2024.101161>
- Langyan, S., Yadava, P., Khan, F. N., Dar, Z. A., Singh, R. i Kumar, A. (2022). Sustaining Protein Nutrition Through Plant-Based Foods. *Frontiers in Nutrition*, 8, 772573. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.772573>
- Rashwan, A. K., Osman, A. I., Abdelshafy, A. M., Mo, J. i Chen, W. (2025). Plant-based proteins: advanced extraction technologies, interactions, physicochemical and functional properties, food and related applications, and health benefits. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 65(4), 667-694. <https://doi.org/10.1080/10408398.2023.2279696>
- Tan, M., Nawaz, M. A. i Buckow, R. (2023). Functional and food application of plant proteins - a review. *Food Reviews International*, 39(5), 2428-2456. <https://doi.org/10.1080/87559129.2021.1955918>
- Parlament Europejski i Rada Unii Europejskiej. (2009). Dyrektywa 2009/32/WE z dnia 23 kwietnia 2009 r. w sprawie zbliżenia ustawodawstw państw członkowskich odnoszących się do rozpuszczalników do ekstrakcji stosowanych w produkcji środków spożywczych i składników żywności. Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej, L 141, 3-11. <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:141:0003:0011:EN:PDF>
- European Food Safety Authority (EFSA). (2024). Technical report on the need for re-evaluation of the safety of hexane used as an extraction solvent in the production of foodstuffs and food ingredients. *EFSA Supporting Publications*, 21(9), EN-9001. <https://doi.org/10.2903/sp.efsa.2024.EN-9001>
- European Food Safety Authority (EFSA). (2025). Call for data for the re-evaluation of technical hexane used as an extraction solvent in the preparation of food and food ingredients. EFSA-Q-2025-00358. <https://www.efsa.europa.eu/en/call/call-data-re-evaluation-technical-hexane-used-extraction-solvent-preparation-food-and-food>

Wykaz źródeł wykorzystanych przy opracowaniu materiałów do rozdz. 6

- Dyrektywa 2002/46/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 10 czerwca 2002 r. w sprawie zbliżenia ustawodawstw państw członkowskich odnoszących się do suplementów żywnościowych (Dz. Urz. UE L 183 z 12.07.2002, s. 51, z późn. zm.). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/?uri=CELEX:32002L0046>
- Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/32/WE z dnia 23 kwietnia 2009 r. w sprawie zbliżenia przepisów państw członkowskich dotyczących rozpuszczalników do ekstrakcji stosowanych w produkcji środków spożywczych i składników żywności (Dz. Urz. UE L 141 z 06.06.2009, s. 3, z późn. zm.). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/?uri=celex:32009L0032>
- Rozporządzenie (WE) nr 1925/2006 Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 20 grudnia 2006 r. w sprawie dodawania do żywności witamin i składników mineralnych oraz niektórych innych substancji (Dz. Urz. UE L 404 z 30.12.2006, s. 26, z późn. zm.). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/?uri=CELEX:32006R1925>
- Rozporządzenie Komisji (UE) 2022/2340 z dnia 30 listopada 2022 r. zmieniające załącznik III do rozporządzenia (WE) nr 1925/2006 w odniesieniu do ekstraktów z zielonej herbaty zawierających galusan (-)-epigallokatechiny (Dz. Urz. UE L 310 z 01.12.2022, s. 7). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/?uri=CELEX:32022R2340>
- Ustawa z dnia 25 sierpnia 2006 r. o bezpieczeństwie żywności i żywienia (t.j. Dz. U. z 2023 r. poz. 1448, z późn. zm.). <https://eli.gov.pl/eli/DU/2023/1448/oql>
<https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=WDU20230001448>
- EFSA Scientific Committee (2009). Guidance on Safety assessment of botanicals and botanical preparations intended for use as ingredients in food supplements. *EFSA Journal*, 7(9), 1249. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2009.1249>
- European Medicines Agency, Committee on Herbal Medicinal Products. European Union herbal monograph on *Silybum marianum* (L.) Gaertn., fructus (EMA/HMPC/294187/2013).

https://www.ema.europa.eu/en/documents/herbal-monograph/final-european-union-herbal-monograph-silybum-marianum-l-gaertn-fructus_en.pdf

European Medicines Agency, Committee on Herbal Medicinal Products. European Union herbal monograph on *Cynara cardunculus* L. (syn. *Cynara scolymus* L.), folium (EMA/HMPC/194014/2017).

https://www.ema.europa.eu/en/documents/herbal-monograph/final-european-union-herbal-monograph-cynara-cardunculus-l-syn-cynara-scolymus-l-folium_en.pdf

European Medicines Agency, Committee on Herbal Medicinal Products. European Union herbal monograph on *Ginkgo biloba* L., folium (EMA/HMPC/321097/2012).

https://www.ema.europa.eu/en/documents/herbal-monograph/final-european-union-herbal-monograph-ginkgo-biloba-l-folium_en.pdf

Riaz M. i wsp. (2023). Phytobioactive compounds as therapeutic agents for human diseases: A review. *Food Science & Nutrition*, 11(6). <https://doi.org/10.1002/fsn3.3308>

Saito A., Ishikawa S., Yang K., Sawa A., Ishizuka K. (2025). Sulforaphane as a potential therapeutic agent: a comprehensive analysis of clinical trials and mechanistic insights. *Journal of Nutritional Science*, 14.

<https://doi.org/10.1017/jns.2025.10033>