

Badania i Rozwój Młodych Naukowców w Polsce

Nauki przyrodnicze



www.mlodzinaukowcy.com

Poznań 2021

Redakcja naukowa

dr Jędrzej Nyćkowiak

dr hab. Jacek Leśny, prof. UPWR

Wydawca

Młodzi Naukowcy

www.mlodzinaukowcy.com

wydawnictwo@mlodzinaukowcy.com

ISBN (całość 978-83-66743-20-5)

ISBN (wydanie online 978-83-66743-53-3)

ISBN (wydanie drukowane 978-83-66743-54-0)

Ilość znaków w książce: 343 tys.

Ilość arkuszy wydawniczych: 8.6

Data wydania: sierpień 2021

Niniejsza pozycja jest monografią naukową. Jej rozdziały zostały wydrukowane zgodnie z przesłanymi tekstami po ich zaakceptowaniu przez recenzentów. Odpowiedzialność za zgodne z prawem wykorzystanie użytych materiałów ponoszą autorzy poszczególnych rozdziałów.

Spis treści

1. Problem pustynnienia i erozji gleb w ujęciu globalnym	7
<i>Celińska Magdalena, Tomczyk Agnieszka, Szewczuk-Karpisz Katarzyna</i>	
2. Metale ciężkie w glebie: charakterystyka i sposoby ich usuwania	14
<i>Celińska Magdalena, Tomczyk Agnieszka, Szewczuk-Karpisz Katarzyna</i>	
3. Rola białek szoku cieplnego w naprawie DNA	21
<i>Mateusz Kciuk, Beata Marciniak, Renata Kontek</i>	
4. Układ immunologiczny owadów – mechanizmy adaptacyjne	27
<i>Jakub Kordaczuk</i>	
5. Przegląd roli czynników wirulencyjnych w przebiegu zakażenia powodowanego drożdżakiem <i>Candida albicans</i>	32
<i>Jakub Kordaczuk</i>	
6. Poprawa stabilności astaksantyny poprzez mikrokapsułkowanie z wykorzystaniem biopolimerów	37
<i>Katarzyna Łupina, Justyna Bochnak-Niedźwiecka, Ada Krawęcka</i>	
7. Śmierć komórkowa zależna od PARP-1	43
<i>Orzechowska Monika, Kciuk Mateusz</i>	
8. Biosurfaktanty w przemyśle spożywczym	49
<i>Rekiel Edyta</i>	
9. Biosurfaktanty lipopeptydowe produkowane przez bakterie – charakterystyka i zastosowanie	54
<i>Rekiel Edyta</i>	
10. Problematyka selenu w kontekście jego znaczenia w glebie oraz w organizmach roślinnych i zwierzęcych	59
<i>Różewicz Marcin, Wyzińska Marta</i>	
11. Efektywne nawożenie zbóż makroelementami	65
<i>Marcin Różewicz, Marta Wyzińska</i>	
12. Znaczenie gospodarcze jęczmienia zwyczajnego (<i>Hordeum vulgare</i> L.)	71
<i>Stadnik Barbara</i>	
13. Uprawa roślin na cele energetyczne	77
<i>Stadnik Barbara, Migut Dagmara</i>	
14. Bezpieczeństwo energetyczne Polski – stan aktualny i perspektywy	83
<i>Staszewski Tomasz</i>	

Przedmowa

Szanowni Państwo, wydawnictwo „Młodzi Naukowcy” oddaje do rąk czytelnika kolekcję monografii naukowych dotyczących szerokiego spektrum nauk. Znajdują się tutaj pozycje dotyczące nauk medycznych i nauk o zdrowiu, nauk przyrodniczych, nauk technicznych i inżynierskich oraz szeroko pojętych nauk humanistycznych i społecznych.

W prezentowanych monografiach poruszany jest bardzo szeroki przekrój zagadnień, jednak każda z osobna składa się z kilkunastu rozdziałów, spójnych tematycznie, dających jednocześnie bardzo dobry przegląd tematyki naukowej jaką zajmują się studenci studiów doktoranckich lub ich najmłodszy absolwenci, którzy uzyskali już stopień doktora.

Czytelnikom życzymy wielu przemyśleń związanych z tematyką zaprezentowanych prac. Uważamy, że doktoranci i młodzi badacze z pasją i bardzo profesjonalnie podchodzą do swojej pracy, a doświadczenie jakie nabierają publikując prace w monografiach wydawnictwa „Młodzi Naukowcy”, pozwoli im udoskonalać swój warsztat pracy. Dzięki temu, z pewnością wielu autorów niniejszych prac, z czasem zacznie publikować prace naukowe w prestiżowych czasopismach. Przyczyni się to zarówno do rozwoju nauki, jak i każdego autora, budując jego potencjał naukowy i osobisty.

Redakcja

1. Problem pustynnienia i erozji gleb w ujęciu globalnym

Problem of soil desertification and erosion in global context

Celińska Magdalena, Tomczyk Agnieszka, Szewczuk-Karpisz Katarzyna

Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego Polskiej Akademii Nauk, ul. Doświadczalna 4, 20-290 Lublin

Opiekun naukowy: dr hab. Katarzyna Szewczuk-Karpisz

Celińska Magdalena: m.celinska@ipan.lublin.pl

Słowa kluczowe: antropopresja, degradacja gleb, rodzaje erozji, działania przeciwoerozyjne

Streszczenie

W ujęciu globalnym erozja gleb może stanowić poważny problem. Jest ona zagrożeniem związanym głównie z rolnictwem, istotnym ze względu na jej długoterminowy, negatywny wpływ na produktywność gleby. W praktyce erozja jest problemem o szerszym znaczeniu, występującym dodatkowo na obszarach leśnych. Prowadzi ona do szkód w środowisku, tj. przyczynia się do przemieszczania cząstek glebowych i zanieczyszczeń, zwiększa ryzyko powodzi, a także prowadzi do pustynnienia obszarów. Kontrola erozji jest koniecznością w prawie każdym kraju na świecie i na praktycznie każdym rodzaju użytkowanych gruntów. Dogłębne zrozumienie procesów erozji i czynników je kontrolujących stanowi warunek konieczny do projektowania efektywnych działań zapobiegających temu zjawisku. Niniejsza praca prezentuje najczęściej obserwowane rodzaje erozji, czynniki na nią wpływające, a także opisuje zjawisko pustynnienia.

1. Wstęp

Gleba jest bardzo ważnym składnikiem środowiska człowieka (Józefaciuk 1999). Pełni ona istotne funkcje – jest miejscem produkcji żywności, produkcji leśnej oraz siedliskiem życia organizmów żywych, m.in. mikroorganizmów odpowiedzialnych za rozkład materii organicznej. Gleba odpowiada również za retencję wodną, sekwestrację dwutlenku węgla oraz, w pewnym stopniu, za procesy samooczyszczania środowiska. Dlatego też należy zwracać szczególną uwagę na stan gleby, jej racjonalne zagospodarowanie i ochronę. Coraz większe zapotrzebowanie na żywność oraz nieustannie postępująca industrializacja i urbanizacja pociągają za sobą degradację i zanieczyszczenie środowiska. Stale obserwuje się zmniejszanie obszaru żyznej powierzchni nadającego się dla rolnictwa oraz zaburzenie naturalnych procesów glebowych niezbędnych dla prawidłowego obiegu materii. Wraz ze zmniejszaniem się powierzchni uprawnej pojawia się problem z zapewnieniem wystarczającej ilości pożywienia dla ludzi i zwierząt. Można to osiągnąć albo poprzez zastosowanie ekstensywnych techniki uprawy, tj. powiększenie obszaru upraw, albo przez stosowanie metod intensywnych, które zapewniają wyższe plony na jednostkę powierzchni. Ekstensywne metody uprawy są możliwe głównie w rejonach słabo zaludnionych i obejmują poddawanie i uprawę ziemi poprzez usuwanie istniejącej trwałej pokrywy roślinnej. Gleby, które są poddawane temu procesowi, są zwykle bardzo podatne na erozję, ponieważ są pozbawione ochronnej warstwy (naturalnie występujących tam roślin). Dodatkowym czynnikiem sprzyjającym erozji takich gleb może być ich położenie geograficzne – głównie klimat, jaki występuje na danym obszarze. Z kolei rolnictwo intensywne przyczynia się do zanieczyszczenia środowiska naturalnego, co stanowi kolejny problem dla ochrony jego zasobów (Zachar 2011).

2. Erozja gleb

Pod pojęciem erozji rozumie się proces fizyczny, który powoduje niszczenie poszczególnych poziomów genetycznych gleby oraz całkowite lub częściowe zniszczenie jej struktury. Jest to proces polegający na odrywaniu się cząstek gleby z jej masy i ich transporcie przez czynniki erozyjne np. płynącą wodę czy wiatr. Gdy poziom energii niezbędnej do transportu cząstek nie jest już wystarczający, występuje kolejna faza erozji, tj. osadzanie (Morgan 2009). Erozja może dotyczyć

warstwy powierzchniowej, bądź sięgać w głąb profilu, aż do skały macierzystej (Hernik 2005; Zachar 2011). Efektem erozji gleb jest stopniowe skracanie poziomów uprawno-próchnicznych, które prowadzi do zmniejszenia głębokości gleb użytkowanych rolniczo aż do ich całkowitego zaniku, a także przemieszczanie materiału glebowego i jego akumulacja w postaci deluwii w obniżeniach terenu. W rezultacie powstają gleby zerodowane oraz gleby deluwialne (Paluszek 2010, Marcinek i Komisarek 2001). Erozja gleb w obszarach rolniczych jest wynikiem działania wielu procesów geomorfologicznych, uaktywnionych brakiem naturalnej roślinności i przyspieszonych rolniczą działalnością człowieka. Intensywność procesów erozyjnych jest niejednakowa i rozłożona w czasie, a jej efekt nierównomierny. Zmiany morfologii profili pod wpływem erozji są najlepiej widoczne w glebach o rozbudowanej sekwencji poziomów genetycznych i wytworzonych z jednolitych skał macierzystych. Takimi glebami są przede wszystkim gleby płowe i czarnoziemy wytworzone z lessów. Skracanie profili glebowych jest uzależnione przede wszystkim od:

- czasu użytkowania polowego,
- kierunku uprawy płużnej,
- nachylenia, ekspozycji i kształtu stoków,
- rozkładu i natężenia opadów atmosferycznych,
- pierwotnej głębokości gleb i ich podatności erozyjnej (Rodzik 2001).

Erozja gleb jest zjawiskiem niekorzystnym z punktu widzenia człowieka, dlatego w ostatnich latach podejmuje się próby jej zapobiegania lub przynajmniej częściowego jej ograniczenia (Paluszek 2010).

3. Przyczyny i typy erozji gleb

3.1 Czynniki naturalne

Do naturalnych czynników powodujących erozję gleb zaliczamy działalność wiatru, wody, lodowców, organizmów żywych (wyłączając ludzi) oraz „samoistne” osuwiska gleby spowodowane działaniem grawitacji, występujące najczęściej na terenach o specyficznej rzeźbie (Zachar 2011). Biorąc pod uwagę czynnik wywołujący erozję, można wyróżnić kilka jej rodzajów.

Erozja wodna obejmuje niszczenie gleby przez intensywne opady deszczu lub śniegu oraz przez wody rzeczne, podziemne i niefluwalne. W wielu przypadkach zniszczenia są spowodowane wodą morską. Z tego punktu widzenia erozję można podzielić na dwie grupy: erozję morską oraz kontynentalną (Marcinek i Komisarek 2001; Zachar 2011).

Erozja lodowcowa dominuje w zimnych regionach o średniej rocznej temperaturze poniżej 0°C i jest spowodowana przez duże masy lodu poruszające się bardzo wolno. Gleba jest uszkodzana przez masy lodu, a także przez wodę powstałą w wyniku topnienia lodowca. Erozja lodowcowa skutkuje bruzdowaniem, cięciem, oraniem i szorowaniem podłoża (Zachar 2011).

Erozja śniegowa występuje często w połączeniu z erozją lodowcową. Uszkadza ona aktywnie glebę, zwłaszcza w kanałach lawinowych, gdzie występuje duży nacisk, a prędkość śniegu powoduje prądy erozyjne. Gleba ulega erozji również przez powolny ruch śniegu, zwłaszcza po stronie zawietrznej zbocza. Oprócz nacisku masy śniegu, erozja jest intensyfikowana przez ruch podmokłej gleby i spływ wody (Zachar 2011).

Erozja wietrzna jest tak samo istotna dla gleby jak erozja wodna. Ten typ erozji występuje głównie na tych obszarach, gdzie opady są znikome lub nie występują wcale, z przewagą wysokich temperatur, tj. w suchych regionach pustynnych. Decydującym czynnikiem w erozji wietrznej jest brak roślinności (Zachar 2011). Jedną z faz erozji wietrznej jest deflacja, podczas której cząstki gleby są wynoszone przez wiatr, co skutkuje stopniowym zmniejszaniem się jej wierzchniej warstwy. Kolejnym z etapów jest abrazja, polegająca ona na ścieraniu podłoża skalnego przez luźny materiał skalny przemieszczany przez wiatr, a także na wzajemnym ścieraniu materiału skalnego, wskutek czego ulega on rozdrobnieniu i obtoczeniu (Fullen 2003).

Erozja grawitacyjna (osuwisko) ma miejsce gdy masa glebowa, np. w postaci mułu lub błota, swobodnie spływa w dół stoku. Jest to tzw. lawina błotna. Zjawiska takie występują najczęściej w rejonach o klimacie niwalnym oraz górzystym ukształtowaniu terenu. Czynnikiem sprzyjającym tego typu erozji jest wysoka wilgotność gleby. Gleba o takich właściwościach traci przyczepność

i może swobodnie osuwać się w dół stoku. Jest to zjawisko szczególnie niebezpieczne na terenach osiedli ludzkich lub w ich pobliżu. Lawiny błotne nie tylko powodują niszczenie środowiska glebowego, ale także mogą być przyczyną niszczenia budynków (Zachar 2011).

Erozja organiczna odnosi się do erozji powodowanej przez organizmy żywe (wyłączając ludzi). Jednym z przykładów może być naruszanie struktury gleby przez korzenie roślin o rozbudowanym systemie korzeniowym. Taka erozja nosi nazwę erozji fitogenicznej i, z punktu widzenia ochrony środowiska, jest korzystna. Poprawia ona strukturę gleby, umożliwia jej lepsze napowietrzenie, a także prowadzi do korzystnych zmian w obiegu azotu. Kolejnym przykładem wpływu organizmów żywych może być erozja zoogeniczna, powodowana przez zwierzęta. Jest to niekorzystna forma erozji związana najczęściej z przemieszczaniem się zwierząt, tworzeniem przez nie siedlisk lub poszukiwaniem pokarmu (Zachar 2011).

3.2 Czynniki antropogeniczne

Człowiek przyczynia się do procesu erozji gleby w sposób pośredni, tj. przyspiesza jej proces przy jednoczesnej degradacji innych elementów środowiska. Można wyróżnić obszary, w których działalność człowieka przyczynia się do erozji w największym stopniu, tj.:

- działalność rolniczą,
- gospodarkę leśną,
- wypas zwierząt,
- transport,
- przemysł (Zachar 2011).

Zazwyczaj do intensywnego tempa erozji gleb przyczynia się kombinacja kilku czynników antropogenicznych (pośrednich) oraz naturalnych (bezpośrednich) (Morgan 2009). Do najważniejszych czynników, w obrębie wymienionych obszarów działalności człowieka, należą:

- niszczenie naturalnej szaty roślinnej,
- uprawa roślin, które mają znikomy wpływ na zapobieganie erozji,
- długotrwałe narażenie gleby na odsłonięcie,
- zmiana jakości (składu fizykochemicznego) gleby,
- zanieczyszczenie gleby,
- zbyt intensywny wypas zwierząt,
- doprowadzanie zbyt dużej ilości wody lub odwrotnie (nieodpowiednia melioracja),
- nieprawidłowo prowadzone osuszanie terenów,
- wycinanie i wypalanie lasów (zwłaszcza wilgotnych lasów równikowych),
- likwidacja miedz w procesie łączenia małych gospodarstw w duże farmy,
- usuwanie murków, żywopłotów, zakrzewień i zadrzewień śródpolnych,
- niewłaściwa lokalizacja dróg,
- uprawa stromych stoków i dolinek śródzboczowych,
- uprawa wzdłuż stoku (Kleczkowski 2001; Rejman 2006; Stach 2006).

Wszystkie powyższe czynniki sprzyjają naturalnej erozji gleb, która zostaje przyspieszona bądź ułatwiona.

4. Erozja gleb w kontekście globalnym

Nadmierna erozja gleb jest obecnie problemem globalnym. Występuje ona na niemal wszystkich obszarach, na których człowiek prowadzi swoją działalność. Negatywne skutki erozji gleb obejmują:

- zmniejszanie miąższości gleby,
- wymywanie składników pokarmowych,
- pogorszenie struktury gleby,
- straty powierzchni uprawnej,
- niszczenie roślinności,
- pogorszenie stosunków hydrologicznych,

- pogorszenie warunków eksploatacji urządzeń hydrotechnicznych,
- wzrost spływu powierzchniowego,
- spadek retencji,
- zmiany przepływów rzek,
- wzrost sedymentacji rzecznej (zagrożenie powodziowe) (Rejman 2006).

Zazwyczaj przy rocznych opadach wynoszących poniżej 450 mm erozja wzrasta wraz ze wzrostem opadów (Morgan 2009). Jednak wraz ze wzrostem opadów szata roślinna staje się bogatsza, co skutkuje lepszą ochroną powierzchni gleby, tak że przy rocznych opadach między 450 a 650 mm utrata gleby maleje wraz ze wzrostem opadów. Dalszy wzrost opadów jest wystarczający, aby przewyższyć efekt ochronny, a erozja staje się coraz silniejsza, aż do momentu, gdy roślinność ponownie zareaguje, stając się wystarczająco gęstą, aby zapewnić dodatkową ochronę i zredukować intensywność erozji. Powyżej 1700 mm objętość i intensywność opadów przeważa nad ochronnym działaniem roślinności, a siła erozji wzrasta wraz ze wzrostem opadów atmosferycznych. Należy podkreślić, że opisane powyżej ogólne tendencje są często maskowane ze względu na odmienne typy gleby, zróżnicowane nachylenie i pokrycie terenu (Fullen 2003; Morgan 2009). Wskaźniki erozji dla poszczególnych krajów przedstawiono poniżej (tab. 1.). Im wyższa wartość wskaźnika tym szybciej postępująca erozja.

Tab. 1. Roczny wskaźnik erozji dla wybranych krajów (Morgan 2009).

Kraj/Obszar	Erozja naturalna	Erozja na polach uprawnych (z roślinnością)	Erozja na glebie bez szaty roślinnej
Chiny	0,1-2	150-200	280-360
USA	0,03-3	5-170	4-9
Australia	0,0-64	0,1-150	44-87
Nigeria	0,5-1	0,1-35	3-150
Indie	0,5-5	0,3-40	10-185
Etiopia	1-5	8-42	5-70
Belgia	0,1-0,5	3-30	7-82
Wielka Brytania	0,1-0,5	0,1-20	10-200
Wybrzeże Kości Słoniowej	0,03-0,2	0,1-90	10-750

Jak można zauważyć, najszybsze tempo erozji, na którą istotny wpływ ma działalność człowieka, zaobserwowano na obszarze Chin. Może mieć to związek z intensyfikacją i chemizacją rolnictwa, która przyczynia się do pogorszenia stanu gleby, jak i z brakiem rozwiązań systemowych, które pozwalałyby w znacznym stopniu ograniczyć to zjawisko. Innym czynnikiem może być intensywne niszczenie naturalnej szaty roślinnej przez nadmierny wypas zwierząt. Usuwanie okrywy roślinnej powoduje gwałtowne spadki w zawartości materii organicznej gleby, po czym następuje wyczerpanie gleby i wzrasta ryzyko pustynnienia (Boardman i Poesen 200; Morgan 2009). Obecnie istnieją próby stworzenia globalnych map erozji. Ze względu na to, że każdego roku około 70% osadów dostarczanych przez systemy rzeczne jest przenoszone do oceanów w zawiesinie, mapy te są w dużej mierze oparte na pomiarach uzysku osadów zawieszonych. Niestety, wyniki są obciążone błędami związanymi z nieodpowiednimi procedurami ekstrapolacji, różnymi metodami pobierania próbek osadów i przetwarzania danych oraz różnicami między poszczególnymi dorzecziami (Morgan 2009).

5. Sposoby ograniczania erozji gleb

W ostatnich latach znacznie wzrosło zainteresowanie tematem erozji oraz potrzeba ochrony gleb przed zbytnim jej nasileniem. Celem ochrony gleby jest zmniejszenie erozji do poziomu maksymalnego i zrównoważenie poziomu produkcji rolniczej, wypasu lub działalności rekreacyjnej, jaki można uzyskać z powierzchni gruntu bez powodowania nieodwracalnych szkód w środowisku. Ponieważ erozja jest procesem naturalnym, nie może być całkowicie powstrzymana (Hernik 2005; Morgan 2009; Zachar 2011).

Istnieje kilka sposobów na to by ograniczyć erozję gleb. Do jednego z najpopularniejszych rozwiązań należy tzw. gospodarka przestrzenna (inaczej modelowanie środowiska). Polega ona na takim planowaniu rozmieszczenia poszczególnych elementów otoczenia, by jak najbardziej ograniczyć działalność naturalnych czynników powodujących erozję. Krajobraz terenów erodowanych można kształtować w różny sposób. Dywersyfikacja poczynań zależy od geomorfologii terenu, warunków glebowych i klimatycznych oraz nasilenia procesów erozyjnych. Jednym z podstawowych sposobów kształtowania krajobrazu na terenach erodowanych jest zmiana struktury użytkowania powierzchni oraz zmiana struktury zasiewów, a szczególnie w terenach silnie urzeźbionych. Na ogół struktura użytkowania terenu jest niewystarczająco zróżnicowana. Dotyczy to szczególnie udziału gruntów ornych oraz trwałych użytków zielonych. Udział gruntów ornych na terenach urzeźbionych jest przeważnie zbyt duży, a użytków zielonych zdecydowanie niewystarczający. Przy racjonalnym kształtowaniu krajobrazu przeciwerozyjnego na terenach górskich niezbędna jest redukcja obszaru gruntów ornych, a zwiększenie w strukturze użytkowania terenu o ponad 100% trwałych użytków zielonych. Innym przykładem jest nasadzenie drzew, krzewów i roślin zielnych na terenach o stromych zboczach. Korzenie takich roślin stanowią niejako warstwę ochronną dla gleby. Chroni ona przed silnymi opadami deszczu poprzez „wiązaną” glebę i zapobieganie wymywaniu jej elementów (Hernik 2005; Morgan 2009).

6. Pustynnienie

6.1 Pustynnienie w ujęciu globalnym

Pustynnienie to proces, który może następować ciągle lub okresowo w różnych częściach świata. W początkowej fazie wyraża się on zmniejszeniem liczby gatunków zasiedlających glebę, zmniejszeniem produkcji biomasy, ubytkiem substancji organicznej w glebie, zmniejszeniem retencji wodnej gleb, zwiększeniem rozpylenia wierzchniej warstwy gleby i nasileniem erozji wietrznej i wodnej. Dalsze etapy to postępujące odsłonięcie powierzchni ziemi, utrata wód glebowych, postępująca erozja i w końcowej fazie powiększający się obszarowo teren pozbawiony szaty roślinnej i gleby. Pustynnienie prowadzi do ograniczenia produkcji rolniczej i leśnej, a w konsekwencji zagraża stabilizacji społecznej i gospodarczej (Porębska i Sadowski 2007; Sokar 2009).

Nadmierna erozja gleb w połączeniu z działaniem czynników klimatycznych może prowadzić do pustynnienia obszarów szczególnie podatnych. Najwyraźniejsze pustynnienie, z uwagi na sprzyjające warunki klimatyczne w obszarach półsuchych, występuje na Bliskim Wschodzie, w południowo-zachodniej części Madagaskaru, w Afryce Północnej, w północno-wschodniej części Brazylii, na znacznych obszarach środkowej Azji, Ameryki Środkowej, Ameryki Północnej i Południowej. Powstanie niektórych pustyń jest również związane z cyrkulacją oceaniczną i występowaniem zimnych prądów morskich, które u wybrzeży kontynentów sprzyjają powstawaniu stałej równowagi w powietrzu i uniemożliwiają transport pary wodnej nad kontynent. Do pustyń powstałych w związku z występowaniem zimnych prądów morskich należą: Atakama i Kalahari. Pustynie mogą się również tworzyć w tzw. cieniu opadowym po zawietrznej stronie gór, na obszarach, gdzie panują suche wiatry, lub na wybrzeżach, gdzie bryza morska, niosąca wilgotne powietrze, wyzwała wilgoć dopiero w głębi lądu. Pustynie w głębi kontynentu azjatyckiego są zarówno wynikiem dużej odległości od oceanu, jak i barier górskich utrudniających dostęp wilgotnych mas powietrza (Sokar 2009).

Pierwszą międzynarodową próbę walki z pustynnieniem podjęto w latach 1968–1974, w okresie wielkiej klęski głodowej w regionie Sahelu. W roku 1973 utworzono Biuro Narodów Zjednoczonych ds. Sudanu-Sahelu, którego zadaniem było niesienie pomocy dziewięciu krajom zachodnioafrykańskim, najczęściej nawiedzonym przez susze. Wkrótce programy biura zostały rozszerzone na 22 kraje położone na południe od Sahary i na północ od równika. Organizacja Narodów Zjednoczonych zajmowała się po raz pierwszy tematem pustynnienia w 1977 r. na konferencji w Nairobi. W roku 1992 na Szczycie Ziemi w Rio, uznano, że proces rozprzestrzeniania się pustyń na świecie ulega systematycznemu nasileniu. Kraje rozwijające się wystąpiły wówczas z inicjatywą opracowania konwencji do spraw walki z pustynnieniem. Konwencja Narodów Zjednoczonych w sprawie zwalczania pustynnienia w krajach dotkniętych poważnymi suszami i/lub

pustynnieniem, zwłaszcza w Afryce, zwana dalej konwencją UNCCD, weszła w życie dnia 26 grudnia 1996 r. Celem Konwencji UNCCD jest zwalczanie pustynnienia i łagodzenie skutków susz w krajach dotkniętych poprzez działania, podejmowane na wszystkich poziomach i wspierane przez wspólnotę międzynarodową, na rzecz osiągnięcia trwałego zrównoważonego rozwoju w tych krajach (Porębska i Sadowski 2007).

Obecnie skutkami pustynnienia zagrożonych jest około miliarda ludzi w 60 krajach, przy czym skutki te są odczuwane nie tylko przez kraje bezpośrednio dotknięte tym zjawiskiem. Jak szacuje UNDP (*United Nations Development Programme*) w skali globalnej straty gospodarcze związane z pustynnieniem wynoszą prawie 42 mld USD rocznie (Porębska i Sadowski 2007). Tylko kontynent afrykański, najbardziej dotknięty zjawiskiem pustynnienia, traci rocznie potencjał gospodarczy równy 9 mld USD. Do roku 2025 powierzchnia użytkowanej obecnie w Afryce ziemi uprawnej może zmniejszyć się o 2/3. Straty ponoszone przez ludność są jednak niemożliwe do całkowicie trafnego oszacowania. Według ocen NATO pustynnienie stanowi poważne zagrożenie bezpieczeństwa w rejonie Śródziemnomorskim (Kepner i in. 2005). Proces erozji i degradacji gleb występuje na około 3,6 mld ha z 5,2 mld ha obszarów użytkowanych rolniczo w strefie suchej. Coraz częściej pod uprawę wykorzystuje się powierzchnie, które się do tego nie nadają, a metody upraw nie są dostosowane do właściwości i możliwości produkcyjnych gleby. Oceniono, że ok. 24 mld ton powierzchniowej warstwy gleby jest każdego roku wywiewane. Oznacza to, że proces niszczenia gleby następuje prawie 16 razy szybciej niż proces jej odbudowy (Porębska i Sadowski 2007).

6.2 Pustynnienie w Polsce

Od lat trzydziestych XX wieku pojęcie stepowienia jest często stosowane do określania takich procesów, które prowadzą do pustynnienia. Stepowienie to stopniowe wchodzenie sucholubnej roślinności typowej dla strefy półsuchej i przemiana łąk, pastwisk i zarośli w zbiorowiska trawiaste podobne do stepów. Wyraża się ono znacznym spadkiem zasobów wodnych, zmniejszaniem plonów, ograniczeniem hodowli z powodu braku paszy oraz rozwojem erozji wietrznej. Stepowienie występuje głównie na terenach o małej lesistości i stosunkowo małych rocznych opadach. Pojęcie stepowienia odnoszone było najwcześniej do opisu zjawiska wynikającego z wytrzebienia w XVIII i XIX wieku w Puszczy Noteckiej i nadmiernej eksploatacji wód podziemnych w Wielkopolsce, co przy tradycyjnie małych opadach w tej części kraju (450–500 mm rocznie) musiało doprowadzić do rozwoju takich zjawisk. Obecnie stepowienie obserwowane jest także na Pomorzu, Kujawach i południowo-wschodniej Polsce. Z przyczyn naturalnych w południowej i środkowej Polsce poziom wód podziemnych jest niski. Ulega on dalszemu obniżaniu przede wszystkim w wyniku braku spójnej gospodarki wodnej oraz zrównoważonej eksploatacji surowców naturalnych (zwłaszcza węgla brunatnego metodą odkrywkową). Gleby w naszym kraju są w większości glebami lekkimi, o małej retencji wód opadowych, a wprowadzanie nowych, intensywnych systemów produkcji roślinnej dodatkowo zmniejsza zasoby wód glebowych. W rezultacie w okresach bezdeszczowych obserwuje się obumieranie i zasychanie roślin oraz znaczne wzmoczenie erozji wietrznej (Porębska i Sadowski 2007).

7. Podsumowanie

Erozja gleb oraz pustynnienie niegdyś żyznych obszarów są problemami powiązаныmi ze sobą i stanowią obecnie poważne wyzwanie. Dotychczasowe próby analizy, modelowania i ograniczania tych zjawisk, choć ciągle się rozwijają, mogą okazać się niewystarczające. Z tego względu konieczne jest ciągłe poszukiwanie nowych metod, ulepszanie obecnych oraz nieustanne monitorowanie, w jakim stopniu postępuje zarówno erozja, jak i pustynnienie. Lepsze poznanie samych mechanizmów i analiza przyczyn tych zjawisk może okazać się niezbędną do podejmowania dalszych działań w kierunku ochrony gleb.

8. Literatura

Arnalds A (2000) Evolution of rangeland conservation strategies. Rangeland Desertification, Arnalds O, Archer S (eds.) Kluwer, Dordrecht 153-163.

- Arnalds A (2004) Carbon sequestration and the restoration of land health. *Journal of Climatic Change* 65: 333-346.
- Boardman J, Poesen J (2007) *Soil Erosion in Europe* John Wiley & Sons.
- EEA (2002) Assessment and reporting on soil erosion. Background and workshop report. Technical report 94.
- Fullen MA (2003) Soil erosion and conservation in Northern Europe. *Progress in Physical Geography* 27: 331-358.
- Hernik J (2005). Model zarządzania przeciwoerozyjną ochroną gleb. *Acta Agrophysica* 5(1), 31-38.
- Józefaciuk A, Józefaciuk Cz (1999) Ochrona gruntów przed erozją. Puławy, 109.
- Kepner WG, Rubio JL, Mouat DA., Pedrazzini F (2005) Desertification in the Mediterranean.
- Kleczkowski A (2001) Ochrona hydrosfery i zasobów wód. *Przemiany środowiska naturalnego a ekorozwój*, red. M. Kotarba, Kraków, Geosfera.
- Marcinek J, Komisarek J, (2001) Przekształcenia pokrywy glebowej na skutek przyspieszonej erozji wodnej falistych i pagórkowatych terenów Niziny Wielkopolski, *Folia Univ. Agric. Stetinensis* 217, *Agricultura* 87: 135–146.
- Morgan RPC (2009) *Soil erosion and conservation*. John Wiley & Sons, 1-9.
- Paluszek J (2010) Zmiany pokrywy glebowej pod wpływem erozji. *Prace i Studia geograficzne* 45: 279-294.
- Porębska G, Sadowski M (2007) Współczesne problemy pustynnienia. *Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych* 30: 73-82.
- Rejman J, (2006) Wpływ erozji wodnej i uprawowej na przekształcenie gleb i stoków lessowych, *Acta Agrophysica, Rozpr. i Monogr.* 136: 90.
- Rodzik J, (2001) Wpływ rozczłonkowania stoku na różnicowanie erozji gleb uprawnych, *Folia Univ. Agric. Stetinensis* 21, *Agricultura* 87: 201–204.
- Sokar M (2009) Pustynnienie Syrii. *Prace i Studia Geograficzne* 41: 273-279.
- Stach A (2006) Erozja uprawowa w trakcie orki i pozyskiwania plonów, *Rocz. AR w Poznaniu* 375, *Roln.* 65: 163–179.
- UNCCD (2002) Konwencja Narodów Zjednoczonych w sprawie zwalczania pustynnienia w krajach dotkniętych poważnymi suszami i/lub pustynnieniem, zwłaszcza w Afryce (Dz.U. z dnia 7 listopada 2002 r. nr 185, poz. 1538).
- UNDP (2006) *Human Development Report Beyond scarcity: Power, poverty and the global water crisis* UNCCD.
- Zachar D (2011) Soil erosion. *Developments in Soil Science* 10.

2. Metale ciężkie w glebie: charakterystyka i sposoby ich usuwania

Heavy metals in soil: characteristics and methods of their removal

Celińska Magdalena, Tomczyk Agnieszka, Szewczuk-Karpisz Katarzyna

Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego Polskiej Akademii Nauk, ul. Doświadczalna 4, 20-290 Lublin

Opiekun naukowy: dr hab. Katarzyna Szewczuk-Karpisz

Celińska Magdalena: m.celinska@ipan.lublin.pl

Słowa kluczowe: antropopresja, kontaminacja, metalofity, remediacja

Streszczenie

W niniejszej pracy scharakteryzowano wybrane metale ciężkie, opisano sposób ich oddziaływania na środowisko i żyjące w nim organizmy, a także przedstawiono metody remediacji gleb, które zawierają ten rodzaj zanieczyszczenia. Wśród metod remediacji uwzględniono te, które opierają się na wykorzystaniu roślin (fitoremediacja) oraz osadów ściekowych. Wyszczególniono również grupy roślin charakteryzujące się największym potencjałem remediacyjnym, tzw. hiperakumulatory. Każda z opisanych metod remediacji posiada zarówno ograniczenia, jak i zalety, które należy brać pod uwagę planując oczyszczanie konkretnego obszaru.

1. Wstęp

W ostatnich latach zaobserwowano nasilający się problem degradacji środowiska naturalnego. Jednym z problemów jest znaczące nagromadzenie się metali ciężkich w glebie, które wynika głównie z rozwoju przemysłu i transportu, a także nadmiernego stosowania środków chemicznych w rolnictwie (Astel et al. 2019). Wskutek silnej antropopresji dochodzi do naruszenia naturalnych cykli biogeochemicznych. W przeciwieństwie do substancji organicznych, metale ciężkie w zasadzie nie ulegają biodegradacji, przez co gromadzą się w ekosystemach wodnych i glebowych i pozostają w nich przez wiele lat, zmieniając jedynie formę, w jakiej występują. Gleba, do której mogą przenikać zanieczyszczenia z powietrza i wód, jest szczególnie wrażliwym elementem biosfery. Ze względu na swoje właściwości fizykochemiczne jest matrycą, w której zanieczyszczenia pozostają znacznie dłużej niż w wodzie czy powietrzu. Z tego powodu niezbędne jest opracowanie efektywnych metod oczyszczania gleby z metalicznych zanieczyszczeń (Ociepa-Kubicka i Ociepa 2012).

2. Charakterystyka wybranych metali ciężkich

Metale ciężkie to najczęściej pierwiastki śladowe, takie jak: kadm, chrom, miedź, rtęć, ołów, nikiel, kobalt, stront, cyrkon, molibden i cynk. Niekiedy do tej grupy zaliczają się również pierwiastki półmetaliczne, np. astat i tellur oraz bardzo rzadko - jony żelaza. Ze względu na stopień zagrożenia dzielimy je na następujące grupy:

- metale ciężkie o bardzo wysokim poziomie potencjalnego zagrożenia, np. Cd, Hg, Pb, Cu, Zn, Cr
- o wysokim poziomie potencjalnego zagrożenia, np. Mo, Mn, Fe,
- o średnim poziomie potencjalnego zagrożenia, np. Ni, Co,
- o niskim poziomie potencjalnego zagrożenia, np. Sr, Zr (Ociepa-Kubicka i Ociepa 2012).

Niektóre pierwiastki określane jako „metale ciężkie” pełnią rolę mikroelementów - ich niskie stężenie jest niezbędne do prawidłowego funkcjonowania organizmów żywych (Astel i in. 2019). Ich duże stężenie w glebie hamuje rozwój i aktywność mikroorganizmów, co prowadzi do zakłócenia procesów związanych z rozkładem i przemianami materii organicznej. W organizmach zwierzęcych i ludzkich metale ciężkie powodują przede wszystkim zmiany w syntezie białek i zaburzenia produkcji ATP, które mogą prowadzić do poważnych zmian patologicznych. Skala zaburzenia zależy w dużej mierze od ilości pierwiastka wprowadzonego do organizmu, jego postaci chemicznej,

rozpuszczalności w płynach ustrojowych i lipidach, czasu ekspozycji oraz odporności danego osobnika. Miarą mobilności, a tym samym dostępności metali ciężkich dla roślin, jest tzw. współczynnik bioakumulacji, definiowany jako stosunek zawartości danego metalu w roślinie do jego zawartości w glebie. Wartości współczynników zależą od gatunku rośliny uprawnej, właściwości fizykochemicznych gleby (głównie odczynu) i jej pojemności sorpcyjnej (Ociepa-Kubicka i Ociepa 2012).

2.1 Kadm

Kadm (Cd) zaburza fotosyntezę i przemiany związków azotu. Powoduje zmiany przepuszczalności błon komórkowych oraz zmiany w budowie DNA. Występuje w środowisku glebowym głównie w postaci jonu Cd^{2+} i jest on intensywnie pobierany przez rośliny i łatwo transportowany systemem korzeniowym do wszystkich organów. Najważniejszymi czynnikami wpływającymi na pobieranie kadmu przez rośliny są warunki pogodowe, pH gleby, a także zawartość w niej mikro- i makroskładników (Ociepa-Kubicka i Ociepa 2012). Pobór tego pierwiastka zależy również od gatunku rośliny. Objawy toksyczności Cd dla roślin pojawiają się na ogół, gdy występuje on w glebie w ilości $5\div 30$ mg/kg. Są to zazwyczaj chlorotyczne, brązowe plamy na blaszkach liści, zaczerwienione żyłki, powykęcane liście i skrócone korzenie (Kabata-Pendias i Szetke 2014).

2.2 Chrom

Chrom (Cr) jest metalem przejściowym, którego aktywność biologiczna zależy od jego stanu walencyjnego. Chrom na szóstym stopniu utlenienia ma właściwości kancerogenne, stosunkowo łatwo przenika błony biologiczne, a we wnętrzu komórki ulega redukcji. Jego niekorzystne działanie polega na peroksydacji lipidów, uszkodzeniu DNA, co często prowadzi do śmierci komórek. Z kolei chrom na trzecim stopniu utlenienia to niezbędny mikroelement, który odgrywa ważną rolę w: (1) utrzymaniu odpowiedniego poziomu glukozy we krwi, (2) gospodarce lipidowej, (3) procesach antyoksydacyjnych i (4) wydzielaniu cytokin zapalnych. Chrom i jego związki można uznać za poważne zanieczyszczenia gleby (Cieśla i Michniewska 2013).

2.3 Miedź

Miedź (Cu) jest naturalnie występującym pierwiastkiem śladowym. Jest mikroelementem odgrywającym istotną rolę w procesach biologicznych (Aspori i in. 2018) i jednocześnie nierozkładalnym metalem ciężkim, który może gromadzić się w glebie i wodzie. Jego duże ilości w wierzchniej warstwie gleby znacząco wpływają na mikro- i makroorganizmy (Mackie i in. 2012). Nadmiar miedzi powoduje u roślin zatrucie. Pierwiastek ten gromadzi się w chloroplastach i powoduje zakłócenia w procesie oddychania, syntezie chlorofilu oraz zaburza aktywność enzymów. Cu silnie wiąże się z białkami i jest najczęściej zatrzymywany w korzeniach roślin, przez co są one krótkie, zgrubiałe i pozbawione włosników (Gruca-Królikowska i Waclawek 2006).

2.4 Rtęć

Rtęć (Hg) występuje na I lub II stopniu utlenienia i może tworzyć różne związki z innymi pierwiastkami (Gworek i Rateńska 2009). Jest bardzo szkodliwa, jednak jej toksyczność zależy od formy występowania w środowisku. Rtęć może występować w postaci ciekłego metalu, w formie lotnej w atmosferze (Hg^0), w postaci związanej w naturalnych minerałach oraz wolnych jonów w środowisku. W każdym z typów środowiska podlega ona różnego rodzaju przemianom. Mikroorganizmy, głównie bakterie i grzyby, są w znacznym stopniu zaangażowane w przemianę związków rtęci. Najważniejsze są tu procesy metylacji (np. przez bakterie *Pseudomonas* spp.), które pozwalają na znaczące obniżenie toksyczności tego pierwiastka. Rozkład związków rtęci w glebach zależy przede wszystkim od panujących w nich warunków utleniania i redukcji (Gworek i Rateńska 2009). Jony rtęci mają zdolność do wiązania się z białkami enzymatycznymi, przez co blokują ich funkcje biologiczne (Cieśla i Michniewska 2013).

2.5 Ołów

Ołów (Pb) w nadmiernej ilości wpływa negatywnie na podstawowe procesy życiowe roślin. Może powodować zaburzenia fotosyntezy, podziału komórek, metabolizmu azotu i zakłócenie gospodarki wodnej. To z kolei może powodować mniejsze plonowanie, ciemnozielony lub czerwony

odcień na osłabionych liściach, a w skrajnych przypadkach nekrotyczne plamy i skrócone korzenie. Mobilność ołowiu w roślinach jest bardzo ograniczona – generalnie ponad 90% tego pierwiastka gromadzi się w korzeniach. Stwierdzono, że całkowita zawartość Pb w glebie powyżej 500 mg/kg jest toksyczna dla roślin, a jego biodostępność ściśle zależy od pH środowiska oraz zawartości w nim związków organicznych, tlenków żelaza oraz fosforu. Wapń, siarka i fosfor ograniczają biodostępność ołowiu, powodując jego wytrącanie w formach słabo rozpuszczalnych i przez to niedostępnych dla roślin (Ociepa-Kubicka i Ociepa 2012).

2.6 Nikiel

Nikiel (Ni) charakteryzuje się dużą ruchliwością w środowisku, a jego pobieranie jest regulowane zarówno przez czynniki glebowe, jak i przez cechy fizjologiczne roślin. W glebie o dużej zawartości próchnicy nikiel jest głównie związany z materią organiczną, natomiast w glebach mineralnych – z wodorotlenkami żelaza i manganu (Domańska 2009). Nikiel jest niezbędny do prawidłowego przebiegu procesów fizjologicznych u organizmów żywych – jest składnikiem oraz aktywatorem wielu enzymów (Kabata-Pendias i Szetke 2012). Jednak nadmierna jego ilość w glebie wpływa negatywnie na plonowanie i skład chemiczny roślin, tj. ogranicza funkcje enzymów, zaburza proces fotosyntezy, w wyniku czego powoduje ogólną chlorozę, uszkodzenie korzeni i ograniczenie pobierania i transportu składników pokarmowych do nadziemnych części roślin (Kuziemska i Kalembasa 2010). Poprzez powszechne stosowanie tego metalu w wielu gałęziach przemysłu, łatwo dostaje się on do gleb (Korzeniowska i in. 2011).

2.7 Cynk

Cynk (Zn) odgrywa istotną rolę w metabolizmie roślin. Zarówno niedobór, jak i nadmiar tego pierwiastka ogranicza wzrost i rozwój roślin. Niedobór Zn w roślinach występuje na ogół, gdy środowisko zawiera go mniej niż 20 mg/kg, natomiast efekt toksyczny występuje, gdy zawiera ono więcej niż 300 ÷ 400 mg/kg (Ociepa-Kubicka i Ociepa 2012). Przy nadmiernej zawartości Zn w glebie rozwój roślin jest ograniczony, następuje redukcja fotosyntezy. Pojawiają się zmiany chlorotyczne lub nekrotyczne na liściach, marszczenie liści i wolniejszy wzrost. Cynk pobierany jest przez rośliny najczęściej proporcjonalnie do jego zawartości w glebie, chociaż zarówno właściwości gleby, jak i dobór gatunkowy mają istotny wpływ na jego kumulację w roślinach (Kabata-Pendias i Szetke 2012).

3. Rekultywacja gleby zawierającej metale ciężkie

3.1 Rekultywacja przy użyciu osadów ściekowych

Jednym z materiałów wykorzystywanych do rekultywacji gleb są osady ściekowe. Powinny one spełniać wymagania określone w Rozporządzeniu Ministra Środowiska z 2015 r. W *sprawie komunalnych osadów ściekowych* by można było je bezpiecznie stosować. Osady te charakteryzują się szeregiem unikalnych właściwości. Wysoka wilgotność, optymalna zawartość materii organicznej, odpowiedni stosunek C, N, P, duża zawartość kwasów huminowych oraz najważniejszych grup mikroorganizmów (bakterie, grzyby, promieniowce) pozwala im uczestniczyć w szeregu mechanizmów rekultywacji skażonych terenów. Poszczególne frakcje osadów ściekowych wykazują znaczną zdolność wiązania metali ciężkich. Odpowiada za to duża ilość znajdującej się w nich materii nieorganicznej i organicznej. W skład materii nieorganicznej wchodzić takie, jak: fosforany, siarczki oraz niekryształiczne tlenki i wodorotlenki Fe, Al i Mn. Jony metali ciężkich są zatrzymywane przez fazę stałą osadów ściekowych poprzez różne mechanizmy, do których należą:

- wymiana jonowa,
- adsorpcja odpowiednio na zewnętrznej i wewnętrznej powierzchni minerałów,
- procesy strącania i współstrącania.

Dodatek osadów ściekowych może powodować znaczne przyrosty zarówno biomasy, jak i liczebności mikroorganizmów glebowych, biorących udział w procesach mineralizacji azotu organicznego. Ponadto, stosowanie osadów ściekowych pozytywnie wpływa na właściwości fizyczne, chemiczne i biologiczne gleb, uzupełnia zasoby humusu, poprawiając w ten sposób strukturę gleby oraz jej stosunki wodno-powietrzne (Nowak i in. 2010, Wydro i in. 2015).

3.2 Fitoremediacja

Inną metodą remediacji gleb zanieczyszczonych metalami ciężkimi jest fitoremediacja. To jedna z najpowszechniejszych technik stosowanych w rekultywacji gleby (Wydro i in. 2015). Wykorzystywane są tu różne gatunki roślin. Ich dobór powinien być bardzo rozważny, a każdy gatunek musi spełniać określone kryteria takie, jak:

- zdolność do gromadzenia dużych/bardzo dużych ilości niektórych metali ciężkich w swoich tkankach,
- zdolność do wzrostu w silnie zanieczyszczonym środowisku (gleba),
- stosunkowo długa żywotność i duże tempo wzrostu,
- prostota przetwarzania/przechowywania zanieczyszczonej biomasy roślinnej,
- dobrze rozwinięty system korzeniowy,
- niska atrakcyjność dla zwierząt roślinożernych (Astel i in. 2019).

Powyższe cechy pozwalają na wydajną i bezpieczną rekultywację gleby (Astel i in. 2019). W fitoremediacji wykorzystuje się wiele gatunków roślin (Antonkiewicz i in. 2006, Astel i in. 2019). Niektóre z nich są uważane za hiperakumulatory, ponieważ są w stanie gromadzić w swoich tkankach niezwykle duże ilości niektórych metali. Różnorodność gatunków roślin (hiperakumulatorów) szeroko stosowanych w fitoremediacji przedstawiono poniżej (Tab.1.).

Tab.1. Gatunki roślin (hiperakumulatorów) wraz z rodzajem akumulowanych metali ciężkich (Astel i in. 2019).

Polska Nazwa Gatunkowa	Łacińska Nazwa Gatunkowa	Rodzina	Akumulowany Metal
Smagliczka Włoska	<i>Alyssum bertolonii</i>	<i>Brassicaceae</i>	Ni, Co, Mg
Smagliczka Murowa	<i>Alyssum murale</i>	<i>Brassicaceae</i>	Ni
Azolla Afrykańska	<i>Azolla pinnata</i>	<i>Azolaceae</i>	Cd
-	<i>Barkheya coddii</i>	<i>Asteraceae</i>	Ni, Cd, Pb, Zn
Kapusta Sitowa	<i>Brassica juncea</i>	<i>Brassicaceae</i>	Pb, Cd, Cu, Ni
Rzeżusznik Hallera	<i>Cardaminopsis halleri</i>	<i>Brassicaceae</i>	Zn
Ponikło Igłowate	<i>Eleocharis acicularis</i>	<i>Cyperaceae</i>	Cu, Zn, Cd, As
Kwiat Miedziowy	<i>Haumaniastrum robertii</i>	<i>Lamiaceae</i>	Co, Cu
Słonecznik Zwyczajny	<i>Helianthus annuus</i>	<i>Asteraceae</i>	As, Cd, Ni
Ubiorek Pośredni	<i>Iberis intermedia</i>	<i>Brassicaceae</i>	Ti
Zawilec Alpejski	<i>Ipomea alpina</i>	<i>Convolvulaceae</i>	Cu
Orliczka Chińska	<i>Pteris vittata</i>	<i>Pteridaceae</i>	As
Rdest Ptasi	<i>Polygonum aviculare</i>	<i>Polygonaceae</i>	Hg
-	<i>Schima superba</i>	<i>Theaceae</i>	Mn
Tobołek Alpejski	<i>Thlaspi caerulescens</i>	<i>Brassicaceae</i>	Cd, Pb

Fitoremediację można podzielić na kilka technik, w zależności od typu przemian/procesów, którym podlega dany metal. Są to: fitoekstrakcja, fitostabilizacja i fitowolatalizacja (Astel i in. 2019).

Fitoekstrakcja jest główną i najskuteczniejszą metodą fitoremediacji wykorzystywaną do oczyszczania gleb z metali ciężkich (Ali i in. 2013). Polega ona na pobraniu przez korzenie zanieczyszczeń metalicznych obecnych w glebie oraz ich magazynowaniu w organach nadziemnych. Jak już wcześniej wspomniano niektóre rośliny, określane jako hiperakumulatory, pochłaniają niezwykle duże ilości metali ciężkich w porównaniu z innymi roślinami (Astel i in. 2019). W rezultacie stężenie zanieczyszczeń metalicznych w ich tkankach może być większe od 100 do 1000 razy w porównaniu ze stężeniem charakterystycznym dla innych gatunków roślin. W strefie korzeniowej hiperakumulatorów środowisko glebowe ulega zakwaszeniu, co zwiększa mobilność i biodostępność metali ciężkich. W ryzosferze wydzielana jest również fitochelatyna, która może tworzyć kompleksy chelatowe z jonami metali (Astel i in. 2019).

Fitostabilizacja, w przeciwieństwie do fitoekstrakcji, nie ma na celu usunięcia metali ciężkich, ale raczej zmniejszenie ryzyka związanego z ich obecnością poprzez unieruchomienie ich w glebie. Jest to wykorzystanie roślin do immobilizacji zanieczyszczeń w glebie poprzez wchłanianie i gromadzenie ich w korzeniach, adsorpcję na powierzchni korzeni lub w okolicach ryzosfery. Rośliny wprowadzane na zanieczyszczone tereny uniemożliwiają rozprzestrzenianie się zanieczyszczeń w głębsze warstwy gleby oraz ich przenikanie do wody i powietrza. Zmniejszając biodostępność metali ciężkich, fitostabilizacja zmniejsza również prawdopodobieństwo włączenia ich do łańcucha pokarmowego. Obniżenie biodostępności metali jest możliwe dzięki substancjom wydzielanym przez korzenie. Substancje te należą głównie do różnych związków fenolowych i kwasów organicznych. Wysięk korzeniowy stymuluje wchłanianie jonów metali do korzeni i ich wytrącanie w postaci nierozpuszczalnych soli (Astel i in. 2019). Unieruchomieniu toksycznych pierwiastków można pomóc przez podwyższenie pH gleby, dodawanie materii organicznej, minerałów ilastych, węglanów lub fosforanów. Zabiegi te mają na celu dezaktywację jonów metali i tworzenie nierozpuszczalnych kompleksów o obniżonej fitoprzywzajalności (Siwek 2008). Rośliny stosowane w fitostabilizacji to m. in.: bylica frędzlasta (*Artemisia frigida*), bylica Ludovica (*Artemisia ludoviciana*), kapusta sitowa (*Brassica Juncea*), kostrzewa czerwona (*Festuca rubra*), goryczka pospolita (*Gentiana penneliana*), mimoza biała (*Leucaena leucocephala*), łubin biały (*Lupinus albus*), wiechlina dzika (*Poa secunda*), wierzba wiciowa (*Salix viminalis*), turi (*Sesbania rostrata*), czyściec leśny (*Stachys sylvatica*), pałka szerokolistna (*Typha latifolia*) (Astel. et al. 2019).

Fitowolatalizacja jest jedną z najmniej znanych i najbardziej „kontrowersyjnych” metod fitoremediacji. Polega ona na pobieraniu zanieczyszczeń przez roślinę, a następnie odparowywaniu ich w zmodyfikowanej, lotnej postaci do atmosfery. Przykładem rośliny zdolnej do akumulacji metali i efektywnego wydzielania w postaci lotnej jest traganek (*Astragalus racemosus*). Gatunek ten pobiera selen i wydziela go w postaci dimetyloselenku. Niektóre gatunki mogą natomiast pobierać znaczne ilości rtęci i gromadzić ją w swoich tkankach biologicznych w nieaktywnych formach (np. w korze i częściach zdrewniałych). Zabiegi takie, jak zakwaszenie gleby i wprowadzenie flory bakteryjnej powodują zwiększenie dostępności organicznych związków rtęci dla roślin (Kozera-Sucharda 2003) Fitowolatalizacja rtęci jest możliwa dzięki hodowli roślin transgenicznych posiadających enzymy bakteryjne - reduktazę rtęci (merA) oraz liazę organicznych związków rtęci (merB). Enzymy te umożliwiają redukcję toksycznego jonu rtęci Hg^{2+} do mniej toksycznej metalicznej rtęci (Hg). Rośliny wyposażone w geny bakteryjne uzyskują zdolność pochłaniania rtęci, głównie w postaci metylowanej i redukcji jej do formy elementarnej Hg. Następnie zredukowana rtęć jest uwalniana do atmosfery poprzez aparat transpiracyjny (Astel i in. 2019). Technika ta może być stosowana do usuwania wielu metali ciężkich (Gworek i Rateńska 2009).

Wszystkie wymienione wyżej metody mają zarówno zalety, jak i wady. Do zalet można zaliczyć:

- relatywnie wysoką skuteczność,
- zakwalifikowanie do metod „przyjaznych środowisku”,
- możliwość ograniczenia dalszych szkód w środowisku (związanych z metodami *ex situ*),
- zmniejszenie zużycia środków chemicznych,
- dodatkową ochronę gleby przed erozją,

- wspomaganie bioprocessów glebowych,
- opłacalność ekonomiczną,
- możliwość ekstrakcji cennych pierwiastków metalicznych (Astel i in. 2019).
Z kolei wady obejmują:
 - trudności z przechowywaniem, transportem i przetwarzaniem uzyskanej biomasy,
 - zmniejszenie naturalnej różnorodności biologicznej (używane są określone gatunki roślin),
 - niskie tempo procesu (zależne od parametrów gleby, klimatu i warunków atmosferycznych),
 - możliwość aktywacji metali unieruchomionych w glebie przez zmiany środowiskowe,
 - możliwość przemieszczania się metali ciężkich ze środowiska glebowego do innej matrycy (atmosfera, woda),
 - możliwość przypadkowego włączenia niebezpiecznych metali do łańcucha pokarmowego (Astel i in. 2019).

4. Podsumowanie

Do tej pory opracowano wiele metod remediacji gleby z metali ciężkich. Są wśród nich: fitoekstrakcja, fitostabilizacja i fitowolatalizacja. Techniki te można stosować na dużą skalę, jednakże ze względu na stale rosnącą ilość zanieczyszczeń w środowisku, istnieje potrzeba ich ciągłego udoskonalania. Opisane w niniejszej pracy metody mają duży potencjał w odniesieniu do metali ciężkich, a wraz z pogłębianiem się wiedzy w dziedzinie remediacji potencjał ten może jeszcze wzrosnąć. W przypadku stosowania fitoremediacji należy zwrócić szczególną uwagę na dobór gatunkowy roślin oraz cechy akumulowanego metalu. W przypadku osadów ściekowych niezbędne jest zbadanie, czy stosowany materiał sam w sobie nie stanowi zagrożenia dla środowiska naturalnego.

5. Literatura

- Ali H, Khan E, Sajad MA (2013). Phytoremediation of heavy metals-concepts and applications. *Chemosphere*, 91(7), 869-881.
- Antonkiewicz J, Jasiewicz C, Losak T (2006) Using *Sida Hermaphrodita* Rusby for extraction of heavy metals from soil. *Acta Scientiarum Polonorum-Formatio Circumictus*, 5(1), 63-73.
- Apori OS, Hanyabui E, Asiamah YJ (2018) Remediation technology for copper contaminated soil: A review. *Asian Soil Research Journal*, 1-7.
- Astel A, Czyżyk A, Parzych A (2019). Fitoremediacja metodą obniżania toksyczności gleb zanieczyszczonych metalami ciężkimi. *Laboratoria, Aparatura, Badania*, 4, 6-12.
- Borkowska H, Wardzińska K (2003) Some Effects of *Sida hermaphrodita* R. Cultivation on Sewage Sludge. *Polish Journal of Environmental Studies*, 12(1).
- Cieśla P, Michniewska A (Eds.) (2013). Wpływ wybranych związków chemicznych na organizmy żywe. *Uniwersytet Pedagogiczny im. Komisji Edukacji Narodowej. Zakład Chemii i Dydaktyki Chemii w Krakowie, Kraków*.
- Domańska J (2009) Specjacja niklu w glebach organicznych i mineralnej o zróżnicowanym odczynie. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*, 2(542).
- Grobelak A, Kacprzak M, Fijałkowski K (2010) Fitoremediacja – niedoceniony potencjał roślin w oczyszczaniu środowiska. *Journal of Ecology and Health*, 14(6), 276-280.
- Gruca-Królikowska S, Waclawek W (2006). Metale w środowisku Cz. II. Wpływ metali ciężkich na rośliny. *Chemistry-Didactics-Ecology-Metrology*, 11.
- Gworek B, Rateńska J (2009) Migracja rtęci w układzie powietrze-gleba-roślina. *Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych*, 41, 614-623.
- Kabata-Pendias A, Szetke B (2012) Pierwiastki śladowe w geo- i biosferze, Wydawnictwo IUNG-PIB, Puławy: 131–135.
- Konopka K (2018) Synthesis and identification of complex compounds of zinc, cobalt and chromium with mixed ligands. PhD Dissertation, Faculty of Chemistry, JJ Strossmayer University of Osijek.

- Korzeniowska J, Stanisławska-Głubiak E, Igras J (2011) Applicability of energy crops for metal phytostabilization of soils moderately contaminated with copper, nickel and zinc, *Journal of Food Agriculture and Environment*, 9(3–4), 693–697.
- Kozera-Sucharda B (2003) Metylortęć w środowisku. Obieg pierwiastków w przyrodzie t. II. IOŚ, Warszawa: 76–78.
- Kuziemska B, Kalembasa S (2010). Wpływ zanieczyszczenia gleby nikiem oraz stosowania wapnowania i substancji organicznych na zawartość żelaza, manganu i cynku w kupkowie pospolitej (*Dactylis glomerata* L.). *Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych*, (42), 100-108.
- Mackie KA, Müller T, Kandeler E (2012) Remediation of copper in vineyards—a mini review. *Environmental Pollution*, 167, 16-26.
- Nowak M, Kacprzak M, Grobelak A (2010). Osady ściekowe jako substytut glebowy w procesach remediacji i rekultywacji terenów skażonych metalami ciężkimi. *Inżynieria i Ochrona Środowiska*, (13), 121-131.
- Ociepa-Kubicka A, Ociepa E (2012). Toksyczne oddziaływanie metali ciężkich na rośliny, zwierzęta i ludzi. *Inżynieria i ochrona środowiska*, 15(2), 169-180.
- Siwek M (2008) Rośliny w skażonym metalami ciężkimi środowisku przemysłowym: część II: mechanizmy detoksyfikacji i strategie przystosowania roślin do wysokich stężeń metali ciężkich. *Wiadomości Botaniczne*, 52(3-4), 7-23.
- Wydro U, Łapiński D, Ofman P i in. (2015). Wspomaganie procesów bioremediacji gleb zanieczyszczonych. *Interdyscyplinarne zagadnienia w inżynierii i ochronie środowiska*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 5, 503-515.

3. Rola białek szoku cieplnego w naprawie DNA

Role of heat shock proteins in DNA repair

Mateusz Kciuk ^(1,2), Beata Marciniak ⁽¹⁾, Renata Kontek ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Katedra Biotechnologii Molekularnej i Genetyki, Wydział Biologii i Ochrony Środowiska, Uniwersytet Łódzki

⁽²⁾ Szkoła Doktorska Nauk Ścisłych i Przyrodniczych UŁ Wydział Biologii i Ochrony Środowiska, Uniwersytet Łódzki

Opiekun naukowy: dr hab. Renata Kontek

Mateusz Kciuk: mateusz.kciuk94@gmail.com

Słowa kluczowe: DDR, HSP, uszkodzenia DNA

Streszczenie

DNA komórek eukariotycznych jest stale narażony na działanie czynników uszkadzających. W odpowiedzi na szeroką gamę uszkodzeń komórki wytworzyły systemy naprawy DNA, które zapewniają stabilność cennej informacji genetycznej. Istotną rolę w naprawie DNA pełni konserwatywna grupa białek szoku cieplnego (ang. *heat shock proteins*; HSP). Poprzez modulacje aktywności komponentów szlaku odpowiedzi na uszkodzenia, HSP przyczyniają się do efektywnej pracy systemów naprawczych.

1. Wstęp

Białka szoku cieplnego (HSP, ang. *heat shock proteins*; HSP) stanowią zachowaną w procesie ewolucji, heterogenną grupę białek opiekuńczych (chaperonowych). Po raz pierwszy zostały opisane przez Ferruccio Ritossę w 1960 roku (De Maio i in. 2012). Ze względu na masę cząsteczkową, białka szoku cieplnego zostały podzielone na kilka rodzin: HSP27 (HSPB), HSP60 (HSPD), HSP70 (HSPA), HSP90 (HSPC) oraz HSP110 (HSPH) (Dubrez i in. 2019).

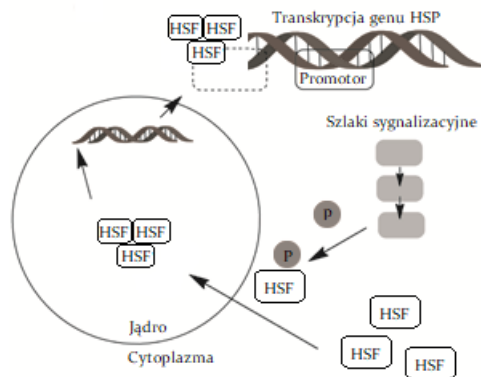
HSP posiadają różnorodną aktywność enzymatyczną związaną głównie z zapewnieniem prawidłowego fałdowania się białek, zarówno w warunkach prawidłowych oraz warunkach stresu komórkowego. Zapobiegają nieprawidłowemu fałdowaniu białek oraz gwarantują przyjęcie przez nowo syntetyzowane białka właściwej struktury przestrzennej, a przez to zachowanie jego funkcji fizjologicznej (Dubrez i in. 2019).

Wszystkie HSP, z wyjątkiem HSP27, posiadają aktywność ATPazową, która prowadzi do rozpadu wysokoenergetycznego wiązania w ATP z utworzeniem ADP. HSP27, pomimo braku tej aktywności, wciąż może uczestniczyć w fałdowaniu białek poprzez rekrutację innych białek opiekuńczych, w tym HSP70/HSP4 (Dubrez i in. 2019).

Ekspresja białek szoku cieplnego jest ściśle regulowana na poziomie komórkowym. W kontroli tej uczestniczą czynniki szoku cieplnego (HSF, ang. *heat shock factors*), które wiążą się do sekwencji regulatorowych HSE (HSE, ang. *heat shock elements*) zlokalizowanych powyżej regionów promotorowych genów HSP. Nieaktywne HSF są monomerycznymi białkami cytozolowymi, które w odpowiednich szlakach sygnalizacyjnych ulegają fosforylacji, a następnie translokacji do jądra komórkowego, gdzie tworzą formy trimeryczne. HSF w formie trimerów są aktywne, mogą wiązać się do regionów HSE i przyczyniać się do efektywnej transkrypcji genów HSP (Slimen i in. 2014) (Rys.1).

Ekspresja HSP indukowana jest w odpowiedzi na wiele czynników wewnątrz- i zewnątrzkomórkowych. Do czynników tych możemy zaliczyć m.in. hipertermię, promieniowanie jonizujące oraz czynniki uszkadzające DNA. Stres komórkowy wywołany hipertermią może przyczyniać się do wzrostu reaktywnych form tlenu (ROS, ang. *reactive oxygen species*) w komórce. ROS stanowią istotny czynnik uszkadzający DNA, prowadzący do modyfikacji zasad azotowych oraz rdzenia fosforanowo-cukrowego DNA. W ten sposób ROS mogą przyczyniać się do indukcji jednoniciowych oraz dwuniciowych pęknięć w DNA, które stanowią istotne zagrożenie integralności

tej cząsteczki (Slimen i in. 2014). Indukcja stresu oksydacyjnego w komórkach za pomocą nadtlenu wodoru indukuje ekspresję białek szoku cieplnego, co wskazuje na możliwą, protekcyjną oraz synergistyczną aktywność białek HSP w naprawie DNA (Abe i in. 1995).



Rys. 1. Regulacja genów HSP. W odpowiedzi na uszkodzenia uruchamiane są szlaki sygnalizacyjne prowadzące do fosforylacji czynników szoku cieplnego (HSF). Ufosforylowane monomeryczne HSF ulegają translokacji z cytoplazmy do jądra komórkowego, gdzie tworzą trimeryczne kompleksy wiążące się z sekwencjami regulatorowymi HSE, a przez to przyczyniają się do transkrypcji genów HSP.

2. Naprawa DNA

Komórki eukariotyczne podlegają uszkodzającym wpływom czynników pochodzących zarówno ze środowiska zewnętrznego, ale również wewnętrznego komórki. Do czynników zewnątrzkomórkowych (egzogennych) możemy zaliczyć m.in. działanie promieniowania jonizującego oraz ultrafioletowego (UV). Wśród czynników wewnętrznych (endogennych) wyróżniamy powstające w procesie replikacji DNA błędy replikacyjne, uszkodzenia oksydacyjne będące wynikiem metabolizmu tlenowego komórki, uszkodzenia hydrolityczne wynikające ze wszechobecności wody w środowisku komórki oraz najpoważniejsze – pęknięcia jednoniciowe oraz dwuniciowe cząsteczki DNA (Chatterjee i Walker 2017).

W odpowiedzi na uszkodzenia komórki eukariotyczne rozwinęły system przeciwdziałający szkodliwym wpływom powyższych czynników. Szlak odpowiedzi na uszkodzenia DNA (DDR, ang. *DNA damage response*) jest złożoną siecią oddziaływań molekularnych wielu białek, które uczestniczą w wykryciu, sygnalizacji i naprawie DNA. Ponadto, rodzaj uszkodzenia DNA determinuje sposób jego naprawy. Białka uczestniczące w procesie DDR można podzielić, a następnie sklasyfikować jako swoiste dla uszkodzenia systemy naprawcze (Ciccia i Elledge 2010).

Najprostszym rodzajem naprawy jest bezpośrednia rewersja uszkodzeń. Naprawa bezpośrednia wiąże się z udziałem pojedynczego białka/enzymu w naprawie uszkodzenia. Co istotne, enzym ten charakteryzuje się zawsze wąską specyficznością substratową. Sama naprawa przebiega w sposób szybszy w porównaniu z wieloetapowymi procesami naprawy pozostałych systemów DDR. Komórki eukariotyczne posiadają jeden główny enzym działający w powyższy sposób. Metylotransferaza O⁶-metyloguaniny (MGMT, ang. *O⁶-methylguanine DNA methyltransferase*) jest głównym enzymem naprawczym uszkodzeń alkilacyjnych powstałych w wyniku metabolizmu komórki (głównie aktywności SAM – S-adenozyl-L-metioniny) oraz uszkodzeń indukowanych przez pochodzące ze środowiska zewnętrznego związki alkilujące (Mishina i in. 2006).

Innym, bardziej złożonym systemem naprawy uszkodzeń alkilacyjnych jest naprawa DNA przez wycinanie zasad azotowych (BER, ang. *base excision repair*). System ten, chroni DNA komórki również przed uszkodzeniami będącymi następstwem hydrolizy wiązania N-glikozydowego, które łączy zasadę azotową z rdzeniem fosforanowo-cukrowym DNA oraz przed uszkodzeniami

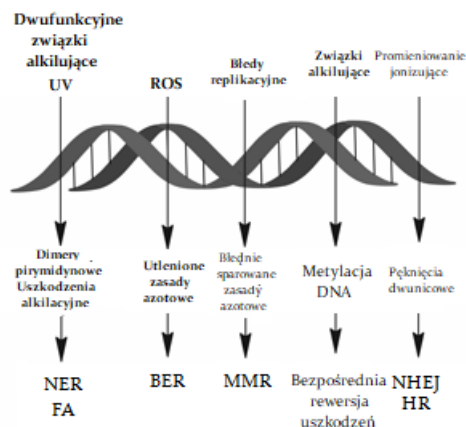
oksydacyjnymi, powstałymi w wyniku działania ROS. Charakterystycznymi białkami systemu BER są glikozylazy DNA, które hydrolizują wiązanie N-glikozydowe uszkodzonej zasady azotowej, pozwalając tym samym na przywrócenie prawidłowej struktury cząsteczki DNA w kolejnych etapach naprawy. Jedynym z podtypów BER jest naprawa jednoniciowych pęknięć DNA (SSBR, ang. *single-strand break repair*), w której kluczowymi enzymami są polimerazy poli(ADP-rybozy) (PARP, ang. *poly ADP-ribose polymerase*). PARP zaangażowane są głównie w rekrutację białek naprawczych do miejsc uszkodzenia, w szczególności pęknięć jednoniciowych DNA (Chatterjee i Walker 2017).

Naprawa błędnie sparowanych zasad (MMR, ang. *DNA mismatch repair*) jest jedynym systemem naprawy zapobiegającym negatywnym konsekwencjom nieprawidłowego sparowania zasad azotowych. Błędy parowania zasad azotowych (ang. *mismatch*) powstają głównie w wyniku niedokładności polimeraz DNA podczas procesu replikacji materiału genetycznego. Głównymi białkami uczestniczącymi w tym rodzaju naprawy DNA w komórkach eukariotycznych są białka kodowane przez geny homologiczne do tych u *E.coli* w tym: *mutL* oraz *mutS* (Chatterjee i Walker 2017).

Naprawa przez wycinanie nukleotydów (NER, ang. *nucleotide excision repair*) jest systemem uczestniczącym w usuwaniu uszkodzeń wywołanych przez promieniowanie UV, takich jak: dimery pirymidynowe oraz 6'-4' fotoprodukty. NER jest jednym z najbardziej skomplikowanych rodzajów naprawy DNA, w którym uczestniczy wiele białek (Chatterjee i Walker 2017).

Dwuniciowe pęknięcia DNA (DSB, ang. *double-strand breaks*) stanowią jedne z najpoważniejszych uszkodzeń DNA, które zaburzają prawidłowe funkcjonowanie komórki, przyczyniając się bezpośrednio do jej śmierci. W odpowiedzi na zagrożenie, komórka wykształciła dwa uzupełniające się systemy naprawcze: naprawę przez niehomologiczne łączenie końców (NHEJ, ang. *non-homologous end joining*) oraz rekombinację homologiczną (HRR, ang. *homologous recombination repair*) (Chatterjee i Walker 2017; Ciccia i Elledge 2010).

Innym zagrożeniem dla funkcjonowania komórki, równie poważnym, co jak wymienione wyżej przykłady, są wiązania krzyżowe. Stanowią one przeszkodę dla procesu replikacji DNA i mogą prowadzić do indukcji procesu programowanej śmierci komórki – apoptozy. Wiązania krzyżowe mogą zostać podzielone na wiązania wewnątrznicowe (ang. *intra-strand crosslinks*), międzyniciowe (ang. *inter-strand crosslinks*) oraz wiązania kowalencyjne pomiędzy białkami i DNA (ang. *protein-DNA crosslinks*). Uszkodzenia te, usuwane są w wyniku działania systemu naprawczego nazywanego szlakiem anemii Fanconiego (FA, ang. *fanconi anemia pathway*), który łączy w sobie współdziałanie innych systemów naprawy DNA w tym: HRR, NER oraz mutageną syntezę przez uszkodzenie (TLS, ang. *translesion synthesis*) (Chatterjee i Walker 2017; Ciccia i Elledge 2010). Na rycinie drugiej przedstawiono schematycznie główne systemy naprawy DNA w komórkach eukariotycznych (Rys.2).



Rys. 2. Zależności pomiędzy rodzajem czynnika uszkodzającego, wywołanym uszkodzeniem DNA, a głównym systemem naprawy zaangażowanym w odpowiedzi na daną zmianę.

3. Udział białek szoku cieplnego (HSP) w naprawie DNA

Białka szoku cieplnego odgrywają ważną rolę w ochronie komórki przed szkodliwym działaniem promieniowania jonizującego. Badania wykorzystujące interferencję z wykorzystaniem małego interferującego RNA (siRNA, ang. *small interfering RNA*), komplementarnego do informacyjnego RNA (mRNA, ang. *messenger RNA*) białka HSP72, dowiodły osłabionej aktywności glikozylazy uracylu (UDG, ang. *uracil glycosylase*) w odpowiedzi na obniżony poziom tego białka opiekuńczego (Bases 2006). Białka szoku cieplnego mogą wchodzić również w bezpośrednie interakcje z innymi składnikami systemu BER, w tym z endonukleazą apurynową/apirymidynową (APE1, ang. *AP endonuclease*) (Kenny i in. 2001), białkiem XRCC1 (ang. *X-ray repair cross-complementing protein 1*) oraz polimerazą β (POL β) (Fang i in. 2014). Poprzez oddziaływanie z PARP-1 białka szoku cieplnego mogą również warunkować prawidłową naprawę pęknięć jednoniciowych DNA (Kotoglou i in. 2009).

Ekspresja białka HSP70 może być nasiloną w odpowiedzi na pojawiający się w komórce stres oksydacyjny. Sugerowana aktywność protekcyjna tego białka w stosunku do indukcji uszkodzeń oksydacyjnych wynika m.in. z jego aktywności antyoksydacyjnej oraz przeciwzapalnej. Zaobserwowano również, że HSP70 może współdziałać z białkami systemu MMR - hMLH1 oraz hMSH2 zapobiegając uszkodzeniom DNA wywołanym przez cisplatynę oraz doksorubicynę w traktowanych szkieletem cieplnym obwodowych jednojądrzastych komórkach krwi (PBMCS – ang. *peripheral blood mononuclear cell*). Inne białka szoku cieplnego również mogą uczestniczyć w eukariotycznym MMR. Jednym z nich jest HSP90, które wykazuje zdolność stabilizacji białka MSH2 w poddanych działaniu pemetrekselem komórkach nowotworowych, wywodzących się z tkanki płuc. HSP90 może oddziaływać również z białkiem MLH1 odpowiedzialnym za pozycjonowanie kompleksu białek MMR w miejscu uszkodzenia (Kciuk i in. 2020).

Ponadto, wykazano, że HSP27 może bezpośrednio wpływać na funkcjonowanie systemu NER. Zahamowanie ekspresji białka opiekuńczego prowadzi do upośledzenia NER i obniżonej wydajności usuwania uszkodzeń wywołanych promieniowaniem UV-C (Wano i in. 2004). Nadekspresja innego białka chaperonowego - HSPA1A (HSP72) chroni komórki przed szkodliwym działaniem promieniowania UV oraz akumulacją uszkodzeń po ekspozycji na benzo[a]piren (Kciuk i in. 2020).

Białka HSP chronią komórkę również przed konsekwencjami powstawania pęknięć dwuniciowych w DNA, poprzez stymulację systemu NHEJ oraz HRR. Jednym z głównych białek opiekuńczych kontrolujących naprawę DNA w komórkach człowieka jest HSP90. Poprzez interakcje z BRCA1/2 (ang. *breast cancer type 1 susceptibility protein*), RAD51 (ang. *DNA repair protein RAD51 homolog 1*), DNA-PKcs (ang. *DNA-dependent protein kinase, catalytic subunit*), kompleksem białek MRN złożonym z MRE11 (ang. *Double-strand break repair protein MRE11*), RAD51, nibryną (NBS1) oraz białkami szlaku anemii Fanconiego, białka HSP mogą modulować funkcjonowanie naprawy typu HRR oraz NHEJ. HSP90 może również wpływać na aktywność białek ATR (ang. *Ataxia telangiectasia and Rad3 related*) oraz ATM (ang. *Ataxia telangiectasia mutated*), które uczestniczą w sygnalizacji uszkodzeń DNA oraz przyczyniają się do aktywacji systemów naprawczych poprzez fosforylację wielu białek w komórce (Pennisi i in. 2015; Kciuk i in. 2020). Rolę białek HSP w naprawie DNA podsumowuje tabela poniżej (Tab.1).

Tab. 1. Rola białek szoku cieplnego w naprawie DNA. Opracowano na podstawie (Kciuk i in. 2020).

Mechanizm DDR	Białko szoku cieplnego	Partner molekularny	Efekt w komórce
Bezpośrednia rewersja uszkodzeń (DR)	HSPC2 (Hsp90alpha) HSPC3 (Hsp90beta)	MGMT	Nie jest jasny
Naprawa przez wycinanie zasad	HSP70	APE1	Stymulacja procesu naprawy
		POL β	

Mechanizm DDR	Białko szoku cieplnego	Partner molekularny	Efekt w komórce
azotowych (BER)	HSP90	XRCC1	Wybór pomiędzy naprawą zależną i niezależną od POL β
Naprawa przez wycinanie nukleotydów (NER)	HSP27	Niezidentyfikowany	Stymulacja naprawy
Naprawa błędnie sparowanych zasad azotowych (MMR)	HSP27/HSP70	MSH2/MLH1	Nieidentyfikowany
	HSP90	MSH2	Stabilizacja MSH2
Niehomologiczne łączenie końców (NHEJ)	HSP90	DNA-PKcs	Stabilizacja i aktywacja DNA-PKcs/efektywna naprawa
Naprawa przez rekombinację homologiczną (HRR)	HSP90	BRCA2	Zwiększona efektywność naprawy DNA
Szlak Anemii Fanconiego	HSP90	FANCA	Stabilizacja FANCA
Sygnalizacja uszkodzenia przez kinazę ATR	HSP90	ATR	ATR jest bezpośrednim partnerem molekularnym HSP90, lecz znaczenie interakcji pozostaje nieznane
Sygnalizacja uszkodzenia przez kinazę ATM	HSP90	ATM	Interakcja wymagana dla prawidłowego przebiegu HRR

4. Podsumowanie

Białka szoku cieplnego (HSP) stanowią grupę zachowanych w toku ewolucji białek opiekuńczych. Pomimo udowodnionej w wielu badaniach funkcji fizjologicznej, rola białek HSP w naprawie DNA pozostaje słabo poznana. Sugeruje się udział HSP w odpowiedzi na uszkodzenia DNA, głównie przez obserwację związków funkcjonalnych z kluczowymi regulatorami odpowiedzi na uszkodzenia DNA (DDR) – kinazami ATR oraz ATM. HSP kontrolują również funkcjonowanie systemów naprawy DNA – naprawy przez wycinanie zasad azotowych (BER), naprawy przez wycinanie nukleotydów (NER), naprawy błędnie sparowanych zasad (MMR), naprawy pęknięć jednoniciowych DNA (SSBR) oraz dwuniciowych – niehomologicznego łączenia końców DNA (NHEJ) oraz naprawy poprzez rekombinację homologiczną (HRR).

Poznanie skomplikowanych oddziaływań krzyżowych pomiędzy elementami szlaku DDR oraz białkami szoku cieplnego może doprowadzić do powstania nowych terapii przeciwnowotworowych, które w pojedynkę lub w terapii skojarzonej mogą przyczynić się do opracowania skuteczniejszych metod leczenia nowotworów.

5. Literatura:

- Abe T, Konishi T, Hirano T i in. (1995) Possible Correlation between DNA Damage Induced by Hydrogen Peroxide and Translocation of Heat Shock 70 Protein into the Nucleus. *Biochemical and Biophysical Research Communications* 206 (2): 548–55.
- Bases R (2006) Heat Shock Protein 70 Enhanced Deoxyribonucleic Acid Base Excision Repair in Human Leukemic Cells after Ionizing Radiation. *Cell Stress & Chaperones* 11 (3): 240–49.
- Chatterjee N, Walker GC (2017) Mechanisms of DNA Damage, Repair, and Mutagenesis. *Environmental and Molecular Mutagenesis* 58 (5): 235–63.
- Ciccio A, Elledge SJ (2010) The DNA Damage Response: Making It Safe to Play with Knives. *Molecular Cell* 40 (2): 179–204.
- De Maio A, Santoro MG, Tanguay RM i in. (2012) Ferruccio Ritossa's Scientific Legacy 50 Years after His Discovery of the Heat Shock Response: A New View of Biology, a New Society, and a New Journal. *Cell Stress & Chaperones* 17 (2): 139–43.
- Dubrez L, Causse S, Bonan Borges N i in. (2019) Heat-Shock Proteins: Chaperoning DNA Repair. *Oncogene*, September.
- Fang Q, Inanc B, Schamus S i in. (2014) HSP90 Regulates DNA Repair via the Interaction between XRCC1 and DNA Polymerase β . *Nature Communications* 5 (November): 5513.
- Kciuk M, Bukowski K, Marciniak B i in. (2020) Advances in DNA Repair-Emerging Players in the Arena of Eukaryotic DNA Repair. *International Journal of Molecular Sciences* 21 (11).
- Kenny M, Mendez F, Sandigursky M i in. (2001) Heat Shock Protein 70 Binds to Human Apurinic/Apyrimidinic Endonuclease and Stimulates Endonuclease Activity at Abasic Sites. *The Journal of Biological Chemistry* 276 (12): 9532–36.
- Kotoglou P, Kalaitzakis A, Vezyraki P i in. (2009) Hsp70 Translocates to the Nuclei and Nucleoli, Binds to XRCC1 and PARP-1, and Protects HeLa Cells from Single-Strand DNA Breaks. *Cell Stress & Chaperones* 14 (4): 391–406.
- Mishina Y, Duguid E, He C i in. (2006) Direct Reversal of DNA Alkylation Damage. *Chemical Reviews* 106 (2): 215–32.
- Pennis R, Ascenzi P, di Masi A (2015) Hsp90: A New Player in DNA Repair? *Biomolecules* 5 (4): 2589–2618.
- Slimen I, Najar T, Ghram A i in. (2014). Reactive Oxygen Species, Heat Stress and Oxidative-Induced Mitochondrial Damage. A Review. *International Journal of Hyperthermia: The Official Journal of European Society for Hyperthermic Oncology, North American Hyperthermia Group* 30 (7): 513–23.
- Wano C, Kazuko K, Takahashi S i in. (2004). Protective Role of HSP27 against UVC-Induced Cell Death in Human Cells. *Experimental Cell Research* 298 (2): 584–92.

4. Układ immunologiczny owadów – mechanizmy adaptacyjne

The insects immune system- adaptive mechanisms

Jakub Kordaczuk

Katedra Immunobiologii, Instytut Nauk Biologicznych, Uniwersytet Marii Curie Skłodowskiej w Lublinie

Jakub Kordaczuk: jakub.kordaczuk@o2.pl

Słowa kluczowe: *Galleria mellonella*, piętnowanie immunologiczne

Streszczenie

Owady stanowią dużą grupę zwierząt, zamieszkującą prawie wszystkie siedliska i środowiska na Ziemi. Część ich sukcesu wynika z szybkiej i wysoce skutecznej odpowiedzi immunologicznej, dzięki której owady skutecznie identyfikują, dezaktywują i eliminują patogeny. Owady posiadają układ odpornościowy, który wykazuje wiele podobieństw do wrodzonego układu odpornościowego kręgowców, ale w przeciwieństwie do organizmów wyższych nie dysponują mechanizmami nabytej odpowiedzi immunologicznej. Dowiedziono jednak, że układ immunologiczny owadów wykazuje zdolności adaptacyjnej. W ostatnich latach zaobserwowano, że wcześniejsza ekspozycja na subletalną dawkę patogenu lub materiału pochodzącego z patogenu prowadzi do stymulacji odpowiedzi immunologicznej, czyniąc owada odpornym na następną śmiertelną infekcję w przyszłości. Do pełnego zrozumienia zjawiska, a także czynników, jakie wpływają na jego efektywność, niezbędne są dalsze badania z uwzględnieniem mechanizmów molekularnych zachodzących w organizmach owadów poddanych piętnowaniu, ponieważ obecny stan wiedzy nie pozwala na dokładne opisanie mechanizmów i czynników molekularnych regulujących zjawisko piętnowania immunologicznego.

1. Wstęp

Układ immunologiczny owadów składa się z mechanizmów wrodzonej odporności, którą tworzą składniki odpowiedzi humoralnej i komórkowej. Bezkręgowce nie posiadają tzw. odporności nabytej, w przeciwieństwie do kręgowców, których układ odpornościowy wykazuje zdolność syntezy dwóch podstawowych grup limfocytów: T i B, a także szeregu przeciwciał. Mimo to, owady zdolne są do efektywnego zwalczania zakażeń (Vogiel i in. 2011). Zakażenie lub zranienie organizmu owada powoduje uruchomienie mechanizmów, których celem jest obrona przed patogenem. Do składników odpowiedzi humoralnej należą peptydy odpornościowe, lizozym, układ oksydazy fenolowej oraz apolipoforyna III i inne białka występujące w hemolimfie w formie rozpuszczalnej (Andrejko 2016). Zdolności adaptacyjne owadów obserwuje się między innymi podczas poddawania ich piętnowaniu immunologicznemu. Mechanizm piętnowania immunologicznego nie został do końca poznany. Zasadniczo polega on na zakażeniu owadów niską dawką patogenu, która nie powoduje ich śmierci, a po określonym czasie dawką wysoką. Porównując odsetek przeżywalności, często obserwuje się większą odporność wśród owadów poddanych piętnowaniu w porównaniu do grupy zakażonej po raz pierwszy.

2. *Galleria mellonella*- owadzi organizm modelowy

Barciak większy zaliczany jest do rzędu Lepidoptera oraz rodziny Pyralidae. Naturalnym środowiskiem rozwoju *Galleria mellonella* są gniazda pszczół znajdujące się w ulach. Wosk pszczeli stanowi podstawowy składnik diety barciaka większego, dlatego też potocznie nazywany jest molem woskowym i naturalnym szkodnikiem pasiek. Cykl życiowy owada trwa około ośmiu tygodni. Po wykluciu z jaj larwy przechodzą przez sześć stadiów wylinkowych. Etap ten trwa około sześć tygodni, prowadząc do powstania poczwarki, a po kolejnych dwóch tygodniach wykształca się dorosły osobnik ćmy (Niedźwiedzka i Dyląg 2015; Wojda 2016). Rozmiar larw mieści się w zakresie około 12-20 mm. W stadium dorosłym osobniki przyjmują wymiar to około 20 mm długości i 30 mm rozpiętości skrzydeł. Wraz z rozwojem owadów dochodzi także do zmiany barwy- w stadium

larwalnym przyjmują cielisty kolor. Postać dorosła zazwyczaj posiada ubarwienie szarobrunatne. W doświadczeniach laboratoryjnych wykorzystywana jest najczęściej przedostania i ostatnia postać larwalna *Galleria mellonella*. Do głównych korzyści wynikających z wykorzystywania tego owada jako modelu badawczego należy zdolność do rozwoju larw w temperaturze 37°C (Górska-Andrzejak i in. 2016; Niedźwiedzka i Dyląg 2015). Pozwala to zakażenie i śledzenie przebiegu patogenezы infekcji grzybiczych w takiej samej temperaturze, jak w organizmie człowieka. Stosunkowo duże rozmiary owadów ułatwiają infekowanie określoną dawką patogenu przy użyciu strzykawki, a także proste pobieranie tkanek, a następnie poddawanie wielu analizom w dalszych etapach badań. Niski koszt hodowli, krótki cykl życiowy 8 i łatwość namnażania sprawiają, że organizm ten może być z powodzeniem wykorzystywany w warunkach laboratoryjnych. Hodowlę barciaka większego prowadzi się w temperaturze około 26-28°C, najczęściej w zaciemnieniu i przy wilgotności mieszczącej się w zakresie 60-70% 37°C (Górska-Andrzejak i in. 2016). Wielkość genomu barciaka większego wynosi 434,55 tysięcy par zasad, a zawartość GC wynosi 33,8%. Znajomość sekwencji genów jest kluczowa dla wykorzystania *Galleria mellonella* jako organizmu modelowego. Umożliwia określenie podobieństwa *Galleria mellonella* do innych modeli badawczych. Pozwala także na poznanie genów związanych z odpornością oraz regulacją ich ekspresji. (Vogel i in. 2011; Cook i Mc Arthur 2013; Lange i in. 2018).

3. Plastyczność odpowiedzi immunologicznej *Galleria mellonella*

Zgodnie z hipotezą Czerwonej Królowej ciągłość gatunku na Ziemi zostaje utrzymana, jeśli dany organizm wykształca mechanizmy obronne, będące w stanie efektywnie walczyć z narzędziami jakimi dysponuje przeciwnik. Owadzie patogeny starają się uniknąć lub pokonać anatomiczne i fizjologiczne bariery organizmu gospodarza, produkując enzymy rozkładające tkanki gospodarza, modyfikując lub ukrywając swoje wzorce molekularne (Vogel i in. 2011). Mikroorganizmy produkują szereg substancji – głównie proteaz, wpływających negatywnie na ekspresję i aktywność czynników układu immunologicznego owadów. Pomimo, że odpowiedź owadów stanowią jedynie mechanizmy wrodzone, mogą one być modulowane przez szereg czynników, które w odmienny sposób wpływają na walkę z patogenami. Cecha ta świadczy o plastyczności układu immunologicznego owadów (Wojda 2016). Na podstawie przeprowadzonych doświadczeń zauważono różnice w podatności larw na infekcję, zależnie od rodzaju 28 pożywienia podawanego ich matkom (Kangasallo i in. 2015). Innym istotnym czynnikiem wpływającym na mechanizmy immunologiczne owadów jest temperatura. W wyniku badań prowadzonych z wykorzystaniem *Galleria mellonella* udowodniono, że hodowla owadów zakażonych bakteriami w podwyższonej temperaturze pozytywnie wpływa na ekspresję genów kodujących peptydy odpornościowe (Wojda i Vertyporokh 2017). Mechanizm reakcji organizmu owada na zmiany temperatury nie został do końca poznany. Znaczącą rolę przypisuje się jednak białkom opiekuńczym, których zadaniem jest przywracanie prawidłowej konformacji zdenaturowanym polipeptydom. Wzrost temperatury, a także zakażenie patogenem wywołują w organizmie gospodarza stres, wpływający na rekrutację kluczowych elementów szlaków przekazywania sygnału. Jedną z najważniejszych komponent indukowanych, w wyniku szoku spowodowanego temperaturą, a także zakażeniem jest białko szoku cieplnego Hsp90. Przypuszcza się, że wzrost jego syntezy wywołuje sygnał zagrożenia współaktywujący odpowiedź immunologiczną (Wojda i Jakubowicz 2007). *Galleria mellonella* posiada, także białko termogeninę, zdolną do wytwarzania energii cieplnej w organizmie owada. Dlatego właśnie skupiska owadów, wytwarzają znaczne ilości ciepła, które może mieć wpływ na ich reakcje odpornościowe (Wojda i Vertyporokh 2017).

3.1 Zjawisko piętnowania immunologicznego owadów

Mimo, że owady nie posiadają mechanizmów odporności nabytej jakimi dysponują kręgowce, zaobserwowane zostały u nich zjawiska adaptacyjne względem patogenu, którym zostały zakażone. Proces ten nazywany jest primingiem, który w tłumaczeniu na język polski określa się jako „piętnowanie immunologiczne” (Dhinaut i in. 2018). Piętnowanie po raz pierwszy zostało zaobserwowane podczas badań z wykorzystaniem przybyszki amerykańskiej (*Periplaneta americana*) immunizowanej martwymi komórkami *Pseudomonas aeruginosa*. W kolejnych latach

przeprowadzono szereg badań z użyciem różnych mikroorganizmów jako czynników infekcyjnych i organizmów modelowych między innymi przy użyciu owada *Galleria mellonella* (Ramarao i in. 2012).

3.2 Mechanizmy piętnowania immunologicznego

Mechanizmy piętnowania immunologicznego nie są w pełni poznane. Zjawisko to polega na tym, że pierwszy kontakt z danym patogenem powoduje wzrost odporności na powtórne zakażenie tym samym lub innym patogenem w przyszłości. Na podstawie przeprowadzonych doświadczeń, wiadomo, że zjawisko piętnowania immunologicznego różni się w zależności od czynnika biotycznego używanego w celu zakażenia (Dhinaut i in. 2018). Badania przeprowadzone z wykorzystaniem grzyba *Candida albicans*, którym immunizowano larwy *Galleria mellonella* dwukrotnie- dawką nieletalną, a następnie letalną, dowodzą zwiększonej aktywności czynników odpornościowych owada w wyniku pierwszego zakażenia. Naukowcy badający zjawisko piętnowania immunologicznego przy pomocy innego mikroorganizmu – *Bacillus thuringiensis*, zauważyli, że powtórne podanie bakterii prowadzi do zmniejszenia poziomu ekspresji genów kodujących białka odpornościowe, w porównaniu do owadów, które zostały immunizowane tylko raz (Ramarao i in. 2012). Mechanizm ten może wynikać z prowadzenia przez barciaka zrównoważonego gospodarowania energią. Aktywacja szerokiego spektrum mechanizmów odpornościowych, powoduje wzrost zużycia energii niezbędnej do prawidłowego rozwoju i procesów reprodukcyjnych. Inną teorią starającą się wyjaśnić mechanizmy piętnowania immunologicznego jest stabilność chemiczna peptydów odpornościowych i pozostałych białek, które są głównymi składnikami odpowiedzi immunologicznej owadów (Sheehan i in. 2020). Piętnowanie immunologiczne zaobserwowane zostało także w układach heterologicznych, wykorzystujących dwa różne patogeny. W obrębie piętnowania wywoływanego przez różne gatunki mikroorganizmów obserwuje się efekty specyficzne i niespecyficzne. Dotychczas heterologiczne piętnowanie immunologiczne *Galleria mellonella* zaobserwowane zostało po zakażeniu owada drożdżami *Saccharomyces cerevisiae*, a następnie grzybami *Candida albicans*, a także iniekcji martwych komórek bakterii *Bacillus thuringiensis*, a następnie zakażenia owada *Pseudomonas luminescens*. Złożoność adaptacyjnych mechanizmów odpornościowych i zbyt mała wiedza na temat mechanizmów, które nimi sterują nie pozwala wysnuć jednoznacznych wniosków wyjaśniających proces piętnowania (Naglik i in. 2003; Medina Gomez i in. 2018). Oprócz powyższych skutków przypuszcza się, że zjawisko piętnowania może być determinowane przez zmiany epigenetyczne w obrębie DNA– metylacje DNA i RNA, acetylacja histonów, zwiększenie efektywności procesów komórkowej odpowiedzi immunologicznej owadów (Wojda i Vertyporokh 2017; Wojda 2016). Zjawisko piętnowania immunologicznego zostało zaobserwowane także u organizmów potomnych owadów, kiedy jedno z rodziców poddano piętnowaniu immunologicznemu. Zjawisko to zostało nazwane międzypokoleniowym piętnowaniem immunologicznym. Przypuszcza się, że przekazywanie zdolności adaptacyjnej przez rodziców związane jest z przekazywaniem potomstwu peptydów odpornościowych, wzorców molekularnych patogenów, a także zmian epigenetycznych (Trauer-Kizilelma i Hilker 2015).

3.3 Rodzaje piętnowania immunologicznego

Piętnowanie owadów obserwuje się w dwóch układach: homologicznym i heterologicznym. Piętnowanie heterologiczne polega na infekowaniu organizmu modelowego niską dawką danego mikroorganizmu, a po określonym czasie podaniu wysokiej dawki innego mikroorganizmu (Sheehan i in. 2020). Ten typ piętnowania dotychczas przebadano w układach zakażenia *Candida albicans* po wcześniejszej iniekcji *Saccharomyces cerevisiae* oraz po zakażeniu *Pseudomonas luminescens* po uprzedniej iniekcji martwymi komórkami *Bacillus thuringiensis*, z wykorzystaniem jako organizmu modelowego *Galleria mellonella* (Wojda i Vertyporokh 2017). Innymi przykładami badania piętnowania heterologicznego jest iniekcja bakteryjnego LPS, a następnie zakażenie grzybem *Metarhizium anisopliae* z wykorzystaniem jako organizmu badawczego mączlika młynarka. Trzmiel amerykański został użyty jako model badawczy do piętnowania dwoma spokrewnionymi gatunkami bakterii Gram– dodatnich i jednym gatunkiem bakterii Gram– ujemnych. Z wykorzystaniem tych samych bakterii przeprowadzono także piętnowanie homologiczne. Polega ono na dwukrotnym podaniu tych samych mikroorganizmów, pierwsze w dawce nieletalnej, a drugie w dawce letalnej.

Piętnowanie homologiczne zostało przeprowadzone z wykorzystaniem bakterii *Bacillus thuringiensis*, grzyba *Aspergillus fumigatus*, a także *Candida albicans*. W wyżej wymienionych układach homologicznych jako modelu doświadczalnego używano *Galleria mellonella* (Wojda i Vertyporokh 2017). Ponadto piętnowanie homologiczne zaobserwowano w układzie martwych komórek *Pseudomonas aeruginosa* i żywych komórek *Pseudomonas aeruginosa* z wykorzystaniem trzmieła amerykańskiego jako organizmu badawczego (Wojda i Vertyporokh 2017).

4. Podsumowanie

Molekularne mechanizmy piętnowania nie zostały jeszcze w pełni poznane, dlatego nie można dokładnie stwierdzić, co odpowiada za zdolności adaptacyjne owadów. Na podstawie badań przeprowadzonych przez jeden z zespołów naukowych przypuszcza się, że na zdolność adaptacyjną owadów, może mieć wpływ wzrost ekspresji genów odpowiedzialnych za syntezę peptydów odpornościowych, wśród gąsienic poddanych piętnowaniu, co może mieć związek z podwyższoną aktywnością przeciwdrożdżową wynikającą z podania pierwszej, niskiej dawki patogenu (Bergin i in. 2006). Do pełnego zrozumienia zjawiska, a także czynników jakie wpływają na jego efektywność niezbędne są dalsze badania z uwzględnieniem mechanizmów molekularnych zachodzących w organizmach owadów poddanych piętnowaniu, ponieważ obecny stan wiedzy nie pozwala jednoznacznie stwierdzić z czego wynika wyżej opisany mechanizm. Jako że układ odpornościowy bezkręgowców jest filogenetycznie starszy, podobne mechanizmy jego regulacji mogą występować u kręgowców. Wiedza ta w przyszłości może zostać wykorzystana do opracowania terapii efektywnie zwalczających zakażenia wywoływane przez patogeny ludzkie, w celu opracowania skutecznych środków leczniczych (Ramarao i inni, 2012)..

5. Literatura

- Andrejko M (2016) Modulacja humoralnej odpowiedzi odpornościowej gąsienic *Galleria mellonella*. Post. Mikrobiol., 55(3):255-267.
- Bergin D, Murphy L, Keenan J i in. (2006). Pre-exposure to yeast protects larvae of *Galleria mellonella* from a subsequent lethal infection by *Candida albicans* and is mediated by the increased expression of antimicrobial peptides. Microb. Infect. 8: 2105-2112.
- Cook S, McArthur D (2013) Developing *Galleria mellonella* as a model host for human pathogens. Virulence, 4(5), strony 350-353.
- Dhinaut J, Chogne M, Moret Y (2018) Immune priming specificity within and across generations reveals the range of pathogens affecting evolution of immunity in an insect. J Anim Ecol. 87(2):448-463.
- Górska-Andrzejak J, Grzmił P, Labocha-Derkowska M i in. (2016) Poczety modelowych organizmów badawczych. Wszechświat, 117(7-9): 194-208.
- Kangasallo K, Valtonen T, Roff D i in. (2015) Intra- and trans-generational effects of larval diet on susceptibility to an entomopathogenic fungus, *Beauveria bassiana*, in the greater wax moth, *Galleria mellonella*. Journal of Evolutionary Biology, 28(8): 1453–1464.
- Lange A, Beier S, Huson D i in. (2018) Genome Sequence of *Galleria mellonella* (Greater Wax Moth). Genome announcement, 6(2): 434-445.
- Medina Gomez H, Adame Rivas G, Hernández-Quintero i in. (2018) The occurrence of immune priming can be species-specific in entomopathogens. Microb Pathog, 118:361-364.
- Naglik J, Challacombe S, Hube B (2003) *Candida albicans* secreted aspartyl proteinases in virulence and pathogenesis. Microbiol. Mol. Biol. Rev.,(67): 400-428.
- Niedźwiedzka K i Dyląg M (2015). Owady- jako organizmy modelowe w badaniach nad patogenezą infekcji grzybiczych i w ocenie naturalnych antymikotyków. MED. DOŚW. MIKROBIOL., 67: 133-139.
- Ramarao N, Nielsen-Leroux C, Lereclus D (2012) The insect *Galleria mellonella* as a powerful infection model to investigate bacterial pathogenesis. J Vis Exp. 11;(70): 234-241.
- Sheehan G, Gemman F, Kavanagh K (2020) Immune priming: the secret weapon of the insect world. Virulence, 11(1)238-246.

- Trauer-Kizilelma U, Hilker M (2015) Impact of transgenerational immune priming on the defence of insect eggs against parasitism. *Dev Comp Immunol.* 51(1):126-33.
- Vogel H, Altincicek B, Glockner D i in. (2011). A comprehensive transcriptome and immune-gene repertoire of the lepidopteran model host *Galleria mellonella*. *BMC Genomics.*, 12(308);2164-72.
- Wojda I (2016). Immunity of the greater wax moth *Galleria mellonella*. *Insect Science*, 24(3): 342-357.
- Wojda I, Jakubowicz T (2007). Humoral immune response upon mild heatshock conditions in *Galleria mellonella* larvae. *Journal of insect physiology*, 53(11): 1334-1344.
- Wojda I, Vertyporokh L (2017). Układ odpornościowy owadów w obronie integralności organizmu. *Kosmos*, 66(4): 541-555.

5. Przegląd roli czynników wirulencyjnych w przebiegu zakażenia powodowanego drożdżakiem *Candida albicans*

General overview of the role of virulence factors in *Candida albicans* infection

Jakub Kordaczuk

Katedra Immunobiologii, Instytut Nauk Biologicznych, Uniwersytet Marii Curie Skłodowskiej w Lublinie

Jakub Kordaczuk: jakub.kordaczuk@o2.pl

Słowa kluczowe: kandydozy, biofilmy, mikroorganizmy

Streszczenie

Candida albicans to pospolity grzyb komensalny, który kolonizuje jamę ustną i gardło, układ pokarmowy i rozrodczy oraz skórę zdrowych osób. U 50% populacji *Candida albicans* jest częścią normalnej flory mikroflory. W przypadku zaburzenia homeostazy organizmu człowieka nierzadko dochodzi do zmian w składzie flory mikrobiologicznej, co w konsekwencji prowadzić może do wystąpienia szeregu jednostek chorobowych, a w przypadku *Candida albicans* wystąpienia oportunistycznych zakażeń. *Candida albicans* dysponuje szeregiem czynników wirulencji, które pomagają jej w skuteczny sposób zasiedlać organizm gospodarza w konsekwencji prowadząc do rozwoju kandydozy. Kandydoza jamy ustnej ma szeroki zakres objawów klinicznych, podzielonych na kandydozę pierwotną i wtórną. Specyficzną cechą patogenności gatunków *Candida* jest ich zdolność do tworzenia biofilmów, które chronią je przed czynnikami zewnętrznymi, takimi jak mechanizmy obronne układu odpornościowego żywiciela i lekami przeciwgrzybiczymi.

1. Ogólna charakterystyka *Candida albicans*

Grzyb *Candida albicans* jest jednym z organizmów występujących w błonach śluzowych układu pokarmowego, oddechowego, rozrodczego i skóry człowieka. W zdrowym organizmie nie powoduje rozwoju choroby. Osłabienie odporności człowieka może być przyczyną rozwoju szeregu chorób – m. in. kandydoz. Z tego względu *Candida albicans* nazywana jest oportunistycznym patogenem ludzkim. Czynnikiem zwiększającymi predyspozycje do rozwoju kandydoz są: nieprawidłowe funkcjonowanie układu immunologicznego człowieka i zaburzenie proporcji w ilości niespecyficjnych mikroorganizmów stanowiących mikrobiom człowieka. Do rozwoju kandydozy może przyczyniać się stosowanie także leków immunosupresyjnych, leczenie hormonalne, zabiegi medyczne, rozległe oparzenia, stosowanie antybiotyków o szerokim spektrum działania (Staniszewska i in. 2014). Ze względu na miejsce występowania, kandydozy można podzielić na powierzchniowe i układowe (Pasich i in. 2013). Kandydozy powierzchniowe rozwijają się na powierzchni skóry, paznokci, błon śluzowych górnego odcinka przewodu pokarmowego, układu oddechowego, pęcherza moczowego i pochwy. Kandydozy układowe powodują powstanie stanów zapalnych wsierdzia, mięśnia sercowego, osierdzia, zapalenia płuc, opon mózgowo-rdzeniowych, kości, stawów i gałki ocznej. Stany zapalne narządów wewnętrznych powodowane *Candida albicans* mają najczęściej charakter endogeny. Są wynikiem dysproporcji między poszczególnymi gatunkami tworzącymi mikrobiom człowieka. Przyczyną rozwoju kandydoz powierzchniowych mogą być zakażenia szpitalne, do których dochodzi podczas zabiegów medycznych, użycia niejałowego opatrunku i sprzętu przez personel medyczny (Staniszewska i in. 2014; Sikora i in. 2015).

2. Czynniki zjadliwości *Candida albicans*

Jedną z głównych cech *Candida albicans* jest pleomorfizm – zdolność do tworzenia czterech form morfologicznych: blastokonidiów, form kielkujących (ang. germ tube), pseudostrzępek i strzępek prawdziwych. Na podstawie badań z wykorzystaniem mutantów nietworzących strzępek i porównaniu ich z formami 25 micelarnymi grzybów, przypuszcza się, że są one jednym z podstawowych czynników wirulencji. Wykazano, że tworzenie zróżnicowanych form

morfologicznych zależy od szeregu czynników zewnętrznych: temperatury, składu podłoży hodowlanych – zawartości N-acetyloglukozoaminy, proliny, alkoholu, surowicy oraz zawartości tlenu w powietrzu podczas hodowli. Innym elementem wpływającym na tworzenie różnych form morfologicznych *Candida albicans* są regulatory ekspresji genów. Przykładem czynników determinujących wzrost form strzępkowych są delecje w obrębie genów TUP1 i EFG1. Formy morfologiczne tego gatunku wykazują zróżnicowane cechy determinujące ich zjadliwość. Pleomorfizm *Candida albicans* ułatwia przenikanie przez bariery fizjologiczne organizmu człowieka. Tworzenie form pleomorficznych wpływa na tworzenie struktur typu "fungus ball", które powodują blokadę drożności naczyń krwionośnych. Jedną z najważniejszych cech formy blastokonidialnej (owalne komórki zarodnikowe, powstałe przez pączkowanie ze strzępek) *Candida albicans* jest zdolność do destrukcji błony komórkowej makrofagów podczas fagocytozy (Staniszewska i in. 2012).

2.1 Proteazy aspartylowe

Głównymi enzymami biorącymi udział w rozwoju kandydozy są enzymy proteolityczne, ułatwiające adhezję mikroorganizmu do ściany komórkowej gospodarza, a następnie powierzchnię kolonizację tkanek oraz ich penetrację. Jedną z ważniejszych grup enzymów zaliczanych do czynników zjadliwości *Candida albicans* są proteazy aspartylowe (SAP ang. *Secreted Aspartyl Proteinases*) Istnieje kilka rodzajów Sap- są one kodowane przez rodzinę 10 genów (SAP 1-10). Poszczególne izoenzymy różnią się między sobą budową, preferencjami substratowymi, ładunkiem elektrostatycznym oraz optimum pH (Staniszewska i in. 2014). Enzymy te występują w formach blastokonidialnych i micelarnych drożdżaka. Ich mechanizm działania polega na degradacji wiązań peptydowych w białkach przeciwciał i błon komórkowych. Wybrane proteazy Sap posiadają także inne role, która zależy od rodzaju, oraz miejsca infekcji. Izoenzymy kodowane przez geny SAP1-3 biorą udział w zakażeniach powierzchniowych objawiających się jako kandydoza jamy ustnej lub pochwy. Miejscem ekspresji genów są blastokonidia. Główną funkcją izoenzymu Sap4-6 jest udział w zakażeniach systemowych i degradują przeciwciał produkowanych przez organizm gospodarza w odpowiedzi na infekcję. Rola izoenzymów Sap7 i Sap8 nie jest znana. Wstępnie przeprowadzone badania sugerują że wspomniane izoenzymy biorą udział w zakażeniach krwi. Najnowsze badania wskazują również na integralną rolę Sap-8 w tworzeniu biofilmów. Zlokalizowane w błonie i ścianie komórkowej Sap9 oraz Sap10 odpowiadają za integralność tych struktur. (Naglik i in. 2003; Staniszewska i in. 2014).

2.2 Pleomorfizm form *Candida albicans*

Drożdżak *Candida albicans* wykazuje zdolność do organizacji w cztery odmienne formy morfologiczne: blastokonidia (komórki pączkujące), pseudostrzęki (wydłużone komórki, tworzące łańcuch), postać kielkującą (germtube), a także strzępek prawdziwych nitkowate struktury bez widocznej granicy między komórkami). Mnogość form morfologicznych jakimi dysponuje *Candida albicans* nazwana jest pleomorfizmem (Staniszewska i in. 2014). Każda z czterech form morfologicznych pełni określoną rolę w procesie chorobotwórczym wywołanym przez drożdżaka. We wczesnej fazie zakażenia uwiadcniają się formy blaszkonidialne, odpowiedzialne za kolonizację tkanek gospodarza. Ze względu na niewielkie rozmiary, formy blastokonidialne trafiają do układu krwionośnego, co prowadzi do rozsiania drożdżaka. Forma strzępkowa odpowiada za penetrację tkanek (Gow i in. 2012).

2.3 Adhezyny

Adhezja mikroorganizmu do komórki gospodarza jest kluczowym elementem rozwoju zakażenia. Proces ten polega na interakcji liganda i receptora. Uważa się, że na początkowe etapy adhezji wpływają oddziaływania wodorowe, kowalencyjne, oddziaływania Van der Waalsa, elektrostatyczne oraz napięcie elektryczne. Ważnym elementem układu adhezyjnego są cząsteczki stymulujące wiązanie drożdżaka do 26 powierzchni tkanki (Gow i in. 2012). Spośród adhezyn wyodrębnia się polisacharydy, glikoproteiny i lipidy. Mimo różnorodności strukturalnej poszczególnych grup, posiadają one szereg cech wspólnych: obecność peptydu sygnałowego na N-końcowym odcinku białka, miejsca C-terminalnego do którego wiązany jest moduł GPI. Adhezyny kodowane są przez szereg genów, spośród których do najlepiej poznanych należy HWP1 oraz siedem

genów rodziny ALS. Istotnym elementem strukturalnym drożdżaka są powierzchniowe fimbrie, składające się w 85% węglowodanów i w 15% z białek. (Staniszewska i in. 2012; Staniszewska i in. 2014).

2.4 Biofilmy

W środowisku naturalnym mikroorganizmy występują w dwóch formach - planktonicznej i kolonialnej. Formę planktoniczną tworzą pojedyncze bakterie, natomiast forma kolonialna jest tworzona przez grupę bakterii, które współdziałają ze sobą. Główną formą, w której występują mikroorganizmy w środowisku naturalnym, jest forma kolonialna, gdzie bakterie tworzą grupy. Postać kolonialna nosi nazwę biofilmu. Biofilm mogą tworzyć mikroorganizmy jednego gatunku lub wielu gatunków, których komórki otoczone są polisacharydową błoną pełniącą bardzo ważną rolę w jego funkcjonowaniu i ochronie mikroorganizmów (Samaranayake 2002). Bakterie tworzące biofilm rosną tworząc jednowarstwowe lub wielowarstwowe struktury. W efekcie mikroorganizmy tworzą wysoce uporządkowany strukturalnie układ zbudowany przez mikrokolonie bakteryjne. Zdolność do występowania w postaci biofilmu mają zarówno organizmy autotroficzne, heterotroficzne, jaki i saprofity, a także mikroorganizmy patogenne. Biofilm mogą tworzyć bakterie, grzyby, pierwotniaki czy glony. Biofilm najczęściej tworzy się na granicy dwóch faz: ciecz - ciecz, ciecz - ciało stałe, ciecz - gaz. Powstawanie błony biologicznej na zróżnicowanych powierzchniach jest wynikiem adhezyjnych właściwości struktury biofilmu, które umożliwiają bakteriom trwałe przytwierdzenie do podłoża. Funkcjonowanie mikroorganizmów w takich skupiskach jak biofilm daje im o wiele większą szansę na przetrwanie niż występowanie w postaci planktonicznej. W kolejnym podrozdziale przedstawiono modelowy opis powstania biofilmu (Kołwzan 2014; Samaranayake 2002).

Proces powstawania biofilmu.

Proces powstawania biofilmu można podzielić na kilka etapów: adhezję odwracalną, podczas której powstaje biofilm wczesny, adhezję nieodwracalną, w czasie której tworzy się biofilm późny, etap dojrzewania mikroorganizmów oraz fazę dyspersji (Czaczyk 2004). Pierwszy, właściwy etap powstawania biofilmu - adhezja odwracalna, zachodzi w wyniku kontaktu mikroorganizmów z podłożem. Następnie dochodzi do wytworzenia sił van der Waalsa, wiązań hydrofobowych i sił elektrostatycznych. Po zbliżeniu się mikroorganizmów na odległość około 1,5 μm , pomiędzy bakteriami a powierzchnią błony wykształcają się swoiste wiązania, które ułatwiają adhezję (Chałas i in. 2015; Pasich i in. 2013). Wiązania te powstają dzięki fimbriom, flagellom czy pilom znajdującym się na powierzchni komórki bakteryjnej. Bakteryjne fimbrie posiadają w swojej strukturze grupy hydrofobowe, które ułatwiają pokonanie oporu utworzonego przez ujemnie naładowane komórki organizmu człowieka i mikroorganizm (Chałas i in. 2015). Poszczególne bakterie wytwarzają różne substancje, głównie adhezyny białkowe, które pomagają w efektywniejszy sposób związać się powierzchnią, na której rozwija się biofilm (Kołwzan 2014). Kolejnym etapem powstawania biofilmu jest adhezja nieodwracalna. W procesie tym biorą udział bakterie biofilmu późnego, współdziałające z bakteriami tworzącymi biofilm w pierwszym etapie jej powstawania. W wyniku syntetyzowania przez bakterie zewnątrzkomórkowych glukanów, fruktanów a także nierozpuszczalnego mutanu powstaje zewnątrzkomórkowa otoczka – matrix (Strużycka i Stępień 2009). W wyniku uwalniania kolejnych dwucukrów matrix zwiększa swoją powierzchnię. Dzięki powstaniu matrix, bakterie tworzące biofilm w ułatwiony sposób adsorbują związki organiczne i jony wapnia. Bakteriami tworzącymi biofilm późny są głównie organizmy beztlenowe, np. *Actinomyces spp.* W zależności od miejsca powstawania biofilmu i dostępnych substratów potrzebnych do przeprowadzania procesów metabolicznych w biofilmie późnym zidentyfikować można *Fusobacterium spp.* czy *Porphyromonas*, posiadające zdolność do czerpania energii z białek i peptydów. W wyniku utworzenia przez mikroorganizmy biofilmu późnego staje się on mikrokolonią, w której współdziałają ze sobą bakterie tworzące biofilm na etapie adhezji odwracalnej i adhezji nieodwracalnej (Czaczyk 2004). Bakterie wchodzące w skład biofilmu mogą ulegać różnicowaniu i namnażaniu, co powoduje powstawanie kolejnych jego warstw i zwiększanie grubości podczas etapu namnażania biofilmu. Charakterystyczną cechą biofilmu jest zdolność do ciągłej reorganizacji. Aktywność metaboliczna w strukturze biofilmu, zmienia się zależnie od lokalizacji

mikroorganizmów i wiąże się ze zjawiskiem sukcesji bakteryjnej. Komórki znajdujące się na zewnątrz biofilmu mają dobry dostęp do substancji odżywczych i wykazują wysoką aktywność metaboliczną, w przeciwieństwie do bakterii należących do wewnętrznych warstw (Chałas i in. 2015; Strużycka i Stępień 2009). Sukcesja bakteryjna jest wynikiem zmian generowanych w wewnętrznych warstwach biofilmu z powodu dobudowywania kolejnych warstw mikroorganizmów. Zmiany środowiska wewnątrz biofilmu – głównie dostęp tlenu, są głównym czynnikiem sukcesji (Baranowski i Rodziewicz 2008). Pionierskie bakterie tlenowe tworzące płytkę nązębną w pierwszym etapie jego powstawania, w wyniku tworzenia kolejnych warstw płytki mają ograniczony dostęp do tlenu, w efekcie ustępując bakteriom o metabolizmie względnie lub bezwzględnie beztlenowym. Bakterie tworzące biofilm wczesny zmieniają proces oddechowy z tlenowego na fakultatywnie beztlenowy (Pasich i in. 2013). W wyniku zmian warunków środowiska przestają one syntetyzować enzymy, a w ich genomach zachodzą mutacje, które przekazywane są kolejnym pokoleniom bakterii, co skutkuje innymi właściwościami niż mikroorganizmy pionierskie (Czaczyk 2004). Bakterie są także w mniejszym stopniu wrażliwe na działanie substancji toksycznych. Czasem ich stan można określić jako zbliżony do anabiozy. Mogą jednak na nowo wrócić do czynnego funkcjonowania. Innym przykładem warunkującym proces sukcesji bakteryjnej są zmiany potencjału redox. Efektem spadku potencjału redox jest wzrost rozwoju mikroorganizmów fakultatywnie beztlenowych i względnie beztlenowych. Sukcesja bakteryjna świadczy o złożoności biofilmu i procesów, jakie w nim zachodzą (Baranowski i Rodziewicz 2008; Chałas i in. 2015). W strukturze dojrzałego biofilmu wyróżnia się kolby i palisady. Kolby występują na gładkich powierzchniach zębów, palisady tworzone są w bruzdach w sąsiedztwie mikrokolonii, które tworzą w przeważającej ilości ziarniaki i pałeczki. Dyspersja bakterii jest ostatnim etapem tworzenia biofilmu prowadząc w efekcie dochodzi do wtórnego biofilmu w innych miejscach (Czaczyk 2004; Chałas i in. 2015).

Metody walki z zakażeniami powodowanymi przez *Candida albicans*

W leczeniu zakażeń o podłożu etiologicznym *Candida albicans* stosuje się antymikotyki. Najczęściej stosowanymi środkami są echinokandyny, fluorowe pochodne pirymidyny i polieny. Polieny są najstarszą grupą przeciwgrzybowych antymikotyków, do której zalicza się amfoterycynę B, nystatynę oraz natamycynę (Pasich i in. 2013). Mechanizm działania polienów opiera się na wiązaniu do steroli błon komórkowych i toksycznym działaniu na komórkę gospodarza. Echinokandyny hamują syntezę ściany komórkowej *Candida albicans* i ujemnie wpływają na działanie enzymu odpowiedzialnego za syntezę glukanu. Wykazują stosunkowo niewielką ilość działań niepożądanych w stosunku do pozostałych grup antymikotyków. Do najczęściej stosowanych echinokandyn, należą mikafungina i kaspofungina (Staniszewska i in. 2014). Działanie fluorowych pochodnych pirymidyny polega na zaburzeniu struktury kwasów nukleinowych i hamowaniu syntezy białek. Najczęściej stosowaną pirymidyną jest flucytozyna. *Candida albicans* posiada zdolność do nabywania oporności w stosunku do tego antymikotyku. Niedostateczne efekty terapeutyczne i działania uboczne antymikotyków, a także nabywanie oporności na substancje przeciwgrzybicze wymuszają poszukiwanie nowych środków walki z zakażeniami powodowanymi przez *Candida albicans* (Sikora i in. 2015). Jedną z grup substancji, wykazujących działanie ujemne na *Candida albicans* są oksymy, do których zalicza się ketoksymy i aldoksymy. Mechanizm działania oksym polega na hamowaniu aktywności proteaz aspartylowych i fosfolipaz. Dowiedziono, że substancjami wykazującymi działanie przeciwgrzybicze są niektóre alkaloidy, terpenoidy, ekstrakty z kory i olejków. Przykładem może być olejek macierzanki tymiankowej oraz tetradyne – naturalny alkaloid wytwarzany przez *Stephania tetrandra* (Pasich i in. 2013). W ostatnich latach badano wykorzystanie pochodnych sulfonowych jako środków skutecznych w walce z zakażeniami powodowanymi przez *Candida albicans*. Dowiedziono, że pochodne sulfonowe hamują aktywność czynników transkrypcyjnych EGF1 i CPH1 odpowiedzialnych za wytwarzanie strzępek prawdziwych. Do pierścienia fenolowego sulfonów dołączane są podstawniki- fluor, chlor oraz bor. Dodanie podstawników halogenowych powoduje

zwiększenie aktywności przeciwgrzybiczej i większą skuteczność (Staniszewska i in. 2014; Sikora i in. 2015).

3. Podsumowanie

Oportunistyczny patogen ludzki *Candida albicans*, jest przyczyną wielu infekcji z którymi boryka się społeczeństwo w XXI wieku. Szereg czynników wirulencji, skomplikowany mechanizm zakażenia, zdolność do organizowania w skomplikowane struktury, utrudniają skuteczną walkę z drożdżakiem. Poważny problem w walce z infekcjami powodowanymi przez drożdżaka stanowi oporność szczepów *Candida spp.* względem stosowanych antymiotyków. Leczenie schorzeń wywołanych przez *Candida albicans* nie przebiega według określonego schematu i może przybierać różnorodne formy. Rodzaj terapii a także leki wykorzystywane podczas procesu leczenia uzależnione są od stanu zdrowia chorego, rodzaju patogenu oraz rozległości zmian zapalnych. Aktualnie prowadzone badania, których celem jest opracowanie skutecznych metod hamujących działanie czynników wirulencji oraz patogenizację *Candida spp.* Badania nad mechanizmem zakażenia drożdżaka *Candida albicans* i prowadzące odkrycie nowych cząsteczek aktywnych wykazujących właściwości bójcze względem mikroorganizmów, dają uzasadnione nadzieje na wynalezienie skutecznego leku.

4. Literatura

- Baranowska K, Rodziewicz A, (2008). Molekularne interakcje w biofilmach bakteryjnych. Kosmos Vol.1-2:29-38.
- Chałas R, Wójcik-Chęcińska I, Woźniak M (2015). Płytko bakteryjna jako biofilm – zagrożenia w jamie ustnej oraz sposoby zapobiegania. Post. Hig. Med. Dosw., Vol. 69:1140-1148.
- Czaczyk K (2004). Czynniki warunkujące adhezję drobnoustrojów do powierzchni abiotycznych. Post. Mikrobiol., Vol.43: 267-283.
- Gow NAR, Hube B (2012) Importance of the *Candida albicans* cell wall during commensalism and infection. Current Opinion in Microbiology 15:406–412.
- Koźłan B (2014). Analiza zjawiska biofilmu- warunki jego powstawania i funkcjonowania. Ochrona Środowiska, Vol. 33(4):3-14.
- Naglik J, Challacombe S, Hube B (2003). *Candida albicans* secreted aspartyl proteinases in virulence and pathogenesis. Microbiol. Mol. Biol. Rev.,(67): 400-428.
- Pasich E, Walczewska M, Pasich A i in. (2013). Mechanizm i czynniki powstawania biofilmu bakteryjnego jamy ustnej. Post. Hig. Med. Dosw., Vol. 67: 736-741.
- Pasich E, Walczewska M, Pasich, A i in. (2013). Mechanizm i czynniki powstawania biofilmu bakteryjnego jamy ustnej. Post. Hig. Med. Dosw., Vol. 67: 736-741.
- Samaranayake LP (2002). Podstawy mikrobiologii dla stomatologów. Warszawa: Wydawnictwo Lekarskie PZWL: 237-246.
- Sikora M, Gołaś M, Piskorska K i in. (2015). Czynniki wirulencji grzybów z rodzaju *Candida* istotne w patogenie zakażeń występujących u pacjentów żywionych pozajelitowo. Post. Mikrobiol., 54(3):224-234.
- Staniszewska, M., Bondaryk, M., Kowalska i in. (2014). Patogeneza i leczenie zakażeń *Candida spp.* Post. Mikrobiol., 53(3):229-240.
- Staniszewska, M, Bondaryk M, Piłat i in. (2012). Czynniki zjadliwości *Candida albicans*. Przegląd Epidemiologiczny, 66(4):629-633.
- Strużycka I, Stępień I (2009). Biofilm- nowy sposób rozumienia mikrobiologii. Borgis-Nowa Stomatologia, Vol. 3(2009):85-89.

6. Poprawa stabilności astaksantyny poprzez mikrokapsułkowanie z wykorzystaniem biopolimerów

Improving the stability of astaxanthin through microencapsulation using biopolymers

Katarzyna Łupina⁽¹⁾, Justyna Bochnak-Niedźwiecka⁽¹⁾, Ada Krawęcka⁽²⁾

⁽¹⁾Katedra Biochemii i Chemii Żywności, Wydział Nauk o Żywności i Biotechnologii, Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie

⁽²⁾Katedra Technologii Surowców Pochodzenia Roślinnego i Gastronomii, Wydział Nauk o Żywności i Biotechnologii, Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie

Słowa kluczowe: mikrokapsułkowanie, polisacharydy, nośnik, karotenoidy

Streszczenie

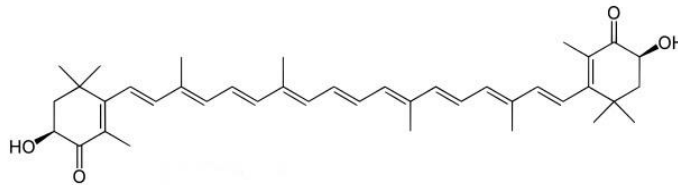
Astaksantyna (ASX) to karotenoid wytwarzany *de novo* głównie przez mikroorganizmy, takie jak mikroalgi, bakterie i drożdże, ponadto związek może być akumulowany w tkankach zwierząt wodnych, takich jak ryby i skorupiaki. ASX pozyskiwana z wyżej wymienionych źródeł wyróżnia się intensywnie czerwoną barwą i silnym działaniem przeciwutleniającym, dzięki czemu karotenoid ten charakteryzuje się niezwykle dużym potencjałem do wykorzystania, jako składniki żywności o funkcjach technologicznych i bioaktywnych. Zastosowanie barwnika w przemyśle jest jednak ograniczone, ponieważ ASX, jako związek lipofilowy wykazuje bardzo niską biodostępność. Co więcej, jest to substancja bardzo niestabilna. Degradacja karotenoidu następuje pod wpływem działania takich czynników jak wysoka temperatura, tlen, światło czy kwaśne pH. Obecnie wiele doniesień naukowych skupia się na kwestii poprawy stabilności ASX przy użyciu różnorodnych technik mikrokapsułkowania i nośników wytworzonych z naturalnych polisacharydów, białek i substancji lipidowych. W niniejszym artykule dokonano przeglądu ostatnich badań dotyczących sposobów poprawy stabilności, biodostępności i funkcjonalności technologicznej ASX z wykorzystaniem biopolimerów.

1. Wstęp

Astaksantyna (ASX) to czerwony barwnik należący do grupy karotenoidów, który występuje naturalnie w niektórych gatunkach mikroalg, bakterii i drożdży. Związek jest rutynowym składnikiem pasz stosowanych w akwakulturze, ponieważ zapewnia odpowiednio intensywne jaskrawoczerwono-pomarańczowe wybarwienie tkanek ryb łososiowatych oraz krewetek, dzięki czemu otrzymane z nich mięso jest atrakcyjniejsze dla konsumentów. Barwnik ma tendencję do akumulacji w organizmach zwierząt morskich, dlatego ich mięso jest głównym źródłem ASX w diecie człowieka. ASX jest istotnym elementem wielu produktów spożywczych i farmaceutycznych, ponieważ charakteryzuje się niezwykle silnymi właściwościami przeciwutleniającymi. Związek wykazuje różnorodne działania biologiczne potwierdzone badaniami *in vitro* i *in vivo*, dlatego produkty bogate w ASX są coraz bardziej popularne, jako suplementy diety. Preparaty tego rodzaju przyjmuje się np. w celu poprawy wzroku i zdrowia oczu, kondycji skóry oraz wzmocnienia wydolności organizmu. Naturalna ASX jest pozyskiwana głównie z upraw mikroalg *Haematococcus pluvialis*, jednak jej dobrym źródłem jest również olej z kryla. Pomimo, że barwnik naturalny charakteryzuje się silniejszymi właściwościami przeciwutleniającymi to jego syntetyczny odpowiednik zdominował rynek światowy. Synteza chemiczna jest odpowiedzią na rosnące zapotrzebowanie na ASX oraz aspekty ekologiczne związane ze zbiorem kryla oraz uprawą glonów. Dodatkowo, barwnik otrzymywany syntetycznie jest znacznie tańszy w porównaniu do ASX naturalnej (Brendler i Williamson 2019; Ng i in. 2021).

System polienowy nadaje karotenoidom charakterystyczną budowę molekularną, właściwości chemiczne i zdolność absorpcja światła. Jak widać na Rys. 1, ASX ma strukturę chemiczną podobną do karotenoidów i β -karotenów. Cząsteczka ASX na obu końcach posiada polarne pierścienie β -jononowe, które są zdolne do zmiatania wolnych rodników oraz reaktywnych

form tlenu. Dodatkowo, obecne w pierścieniach grupy (ketonowa i hydroksylowa), odpowiadają za stabilność oraz polarność związku. Układy pierścieniowe połączone są łańcuchem trzynastu sprzężonych wiązań podwójnych odpowiedzialnych za absorpcję światła, co gwarantuje ASX jaskrawe czerwono-pomarańczowe zabarwienie. Specyficzna struktura amfipatyczna (polarno-niepolarno-polarna) zapewnia ASX zdolność oddziaływania na błony komórkowe. Co więcej, każde wiązanie podwójne w łańcuchu polienowym karotenoidu może występować w dwóch konfiguracjach tj., jako izomery geometryczne *cis* lub *trans*. Każda cząsteczka ASX ma dwa centra chiralności w pozycji C-3 i C-3', dlatego oprócz tworzenia izomerów geometrycznych może przedstawiać również trzy izomery konfiguracyjne: dwa enancjomery (3R, 3R' i 3S, 3S') oraz postać mezo (3R, 3S). Spośród wszystkich izomerów, formy 3S, 3'S są najbardziej rozpowszechnione w przyrodzie. ASX otrzymywana syntetycznie składa się z racemicznej mieszanki dwóch enancjomerów i formy mezo (Higuera-Ciapara i in. 2006; Martínez-Álvarez i in. 2020).

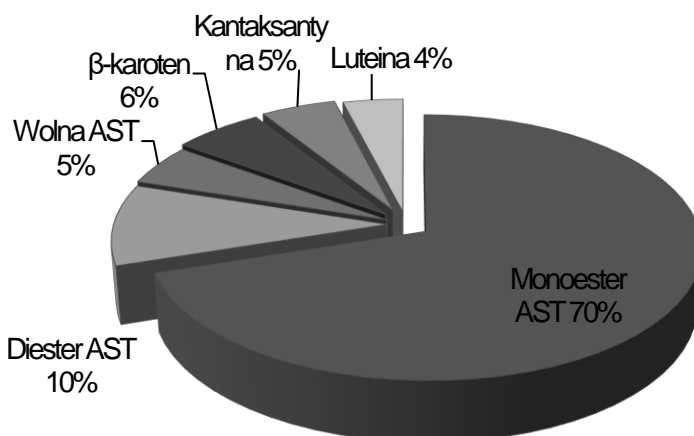


Rys.1. Wzór strukturalny astaksantyny.

Skład chemiczny, biodostępność, czystość, stabilność i inne cechy ASX są zróżnicowane w zależności od jej pochodzenia. Naturalna ASX zazwyczaj występuje w postaci wolnej, jako mono- lub diester w połączeniu z kwasami tłuszczowymi oraz w formie karotenoprotein (poprzez sprzężenie z odpowiednimi białkami). Najczęstsze kwasy tłuszczowe obecne w zestyfikowanych formach ASX to kwas dokozaheksaenowy (DHA) oraz kwas eikozapentaenowy (EPA). Barwnik obecny w mikroalgach *Haematococcus* jest w naturalny sposób skompleksowany z innymi karotenoidami jak widać na Rys. 2. ASX produkowana syntetycznie nie jest podawana procesowi estryfikacji, dlatego szybciej się utlenia, charakteryzuje się mniejszą stabilnością oraz słabszymi właściwościami przeciwutleniającymi w porównaniu do form naturalnych. Wykorzystanie ASX w przemyśle spożywczym i farmaceutycznym jest po części ograniczone, głównie z powodu niskiej stabilności oraz biodostępności związku. Łańcuch polienowy obecny w strukturze barwnika jest podatny na reakcje utleniania i izomeryzacji. Degradacja ASX zachodzi pod wpływem takich czynników jak światło, tlen, temperatura czy pH. Szczególnie degradacja termiczna jest powszechnym procesem obserwowanym w przypadku tego karotenoidu (Martínez-Álvarez i in. 2020; Yang i in. 2021). Utlenianie karotenoidów, w tym ASX, prowadzi nie tylko do utraty ich właściwości funkcjonalnych, ale także do obniżenia wartości odżywczej żywności, zmniejszenia intensywności barwy jak również utraty właściwości organoleptycznych. Niezwykle ważne jest określenie wpływ różnych czynników na stabilność ASX oraz zaprojektowanie takiej metody ochrony, kapsułkowania i kondycjonowania barwnika, która pozwoli właściwie wykorzystać jego biologiczne właściwości. Stabilność związku będzie zależała nie tylko od doboru odpowiedniej metodologii ale również od składu matrycy i późniejszego przechowywania gotowego preparatu (Martínez-Delgado i in. 2017).

Badania mające na celu poprawę stabilności ASX skupiają się przede wszystkim na modyfikacjach strukturalnych związku oraz wykorzystaniu różnorodnych metod mikrokapsułkowania. Systemy oparte na liposomach, emulsjach, nanoemulsjach i nośnikach lipidowych skutecznie poprawiają stabilność i funkcjonalność ASX, jednak stopień ich działania jest zależny od składu systemu, wyboru emulgatora i końcowego zastosowania (Khalid i in. 2017). W ostatnim dziesięcioleciu stosowanie mikrokapsułkowania z wykorzystaniem matryc polimerowych w celu stabilizacji związków aktywnych staje się coraz bardziej popularne i znajduje swoje zastosowanie w przemyśle spożywczym, rolnictwie, medycynie, farmacji i biotechnologii. Proces ten opiera się na powlekanii lub osadzaniu małych cząsteczek substancji (określanych jako rdzeń) w jednorodnej lub niejednorodnej matrycy w celu wytworzenia fizycznej bariery między

materiałem rdzenia a warunkami środowiskowymi. W przypadku mikroapsułkowania, niezwykle ważny jest dobór odpowiedniego materiału powlekającego, który musi być dopuszczony do spożycia, nie może reagować z rdzeniem a jego właściwości fizykochemiczne powinny być dopasowane do wybranej techniki mikroapsułkowania. Dodatkowo, cena materiału z którego wytwarzane są mikroapsułki nie może być zbyt wygórowana. Wiele naturalnych polimerów polisacharydowych oraz białek jest wykorzystywana jako materiał powlekający w mikroapsułkach, ponieważ związki te nie tylko spełniają powyższe kryteria ale dodatkowo charakteryzują się wysoką biokompatybilnością i są biodegradowalne. Do wytwarzania ścian mikroapsulek najczęściej stosuje się skrobię (również modyfikowaną), gumę arabską, alginiany, karagen, żelatynę, pektyny, kazeinę, białko sojowe, chitozan, oraz воск karnauba. Główne zalety mikroapsułkowania to zmniejszenie reaktywności rdzenia z czynnikami zewnętrznymi, możliwość kontrolowania uwalniania substancji aktywnych, zmniejszenie szybkości przenoszenia materiału rdzenia do środowiska zewnętrznego oraz maskowanie smaku i możliwość rozcieńczenia uwieczonych w otoczkach związków. Najpopularniejsze techniki mikroapsułkowania to przeprowadzenie procesu z wykorzystaniem suszenia rozpyłowego, powlekania, ekstruzji, procesów suspensyjnych, współkryształizacji, koacerwacji, oraz zamykania w liposomach i cyklodekstrynach. W przypadku ASX szczególnie obiecujące wydają się również nanostrukturalne nośniki lipidowe, które potencjalnie mogą zwiększyć stabilność chemiczną kapsułkowanych związków w porównaniu z innymi nano-nośnikami lipidowymi, ponieważ są one bardzo skuteczne w immobilizacji substancji aktywnych w macierzy lipidowej (Korus i in. 1997; Lin i in. 2016; Youssef 2017).



Rys. 2. Rozkład karotenoidów naturalnej astaksantyny (ASX) (Capelli i in. 2013).

2. Opis Zagadnienia

Celem niniejszej pracy jest przegląd i analiza dostępnych danych literaturowych dotyczących sposobów poprawy stabilności ASX z wykorzystaniem różnorodnych nośników polimerowych.

3. Przegląd Piśmiennictwa

Główne czynniki, które odpowiadają za poprawę stabilności ASX to dobór optymalnej metody hermetyzacji związku, rodzaju nośnika oraz warunków przechowywania. Ocena stabilności zazwyczaj obejmuje stopień konserwacji i ewentualne straty ASX oraz zmiany barwy i właściwości przeciwutleniających w czasie. Mikroapsułkowanie to metoda, która jest najczęściej wykorzystywana do zabezpieczenia ASX przed degradacją. W tym przypadku kluczową kwestią jest

dobór odpowiedniego materiału powlekającego. Czynniki, które należy wziąć pod uwagę przy ich zastosowaniu, są właściwości technologiczne (rozpuszczalność, zdolność błonotwórcza, zdolność emulgująca, higroskopijność, lepkość, zdolność żelowania, temperatura topnienia), stan skupienia (amorficzny, szklisty), właściwości organoleptyczne (barwa, zapach, smak) i fizyko-chemiczna zgodność z materiałem rdzenia. W związku z tym powszechnie stosuje się związki powierzchniowo czynne jako emulgatory w celu polepszenia kompatybilności. Zastosowanie kompleksów z różnych polimerów jest obiecującą strategią, ponieważ mieszanki mogą charakteryzować się większą funkcjonalnością niż pierwotne substancje. Wyżej wymienione czynniki, a także rodzaj i wielkość struktury, będą determinować funkcjonalność, kinetykę uwalniania i stabilność ASX, a w konsekwencji potencjalne zastosowania opracowanych systemów. Nośniki polimerowe powinny nie tylko polepszać stabilność ASX, lecz również poprawiać jej rozpuszczalność w wodzie, ponieważ jest to kluczowy czynnik wpływający na siłę barwiącą ASX oraz jej biodostępność i właściwości przeciwutleniające. Liczne badania potwierdzają, że wiele metod kapsułkowania (z wykorzystaniem np. β -cyklodekstryn, suszenia rozpyłowego, żelowania jonotropowego czy liposomów) zapewniło poprawę rozpuszczalności i dyspersji ASX (Martínez-Álvarez i in. 2020). Nośniki polimerowe mogą wpływać również na profile uwalniania związków i tym samym kreować właściwości przeciwutleniające ASX. Badania Łupiny i in. (2021) wykazały, że folie jadalne na bazie mieszaniny polisacharydów sojowych i żelatyny uwalniały ASX ok. 4 razy wolniej niż matryce wytworzone z mieszaniny gumy arabskiej i żelatyny, co skutkowało zmniejszeniem właściwości przeciwutleniających. Wyniki te prawdopodobnie były zależne od stopnia rozpuszczalności polimerów.

Techniki mikrokapsułkowania można podzielić na metody chemiczne, fizyko-chemiczne lub fizyko-mechaniczne, i w rzeczywistości większość z nich została zastosowana do hermetyzacji ASX. Biorąc pod uwagę, że ASX jest związkiem termolabilnym, zalecane jest wykorzystywanie technik, które nie wymagają używania wysokiej temperatury. Przykładowo, kapsułkowanie z zastosowaniem suszenia rozpyłowego opiera się na rozpyleniu dyspersyjnego układu substancji aktywnej oraz substancji powlekającej w gorącej komorze suszarki. W przypadku ASX, temperatura obecna w komorze może powodować od 30% do 40% strat tego związku (Martínez-Álvarez i in., 2020). Mimo możliwości utarty pewnej części barwnika, suszenie rozpyłowe jest technologią o stosunkowo ugruntowanej pozycji i nadal stanowi popularną metodę zwiększania stabilności ASX. Badanie Shena i Queka (2014) jako jedno z wielu potwierdza, że wykorzystanie suszenia rozpyłowego jest skuteczną metodą mikrokapsułkowania ASX. W badaniu jako materiał powlekający wykorzystano izolat białka serwatki oraz kazeinian sodu z rozpuszczalnym błonnikiem kukurydzianym. Ostatecznie stopień enkapsulacji był bardzo efektywny i plasował się na wysokim poziomie tj. 95%. Nieco mniejszą efektywność (od 33,40% do 70,1%) suszenia rozpyłowego odnotowali Bustos-Garza i in. (2013), którzy oleożywiec z ASX osadzili w nośnikach na bazie białka serwatki, gumy arabskiej oraz nośnikach składających się ich mieszanin. Dodatkowo do wybranych materiałów powlekających wprowadzono maltodekstrynę i inulinę. Efektywność mikrokapsułkowania z wykorzystaniem suszenia rozpyłowego była zależna od rodzaju nośnika. Mieszanina gumy arabskiej i izolatu białka pozwoliła uzyskać wyższą wydajność procesu niż czyste materiały, co prawdopodobnie wynikało z interakcji elektrostatycznych pomiędzy tymi dwoma polimerami. Stosunkowo niższy poziom skuteczności kapsułkowania odnotowano w przypadku mieszanek z maltodekstryną i inuliną (38,95-50,95%), co pozwala sądzić, że biopolimery powierzchniowo czynne, takie jak guma arabska lub białka, ogólnie poprawiają skuteczność kapsułkowania w porównaniu z polisacharydami, takimi jak inulina czy maltodekstryna. Co więcej 10 dniowy test stabilności w 45°C wykazał, że mikrokapsułki na bazie czystego izolatu białkowego charakteryzowały się największą stabilnością ASX i najlepszymi właściwościami przeciwutleniającymi. Powyższe badanie potwierdza, że białka stanowią dobry materiał powlekający dla ASX ponieważ mogą tworzyć kompleksy molekularne z karotenoidami poprzez oddziaływania hydrofobowe, co może pomóc chronić karotenoidy przed degradacją. Badania przeprowadzone przez Montero i in. (2016) wykazały również, że kapsułkowanie ekstraktów lipidowych z odchodów krewetek bogatych w ASX z wykorzystaniem suszenia rozpyłowego umożliwia wytworzenie proszków o wysokiej rozpuszczalności w wodzie (> 92%). Co więcej, mimo że początkowa obróbka termiczna spowodowała utlenianie lipidów i utratę

ASX, to ostatecznie podczas przechowywania w chłodni (110 dni) nie zaobserwowano oznak niestabilności barwnika.

Z kolei Li i in.(2018) wykorzystali koacerwację w celu hermetyzacji oleożywicy ASX w mikrokapsułkach z alginianu i żelatyny, następnie oceniali stabilność mikrokapsułek oraz uwalnianie ASX podczas trawienia *in vitro*. Uzyskane wyniki wykazały, że proces kapsułkowania był wysoce wydajny (85,9%). Naukownicy zaobserwowali że ASX w mikrokapsułkach wykazywała 1,29-krotnie wyższą biodostępność i 2,2-krotnie większą odporność na degradację pod wpływem tlenu, światła i temperatury w porównaniu do czystej, niekapsułkowanej ASX. Dodatkowo, autorzy zaobserwowali oporność mikrokapsułek podczas trawienia w żołądku i gwałtowne uwalnianie ASX w ciągu pierwszych 4 godzin trawienia jelitowego (ponad 60%) z powodu erozji matrycy w łagodnych warunkach alkalicznych. Badacze odnotowali u myszy najwyższe stężenie ASX po upływie po 2,5 h po podaniu do żołądka. Podobne badania przeprowadzali Zhou i in.(2018), którzy wytworzyli koacerwaty na bazie estryfikowanej ASX i mieszaniny białka serwatkowego i gumy arabskiej. Autorzy porównywali potencjalną biodostępność oleożywicy z ASX i barwnika zamkniętego w koacerwatach. Symulowane trawienie w przewodzie pokarmowym, pokazało że biodostępność ASX umieszczonej w koacerwatach była większa w porównaniu do związku w postaci oleożywicy. Co więcej, w przeciwieństwie do wyników zaobserwowanych przez Li i in. (2018) maksymalne stężenie ASX w osoczu zostało osiągnięte w ciągu 9 h od podania mikrokapsułek. Odmienne wyniki przedstawionych badań mogą wynikać z różnic w kontrolowanej szybkości uwalniania ASX w przewodzie pokarmowym. Można sugerować, że mikrokapsułki wykonane z mieszaniny białka serwatki i gumy arabskiej wykazują większą wytrzymałość mechaniczną w warunkach jelitowych niż te przygotowane na bazie alginianu i żelatyny, które w rzeczywistości mogły być bardziej podatne na degradację lub erozję.

4. Wnioski

Obecny stan wiedzy pokazuje, że w ostatnim czasie opracowano wiele biopolimerowych nośników ASX, które pozwalają poprawić stabilność i biodostępność tego związku, jak również umożliwiają przeprowadzenie kontrolowanego uwalniania substancji. W dalszym ciągu skuteczne okazują się różnorodne techniki mikrokapsułkowania, w przypadku których dobór optymalnego materiału powlekającego gwarantuje bardzo dużą efektywność procesu. Stosowanie białek jako materiał nośnikowy dla ASX wydaje się być szczególnie efektywne i skutecznie zapobiega degradacji barwnika na skutek działania światła, tlenu i temperatury.

Praca powstała w wyniku realizacji projektu badawczego o nr 2019/35/N/NZ9/01795 finansowanego ze środków Narodowego Centrum Nauki.

5. Literatura

- Brendler T i Williamson EM (2019) Astaxanthin: How much is too much? A safety review. *Phytotherapy Research*33(12): 3090–3111.
- Bustos-Garza C i in. (2013) Thermal and pH stability of spray-dried encapsulated astaxanthin oleoresin from *Haematococcus pluvialis* using several encapsulation wall materials. *Food Research International*54(1): 641–649.
- Capelli B i in. (2013) Synthetic astaxanthin is significantly inferior to algal-based astaxanthin as an antioxidant and may not be suitable as a human nutraceutical supplement. *Nutrafoods*12(4): 145–152.
- Higuera-Ciapara I i in. (2006) Astaxanthin: A review of its chemistry and applications. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*46(2): 185–196.
- Khalid N i in. (2017) Formulation and characterization of O/W nanoemulsions encapsulating high concentration of astaxanthin. *Food Research International*102: 364–371.
- Korus J i in. (1997) Mikrokapsułkowanie substancji spożywczych. *Żywność Technologia Jakość*04(1): 30–40.

- Li R i in. (2018) Preparation of enteric-coated microcapsules of astaxanthin oleoresin by complex coacervation. *Pharmaceutical Development and Technology*23(7): 674–681.
- Lin S i in. (2016) Improving the stability of astaxanthin by microencapsulation in calcium alginate beads. *PLoS ONE*11(4): 1–10.
- Łupina i in. (2021) Gum Arabic/Gelatin and Water-Soluble Soy Polysaccharides/gelatin blend films as carriers of astaxanthin —a comparative study of the kinetics of release and anti-oxidant properties. *Polymers* 13(7):1062.
- Martínez-Álvarez Ó i in. (2020) Recent advances in astaxanthin micro/nanoencapsulation to improve its stability and functionality as a food ingredient. *Marine Drugs*18(8): 1–25.
- Martínez-Delgado AA i in. (2017) Chemical stability of astaxanthin integrated into a food matrix: Effects of food processing and methods for preservation. *Food Chemistry*225: 23–30.
- Montero P i in. (2016) Microcapsules containing astaxanthin from shrimp waste as potential food coloring and functional ingredient: Characterization, stability, and bioaccessibility. *LWT - Food Science and Technology*70: 229–236.
- Ng QX i in. (2021) Effects of Astaxanthin Supplementation on Skin Health: A Systematic Review of Clinical Studies. *Journal of Dietary Supplements*18(2): 169–182.
- Shen Q i Quek SY (2014) Microencapsulation of astaxanthin with blends of milk protein and fiber by spray drying. *Journal of Food Engineering*123: 165–171.
- Yang L i in. (2021) Influence of molecular structure of astaxanthin esters on their stability and bioavailability. *Food Chemistry*343: 128497.
- Youssef MA (2017) Improvement of edible coating properties by combining it with an advanced biological materials " Astaxanthin ". *Middle East Journal of Applied Sciences*7(3): 574–585.
- Zhou Q i in. (2018) Evaluation of the physicochemical stability and digestibility of microencapsulated esterified astaxanthins using in vitro and in vivo models. *Food Chemistry*, 260, 73–81.

7. Śmierć komórkowa zależna od PARP-1

PARP-1-dependet cell-death pathway

Orzechowska Monika ⁽¹⁾, Kciuk Mateusz ^(1,2)

⁽¹⁾ Katedra Biotechnologii Molekularnej i Genetyki, Wydział Biologii i Ochrony Środowiska, Uniwersytet Łódzki

⁽²⁾ Szkoła Doktorska Nauk Ścisłych i Przyrodniczych UŁ Wydział Biologii i Ochrony Środowiska, Uniwersytet Łódzki

Opiekun naukowy: Dr hab. Alina Błaszczyk

Monika Orzechowska: UL0247111@edu.uni.lodz.pl

Słowa kluczowe: apoptoza, parthanatos, polimeraza poli-ADP-rybozy

Streszczenie

Parthanatos jest śmiercią komórkową zależną od polimerazy poli(ADP-rybozy) (PARP-1) oraz czynnika indukującego apoptozę (AIF). Główną przyczyną tego procesu jest akumulacja cząsteczek poli(ADP-rybozy) (PAR) oraz znaczne wyczerpanie się zasobów NAD⁺ oraz ATP w środowisku komórki. Transport PAR z jądra komórkowego do mitochondriów powoduje aktywację czynnika AIF. Czynniki ten po translokacji do jądra komórkowego oddziałuje z DNA, co skutkuje śmiercią komórki. Proces ten zachodzi najczęściej w neuronach i może mieć związek z różnymi chorobami neurodegeneracyjnymi. Dokładne poznanie śmierci komórkowej zależnej od PARP-1, jest niezbędne do opracowania nowych i skutecznych środków terapeutycznych.

1. Wstęp

Śmierć komórek może nastąpić na wiele sposobów. Najczęstszymi i najlepiej poznanymi rodzajami śmierci komórkowej są apoptoza oraz nekroza. Apoptoza jest czynną oraz zaprogramowaną śmiercią komórki, w przeciwieństwie do nekrozy, która jest procesem biernym i niekontrolowanym. Specyficznym rodzajem śmierci komórkowej, który w znacznej mierze różni się od w/w procesów jest parthanatos. Nazwa „parthanatos” została zainspirowana grecką personifikacją śmierci – *thanatos*. Proces ten został pierwszy raz zaobserwowany przez Nathana Bergera (Berger i in. 1983). Początkowe badania sugerowały, że ten rodzaj śmierci komórkowej zachodzi głównie w wyniku redukcji NAD⁺ oraz ATP w komórce. Późniejsze badania wykazały, że proces ten jest bardziej złożony. Parthanatos jest śmiercią komórkową zależną ściśle od polimerazy poli-(ADP-rybozy) (PARP-1, *ang. poly(ADP-ribose) polymerase 1*) oraz czynnika indukującego apoptozę (AIF, *ang. apoptosis inducing factor*) (Fatokun i in. 2014; Nirmala i Lopus 2020).

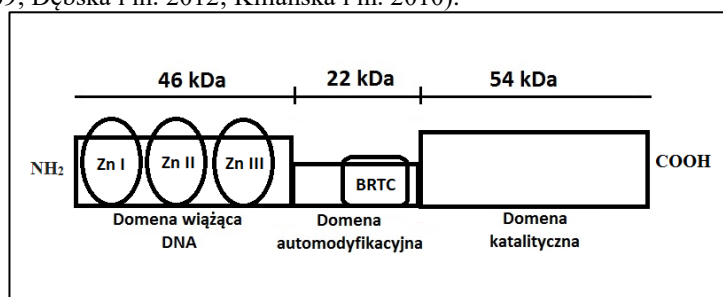
PARP-1 jest najlepiej poznaną polimerazą należącą do grupy białek PARP. Czynnikiem aktywującym PARP są uszkodzenia DNA. Aktywny enzym katalizuje przyłączenie łańcuchów poli(ADP-rybozy) (PAR, *ang. poly(ADP-ribose)*) do białek histonowych, zaznaczając miejsce uszkodzenia i przyczyniając się do rekrutacji maszynarii naprawczej DNA. Ponadto, pozwala na precyzyjną kontrolę procesów takich jak, apoptoza, proliferacja oraz transkrypcja. Reakcja przyłączenia ogonów polimerowych struktur PAR do docelowych makromolekuł nazywana jest poli-ADP-rybozylacją (Fatokun i in. 2014; Nirmala i in. 2020).

Nadmierna aktywność białka PARP-1, może spowodować akumulację polimerów PAR. Wówczas cząsteczki PAR są transportowane z jądra komórkowego do mitochondrium, gdzie aktywowany jest czynnik indukujący apoptozę (AIF). W wyniku translokacji AIF z mitochondrium do jądra komórkowego wyzwalana jest śmierć komórkowa zależna od PARP-1 - parthanatos (Fatokun i in. 2014; Nirmala i Lopus 2020).

W pracy przedstawiono charakterystykę polimerazy PARP-1, opisano przebieg procesu parthanatos oraz wskazano znaczenie tego mechanizmu w rozwoju chorób neurodegeneracyjnych.

2. Aktywność biologiczna PARP-1

Polimerazy poli(ADP-rybozy) (PARP, *ang. poly(ADP-ribose) polymerases*) są kluczowymi enzymami, biorącymi udział w naprawie DNA. W genomie człowieka zidentyfikowano 17 genów kodujących białka z rodziny PARP. Ze względu na różnice w lokalizacji i odmienne funkcje produktów tych genów można wyróżnić trzy grupy PARP. Dotychczas najlepiej poznana jest PARP-1, która odgrywa ważną rolę w naprawie uszkodzeń DNA. Białko to zbudowane jest z trzech domen (Rys.1). Pierwsza nazywana jest domeną wiążącą DNA. Posiada trzy palce cynkowe, które umożliwiają interakcję typu białko-białko oraz przyczyniają się do aktywacji PARP-1 w wyniku rozpoznania uszkodzenia DNA. Odmianą funkcję pełni domena automodyfikacyjna charakteryzująca się obecnością regionu BRTC (C-końcowa domena białka BRCA1). Obszar ten pełni dwie podstawowe role: ulega automodyfikacji poprzez przyłączenie łańcuchów PAR, co skutkuje aktywacją enzymu, a także odpowiada za oddziaływania PARP-1 z innymi białkami systemów naprawczych DNA. Miejsce akceptorowe dla dinukleotydu nikotynoamidowego (NAD⁺, *ang. nicotinamide adenine dinucleotide*) zawarte jest w obrębie trzeciej z domen - domeny katalitycznej. W procesie ADP-rybozylacji, NAD⁺ jest dawcą ADP-rybozy. Modyfikacja ta polega na ciągłym przyłączaniu kolejnych monomerów ADP-rybozy, do momentu wytworzenia wydłużonych lub rozgałęzionych łańcuchów PAR. Utrzymanie prawidłowego poziomu cząsteczek PAR w komórkach jest możliwe, dzięki glikohydrołazie poli-ADP-rybozy (PARG, *ang. poly(ADP-ribose) glycohydrolase*). Enzym ten umożliwia usuwanie monomerów ADP-rybozy z łańcuchów PAR (David i in. 2009; Dębska i in. 2012; Kiliańska i in. 2010).



Rys. 1. Schemat budowy białka PARP-1 (Dębska i in. 2012; Fatokun i in. 2014; Kiliańska i in. 2010).

PARP-1 pełni istotną funkcję w regulacji replikacji DNA. Największą aktywność tej polimerazy wykryto w fazie S cyklu komórkowego w trakcie której następuje podwojenie materiału genetycznego komórki. PARP-1 bierze udział w detekcji uszkodzeń w widełkach replikacyjnych oraz rekrutuje białko MRE11 (nukleaza biorąca udział w naprawie dwuniciowego pęknięcia DNA). W ten sposób następuje inicjacja naprawy DNA w uszkodzonych widełkach. Po naprawie uszkodzenia, replikacja może przebiegać prawidłowo. Znaczna aktywność PARP-1 w fazie S jest najprawdopodobniej spowodowana akumulacją jednoniciowych fragmentów DNA, powstałych w wyniku replikacji tzw. fragmentów Okazaki. Polimeraza PARP-1 sprawnie wykrywa te fragmenty i inicjuje naprawę powstałych pęknięć jednoniciowych (Wang i in. 2019).

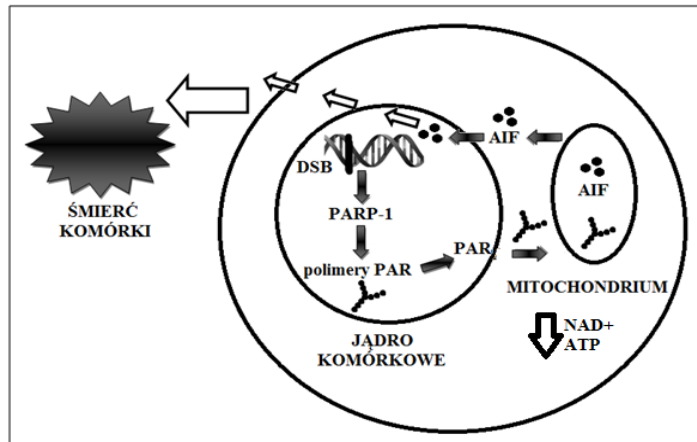
Rola PARP-1 w naprawie DNA została dobrze scharakteryzowana w szlaku wycinania uszkodzonych zasad azotowych (BER, *ang. base excision repair*). Białka należące do systemu BER biorą udział w naprawie jednoniciowych pęknięć DNA (SSBs, *ang. single-strand breaks*). SSBs powstają najczęściej na skutek uszkodzeń alkilacyjnych zasad azotowych. PARP-1 biorą udział w rozpoznaniu powstałej przerwy w DNA. Polimeraza PARP ulega automodyfikacji, dzięki której rekrutuje kompleks naprawczy PLX (PARP-1, *ang. poly(ADP-ribose) polymerase 1*, DNA ligase III, XRCC1, *ang. X-ray repair cross complementing 1*). Dzięki niemu uszkodzenie DNA może zostać naprawione. Ponadto PARP-1 odgrywa rolę w regulacji struktury chromatynej przyczyniając się do utworzenia struktury otwartej, dostępnej dla białek naprawczych. PARP1 może tworzyć wiązania niekowalencyjne z zasadowymi histonami, które posiadają większe powinowactwo do PAR niż DNA. Szczególny pod tym względem jest histon H4. Modyfikacja białek histonowych może wpływać na rozluźnienie struktury chromatynej, a w konsekwencji może ułatwiać dostęp kompleksów

naprawczych do DNA. Nieskuteczna naprawa SSBs jest poważnym zagrożeniem dla komórki. Akumulacja pęknięć jednoniciowych w DNA może doprowadzić do powstania pęknięć dwuniciowych (DSBs, *ang. double-strand breaks*), a następnie do uruchomienia procesu prowadzącego do śmierci komórkowej. Istnieją jednak szlaki naprawy, które w pierwszej kolejności starają się usunąć przerwę w podwójnej nici DNA. Są to dwa główne systemy naprawcze: naprawa przez rekombinację homologiczną (HRR, *ang. homologous recombination repair*) oraz niehomologiczne łączenie końców (NHEJ *ang. non-homologous end joining*). HRR działa głównie w fazie S i G2 cyklu komórkowego, ponieważ wtedy jest możliwość uzyskiwania homologicznej cząsteczki DNA, niezbędnej do naprawy. W fazach G0 oraz G1 cyklu preferowana jest natomiast naprawa na drodze NHEJ. W obu tych szlakach PARP-1 rozpoznaje DSBs oraz rozluźnia chromatynę w celu zapewnienia białkom naprawczym łatwiejszego dostępu do uszkodzenia. Polimeraza PARP-1 może również promować proces HRR. Polimeraza PARP-1 rozpoznaje miejsce uszkodzenia i wiąże się z nim. Następnie dochodzi do automodyfikacji enzymu, co skutkuje rekrutacją nukleazy MRE11 do miejsca uszkodzenia. Aktywność białka MRE11 jest niezbędna do wytworzenia jednoniciowego, krótkiego fragmentu od strony 3' DNA. Powstający jednoniciowy odcinek DNA przyczynia się do odmiennej dynamiki końców DNA do których nie mogą przyłączyć się białka KU70/KU80, lub w momencie przyłączenia w/w białek skutkuje ich odłączeniem. Dzięki temu procesowi, rozpoczyna się naprawa HR oraz rekrutacja białek niezbędnych do tej naprawy. Białka KU70/KU80 (XRCC6, *ang. X-ray repair cross complementing 6 / XRCC5*, *ang. X-ray repair cross complementing 5*) są niezbędne do aktywacji szlaku NHEJ. Przyłączają się do wolnych końców DNA, powstałych w wyniku uszkodzenia. Umożliwia to rekrutację kompleksów naprawczych niezbędnych w naprawie NHEJ. PARP-1 może stymulować aktywność DNA-PKcs (*ang. DNA-dependent protein kinase, catalytic subunit*). Za odłączenie łańcuchów poli-ADP-rybozy od białek naprawczych odpowiedzialna jest glikohydrolaza poli(ADP-rybozy) - PARG. Białko te reguluje poziom PAR w komórce. Nadmierna akumulacja łańcuchów PAR może doprowadzić do śmierci komórkowej zależnej od PARP-1 – parthanatos (Dębska i in. 2012, Kiliańska i in. 2010; Wang i in. 2009; Wang i in. 2019)

3. Parthanatos

Proces parthanatos można podzielić na kilka podstawowych etapów: nadmierną aktywację PARP-1, akumulację polimerów PAR, wyczerpanie komórkowych zasobów NAD⁺ oraz ATP, depolaryzacje błony mitochondrialnej, uwolnienie czynnika indukującego apoptozę - AIF z mitochondrium, translokację AIF do jądra komórkowego, fragmentację DNA oraz śmierć komórki. PARP-1 jest aktywowany w warunkach stresowych np. w wyniku wystąpienia uszkodzeń DNA (Rys. 2). Niewielkie uszkodzenia powodują fizjologiczną ekspresję PARP-1 oraz niezaburzony proces naprawy DNA. W wyniku rozległych uszkodzeń DNA dochodzi do nadmiernej ekspresji PARP-1, redukcji NAD⁺, akumulacji PAR, a w konsekwencji do śmierci komórki. Polimeraza wiąże się z miejscem uszkodzenia i wykorzystuje NAD⁺ do czerpania monomerów ADP-rybozy. Polimerowe struktury PAR przyłączane są do miejsca uszkodzenia, białek naprawczych oraz enzymu samego w sobie. Nadmierna ekspresja PARP-1 powoduje akumulację PAR, co skutkuje aktywacją ekspresji czynnika indukującego apoptozę w mitochondriach. Pierwotnie AIF zostało zakwalifikowane do białek, które są ściśle powiązane z mitochondriami. W ostatnim czasie odkryto, że czynnik indukujący apoptozę ulega przemieszczeniu z mitochondrium do jądra komórkowego i wywołuje fragmentację DNA. Mechanizm uwolnienia AIF z mitochondrium nie jest jeszcze do końca poznany. Najprawdopodobniej proces ten zachodzi dwuetapowo. Pierwszym etapem jest zmiana potencjału błony mitochondrialnej i otwarcie mitochondrialnego mega kanału - MPTP, który staje się przepuszczalny dla cząsteczek AIF. Redukcja NAD⁺ prowadzi do nieprawidłowego przebiegu glikolizy, cyklu Krebsa i szlaku pentozofosforanowego, co prowadzi do upośledzenia produkcji ATP oraz NAD⁺. Obniżenie poziomu NAD⁺ i ATP może powodować depolaryzację błony mitochondrialnej, a w konsekwencji uwolnienie AIF do cytoplazmy. Drugi etap obejmuje bezpośrednie oddziaływanie cząsteczek PAR z AIF. PAR może wiązać się z AIF poprzez domenę D3 tego białka, co może ułatwiać przemieszczenie AIF z mitochondrium do jądra komórkowego. W jądrze komórkowym AIF wiąże się z DNA i powoduje jego fragmentację, co skutkuje śmiercią

komórki. Można stwierdzić, że AIF jest białkiem efektorowym śmierci komórki, PARP-1 inicjatorem, a PAR cząsteczką sygnałową, która aktywuje ekspresję i translokację AIF z mitochondrium do jądra komórkowego. Należy jednak zaznaczyć, że hiperaktywacja PARP-1 nie zawsze prowadzi do śmierci komórki (Andrabi i in. 2008; Greenwald i Pierce 2019; Pazzaglia i Pioli 2019; Tang i in. 2019; Wang i in. 2009; Zhou i in. 2020).



Rys. 2. Schemat parthanatos (Fatokun i in. 2014; Robinson i in. 2019).

Wykazano, że śmierć komórek zależna od PARP-1 jest związana z patogenezą wielu chorób, głównie neurodegeneracyjnych. Określenie roli jaką parthanatos pełni w patogenezie chorób, może być pomocne w opracowaniu nowych celowanych terapii. Początkowy etap parthanatos, czyli nadekspresja PARP-1 przyczynia się do rozwoju chorób neurodegeneracyjnych poprzez gromadzące się uszkodzenia mitochondriów, wpływ na ekspresję genów i poprzez interakcję z różnymi białkami jądrowymi (Park i in., 2020; Wang i Ge, 2020). Przykładem może być interakcja PARP-1 oraz PAR ze zwłóknioną alfa-synukleina (α -syn, ang. *alpha-synuclein*), która bierze udział w patogenezie choroby Parkinsona (PD, ang. *Parkinson's Disease*). Badania wykazały, że akumulacja cząsteczek PAR wzmacnia toksyczność zwłóknionej α -syn w PD, a następnie prowadzi do hiperaktywacji białka PARP-1 tworząc niekorzystny cykl, którego skutkiem jest śmierć neuronów. Ponadto, u pacjentów z PD wykryto podwyższone stężenie PAR w płynie mózgowo rdzeniowym. Dowody te wskazują na dominującą rolę parthanatos w patogenezie choroby Parkinsona (Kam i in. 2018). Rola parthanatos w chorobie Huntingtona (HD, ang. *Huntington's Disease*) nie jest do końca poznana. Wiadomo jednak, że śmierć komórek zależna od PARP-1 ma większe znaczenie w patogenezie tej choroby niż np. apoptoza. Parthanatos jest śmiercią komórkową niezależną od kaspaz, ale zależną od PARP-1. W neuronach pacjentów z chorobą Huntingtona wykazano silną aktywność PARP-1, a słabą kaspazy-3. Wyniki pokazują, że apoptoza nie ma dużego wpływu na patogenezę choroby Huntingtona (Park i in. 2020; Wang i Ge 2020). Niekorzystne działania parthanatos jest również obserwowane u pacjentów z chorobą Alzheimera (AD, ang. *Alzheimer's Disease*). AD jest chorobą w której dochodzi do akumulacji toksycznych beta amyloidów ($A\beta$). Niekorzystnie działające $A\beta$ powoduje nagromadzenie reaktywnych form tlenu (RFT ang. *reactive oxygen species*), które powodują uszkodzenia DNA. Prowadzi to do nadmiernej aktywacji PARP-1 w odpowiedzi na uszkodzenia oraz śmierci neuronów i astrocytów na drodze parthanatos (Saleh i in. 2020).

Poznanie roli parthanatos w poszczególnych chorobach neurodegeneracyjnych, pozwoliło opracować liczne terapie. Większość z nich jest ciągle w fazie eksperymentalnej, jednak badania przynoszą bardzo optymistyczne wyniki. Badane jest wykorzystanie inhibitorów PARP-1 w tym nikotynamidu w leczeniu choroby Alzheimera. Leczenie to ma zahamować aktywację PARP-1, przez co ma zapobiec śmierci komórek nerwowych oraz dysfunkcji mitochondriów (Saleh i in. 2020). Badane są również związki mogące prowadzić do degradacji cząsteczek PAR. Przykładem może być iduna, która jest ligazą E3 ubikwityny (UBL, ang. *ubiquitin ligase E3*), mająca zdolność ubikwitynacji PAR (Kang i in. 2011). Powoduje to ich degradację, a co za tym idzie hamuje

parthanatos komórek. Obiecującym celem terapeutycznym w chorobach neurodegeneracyjnych jest również AIF. Inhibicja translokacji AIF z mitochondrium do jądra komórkowego może prowadzić do zatrzymania parthanatos na tym etapie procesu (Park i in. 2020).

Celowa indukcja parthanatos może być wykorzystywane do leczenia wielu chorób nowotworowych (Wang i Ge 2020). Badania wykazały, że indukcja parthanatos w komórkach nowotworowych glejaka jest obiecującą formą terapii przeciwnowotworowej (Ma i in. 2016). Aktywność PARP-1 w komórkach glejaka jest większa niż w neuronach. Aktywność ta jest również skorelowana ze stopniem złośliwości tego nowotworu, a tym samym z rokowaniem pacjentów. Badania pokazują, że śmierć komórek glejaka w procesie parthanatos może być indukowana przez podofilotoksynę, związek pochodzenia roślinnego, dzięki jego zdolności do indukcji RFT (Ma i in. 2016). Konieczne jest jednak dokładniejsze poznanie procesu parthanatos, tak aby proces ten selektywnie wywołać w komórkach nowotworowych z jednoczesnym oszczędzeniem komórek prawidłowych, których śmierć mogłaby nieść niekorzystne konsekwencje dla funkcjonowania organizmu (Ma i in. 2016; Wang i Ge 2020).

4. Podsumowanie

Parthanatos to wieloetapowy i skomplikowany proces. Wyróżnia go kilka podstawowych cech: niezależność od kaspaz, aktywacja PARP-1, akumulacja cząsteczek PAR, depolaryzacja błony mitochondrialnej oraz translokacja AIF z mitochondrium do jądra komórkowego. W jądrze AIF powoduje fragmentację DNA, co skutkuje śmiercią komórki. Parthanatos odgrywa ważną rolę w patogenezie chorób neurodegeneracyjnych. Proces ten odpowiedzialny jest za śmierć komórek nerwowych m.in. w chorobie Parkinsona, Huntingtona oraz Alzheimer. Trwają badania nad wykorzystaniem inhibitorów poszczególnych etapów parthanatos, jako potencjalnych środków terapeutycznych. Wyniki eksperymentów wydają się bardzo obiecujące. Śmierć komórek zależna od PARP-1 może być również wykorzystana w leczeniu nowotworów. Szczególnie obiecujące są próby wywołania parthanatos w komórkach glejaka. Szczegółowe poznanie tego procesu może być pomocne w opracowaniu potencjalnych form leczenia różnych chorób (David i in. 2009; Fatokun i in. 2014; Wang i Ge 2020)

5. Literatura

- Andrabi SA, Dawson TM, Dawson VL (2008) Mitochondrial and nuclear cross talk in cell death: parthanatos. *Ann N Y Acad Sci.* 1147:233-41.
- Berger NA, Sims JL, Catino DM, et al. (1983) Poly(ADP-ribose) polymerase mediates the suicide response to massive DNA damage: studies in normal and DNA-repair defective cells. *Princess Takamatsu Symp.* 13:219-26.
- David KK, Andrabi SA, Dawson TM, et al. (2009) Parthanatos, a messenger of death. *Front Biosci (Landmark Ed).* 14:1116-28.
- Dębska S, Kubicka J, Czyżykowski R i in. (2012) Inhibitory PARP-podstawy teoretyczne i zastosowanie kliniczne. *Postepy Hig Med Dosw (Online).* 66:311-21.
- Fatokun AA, Dawson VL, Dawson TM (2014) Parthanatos: mitochondrial-linked mechanisms and therapeutic opportunities. *Br J Pharmacol.* 171(8):2000-16.
- Greenwald SH, Pierce EA (2019) Parthanatos as a Cell Death Pathway Underlying Retinal Disease. *Adv Exp Med Biol.* 1185:323-327
- Kam TI, Mao X, Park H, et al. (2018). Poly(ADP-ribose) drives pathologic α -synuclein neurodegeneration in Parkinson's disease. *Science (New York, N.Y.).* 362(6414),
- Kang HC, Lee YI, Shin JH, et al. (2011) Iduna is a poly(ADP-ribose) (PAR)-dependent E3 ubiquitin ligase that regulates DNA damage. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 108(34):14103-14108.
- Kiliańska ZM, Zołnierczyk J, Wesierska-Gadek J. (2010) Biologiczna aktywność polimerazy poli(ADP-rybozy)-1. *Postepy Hig Med Dosw (Online).* 64:344-63.
- Ma D, Lu B, Feng C, et al. (2016) Deoxypodophyllotoxin triggers parthanatos in glioma cells via induction of excessive ROS. *Cancer Lett.* 371(2):194-204.

- Nirmala JG, Lopus M (2020) Cell death mechanisms in eukaryotes. *Cell Biol Toxicol.* 36(2):145-164.
- Park H, Kam TI, Dawson TM, Dawson VL (2020) Poly (ADP-ribose) (PAR)-dependent cell death in neurodegenerative diseases. *Int Rev Cell Mol Biol.* 353:1-29.
- Pazzaglia S, Pioli C (2019) Multifaceted Role of PARP-1 in DNA Repair and Inflammation: Pathological and Therapeutic Implications in Cancer and Non-Cancer Diseases. *Cells.* 9(1):41.
- Saleh F, Ponce DP, Paula-Lima AC, et al. (2020) Nicotinamide, a Poly [ADP-Ribose] Polymerase 1 (PARP-1) Inhibitor, as an Adjunctive Therapy for the Treatment of Alzheimer's Disease. *Front Aging Neurosci.* 12:255.
- Tang D, Kang R, Berghe TV, et al. (2019) The molecular machinery of regulated cell death. *Cell Res.* 29(5):347-364.
- Wang X, Ge P (2020) Parthanatos in the pathogenesis of nervous system diseases. *Neuroscience.* 449:241-250.
- Wang Y, Dawson VL, Dawson TM (2009) Poly(ADP-ribose) signals to mitochondrial AIF: a key event in parthanatos. *Exp Neurol.* 218(2):193-202.
- Wang Y, Luo W, Wang Y (2019) PARP-1 and its associated nucleases in DNA damage response. *DNA Repair (Amst).* 81:102651.
- Zhou Y, Liu L, Tao S, et al. (2020) Parthanatos and its associated components: Promising therapeutic target for cancer. *Pharmacol Res.* 7:105299.

8. Biosurfaktanty w przemyśle spożywczym

Biosurfactants in food industry

Rekiel Edyta

Katedra Zjawisk Międzyfazowych, Instytut Nauk Chemicznych, Wydział Chemii, Uniwersytet Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie

Opiekun naukowy: prof. dr hab. Anna Zdziennicka

Rekiel Edyta: edyta.rekiel@poczta.umcs.lublin.pl

Słowa kluczowe: biosurfaktanty, przemysł spożywczy, biofilm

Streszczenie

Syntetyczne surfaktanty wykorzystywane są w niemal każdym przemyśle prowadzącym produkcję na wysoką skalę, będąc dodatkami polepszającymi rozpuszczalność innych substancji, dyspergatorami, emulgatorami czy związkami wpływającymi na zwilżalność różnych powierzchni. Zbudowane z części hydrofilowej (głowa) i hydrofobowej (ogon), stanowią nieodzowny element życia codziennego, wchodząc w skład kosmetyków, farmaceutyków czy dodatków do żywności (np. jako konserwanty). Ze względu na ich wysokie zużycie, surfaktanty pojawiają się coraz częściej w środowisku naturalnym, zagrażając ekosystemom, ich florze i faunie, czy wodom powierzchniowym. Część tych substancji może powodować alergie i zalega w otaczającym człowieka środowisku stanowiąc toksyczną i nie ulegającą biodegradacji przeszkodę dla roślin i zwierząt. Biosurfaktanty to związki powierzchniowo czynne o właściwościach podobnych, a nawet lepszych od klasycznych, syntetycznych surfaktantów. Producenci coraz częściej sięgają po ekologiczne alternatywy dla syntetycznych związków powierzchniowo czynnych. Biosurfaktanty są substancjami pochodzenia naturalnego, produkowanymi przez mikroorganizmy, tj. bakterie, grzyby oraz drożdże. Zdolność do produkcji biosurfaktantów wykazują również niektóre rośliny i zwierzęta morskie. Duża ilość gatunków produkujących naturalne substancje aktywne powierzchniowo jednocześnie wytwarza odpowiednie enzymy do ich usunięcia, łatwo ulegając biodegradacji.

1. Wstęp

Dodatki do żywności nie posiadają wartości odżywczych, a ich funkcją jest modyfikowanie cech chemicznych, fizycznych, biologicznych czy tych związanych z reakcją ludzkich zmysłów podczas przetwarzania, przy-gotowywania, obróbki, pakowania, przechowywania i transportowania produktów spożywczych. Podstawową zasadą dotyczącą takich substancji jest bezpieczeństwo ich wykorzystania. Wiele dodatków do żywności oraz konserwantów musi przejść odpowiednią ewaluację toksykologiczną, w której pod uwagę bierze się ich zdolność do akumulacji, efekt synergistyczny i ochronę zdrowia. Dodatki do żywności pozwalają na stabilizację produktu, jego zagęszczenie czy żelowanie, a także na jego emulgację (Sharma 2016). Korzystne jest również, aby składniki dodawane do produktu miały zagregowaną wartość odżywczą, która sprawia, że jest on bardziej atrakcyjny dla konsumentów. Ta wartość odżywcza jest związana z procentową zawartością wielonasyconych kwasów tłuszczowych, np. kwasu linolenowego (ALA), kwasu eikozapentaenowego (EPA) czy kwasu dokozaheksaenowego (DHA). Wysoka zawartość 18-węglowych kwasów podnosi tym samym wartość odżywczą produktu, gdyż są to składniki niezbędne dla prawidłowego funkcjonowania organizmu człowieka (Ribeiro i in. 2020).

Przykładami związków, które stosowane są w przemyśle spożywczym na szeroką skalę są monostearnian gliceryny (środek przeciwzbrylający, emulgator, zagęstnik, konserwant) oraz karboksymetyloceluloza (oznaczana w przemyśle spożywczym symbolem E466; używana jako zagęstnik). Pomimo wydajności, ich zużycie jest stale ograniczane ze względu na rosnącą świadomość konsumencką i coraz większą popularność składników pochodzenia naturalnego (Campos i in. 2013). Biosurfaktanty stają się potencjalnymi związkami pozwalającymi zastępować związki syntetyczne. Ich zdolność do obniżania napięcia powierzchniowego i emulgowania olejów

jadalnych, właściwości antybakteryjne oraz i antyadhezyjne w przypadku biofilmów bakteryjnych sprawiają, że związki te cieszą się coraz szerszym zainteresowaniem w przemyśle spożywczym oraz przy zapobieganiu kontaminacji obszarów przetwórstwa żywności (Sharma 2016).

2. Opis zagadnienia

Przemysł spożywczy wymaga surowej kontroli wykorzystywanych substancji. Ze względu na rosnącą świadomość konsumencką, producenci coraz częściej sięgają po związki pochodzenia naturalnego, np. roślinnego. Przykładami takich substancji są lecytyna i guma arabska. Niestety, ich obecność w formulacjach ma pewne ograniczenia w przypadku gotowania za pomocą mikrofal czy naświetlania (Campos i in. 2013). Biosurfaktanty pochodzące od mikroorganizmów są uznawane za nowe związki, które można wykorzystać w przemyśle spożywczym ze względu na ich wyróżniającą się strukturę oraz właściwości (Sharma 2016). Głównym powodem przetwarzania żywności jest nie tylko zapewnienie bezpieczeństwa jego spożywania w terminach późniejszych od daty produkcji, ale również nadanie spożywanemu jedzeniu wyglądu, smaku i zapachu zbliżonego do świeżo przygotowanej potrawy. Ze względu na dużą dostępność różnego rodzaju jedzenia i jego zaopatrywania, przetwarzanie żywności ma na celu wykorzystanie odpowiednich substancji, które utrzymują właściwości i jakość produktu końcowego. Żywność, która nie ma odpowiedniego smaku, odpowiedniego wyglądu czy też nie ma przyjemnego zapachu, nie zostanie spożyta, a w konsekwencji, nie zostanie sprzedana. Dodatki do żywności stają się więc niezbędnymi składnikami również pod kątem komercyjnym (Ranasalva i in. 2014). Odkrycie nowych bakteryjnych polisacharydów i surfaktantów w połączeniu z chęcią zmniejszenia zużycia emulgatorów roślinnych otrzymywanych na drodze modyfikowania genetycznego (GMO), np. soi oraz wykorzystanie właściwości przeciwutleniających, przeciwadhezyjnych, antybakteryjnych i pozwalających na zaburzanie ciągłości filmu bakteryjnego, sprawia, że biosurfaktanty cieszą się ogromnym zainteresowaniem. Nie tylko są one nowym naturalnym i alternatywnym źródłem związków amfifilowych, ale również pozwalają na zwiększanie zaawansowania produkcji spożywczej. Różnorodność struktur pozwala na odpowiednią selekcję związków o właściwościach odpowiednich dla danego zastosowania (Campos i in. 2013).

Przemysł przetwórstwa żywności może wykorzystać biosurfaktanty na dwa sposoby: 1) do ich pośredniego użycia w oczyszczeniu i czyszczeniu powierzchni, które mają kontakt z żywnością, 2) do bezpośredniego zastosowania jako dodatek do żywności. Co więcej, alternatywą może być również wykorzystanie odpadów poprodukcyjnych przemysłu spożywczego jako substratów do produkcji biosurfaktantów, co znacznie przyczyniłoby się do waloryzacji tych odpadów, a także obniżyłoby koszty ich przetwarzania (Nitschke i Silva 2018).

Biofilm jest heterogeniczną wspólnotą mikroorganizmów, osadzoną w wewnątrzkomórkowej matrycy polimerowej (EPM), która może przylegać do powierzchni biotycznej lub abiotycznej, w której komórki mają dobre warunki do wzrostu (Nitschke i Silva 2018). Ich przeżywalność i użyteczność „dla wyższego dobra” zależy od wskaźnika przeżywalności – stopnia szybkości ulegania odpowiednim mutacjom i szybkości wymieniania informacji zapisanej w genach. Istnieje przypuszczenie, iż wysoka odporność biofilmów na antybiotyki wynika właśnie z tempa jego mutacji. Wpływ na to ma również poziom tlenu oraz składników odżywczych obecnych w niskich warstwach bakteryjnego biofilmu. Niska aktywność metaboliczna powoduje również niską odpowiedź na antybiotyki, a zmiany pH w poszczególnych warstwach biofilmu mogą powodować kumulację kwasów organicznych. Kwasy te pozwalają na deaktywację związków, które mogą zagrażać jedności biofilmu. Co więcej, biofilmy, które zawierają więcej niż jeden gatunek bakterii mają tendencję do bycia jeszcze bardziej odpornymi na antybiotyki (Algburi i in. 2016). Tworzenie biofilmu następuje stopniowo, dynamicznie i sekwencyjnie, obejmując adhezję biofilmu, jego dojrzewanie i ewentualną dyspersję. Jego rozwój w środowiskach związanych z przetwarzaniem żywności powoduje pogorszenie jakości wytwarzanych produktów i zagraża również zdrowiu publicznemu. Biofilm nie tylko stwarza poważne problemy dla poszczególnych operacji w procesie produkcji żywności, ale również powoduje degradację produktów. Obecność takich patogenów jak *Listeria monocytogenes*, *Escherichia coli* czy rodzaj *Salmonella* może prowadzić do przenoszenia poważnych chorób. Chemiczne środki odkażające są mniej skuteczne przy usuwaniu biofilmów.

Minimalizacja ich tworzenia jest niezbędna, a biosurfaktanty mogą zostać wykorzystane do zapobiegania, hamowania oraz usuwania mikroorganizmów w 'kolonii' bakteryjnej. (Nitschke i Silva 2018). Rossi i współpracownicy (Rossi i in. 2016) odkryli, że biosurfaktant wytwarzany przez *Salmonella enteritidis* SE86 przyczynia się do adhezji oraz odporności mikroorganizmu na środki odkażające. Bakteria ta zainfekowała liście sałaty, a biosurfaktant odgrywał rolę fizjologiczną w zakażeniu patogenem. Jednakże, ten sam biosurfaktant, który może służyć jako czynnik kolonizacyjny dla określonego mikroorganizmu, może również zapobiegać lub opóźniać kolonizację innego. Niektóre badania udowodniły, że biosurfaktanty wykazywały właściwości antyadhezyjne wobec patogenów przenoszonych przez żywność. Inne badania, np. przeprowadzone przez Shakerifarda i współpracowników (Shakerifard i in. 2009) wykazały iż ituryna i surfaktyna zmniejszyły adhezję *Bacillus cereus* do stali nierdzewnej oraz teflonu. Potraktowanie tych powierzchni roztworem biosurfaktantów wpłynęło na ich hydrofobowość i tym samym zdolność komórek bakteryjnych do adhezji (Nitschke i Silva 2018). Biosurfaktanty nie muszą być jednak wykorzystywane jedynie jako środki antibakteryjne i zapobiegające biofilmom bakteryjnym. Naturalne związki powierzchniowo czynne mogą zostać dodane do materiałów, z których wykonuje się opakowania produktów spożywczych. Badania nad takimi opakowaniami przeprowadzono na mieszaninie alkoholu poliwinylowego (PVA) oraz biosurfaktantów produkowanych przez szczep *Lactobacillus rhamnosus*. Wykazano zmniejszoną adhezję bakterii, a także wpływ PVA na masę cząsteczkową (Abdul i in. 2014). W innym badaniu zaadsorbowano rhamnolipidy na powierzchni filmów polipropylenowych, które wcześniej poddano działaniu tlenu i plazmy powietrznej. Tak przygotowana powierzchnia wykazywała zmniejszoną adhezję dla bakterii Gram+ oraz Gram- (Hajfarajollah i in. 2015).

Emulsje spożywcze to bardzo złożone składem układy zawierające dwie niemieszające się ze sobą cieczce (np. oleju i wody), gdzie jedna z takich cieczy stanowi fazę rozproszoną (olejowa), druga – fazę rozpraszająca (wodna) (Bortnowska 2011). Podstawowym zadaniem emulsji w układach spożywczych jest zapewnienie odpowiedniej konsystencji oraz tekstury jedzeniu. Biosurfaktanty polimerowe są zdolne do otaczania kropelek oleju, co mogłoby wspomóc tworzenie emulsji olej-woda. Biosurfaktanty lipopetydowe produkowane przez *Bacillus subtilis* tworzą stabilne emulsje z różnego rodzaju olejami jadalnymi, np. kokosowym czy sojowym. Manoproteiny czyli biosurfaktanty produkowane np. przez gatunek *Kluyveromyces marxianus* potrafią stabilizować emulsje oleju kukurydzianego do 3 miesięcy (Sharma 2016).

Utlenianie lipidów prowadzi nie tylko do zmiany smaku produktów i powoduje ich zjełczenie, ale również zmniejsza jakość żywności oraz bezpieczeństwo jej spożywania. Do ochrony przed tym procesem, przemysł spożywczy wykorzystuje klasę substancji nazywaną antyoksydantami. Niektóre z biosurfaktantów wykazują potencjalne zastosowanie jako takie związki, między innymi surfaktanty lipopetydowe produkowane przez *Bacillus subtilis* czy lipidy mannosylerytrytolu, które wykazywały zdolność do hamowania stresu oksydacyjnego spowodowanego cząsteczkami H₂O₂ w fibroblastach skórnych (Nitschke i Silva 2018).

Biosurfaktanty okazują się również dobrymi emulgatorami dla majonezu oraz sosów sałatkowych. Campos i współpracownicy (Campos i in. 2019) przeprowadzili badania nad biosurfaktantem produkowanym przez *Candida utilis*, który poprawiał stabilność oraz konsystencję sosów sałatkowych podczas mieszania ich za pomocą metalowej szpatułki po 1 miesiącu przechowywania. W przypadku obecnie wykorzystywanych dodatków do żywności, podgrzewanie czy wysokie temperatury mogą powodować zmiany w budowie ich cząsteczek. To z kolei może doprowadzić do zmian właściwości reologicznych i problemów z utrzymaniem ziarnistej struktury produktów spożywczych. Dodatek biosurfaktantów, które wykazują utrzymanie właściwości nawet w ekstremalnych temperaturach czy pH wydaje się więc obiecującą alternatywą. Istnieją również badania, w których niektóre gatunki drożdży (np. *Saccharomyces cerevisiae*) produkowały biosurfaktanty o właściwościach stabilizujących lepszych niż guma arabska, guma guar czy karboksymetyloceluloza przy zachowaniu odpowiedniej stabilności temperaturowej (Ribeiro i in. 2020).

Wypieki takie jak chleb, bułki, różnego rodzaju ciasta czy ciasteczka są znane od setek lat. Wykorzystanie biosurfaktantów w piekarnictwie miało podobną motywację jak w przypadku emulsji

typu sosy sałatkowe – usunięcie obecnie używanych dodatków do żywności i poprawienie reologii otrzymanej masy lub jej konsystencji. Przykładem biosurfaktantu, którego dodatek wpływał zarówno na konsystencję, objętość, ale również konserwację otrzymanych wypieków był rhamnolipid. Dodatek rhamnolipidów powodował ulepszenie konsystencji chleba oraz zmniejszał jego wrażliwość na namnażanie się bakterii (Ribeiro i in. 2020). Dodatek tego samego biosurfaktantu do mąki pszennej i pozwolił na uzyskanie bardziej miękkich wypieków i ogólnej, lepszej jakości produktu w porównaniu do wykorzystywanego komercyjnie monostearynianu gliceryny (Mnif i in. 2012). Dodatek biosurfaktantu lipopetydowego produkowanego przez rodzaj *Nesterenkonio* do ciasta na babeczki (muffiny) zmniejszał jego twardość (Kiran i in. 2017). Przeprowadzono również badania, w których biosurfaktant glikolipidowy częściowo lub całkowicie zastępował żółtko jaja w cieście (Ribeiro, Guerra, Sarubbo 2020).

Część autorów wspomina możliwość wykorzystania biosurfaktantów jako emulgatorów do formulacji lodowych, aby poprawić ich ogólną konsystencję, konsystencję kremu oraz jakość otrzymanego produktu. Biosurfaktanty mają zdolność do ochrony właściwości fizycznych jak również do solubilizacji olejków aromatycznych dodawanych by zwiększyć intensywność smaku (Nitschke i Costa 2007). Biosurfaktanty o niskich masach cząsteczkowych są szczególnie obiecujące w zastosowaniu jako czynniki stabilizujące w lodach, ze względu na właściwości obniżające napięcie powierzchniowe i niższy czas potrzebny do uzyskania równowagi przez emulsję w porównaniu z białkami. Istnieje prawdopodobieństwo, że zastosowanie zarówno białek jak i niskocząsteczkowych biosurfaktantów może prowadzić do efektu synergistycznego (Ribeiro i in. 2020).

Istnieje kilka produktów na rynku międzynarodowym zawierających biosurfaktanty. Są to, między innymi, PD5R (Pendragon Holdings Ltd) sprzedawany jako dodatek do paliw opierający się na mieszaninie rhamnolipidów oraz enzymów, EC-601R (EcoChem Organics Co) skomercjalizowany jako nierozpuszczalny w wodzie dyspergator węglowodorów, produkty JBRR (Janeil Biosurfactant Company), rhamnolipidy w roztworach wodnych o różnym poziomie czystości lub w postaci półstałej, a także produkty Rhamnolipid Inc. Biosurfaktanty pochodzące od *Pseudomonas aeruginosa* są najbardziej obiecującą klasą naturalnych związków powierzchniowo czynnych, ponieważ amerykańska Agencja Ochrony Środowiska (EPA) zatwierdziła rhamnolipidy w produktach spożywczych, kosmetykach i farmaceutykach (Ranasalva i in. 2014).

3. Podsumowanie

Biosurfaktanty wydają się idealnym zamiennikiem swoich syntetycznych odpowiedników. Wykazują one niską toksyczność, podobne lub lepsze właściwości fizykochemiczne, szczególnie pod kątem obniżania napięcia powierzchniowego czy aktywności powierzchniowej, są biodegradowalne i można pozyskiwać je z surowców naturalnych. Niestety, wysokie koszty produkcji oraz problemy z optymalizacją procesów pozyskiwania tych związków, a co za tym idzie, czystością otrzymanego produktu sprawiają, że biosurfaktanty nie są alternatywą całkowicie atrakcyjną. Matryce produktów spożywczych są dość skomplikowane – zazwyczaj składają się z kilkunastu różnych składników odżywczych, np. węglowodanów, tłuszczu, lipidów, białek, błonnika, minerałów, witamin, które również w różnym stopniu ulegają procesom przetwarzania. Produkty spożywcze często podlegają homogenizacji, działaniu ultradźwiękami czy promieniami mikrofalowymi, poddaje się je obróbce termicznej, zmianom ciśnienia, pH czy ich właściwości reologicznych. Koszt wykorzystania biosurfaktantów w formulacjach spożywczych dalej stanowi bardzo poważną przeszkodę ich aplikacji. Co więcej, zaleta biosurfaktantów polegająca na odporności na zmieniające się warunki środowiskowe nie zawsze jest zaletą w procesach technologicznych, szczególnie w przemyśle spożywczym. Potrzebne są nowe, bardziej ekonomiczne strategie, które pozwolą na zmniejszenie ilości potencjalnie zużywanych biosurfaktantów a także pozwolą na zwiększenie skuteczności ich działania przy niskich stężeniach. Mimo to, biosurfaktanty wciąż posiadają ogromny potencjał do zastąpienia swoich syntetycznych odpowiedników ze względu na korzyści, które niosą dla ludzkiego zdrowia i środowiska naturalnego (Ribeiro i in. 2020).

4. Literatura

- Abdul J, Salman S, Kadhemy MFH (2014) Effect of PVA, PVA/biosurfactant on some pathogenic bacteria in glass and plastic plates. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences* 3: 301-309.
- Algburi A, Comito N, Kashtanov D i in. (2016) Control of Biofilm Formation: Antibiotics and Beyond, *Applied and Environmental Microbiology* 83 (3).
- Bortnowska G (2011) Emulsje spożywcze typu o/w – zastosowanie i zwiększenie stabilności. *Wydawnictwo SIGMA-NOT, Tom 65 nr 5: 40-42.*
- Campos JM, Stamford TL, Sarubbo LA i in. (2013) Microbial Biosurfactants as Additives for Food Industries. *Biotechnology Progress* 29 (5): 1097-1108.
- Campos JM, Stamford TLM i Sarubbo LA (2019) Characterization and application of a biosurfactant isolated from *Candida utilis* in salad dressings. *Biodegradation* 30: 313-324.
- Hajfarajollah H, Mehvari S, Habibian M i in. (2015) Rhamnolipid biosurfactant adsorption on a plasma treated polypropylene surface to induce antimicrobial and antiadhesive properties. *RSC Advances* 5: 33089-33097.
- Kiran GS, Priyadharsini S, Sajayan A i in. (2017) Production of Lipopeptide biosurfactant by a marine *Nesterenkonia* sp and its application in food industry. *Frontiers in Microbiology* 8: 1138.
- Mnif I, Besbes S, Ellouze R i in. (2012) Improvement of bread quality and bread shelf-life by *Bacillus subtilis* biosurfactant addition. *Food Science and Biotechnology* 21: 1105-1112.
- Nitschke M, Costa SGVAO (2007) Biosurfactants in food industry. *Trends in Food Science & Technology* 18: 252-259.
- Nitschke M, Silva SS (2018) Recent food applications of microbial surfactants. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 58: 631-638.
- Ranasalva N, Sunil R, Poovarasam G (2014) Importance of Biosurfactant in Food Industry. *IOSR Journal of Agriculture and Veterinary Science* 7 (5): 6-9.
- Ribeiro BG, Guerra JMC, Sarubbo LA (2020) Biosurfactants: Production and application prospects in the food industry. *Biotechnology Progress* 36: 1-16 (cytowany jako: Ribeiro i in. 2020)
- Ribeiro BG, Guerra JMC, Sarubbo LA (2020) Potential Food Application of a Biosurfactant Produced by *Saccharomyces cerevisiae* URM 6670. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology* 8: 434. (cytowany jako Ribeiro, Guerra, Sarubbo 2020).
- Rossi EM, Beilke L, Kochhann M i in. (2016) Biosurfactant produced by *Salmonella Enteritidis* SE86 can increase adherence and resistance to sanitizers on lettuce leaves (*Lactuca sativa* L., cichoraceae). *Frontiers in Microbiology* 7: 9.
- Shakerifard P, Gancel F, Jacques P i in. (2009) Effect of different *Bacillus subtilis* lipopeptides on surface hydrophobicity and adhesion of *Bacillus cereus* 98/4 spores to stainless steel and teflon. *Biofouling. The Journal of Bioadhesion and Biofilm Research* 25: 533-554.
- Sharma D (2016) Biosurfactants in Food, chapter Applications of Biosurfactants in Food. *SpringerBriefs in Food, Health, and Nutrition*. Springer International Publishing.

9. Biosurfaktanty lipopeptydowe produkowane przez bakterie – charakterystyka i zastosowanie

Lipopeptide biosurfactants produced by bacteria – characteristics and applications

Rekiel Edyta

Katedra Zjawisk Międzyfazowych, Instytut Nauk Chemicznych, Wydział Chemii, Uniwersytet Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie

Opiekun naukowy: prof. dr hab. Anna Zdziennicka

Rekiel Edyta: edyta.rekiel@poczta.umcs.lublin.pl

Słowa kluczowe: biosurfaktanty, lipopeptydy, bakterie, *Bacillus subtilis*

Streszczenie

Bakterie to organizmy jednokomórkowe, które istnieją w milionach egzemplarzy w każdym środowisku – również wewnątrz i na zewnątrz ludzkiego ciała. Duża część tych drobnoustrojów jest szkodliwa – wywołuje choroby, zapalenia, prowadzi do tworzenia się biofilmów na powierzchniach implantów czy narzędzi chirurgicznych, atakuje płody rolne. Wiele jednak odgrywa rolę pożyteczną – pozwala na prawidłowe trawienie pokarmów rozkładając składniki odżywcze takie jak, np. cukry w formę, którą organizm jest w stanie wykorzystać. Wspomagają również obieg azotu w glebie wiążąc go i uwalniając w formie niezbędnej dla przetrwania wielu roślin. Bakterie kwasu mlekowego pozwalają na odpowiednią obróbkę produktów spożywczych takich jak ser, sos sojowy, jogurty, ocet czy marynaty. Procesy fermentacyjne pozwalają na konserwację żywności oraz produkcję kiszonek, które są niezwykle zdrowe dla ludzkiego przewodu pokarmowego. Niektóre szczepy bakteryjne wyspecjalizowały się również w produkcji biosurfaktantów. Te naturalne związki powierzchniowo czynne wykazują specyficzne właściwości fizykochemiczne i wyróżniają się amfifilową budową, w której można wyróżnić część hydrofobową i hydrofilową. Ze względów ekologicznych, te produkowane przez mikroorganizmy substancje cieszą się ogromnym zainteresowaniem producentów, którzy wykorzystują je w produkcji żywności, przemyśle kosmetycznym, włókiennictwie, przemyśle farmaceutycznym czy farbiarskim. Stanowią one alternatywę dla surfaktantów klasycznych – syntetycznych, które stają się poważnym zagrożeniem dla środowiska naturalnego i są powodem wielu alergii u człowieka.

1. Wstęp

Wykorzystanie związków chemicznych w kontrolowaniu chorób zagrażających roślinom w pewien sposób zaburzyło naturalną równowagę pomiędzy mikroorganizmami zamieszkującymi glebę, a innymi niszami ekologicznymi doprowadzając do wytworzenia szczepów odpornych na dotychczasowe środki, kontaminacji wód powierzchniowych czy do zagrożeń chorobowych u człowieka. Tym samym, poszukiwane są alternatywy dla używanych związków syntetycznych, które będą przyjazne dla środowiska. Odporność bakterii na antybiotyki sprawia, że istnieje realna potrzeba wykorzystania związków antibakteryjnych, takich jak lipopeptydy w użyciu klinicznym czy związanym z konserwacją żywności. Co więcej, w 2003 roku, lipopeptydy zostały zaaprobowane przez FDA jako antybiotyki - daptomycyna była pierwszym cyklicznym lipopeptydem, który FDA dopuścił do leczenia poważnych infekcji krwi oraz skóry powodowanych przez niektóre Gram+ bakterie. W przypadku roślin, surfaktyna, fengycyna oraz ituryna były badane pod kątem antagonistycznej aktywności wobec różnych fitopatogenów (Meena i Kanwar 2015). Badanie tych związków może zezwolić na lepszą kontrolę chwastów czy owadów zagrażających plonom. Wysoka różnorodność lipopeptydów i silne właściwości antibakteryjne mogą okazać się nieocenione w walce ze skomplikowanymi układami patogenów. Zrozumienie które z nich i w jaki sposób wpływają na syntezę i produkcję związków obronnych w organizmach roślinnych jest jednym z kluczowych zagadnień współczesnej nauki o środowisku (Malviya i in. 2020)

2. Opis zagadnienia

Ze względu na ogromną różnorodność struktur chemicznych, niską toksyczność, biodegradowalność i skuteczność nawet w ekstremalnych warunkach środowiska takich jak wysokie pH, temperatura, susza, zasolenie czy stres biologiczny, biosurfaktanty są obiecującymi, przyjaznymi naturze alternatywami dla związków syntetycznych wykorzystywanych do kontroli fitopatogenów i zmniejszania ubytków produkcji rolnej (Malviya i in. 2020).

Przez wiele lat, rodzaj *Bacillus* był intensywnie wykorzystywany w badaniach biochemicznych oraz genetycznych. Wiele szczepów zostało w tym czasie wyizolowanych i wyprodukowano ogromne ilości antybiotyków. Szacuje się, że ok. 4-5% genomu *Bacillus subtilis* (synergistycznej bakterii żyjącej w korzeniach roślin motylkowych) zostało wykorzystane do produkcji formułacji farmaceutycznych (Penha i in. 2020). Wiele gatunków szczepu *Bacillus* produkuje małe peptydy z długim ugrupowaniem tłuszczowym. Często są one nazywane „antybiotykami lipopeptydowymi” (Tsuge i in. 2001), odznaczają się cykliczną strukturą oraz niską masą cząsteczkową (od 1000 do 2000 Da). Większość przedstawicieli szczepu *Bacillus* produkuje jeden typ lipopeptydów, niektóre posiadają zdolność produkcji dwóch lub trzech związków z tej grupy. Każdy taki lipopeptyd zawiera kilka homologów, w których ugrupowania aminokwasów są identyczne, ale różnią się długością kwasu tłuszczowego (Zhou i in. 2020). Lipopeptydy są syntetyzowane przez specyficzne skupiska genów (Malviya i in. 2020), a część białkowa tych związków zawiera aminokwasy (o konfiguracji D), które są produkowane nierybosomalnie przez wielofunkcyjne syntetazy peptydowe (NRPs). Na podstawie powiązań strukturalnych, lipopeptydy produkowane przez *Bacillus* są klasyfikowane w trzy grupy: a) grupę surfaktyn, b) grupę fengycyn-plipastatyn oraz c) grupę ituryn. Związki należące do surfaktyn oraz fengycyn-plipastatyn charakteryzuje budowa składająca się z β -hydroksykwasu tłuszczowego i od 7 do 10 α -aminokwasów. Grupa ituryn posiada z kolei β -aminokwas tłuszczowy oraz 7 α -aminokwasów. Obecność aminokwasu tłuszczowego jest najbardziej charakterystyczną cechą grupy ituryny A i odróżnia ją od reszty związków (Tsuge i in. 2001). Aktywność bakteriobójcza lipopeptydów wzrasta wraz z dodatkiem ugrupowania lipidowego o odpowiedniej długości (typowo C₁₀-C₁₂), a lipopeptydy zawierające większą ilość atomów węgla (14 lub 16) w ogonie lipidowym wykazują zwiększone właściwości przeciwrzybiczne dodatkowo do obecnych już właściwości antibakteryjnych (Meena i Kanwar 2015).

Istnieje kilka cyklicznych lipopeptydów, które pozwalają na bezpośrednią inhibicję rozrostu fitopatogenów i/lub stymulację oraz umacnianie układu obronnego rośliny składającego się z sieci indukowanej odporności ogólnoustrojowej (induced systemic resistance, ISR). Mogą być one dowolnie zaangażowane w trój etapowym procesie ISR: a) spostrzeżeniu elicytorów bakteryjnych, czyli związków indukujących biochemiczne reakcje obronne roślin, b) ogólnoustrojowej transdukcji czyli wprowadzeniu nowego genu do komórki przez bakteriofagi, c) ekspresji genów odpowiedzialnych za odpowiedź obronną (Malviya i in. 2020). Rośliny posiadają szereg aktywnych aparatów obronnych, które reagują odpowiednio na istniejący stres biotyczny (wywoływany przez pasożyty lub patogeny) o różnej skali (w zależności czy wywołuje go wirus lub owad). Czas tej odpowiedzi jest krytyczny, ponieważ określa czy układ obronny rośliny poradzi sobie z atakiem patogenów bądź pasożytów. Odporność indukowana to stan zwiększonej zdolności obronnej rozwijany przez roślinę na drodze odpowiedniej stymulacji. Można podzielić ją na odporność ogólnoustrojową (SAR) oraz indukowaną odporność ogólnoustrojową (ISR). W obu przypadkach, mechanizmy obronne roślin są wstępnie uwarunkowane wcześniejszym zakażeniem lub leczeniem, co pozwala na wytworzenie odpowiedniej odporności przy potencjalnym ponownym kontakcie z czynnikiem chorobotwórczym. SAR można wywoływać poprzez wystawienie rośliny na działanie zjadliwych, niezjadliwych i niepatogennych drobnoustrojów. W zależności od gatunku rośliny i elicytorów, wymagany jest odpowiedni okres czasu do ustalenia SAR, gdzie zachodzi akumulacja białek (chitynazy i glukonazy) oraz kwasu salicylowego związanych z patogenezą. ISR jest wzmacniany poprzez obecność korzeniowych rizobakterii (*Rhizobacteria*) sprzyjających wzrostowi roślin (plant-growth promoting rhizobacteria, PGPR). W przeciwieństwie do SAR, ISR nie powoduje akumulacji białek ani kwasu salicylowego, ale opiera się na szlakach regulowanych przez jasmonidy

i etylen (Choudhary i in. 2007). Do tej pory niewiele było wiadomo na temat mechanizmów na podstawie których lipopeptydy wywoływały odpowiedź ISR i aktywowały związane z nim szlaki metaboliczne. Niektóre związki mogą być składnikami budującymi powierzchnię komórki, substancjami lotnymi, metabolitami regulowanymi przez żelazo, antybiotykami lub związkami wyspecjalizowanymi do wykrywania/wyczuwania kworum (quorum sensing, QS), czyli mechanizmu „porozumiewania się” bakterii za pomocą związków chemicznych. Grupy surfaktyn oraz fengycyn działają jak elicytory ISR uzupełniając oraz wywołując odpowiedź odpornością. Niestety, niewiele jest dostępnych badań na ten temat. Wiadomo jednak, że lipopeptydy działają jak bariery chemiczne, spowalniają lub hamując kolonizację drobnoustrojów (Malviya i in. 2020).

Surfaktyny. Surfaktyna została odkryta oraz opisana przez Arimę i współpracowników (Arima i in. 1968). W jej budowie wyróżnia się pierścień peptydowy oraz łańcuch kwasu tłuszczowego, który posiada od 13 do 16 atomów węgla (Hu i in. 2019). Pierścień ten zawiera amfipatyczny cykliczny lipoheptapeptyd składający się z łańcucha Glu-Leu-Leu-Val-Asp-Leu-Leu (Glu – kwas glutaminowy, Leu – leucyna, Val – walina, Asp – kwas asparaginowy) i analogicznej chiralnej sekwencji przyłączonej między 12 a 16 węglem. Zmiany w rozmiarze oraz kolejności aminokwasów powodują również zmiany w części lipidowej, co więcej, zmiany te zależą od samego szczepu bakteryjnego, warunków wzrostu oraz składu pożywki (Malviya i in. 2020). Surfaktyna wytwarzana przez *Bacillus subtilis* jest mieszaniną izoform: A, B, C i D, które różnią się właściwościami poprzez różną długość i rozgałęzienie hydroksykwasu tłuszczowego oraz rodzaj aminokwasów budujących pierścień. Pierścień peptydowy ma charakterystyczną budowę „siodełkową”, nazywaną również β -harmonijką (Santos i in 2018). Surfaktyny oddziałują z podwójną warstwą lipidową błony komórkowej i wykazują efektywne działanie wobec bakterii Gram+ oraz Gram-. Mają również działanie antywirusowe, antygrzybiczne, a także oddziałują z komórkami nowotworowymi i zmniejszają stany zapalne poprzez reakcje z fosfolipazą A2, która jest odpowiedzialna za degradację kwasów tłuszczowych (Malviya i in. 2020).

Surfaktyna wykazuje bardzo dobre właściwości fizykochemiczne, obniża napięcie powierzchniowe wody z 72 mN m^{-1} do 27 mN m^{-1} , jest odporna na działanie temperatury oraz stabilna w dużym zasoleniu, posiada wysoką zdolność do samoorganizacji i tworzenia micel (Seydlová i Svobodová 2008). Lipopeptyd ten posiada również wiele potencjalnych zastosowań. Potrafi oddziaływać z mycoplasma oraz ma właściwości antyadhezyjne, co jest bardzo ważne w kontekście usuwania filmów bakteryjnych. Bakterie w biofilmach są bardzo odporne na działanie antybiotyków i pozostają obojętne wobec obrony immunologicznej gospodarza. Surfaktyna adsorbuje się na powierzchniach, a następnie modyfikuje ich hydrofobowość, utrudniając tym samym adhezję bakterii. Biosurfaktant ten może być potencjalnie zastosowany w medycynie przy zabezpieczeniu narzędzi chirurgicznych lub implantów (Santos i in. 2008).

Fengycyny/plipastatyny. Fengycyny to rodzina lipopeptydów produkowanych przez szczepy *Bacillus* oraz *Peanibacillus*. Strukturalnie, fengycyny składają się dekapeptydów (oligopeptydów o dziesięciu resztach aminokwasowych) połączonych z β -hydroksykwasem tłuszczowym (Malviya i in.2020). W skład pierścienia wchodzi osiem aminokwasów: Tyr-Thr-Glu-Ala-Pro-Gln-Tyr-Ile (Tyr – tyrozyna, Thr – treonina, Glu – kwas glutaminowy, Ala – alanina, Pro – prolina, Ile – izoleucyna) (Meena i Kanwar 2015). Można wyróżnić fengycynę/plipastatynę A oraz fengycynę/plipastatynę B, które różnią się między sobą aminokwasem przyłączonym w pozycji numer 6. W przypadku fengycyny/plipastatyny A jest to alanina (Ala), natomiast fengycyna/plipastatyna B ma w tym miejscu przyłączoną walinę (Val) (Malviya i in 2020). W strukturach występuje wewnętrzny pierścień laktonowy pomiędzy grupą karboksylową końcowego aminokwasu (Ile, izoleucyna) a grupą hydroksylową reszty tyrozynowej (Tyr) w pozycji 3. Fengycyny oraz plipastatyny są blisko spokrewnionymi lipodekapeptydami, w których największa różnica leży w ugrupowaniu peptydowym i pozycji D-tyrozyny, która kodowana jest przez drugi gen operonu *fenB* w fengycynie oraz czwarty gen operonu *ppsD* plipastatyny (gdzie operon to fragment nici DNA o pewnej liczbie genów położonych obok siebie i które są wspólnie transkrybowane w procesie syntezy RNA na matrycy DNA) (Hussein 2019). Fengycyny wykazują aktywność przeciwgrzybiczną, szczególnie wobec grzybów strzępkowych (pleśni), które rosną w postaci wielokomórkowych włókien. Jak większość naturalnych peptydów przeciwdrobnoustrojowych, fengycyna najprawdopodobniej

oddziałuje z błoną komórkową i sprawia, że jest ona bardziej przepuszczalna. Mechanizm stojący za tym zjawiskiem nie jest jednak do końca poznany. Kompleksowość układów biologicznych, badania nad związkami pomiędzy peptydami przeciwdrobnoustrojowymi a żywymi komórkami zapewniają jedynie bardzo ogólne informacje (Deleu i in. 2008). Fengycyna może zostać użyta do leczenia różnych chorób roślinnych, w tym: kiły kapusty, mozaiki kukurydzy, zarazy jęczmienia czy mączniaka dyni. Istnieją dwie możliwe ścieżki działania fengycyny: a) indukuje odpowiedź ogólnoustrojową w roślinie poprzez zaburzenie komórek błony komórkowej komórek korzeni lub, b) bezpośrednio atakuje komórki grzybów poprzez wiązanie się z ich błoną komórkową, co powoduje wyciek cytoplazmy oraz lizę komórki. Co więcej, fengycyna wykazuje działanie hemolityczne, a jej budowa sprawia, że jest mniej wrażliwa na degradację spowodowaną peptydazami w porównaniu z konwencjonalnymi peptydami przeciw-drobnoustrojowymi (Sur i in. 2018).

Ituryny. Ituryny to związki o niskiej masie cząsteczkowej. Posiadają potencjalne właściwości przeciwdrobnoustrojowe wobec patogenów roślinnych, które realizują poprzez interakcję ze składnikami sterolowymi obecnymi w błonie komórkowej grzybów. Ituryny posiadają w swojej budowie pierścien peptydowy składający się z siedmiu aminokwasów (heptapeptydów), który wykazuje wysoką polimorfie, która z kolei prowadzi do zróżnicowanych biologicznych jak i fizykochemicznych właściwości (Malviya i in. 2020). Oprócz pierścienia, ituryny posiadają β -aminokwasy tłuszczowe zawierające od 14 do 17 atomów węgla. Sekwencja heptapeptydów składa się z Asn-Tyr-Asn-Gln-Pro-Asn-Ser (Asn – asparagina, Tyr – tyrozyna, Gln – glutamina, Pro – prolina, Ser – seryna). Pierwsze trzy aminokwasy są zachowywane, natomiast pozostałe cztery mogą zostać zmienione w zależności od rodzaju ituryny (Zhou i in. 2020). Ituryny można podzielić na iturynę A, C, D, E, bacillomycynę D, F, Lc, mojavensin A i mykosubtilinę. Ituryna A posiada zdolność do tworzenia kanałów indukowanych potasem w podwójnej warstwie lipidowej (Malviya i in. 2020). Ituryna D i E różnią się od ituryny A obecnością wolnej grupy karboksylowej (ituryna D) oraz wolnej grupy karboksymetylowej (ituryna E). Bacillomycyny, mojavensin oraz mykosubtilina różnią się sekwencją aminokwasów w heptapeptydach. Co więcej, te lipopeptydy zawierają wiele homologów o identycznych sekwencjach aminokwasowych w heptapeptydach, ale różnych długościach łańcuchów kwasów tłuszczowych (o ilości węgla 14, 15 lub 16). W ostatnich badaniach przeprowadzonych przez Zhou i współpracowników (Zhou i in. 2020) scharakteryzowano również iturynę W, produkowaną przez morską bakterię ze szczepu *Bacillus*, której sekwencję heptapeptydu określono jako Asn-Ser-Asn-Pro-Tyr-Asn-Gln (Asn – asparagina, Ser – seryna, Pro – prolina, Tyr – tyrozyna, Gln – glutamina). Sekwencja ta jest wyjątkowa o tyle, że różni się nie tylko ostatnimi czterema aminokwasami, ale również drugim aminokwasem z trzech zazwyczaj zachowywanych w budowie ituryń.

Oprócz szczepu *Bacillus*, część szczepów *Pseudomonas* jest zdolna do produkcji lipopeptydów. Do takich biosurfaktantów zaliczane są, np. pseudofaktyny (I i II) produkowane przez *Pseudomonas fluorescens*, które wykorzystywane są w zastosowaniach terapeutycznych (szczególnie pseudofaktyna II). Zbudowane są z cyklicznego oktapeptydu przyłączonego do kwasu palmitynowego (Malviya i in. 2020).

Poprzez modyfikacje genetyczne, niektóre szczepy *Bacillus subtilis* są zdolne do wysokiej produkcji lipopeptydów, co spowodowało komercyjne opracowanie biofungicydu Serenade™ produkowanego przez firmę Bayer (Sur i in. 2018).

3. Podsumowanie

Lipopeptydy stanowią klasę związków o ogromnych możliwościach zwalczania fitopatogenów. Mają szerokie zastosowanie przy kontrolowaniu chorób roślin, stanowią składniki kosmetyków, dodatków do żywności, stosowane są jako związki powierzchniowo czynne, przeciwwirusowe czy też przeciwnowotworowe. Wydają się również obiecujące jako biofungicydy i biopeptydy w zastosowaniach rolniczych, stanowiąc zieloną alternatywę dla chemicznych herbicydów i pestycydów. Co więcej, odpowiednio modyfikowane, mogą stanowić broń w zwalczaniu odporności chemicznej drobnoustrojów chorobotwórczych. Są nietoksyczne, biodegradowalne, stabilne, ekologiczne i niezanieczyszczające środowisko naturalne (Meena i Kanwar 2015). Przyszłe badania nad lipopeptydami powinny skupiać się na jak najlepszym poznaniu

mechanizmów działania różnych klas tych związków, a także na zastosowaniach grup fengycyn i ituryn przy tworzeniu środków wspomagających rolnictwo. Niestety, w obecnej chwili, aplikacja i zastosowanie biosurfaktantów na wysoką skalę wymaga wynalezienia i wdrożenia nowych systemów produkcji, które będą komercyjnie bardziej konkurencyjne niż produkcja surfaktantów syntetycznych i pozwoli na produkcję biosurfaktantów w większych ilościach niż dotychczas.

4. Literatura

- Arima K, Kakinuma A, Tamura G (1968) Surfactin, a crystalline peptidelipid surfactant produced by *Bacillus subtilis*: isolation, characterization and its inhibition of fibrin clot formation. *Biochemical and Biophysical Research Communications* 31: 488-494
- Choudhary DK, Prakash A, Johri BN (2007) Induced systemic resistance (ISR) in plants: mechanism of action. *Indian Journal of Microbiology* 47: 289-297.
- Deleu M, Paquot M, Nylander T (2008) Effect of Fengycyn, a Lipopeptide Produced by *Bacillus subtilis*, on Model Biomembranes. *Biophysical Journal* 94 (7): 2667-2679.
- Hu F, Liu Y, Li S (2019) Rational strain improvement for surfactin production: enhancing the yield and generating novel structures. *Microbial Cell Factories* 18, 42.
- Hussein W (2019) Fengycyn or plipastatin? A confusing question in *Bacilli*. *BioTechnologia. Journal of Biotechnology, Computational Biology and -Bionanotechnology* 100: 47-55.
- Malviya D, Sahu PK, Sing UB i in. (2020) Lesson from Ecotoxicity: Revisiting the Microbial Lipopeptides for the Management of Emerging Diseases for Crop Protection. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 17: 1434.
- Meena KR, Kanwar SS (2015) Lipopeptides as the Antifungal and Antibacterial Agents: Applications in Food Safety and Therapeutics. *BioMed Research International*, Article ID 473050, 9 pages.
- Penha RO, Vandenberghe LPS, Faulds C i in. (2020) *Bacillus* lipopeptides as powerful pest control agents for a more sustainable and healthy agriculture: recent studies and innovations. *Planta* 251: 70.
- Santos VSV, Silveira E, Pereira BB (2018) Toxicity and applications of surfactin for health and environmental biotechnology. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part B* 21: (6-8): 382-399.
- Seydlová G, Svobodová J (2008) Review of surfactin chemical properties and the potential biomedical applications. *Central European Journal of Medicine* 3(2): 123-133.
- Sur S, Romo TD, Grossfield A (2018) Selectivity and Mechanism of Fengycyn, an Antimicrobial Lipopeptide from Molecular Dynamics. *The Journal of Physical Chemistry B* 112 (8): 2219-2226.
- Tsuge K, Akiyama T, Shoda M (2011) Cloning, Sequencing, and Characterization of the Iturin A Operon. *Journal of Bacteriology* 183 (21): 6265-6273.
- Zhou S, Liu G, Zheng R i in. (2020) Structural and Functional Insights into Iturin W, a Novel Lipopeptide Produced by the Deep-Sea Bacterium *Bacillus* sp. Strain wsm-1. *American Society for Microbiology. Applied and Environmental Microbiology* 86 (21): 1-12.

10. Problematyka selenu w kontekście jego znaczenia w glebie oraz w organizmach roślinnych i zwierzęcych

Selenium in the context of its importance in soil, plant and in plant and animal organisms

Różewicz Marcin, Wyzińska Marta

Zakład Uprawy Roślin Zbożowych, Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa, Państwowy Instytut Badawczy w Puławach

Różewicz Marcin: mrozewicz@iung.pulawy.pl

Słowa Kluczowe: toksyczność, niedobór, biofortyfikacja

1. Wstęp

Selen (Se, łac. *selenium*), jako pierwiastek odkryty został na początku XIX wieku, a dokładnie w roku 1817 przez Jana J. Berzelius'a. Przez kolejne prawie 100 lat uważany był za pierwiastek toksyczny. Jego szkodliwe działanie, stwierdzono u zwierząt domowych spożywających paszę o dużej zawartości selenu. Dopiero w latach 50. XX wieku odkryto, że selen jest w pewnych ilościach niezbędnym składnikiem pożywienia zwierząt oraz ludzi, ponieważ jego niedobór również wywołuje negatywne konsekwencje. Dwadzieścia lat później stwierdzono również jego pozytywny wpływ na organizm człowieka. Każdy organizm żywy, aby mógł funkcjonować poprawnie, podczas swojego życia musi mieć stworzone warunki sprzyjające jego działaniu, czyli systematyczne dostarczanie niezbędnych składników odżywczych. Na przykładzie selenu zauważyć można jak ważny jest odpowiedni balans pomiędzy dostarczeniem jego odpowiedniej ilości bez przekraczania poziomu, powyżej którego działa on toksycznie.

W przyrodzie wszystkie organizmy żywe muszą pobierać pokarm, który powinien dostarczać niezbędnych składników do prowadzenia wielu procesów życiowych metabolizmu na poziomie małej pojedynczej komórki. Każda komórka organizmu prowadzi stale wiele przemian chemicznych, niektóre ich produkty jak np. komórki gruczołów produkują hormony oddziałujące na inne organy. Aby procesy te przebiegały sprawnie i bez zakłóceń, podstawą jest zachowanie homeostazy. Homeostaza (gr. *homoíos* - podobny, równy; *stásis* - stanie, trwanie, postawa) jest zdolnością do utrzymywania stałości parametrów. Pojęcie to zwykle odnosi się do samoregulacji procesów biologicznych na poziomie komórkowym, ale także całego organizmu. W celu utrzymania homeostazy niezbędne jest także zrównoważenie dostarczanych do organizmu substancji odżywczych z ich wydalaniem bądź zużyciem. Każdy ze związków pełni określone funkcje w organizmie, a jego niedobór powoduje zaburzenie delikatnej homeostazy.

Selen, pomimo, że jest potrzebny w mniejszej dawce to pełni również ważne funkcje. Jest przede wszystkim silnym antyoksydantem, a w organizmie pełni rolę ochrony lipidów przed utlenianiem, jak również bierze udział w procesach detoksykacji organizmu. Jest on składnikiem selenoprotein uczestniczących w różnych procesach fizjologicznych. Pierwszym ogniwem poprzez które selen jest wprowadzany do łańcucha żywnościowego są rośliny. Aby mogły one wbudowywać w swój organizm selen niezbędna jest jego odpowiednia ilość w glebie, której rosną. Następnie części roślin, które są przeznaczane na paszę lub cele spożywcze stanowią źródło tego pierwiastka. Jednocześnie część produktów zwierzęcych, które pochodzą od zwierząt karmionych paszą roślinną z wyższą zawartością selenu, również zawierają więcej tego pierwiastka i są jego dobrym źródłem w diecie człowieka. Celem pracy jest omówienie problematyki niedoboru selenu w glebach w Polsce, a także znaczenie tego pierwiastka w organizmach roślin i zwierząt.

2. Zawartość selenu w glebie

Gleba jest dla roślin podstawowym rezerwuarem ważnych pierwiastków, których potrzebują do prowadzenia procesów życiowych. Ich zawartość i dostępność w glebie wpływa nie tylko na prawidłowy rozwój roślin i ich plonowanie, ale także przekłada się na zawartość pierwiastków w tych

częściach roślin, które stanowią pożywienie dla ludzi i zwierząt. Dotyczy to zwłaszcza seleniu, którego niska zawartość w glebie przekłada się na niedostateczną zawartość tego pierwiastka w produktach pochodzenia roślinnego. Zróżnicowana zawartość seleniu i nierównomierne jego rozmieszczenie, związane z występowaniem gleb z wysoką zawartością seleniu (nawet toksyczną) oraz bardzo niską, jest przedmiotem licznych badań naukowych. Rozkład zawartości seleniu w glebie w ujęciu globalnym jest zróżnicowany (0,01–2 mg•kg⁻¹), w zależności od kontynentu i regionu świata, uśredniona jego zawartość wynosi 0,4 mg•kg⁻¹ (Fordyce 2005). Odnotowuje się regiony o znacznie zwiększonej zawartości seleniu w glebie, jak również obszary o deficycie tego pierwiastka. Bardzo mała zawartość seleniu w glebie (stężenie poniżej 0,05 mg•kg⁻¹) występuje na terenie Chin, Finlandii i Nowej Zelandii (Chen i in. 2002). Gleby zasobne w selen (powyżej 5 mg•kg⁻¹) znajdują się na terenie Kanady, Irlandii oraz zachodniej części USA (Navarro-Alarcon i Cabrera-Vique 2000).

Dotychczas przeprowadzone badania nad zawartością seleniu w glebach Polski wskazywały duże zróżnicowanie pod względem zasobności w ten pierwiastek. Przedział zawartości seleniu w glebach waha się w zakresie wartości od deficytowych do nadmiernych (silnie toksycznych). Jest to uwarunkowane wieloma czynnikami, do których należą: skała macierzysta danej gleby, intensywność procesów wymywania i przemieszczania seleniu z utworów skalnych do zbiorników wodnych oraz od procesów sorbowania tego pierwiastka przez tlenki żelaza i substancję ilastą gleby (Piotrowska 1984). Z tego względu zawartość seleniu w różnych typach gleb jest zróżnicowana. Skała macierzysta jest ważnym źródłem seleniu. W zależności od jej rodzaju i pierwotnej zawartości seleniu, na skutek wietrzenia fizycznego i chemicznego staje się ona źródłem tego pierwiastka w powstającej glebie. Skały magmowe zawierają 0,35 mg•kg⁻¹ seleniu, natomiast znacznie większą zawartość stwierdza się w skałach osadowych (Shahid i in. 2018). Zawartość seleniu w glebie jest ściśle skorelowana z zawartością w skałach macierzystej, jednak może wykazywać zróżnicowanie nawet na niewielkim obszarze (Hao i in. 2021). Według badań przeprowadzonych przez Borowską i in. (2008) w glebach organicznych i mineralno-organicznych zawartość seleniu ogółem wynosi 0,143-0,846 mg•kg⁻¹ (średnio 0,497 mg•kg⁻¹), natomiast w glebach aluwialnych zawartość seleniu ogółem wynosiła 0,202-0,424 mg•kg⁻¹ (średnio 0,309 mg•kg⁻¹). Za optymalny zakres zawartości seleniu w glebie przyjmuje się w przedziale wartość 3-10 mg•kg⁻¹ (Kabata-Pendias i Pendias 1999).

Poza naturalnymi źródłami seleniu w glebie, może on być wprowadzany do gleby przez źródła antropogeniczne. Największe znaczenie ma spalanie węgla kamiennego, którego wydobywane złoża są zasobne w selen. Tereny wysoce uprzemysłowione, gdzie występuje znaczące zużycie węgla w procesie spalania charakteryzują się znaczną zawartością seleniu. Badania przeprowadzone przez Brandt i in. (2017) na terenie, gdzie znajdowały się elektrownie pozyskujące energię ze spalania węgla, wykazali wysoki poziom seleniu, który przekraczał dopuszczone normy. Badacze potwierdzili, że źródłem tego pierwiastka były złoża węgla. Również inni autorzy potwierdzili, że ubocznym efektem spalania węgla jest emisja do atmosfery seleniu, którego zawartość w spalonym surowcu wynosiła 300 mg•kg⁻¹ (Shahid i in. 2018). W krajach, gdzie na dużym obszarze występują gleby o niskiej zawartości seleniu w glebie, przy jednoczesnym braku jego emisji ze źródeł antropogenicznych, stosuje się nawożenie gleb. Jednym z przykładów takiego rozwiązania jest obszar w północno-wschodnich Chinach, gdzie zdiagnozowane zostały choroby związane z niedoborem seleniu (choroba Keshana i choroba Kashin-Becka). Wprowadzenie Se do gleby poprzez jej nawożenie znacząco zredukowało występowanie niedoboru seleniu u ludzi. Według najnowszych badań analiza próbek gleby z tych terenów, wykazała, że stosowane dawniej nawożenie selenem wpłynęło na wzbogacenie gleby, a obecnie 62,6% badanego obszaru na południowej równinie Songnen ma wystarczające zaopatrzenie w Se (Yang i in. 2021). Efektywne nawożenie Se gleby powinno obejmować aspekt jego możliwie wysoko przyswajalnych form, a jednocześnie zapobiegać wymywaniu w głębsze warstwy profilu glebowego oraz jego przemieszczaniu do wód gruntowych. Jest to niezwykle ważne ze względu na możliwość toksycznego działania wysokich stężeń seleniu na organizmy wodne. Stwierdzono to w badaniach prowadzonych na terenie Stanów Zjednoczonych, gdzie zaobserwowano toksyczne działanie wysokich stężeń seleniu w wodach jezior, które zlokalizowane były w pobliżu elektrowni spalającej węgiel (Brandt i in. 2017).

Ważnym, naturalnym źródłem seleniu są także nawozy organiczne. Należy tutaj podkreślić znaczącą rolę obornika oraz gnojówki i gnojowicy. Zmiana koncepcji żywienia zwierząt dotycząca

wprowadzenia do dawek żywieniowych premiksów zawierających zestawy mikroelementów, sprawia, że jest to jedno z egzogennych ich źródeł wprowadzanych do gleby. Wyższe dawki mikroelementów oraz brak ich całkowitej wchłaniania w przewodzie pokarmowym zwierząt, sprawia, że ich odchody stanowią ważne źródło tego pierwiastka. Stosowanie nawozów organicznych pochodzenia zwierzęcego należy obecnie uznać za bardzo istotne źródło niektórych pierwiastków. Wieloletnie badania Borowskiej i Kopra (2001) wykazały, że stosowanie nawożenia gnojowicą bydlęcą i gnojowicą trzody chlewnej powodowało wzrost zawartości selenu w glebie. Wyższe zapotrzebowanie zwierząt przeżuwiających na selen i powszechnie stosowana wyższa dawka tego pierwiastka w dawce pokarmowej powoduje również wyższą jego zawartość w wydalanych odchodach. Potwierdzają to badania Borowskiej i Kopra (2004), którzy stwierdzili, że w glebie nawożonej gnojowicą bydlęcą zawartość selenu ogółem była wyższa (0,076- 0,109 mg•kg⁻¹) w stosunku do zawartości w próbkach gleby nawożonych gnojowicą trzody chlewnej (0,038-0,071 mg•kg⁻¹). Stosowanie nawożenia gnojowicą pochodzącą od trzody chlewnej powoduje istotny wzrost całkowitej zawartości selenu w glebie, przy jednoczesnym wprowadzeniu pewnej dawki azotu, co jest dużym atutem w odniesieniu do pól uprawnych nawożonych azotem w formie mineralnej (Borowska i in. 2014). Istnieje również możliwość dostarczania do gleby selenu w formie nawozów mineralnych. Selen dostarczany jest wówczas w formie anionowej: SeO₃²⁻ lub SeO₄²⁻ (Izydorczyk i in. 2020). Dostępność tych form selenu dla roślin jest uzależniona od reakcji zachodzących w glebie i przemian związków i jonów selenu. Przemiany związków i form jonowych selenu warunkowane są właściwościami gleby, ale znaczącą rolę ma jej odczyn. Gleby kwaśne zawierają formy Se w postaci siarczków selenu oraz selenków, które są formami trudnodostępnymi dla roślin. Natomiast w glebach o pH neutralnym, selen występuje w formie seleninów, którą są formami trudnodostępnymi dla roślin. Najkorzystniejsza forma selenu, która charakteryzuje się wysoką biodostępnością są seleniany, występujące w glebach o pH alkalicznym (Kabata-Pendias i Pendias 1999). Ze względu na możliwość transformacji selenu w związki trudnodostępne dla roślin, korzystniejszym rozwiązaniem jest stosowanie nawożenia naturalnego tym związkiem (Izydorczyk i in 2020).

Tab. 1. Formy selenu w zależności od pH gleby (Kabata-Pendias i Pendias 1999).

WARUNKI REDOKS	PH	GŁÓWNE FORMY SELENU	
SILNIE OKSYDACYJNE	7	SeO ₄ ²⁻	seleniany
PRZEJŚCIOWE	<2	HSeO ₄ ⁻ , H ₂ SeO ₃ ⁻	
	>7	SeO ₃ ²⁻	seleniny
	<7,3	HSeO ₃ ⁻	
SILNIE REDUKCYJNE	>3,8	HSe ⁻	selenki
	<3,8	H ₂ Se ⁰	

3. Znaczenie selenu dla roślin

Selen nie jest pierwiastkiem niezbędnym dla prawidłowego funkcjonowania roślin, ale jego dostępność w glebie wpływa korzystnie na rośliny (Lyons i in. 2009). Przy odpowiednio wysokiej podaży łatwo dostępnych form selenu jest on metabolizowany podobnie jak siarka i wbudowywany zamiast niej w strukturę tzw. aminokwasów siarkowych. Powstają wtedy selenometionina lub selenocysteina. Aminokwasy te w pewnym stopniu wspomagają rośliny w trakcie stresów abiotycznych poprzez niwelowanie działania reaktywnych form tlenu (Pilon-Smits i Quinn 2010). Selenoaminokwasy wbudowywane w struktury tkanek roślin, a po ich spożyciu przez ludzi i zwierzęta są wysoko przyswajalnym źródłem tego pierwiastka. Ze względu na efektywność pobierania selenu z gleby przez rośliny wyodrębnia się trzy ich grupy:

- hiperakumulatory selenu, czyli te gatunki roślin, które bardzo efektywnie pobierają i metabolizują selen gromadząc go w swoich tkankach;
- gatunki występujące na glebach o średniej bądź niskiej zawartości selenu, które w mniejszym stopniu niż hiperakumulatory gromadzą i metabolizują selen;
- gatunki roślin, mające niską zdolność do pobierania, metabolizowania i akumulacji selenu (przynależą tutaj ważne gospodarczo gatunki jak: zboża, trawy, owoce i warzywa).

Nadmierna ilość selenu w glebie wywołuje toksyczne działanie, zwłaszcza u roślin które mają niską zdolność metabolizowania i usuwania nadmiaru tego pierwiastka. Nadmierne jego nagromadzenie w glebie powoduje zahamowanie wzrostu systemu korzeniowego, co znacząco utrudnia roślinie pobieranie innych składników pokarmowych, a także wody, przez co staje się ona wrażliwsza na suszę. Poprzez reakcje przemian selenoaminokwasów, których zawartość znacznie wzrasta w przypadku nadmiaru selenu pobieranego przez rośliny, neutralizowany jest nadmiar selenu. Szereg reakcji enzymatycznych selenometioniny prowadzi do powstania produktu lotnego w postaci dimetyloseleneku lub dimetylodiselenku (Gupta i Gupta 2017). Te lotne związki wydzielane przez rośliny w pewnym stopniu działają odstraszająco na owady, które są fitofagami. Odpowiednie zaopatrzenie roślin (określane jako biofortyfikacja) w selen jest jednym z potencjalnych metod ochrony roślin przed szkodnikami. Liczne badania wykazują, że nawożenie selenem skutecznie zapobiega nadmiernemu rozwojowi populacji szkodników poprzez spowolnienie rozwoju ich populacji lub poprzez toksyczne działanie nawet ich śmierć (Vickerman i in. 2002). Ta metoda zwalczania owadów żerujących na roślinach uprawnych jest interesująca ze względu na możliwość ich zwalczania poprzez zastosowanie naturalnego nawożenia pierwiastkiem. Dodatkowo kumulując się w tkankach roślin byłyby wprowadzany do łańcucha troficznego, a poprzez to można by ograniczyć jego niedobory u ludzi i zwierząt. Jednak wadą tego rozwiązania jest możliwość toksycznego wpływu zbyt wysokich dawek selenu na ekosystem, oraz relacje w łańcuchu troficznym wewnątrz agrobi- i ekosystemów (Łukasiewicz i Politycka 2020).

4. Znaczenie selenu dla zwierząt i ludzi

Selen jest pierwiastkiem, który ma większe znaczenie dla prawidłowego funkcjonowania organizmów ludzi i zwierząt. Jest on niezbędny do prowadzenia procesów życiowych, a niedobór lub nadmiar ma negatywne konsekwencje zdrowotne. W głównej mierze selen występuje w postaci selenobiałek. Zidentyfikowano ich obecnie 25 w różnych tkankach organizmu. Selen wchodzi w skład peroksydazy glutationowej, pełniąc ważną rolę antyoksydacyjną. Jest to bardzo ważny enzym, zwłaszcza podczas znacznego wysiłku fizycznego. Selen ma duże znaczenie w utrzymaniu prawidłowego stanu zdrowia człowieka, jednak zarówno jego niedobór w diecie jak i nadmiar ma negatywny wpływ na organizm. Ustalona dzienna dawka pobrania selenu z pożywienia dla ludzi to 55 µg, natomiast poziom 400 µg selenu dziennie uważany jest za możliwie szkodliwy (Kałabun 2020). Stąd osoby wykazujące wyższą aktywność fizyczną mają wyższe zapotrzebowanie na selen. Dotyczy to również zwierząt, a w szczególności koni, które poddawane intensywnemu treningowi, wykazują wyższe zapotrzebowanie na selen. Konie utrzymywane na terenach ubogich w selen mają niedobór tego składnika. Według różnych autorów o niedoborze selenu u koni można mówić wówczas, gdy jego stężenie we krwi wynosi poniżej 55–75 µg/l (Ludvíková i in. 2005).

Pierwszym etapem włączania tego pierwiastka jest gleba, która powinna posiadać odpowiednią ilość i formę selenu pobieraną przez rośliny, a następnie one są źródłem pokarmowym tego pierwiastka dla ludzi i zwierząt. W żywieniu bydła pasze roślinne, ze względu na specyfikę żywienia, stanowią podstawowe źródło selenu. Ogólna dawka pobieranego selenu, uzależniona jest od zasobności gleby w ten pierwiastek. Ze względu na niską zasobność gleb w Polsce w selen, u zwierząt stosuje się dodatek do pasz premiksów, które zawierają wszystkie niezbędne pierwiastki. Uzupełniają one również selen w diecie zwierząt, a dodatkowo niewchłonięta część tego pierwiastka wydalana jest wraz z moczem i odchodami. Nawożenie organicznymi nawozami powoduje wprowadzenie selenu do gleby. Naturalnym sposobem wprowadzenia selenu do produktów zwierzęcych jest nawożenie mineralne selenem. Tufarelli i in. (2016) stosując nawożenie mineralne selenem tritordeum (zboże powstałe na drodze hybrydyzacji międzygatunkowej), uzyskali wzrost

zawartości selenu w ziarnie. Następnie badacze zastosowali je w paszy dla kur niosek. Karmienie tym ziarnem spowodowało wzrost zawartości selenu w jajach, a dzięki temu produkt ten może być źródłem selenu w diecie spożywających go ludzi. Ziarno zbóż spożywane z plantacji nawożonych selenem, gdzie występuje niedobór tego pierwiastka w glebach mogłoby być również bezpośrednim jego źródłem w diecie ludzi. Problem stanowi jednak obróbka termiczna produktów, która w zależności od jej czasu trwania i samego rodzaju produktu powoduje straty selenu. Wypiek pieczywa powoduje utratę znacznej części selenu na skutek reakcji Maillarda pomiędzy selenometioniną i glukozą. Powstają wtedy lotne związki selenu (Sager 2006).

5. Podsumowanie

Z racji ważnych funkcji biologicznych, jakie pełni selen w organizmie ludzi i zwierząt, istnieje potrzeba prowadzenia badań naukowych obejmujących jego obieg w poszczególnych łańcuchach troficznych. Ważną rolę odgrywa tutaj gleba, która jest jednym z jego ważniejszych źródeł. Jak wynika z krajowych badań, gleby w Polsce mają niewystarczającą zawartość tego pierwiastka, co przekłada się na niedostateczne jego pobranie przez rośliny, a w konsekwencji występowanie niedoborów u ludzi i zwierząt. Pomimo, że selen nie jest niezbędny dla roślin, jego dostarczenie do gleby wpływa na nie korzystnie, za wyjątkiem przekroczenia pewnych progów toksyczności dla roślin. Nawożenie selenem jest jedną z metod zapewnienia odpowiedniego zaopatrzenia roślin, a następnie ludzi i zwierząt w ten pierwiastek. Jednak ze względu na możliwe toksyczne działanie, powinno się stale monitorować jego zawartość w glebie, a zwłaszcza tam, gdzie możliwa jest jego emisja do środowiska ze źródeł antropogenicznych.

6. Literatura

- Borkowska K, Koper J (2004) Zmiany zawartości selenu w glebie nawożonej gnojowicą. *Roczniki Gleboznawcze*, 3: 53-58.
- Borowska K, Koper J (2001) Zawartość selenu ogółem w glebie po wieloletnim nawożeniu gnojowicą. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych* 476: 69-74.
- Borowska K, Koper J, Kozik K i in. (2014) Effect of slurry fertilization on the selenium content and catalase activity in lessive soil. *Journal of Elementology* 19(3): 649-659.
- Borowska K, Koper J, Dąbkowska-Naskręt H (2008) Zawartość selenu w wybranych typach gleb pomorza i kujaw na tle aktywności peroksydaz. *Roczniki Gleboznawcze - Soil Science Annual* 59(1): 52-59.
- Brandt JE, Bernhardt ES, Dwyer GS i in. (2017) Selenium Ecotoxicology in Freshwater Lakes Receiving Coal Combustion Residual Effluents: A North Carolina Example, *Environmental Science & Technology* 51: 2418–2426.
- Chen L, Yang F, Xu J i in. (2002) Determination of Selenium Concentration of Rice in China and Effect of Fertilization of Selenite and Selenate on Selenium Content of Rice. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 50: 5128–5130
- Fordyce FM (2005) Selenium deficiency and toxicity in the environment: Essentials of medical geology-impacts of the natural environment on public health London: Elsevier:pp. 373–415
- Gupta M, Gupta S (2017) An overview of selenium uptake, metabolism and toxicity in plants. *Frontiers in Plant Science* 7 (2014): 1–14.
- Hao L, Zhang J, Zhang S i in. (2021) Distribution characteristics and main influencing factors of selenium in surface soil of natural selenium-rich area: a case study in Langao County, China. *Environ Geochem Health*, 43: 333–346.
- Izydorczyk G, Ligas B, Mikula K i in. (2020) Biofortification of edible plants with selenium and iodine—A systematic literature review. *Science of The Total Environment*, 141983.
- Kabata-Pendias A, Pendias H (1999) *Biogeochemia pierwiastków śladowych*. Wyd. PWN, Warszawa.
- Kałabun M (2020) *Wzbogacanie w selen roślin uprawnych*. Praca doktorska, Uniwersytet Warszawski.

- Ludvíková E, Pavlata L, Vyskočil M i in. (2005) Selenium Status of Horses in the Czech Republic. *Acta Veterinaria Brno* 74: 369–375.
- Lyons GH, Genc Y, Soole K i in. (2009) Selenium increases seed production in Brassica. *Plant Soil* 318:73–80
- Łukaszewicz S, Politycka B (2020) Selen w roślinach i jego wpływ na żerowanie i rozwój fitofagów. *Progress in Plant Protection* 60 (2): 119-127.
- Navarro-Alarcon M, Lopez-Martinez MC (2000) Essentiality of selenium in the human body: relationship with different diseases, *The Science of the Total Environment* 249: 347–371.
- Pilon-Smits EA, Quinn CF (2010) Selenium metabolism in plants. In *Cell biology of metals and nutrients* Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 225-241.
- Piotrowska M (1984) Zawartość selenu w uprawnych glebach Polski. *Roczniki Gleboznawcze - Soil Science Annual* 35(1): 23-31
- Sager M (2006) Selenium in agriculture, food, and nutrition, *Pure and Applied Chemistry* 78: 111–133.
- Shahid NM, Niazi NK, Khalid S i in. (2018) A critical review of selenium biogeochemical behavior in soil-plant system with an inference to human health. *Environmental Pollution* 234: 915–934.
- Tufarelli V, Cazzato E, Ceci E i in. (2016) Selenium-fertilized Triticum (*Triticum* Ascherson et Graebner) as dietary selenium supplement in laying hens: Effects on egg quality. *Biol. Trace Element Res.*, 173 (1): 219–224.
- Vickerman DB, Young JK, Trumble JT (2002) Effect of selenium-treated alfalfa on development, survival, feeding, and oviposition preferences of *Spodoptera exigua* (Lepidoptera: Noctuidae). *Environmental Entomology* 31 (6): 953–959.
- Yang C, Yao H, Wu Y i in. (2021) Status and risks of selenium deficiency in a traditional selenium-deficient area in Northeast China. *Science of The Total Environment* 762: 144103.

11. Efektywne nawożenie zbóż makroelementami

Effective fertilization of cereals with macronutrients

Marcin Różewicz, Marta Wyzńska

Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowy Instytut Badawczy, Zakład Uprawy Roślin Zbożowych, Puławy

Słowa kluczowe: plon, odczyn gleby, mikroelementy, nawożenie, materia organiczna

Streszczenie

W pracy o charakterze przeglądowym zaprezentowano przegląd badań dotyczących efektywnego nawożenia zbóż w oparciu o przegląd najnowszej literatury naukowej. Opracowanie obejmuje przegląd badań nad efektywnością stosowania makro- i mikroelementów, a także znaczenie materii organicznej oraz odczynu gleby. Przeanalizowano wpływ poszczególnych makroelementów i ich oddziaływanie na efektywność uprawy różnych gatunków zbóż.

1. Wstęp

Zarówno makro- jak i mikroelementy są składnikami, które mają istotne znaczenie w fizjologii roślin tj. wzrost systemu korzeniowego i tkanki mechanicznej, zwiększając tolerancję roślin na stresy niskiej temperatury, niedoboru wody (poprzez regulowanie bilansu wodnego) czy różnych patogenów. Pierwiastki te wpływają także na gospodarkę węglanową i azotanową. Azot jako pierwiastek plonotwórczy w dużym stopniu decyduje również o jakości ziarna (zawartość białka). Pokrycie zapotrzebowania na azot, fosfor, potas, siarkę, magnez oraz wapń ma duże znaczenie, gdyż wymienione makroelementy pełnią szereg istotnych funkcji. Niemniej ważne są także mikroelementy takie jak: miedź, cynk, żelazo, bor, molibden, mangan, chlor, które pomimo, że są potrzebne roślinom w mniejszych ilościach, to jednak pełnią szereg ważnych funkcji. Niedobór składników pokarmowych powoduje ograniczenie plonowania zbóż jak również jakość uzyskanego plonu. Dotyczy to w szczególności azotu, który wpływa na zawartość białka w ziarnie. Ponadto niedobór makroelementów powoduje szereg objawów na liściach i pędach, natomiast nadmiar dostarczanych składników pokarmowych wpływa niekorzystnie na efektywność ekonomiczną uprawy i środowisko (powodując m.in. eutrofizację związkami azotu i fosforu). Poza dostarczeniem odpowiedniej ilości składników pokarmowych ważnym aspektem efektywnego nawożenia jest odpowiedni odczyn pH oraz zawartość materii organicznej w glebie.

W niniejszym opracowaniu przedstawiono znaczenie poszczególnych makroelementów w uprawie zbóż na podstawie wybranych pozycji najnowszej literatury naukowej.

2. Wpływ nawożenia na rośliny zbożowe i środowisko

Nowoczesne odmiany zbóż charakteryzują się wysokim potencjałem plonowania. Wysoki plon ziarna o jednocześnie pożądanej jakości wymaga dostosowania odpowiedniej dawki oraz terminu nawożenia. Obecnie istnieje możliwość stosowania różnych nawozów, zarówno tych pochodzenia naturalnego, jak i mineralnego. Problemem we współczesnym nawożeniu roślin, jest utrzymanie zbilansowania pomiędzy zapewnieniem roślinom odpowiedniej dawki potrzebnych składników oraz efektywnością ekonomiczną, a także niwelowaniem możliwych negatywnych efektów na środowisko. Główny problem stanowią tutaj związki azotu i fosforu, mające duże znaczenie plonotwórcze, a jednocześnie przedostające się do ekosystemów wodnych powodując ich eutrofizację. Problem w efektywnym nawożeniu upraw zbóż stanowi odczyn gleby. Ma on decydujący wpływ na możliwość pobierania składników pokarmowych przez rośliny. Odczyn wpływa na biologiczne, chemiczne i fizyczne właściwości danej gleby. W glebie o kwaśnym odczynie dostępność składników pokarmowych dla roślin jest zdecydowanie mniejsza. Zwłaszcza fosfor, w kwaśnym środowisku tworzy sole żelaza i glinu, co sprawia, że staje się on niedostępny dla roślin. Zakwaszenie gleb w Polsce i związany z tym problemem niedoboru przyswajalnego fosforu uznaje się za jeden z ważniejszych czynników wpływających na spadek produktywności gleb (Jagus

2020). Ponadto w glebie zakwaszonej, znajduje się znaczna ilość toksycznych form glinu, który powoduje zahamowanie rozwoju systemu korzeniowego zbóż, zmniejszając przez to pobieranie składników odżywczych z głębszych warstw profilu glebowego. Gleby bardzo kwaśne i kwaśne stanowią 38-43% gruntów ornych (Ochal 2015).

Wrażliwość roślin zbożowych na zakwaszenie gleby zależne jest od gatunku. Najwyższa wrażliwość na zakwaszenie gleby występuje u pszenicy i jęczmienia, nieco mniej wrażliwy jest owies, a najbardziej tolerancyjne jest żyto. Nieuregulowanie odczynu gleby pomimo zwiększenia zużycia nawozów mineralnych powoduje straty na skutek wymywania w głąb profilu makroelementów, które przedostają się do wód gruntowych. Znaczący wzrost zużycia nawozów mineralnych w Polsce (o 31%), nastąpił zwłaszcza w okresie po akcesji do UE, co w aspekcie zakwaszenia znacznej części gleb, obniża efektywność nawożenia na skutek strat $36,7 \text{ kg NPK} \cdot \text{ha}^{-1}$ użytków rolnych. Nieuregulowany odczyn gleby i spadek efektywnego wykorzystania dostarczanych nawozów mineralnych powoduje straty plonu ziarna zbóż w ilości 4,3 jednostek zbożowych $\cdot \text{ha}^{-1}$ (Kopiński i in. 2013). Jest to powodem strat ekonomicznych, przy jednocześnie negatywnym wpływie na środowisko. Ze względu na duże znaczenie odczynu pH dla prawidłowych funkcji produkcyjnych gleb oraz znaczny udział gleb zakwaszonych w strukturze użytków rolnych, Ministerstwo Rolnictwa i Rozwoju Wsi wprowadziło program wapnowania gleb. Celem „Ogólnopolskiego programu regeneracji środowiskowej gleb poprzez ich wapnowanie” jest wprowadzenie dopłat do wapnowania gleb, aby poprzez obniżenie jego kosztów zachęcić rolników do jego stosowania. Wapnowanie gleb przyczynia się do uregulowania odczynu i zwiększenia funkcji produkcyjnych gleb przy jednoczesnym zwiększeniu ochrony środowiska. Potrzeby wapnowania gleb w Polsce są zróżnicowane. Niektóre z regionów charakteryzują się wyższym udziałem gleb bardzo kwaśnych i kwaśnych wynosi, np. Podlasie, gdzie udział tych gleb wynosi łącznie 55% (Lipiński i in 2017).

Negatywny wpływ na efektywne wykorzystanie składników pokarmowych dostarczanych z nawozami przez rośliny ma znaczny ubytek materii organicznej z gleby. A to właśnie ona pełni szereg ważnych funkcji, które wpływają na właściwości gleby tj. tworzenie struktury agregatowej gleby, a tym samym polepszenie warunków wodno-powietrznych (co sprzyja lepszemu rozwojowi systemu korzeniowego, zwiększa pojemność wodną gleby, decyduje o pojemności sorpcyjnej gleby, ma właściwości buforujące (regulacja odczynu gleby), a także jest rezerwuarem składników pokarmowych dla roślin.

W związku z notowanym ubytkiem materii organicznej z gleb w Polsce istnieje konieczność jej uzupełnienia poprzez wprowadzanie dodatkowej masy organicznej. Dawniej stosowany dodatek do gleby nawozów naturalnych m.in. obornika i gnojówki powodował utrzymanie bilansu materii organicznej w glebach. Jednak specjalizacja gospodarstw w kierunku produkcji roślinnej bez inwentarza spowodowała, że obornik nie jest stosowany tak powszechnie jak w przeszłości. Jednym z rozwiązań mających na celu wprowadzenie innych źródeł materii organicznej do gleby jest stosowanie osadów pościekowych. Jednak ich stosowanie obwarowane jest wymaganiami określonymi prawem, co do bezpieczeństwa ich stosowania. W głównej mierze dotyczy to zawartości metali ciężkich i innych substancji szkodliwych.

Nowoczesne techniki nawożenia obejmują jego dostosowanie do polowej zmienności zawartości poszczególnych składników pokarmowych. Określane jest to jako nawożenie precyzyjne. W tej metodzie wykorzystuje się dane szczegółowe na areale pola lub konkretnej działki zbierane podczas przejazdu kombajnem. W trakcie tej czynności dokonywana jest analiza wielkości plonu. Naniesione na siatkę dane dotyczące różnic w zbiorach w poszczególnych miejscach pola dają wskazówki dotyczące zastosowania wyższych lub niższych dawek nawożenia w kolejnym sezonie. Wyznaczone mapy z naniesionymi danymi, przekazane do komputera w ciągniku w połączeniu z maszyną dozującą dawkę optymalizują zużycie nawozu. Umożliwia to precyzyjne uzupełnienie niedoborów składników pokarmowych tam, gdzie plon był niższy. Na rynku dostępnych jest kilka systemów wspomagających pomiar plonów w trakcie zbiorów, których dane mogą być wykorzystywane we wspomaganiu stosowania precyzyjnego nawożenia (Ciechanowski i in. 2018). Istnieje także możliwość precyzyjnego dawkowania nawożenia przy wykorzystaniu sensora rejestrującego gęstość roślin na polu bądź poziom chlorofilu w roślinach, który jest wskaźnikiem

stanu odżywienia roślin azotem. Pozwala to na dostosowanie dawki tego składnika do aktualnego odżywienia roślin po przezimowaniu, co jest szczególnie ważne w uprawie zbóż i rzepaku.

3. Efektywne wykorzystanie makroskładników

Azot uważany jest za najważniejszy makroelement pod względem jego plonotwórczego działania. W nawozach mineralnych pierwiastek ten znajduje się w formach:

- azotanowej (NO_3^-),
- aminowej (NH_4^+),
- amidowej (NH_2^+).

Z gleby, najlepiej azot pobierany jest w formie azotanowej. Sprawia to, że stosowana jest na plantacjach zbóż w gorszej kondycji, gdzie nastąpiło przerzedzenie obsady roślin na skutek wymarnięcia lub zbyt rzadkiego siewu. Zastosowanie formy azotanowej pobudza rośliny do lepszego krzewienia, co kompensuje niższą ich obsadę. Skutkiem jest zwiększenie obsady kłosów i uzyskanie lepszego plonu. Wadą stosowania formy azotanowej jest możliwość jej wymywania w głębsze warstwy profilu glebowego, gdzie jest niedostępna dla roślin. Przedostanie się jej do wód gruntowych powoduje eutrofizację zbiorników wodnych. Forma amonowa pobierana jest przez rośliny wolniej w stosunku do formy azotanowej. Zalecana jest do stosowania w uprawach zbóż w dobrej kondycji o dużym stopniu rozkrzewienia. Zaletą formy amonowej jest także to, że nie ulega w takim stopniu wymywaniu z gleby jak forma azotanowa, a jednocześnie roślina wbudowuje ją od razu w swoje struktury. Efektywne nawożenie azotowe zbóż, w szczególności form ozimych obejmuje odpowiednią formę, dawkę oraz termin jego stosowania. Dyrektywa azotanowa zezwala na stosowanie nawozów azotowych od 1 marca. Wyjątkowa sytuacja w roku 2020, spowodowana łagodniejszą zimą i przyspieszeniem wiosennej wegetacji, sprawiła, że zastosowano derogację na skutek której rolnicy mogli zastosować nawożenie azotowe od 14 lutego. Dodatkowo, aby zwiększyć efektywność wykorzystania azotu z nawozów mineralnych od 1 lipca 2021 roku, prawnie dozwolone będzie stosowanie nawozów zawierających formę amonową azotu wyłącznie otoczkowaną lub z zastosowaniem inhibitora ureazy.

Jak wynika z badań Kopińskiego (2017) efektywność wykorzystania azotu uległa znaczącej poprawie. Autorzy oszacowali ją na poziomie 60% składnika dostarczanego w dawce nawozowej. Sytuacja poprawy wykorzystania azotu z nawozów mineralnych poprawiła się w większości województw Polski. Jednak zauważalne są regionalne różnice, których zakres waha się w od 55% w województwie wielkopolskim do 84% w województwie podkarpackim.

W bilansie nawożenia azotem uwzględniane powinny być również nawozy naturalne (obornik, gnojówka i gnojowica). Dawka azotu pochodząca z prowadzonej produkcji zwierzęcej uzależniona jest od specyfiki danego gospodarstwa. Dotyczy to także indywidualnej sytuacji w poszczególnych województwach związanej ze zróżnicowaną obsadą i koncentracją produkcji zwierzęcej. Według Kopińskiego (2018) azot z nawozów naturalnych pochodzi głównie z chowu bydła (60%), chów świń (23%) i produkcji drobiarskiej (14%). Azot pochodzenia organicznego jest szczególnie ważny w ekologicznej uprawie zbóż, gdzie niedozwolone jest stosowanie nawozów mineralnych. Możliwym i bardzo efektywnym rozwiązaniem, pozwalającym na wzbogacanie gleby w azot jest także wprowadzenie do zmianowania roślin bobowatych lub uprawa ich na poplon. Jak wykazały badania Małeckiej-Jankowiak i in. (2018) plon ziarna pszenicy ozimej uprawianej po przedplonach strączkowych był wyższy w zakresie 27,5–33,8% w porównaniu do uprawy pszenicy po sobie. Rośliny bobowate wnoszą do gleby wraz z resztkami poźniwnymi dawkę azotu, którą należy uwzględnić w planie nawożenia.

Fosfor jako drugi z ważniejszych makroelementów ma duże znaczenie w kształtowaniu plonu. Jest to związane z rolą jaką pełni w rozwoju systemu korzeniowego roślin. Dobrze rozwinięty system korzeniowy, penetrując głębsze warstwy profilu glebowego, zapewnia dostęp do wilgoci i składników odżywczych. Efektywne nawożenie tym pierwiastkiem powinno uwzględniać jego trzy formy występujące w glebie:

- aktywną, czyli w postaci jonów fosforanowych (V), łatwo dostępną dla roślin,
- ruchomą czyli formę niedostępną, która może przeobrazić się w formę aktywną,

- zapasową, która jest formą niedostępną dla roślin, związaną z minerałami.

Według badań Ochala (2015) 31% gleb w Polsce charakteryzuje się niedoborem fosforu, stąd konieczność uzupełniania tego pierwiastka poprzez nawożenie mineralne.

Fosfor jest pierwiastkiem mało mobilnym w profilu glebowym, stąd też jest on dostarczany przedsięwzięciem, aby granule nawozu mogły być wymieszane z warstwą orną. Forma granulki jest efektywnym sposobem dostarczania fosforu roślinom, ponieważ system korzeniowy docierając do niej ma zapewnione źródło tego pierwiastka, które jest skoncentrowane. Jest to korzystne również ze względu na dużą presję chwastów, które występując w dużym nasileniu pobierają znaczne ilości fosforu z gleby ograniczając jego dostępność dla roślin uprawnych (Głowacka i in. 2017). Podobnie jak azot, fosfor należy do związków biogennych, które eutrofizują zbiorniki wodne. Jak dowiodły wyniki badań Wojciechowskiej i in. (2019) nawożenie fosforem i spływ jego związków do wód jest głównym źródłem zanieczyszczenia fosforanami morza Bałtyckiego.

Potas jest ważnym makroelementem dla roślin, bowiem reguluje szereg procesów życiowych roślin. Do głównych funkcji jakie pełni w roślinie należą regulacja pracy aparatów szparkowych i utrzymanie odpowiedniego stanu nawodnienia rośliny, a także synteza związków zapasowych oraz transport asymilatów. W glebie pierwiastek ten występuje w trzech formach:

- potas strukturalny, który zawarty jest w minerałach, głównie mikach i skaleniach, z których podczas procesu ich wietrzenia może być uwalniany i dostępny dla roślin (gleby zasobne w te minerały są jednocześnie zasobne w potas),
- potas niewymienny jest formą trudno dostępną dla roślin,
- potas wymienny jest formą przyswajalną dla roślin, która związana jest z zewnętrznymi powierzchniami minerałów ilastych.

W Polsce udział gleb o niskiej i bardzo niskiej zawartości potasu wynosi 41% (Ochal 2015).

Dlatego ważne jest uzupełnianie niedoboru potasu w glebie, co przyczynia się do lepszego plonowania zbóż i efektywnego wykorzystania produkcji na gruntach uprawnych. Należy mieć na względzie, że potas pobierany jest z gleby efektywnie w zakresie pH 5,5-7,2 (Wach, 2020). W związku z bardzo ważną rolą jaką pełni potas w gospodarce wodnej roślin oraz związany z nim mechanizm regulacji pracy aparatów szparkowych, odpowiednie zaopatrzenie w ten pierwiastek wpływa na ograniczenie skutków suszy. Potwierdzają to badania Grzebisza (2015), przeprowadzone na pszenicy, w różnych warunkach nawożenia potasem i warunkach wodnych. Wykazały one wyraźnie na duże znaczenie nawożenia potasem dla plonowania pszenicy jarego, a szczególnie na duże przyrosty plonu jakie uzyskano w latach z występowaniem stresu suszy (nawet 133% w stosunku do poletek doświadczalnych nienawożonych potasem). Odpowiednie zaopatrzenie roślin w potas w warunkach stresu suszy pozwala na szybką reakcję rośliny związaną z zamykaniem komórek szparkowych, co ogranicza transpirację i związane z nią straty wody (Kuś 2016).

Siarka jest makroelementem, którego konieczność dostarczania roślinom uprawnym wraz z nawożeniem dostrzeżono stosunkowo niedawno. Jest to związane z tym, że dawniej jej źródłem w glebie była emisja tlenków siarki z przemysłu. Wprowadzenie unowocześnień w zakładach przemysłowych, które znacząco obniżyły emisję siarki do atmosfery sprawiło, że zaczęto obserwować niedobory tego pierwiastka i konieczność stosowania nawożenia gleb. Siarka poprzez swoje funkcje w roślinie, wywiera silny wpływ na wysokość i jakość uzyskiwanych plonów (Jamal i in. 2010; Klikocka 2010). Symptomy niedoboru siarki u roślin przypominają niedobory azotu. Różnicuje je jednak rozmieszczenie. Objawy niedoboru siarki występują na liściach młodszych i stożkach wzrostu, w przeciwieństwie do azotu, którego niedobór objawia się w pierwszej kolejności na starszych liściach. Młode liście z objawami niedoboru siarki mają słabo wykształcone wąskie, bladezielone blaszki liściowe oraz cienkie łodygi z dobrze rozwiniętą i silnie zdrewniałą tkanką wzmacniającą. Zahamowanie rozwoju części nadziemnej roślin jest wyraźnie większe niż korzeni. Ogólna zawartość siarki w roślinach waha się na ogół w zakresie 0,06-0,8% mas. suchej masy i jest różna w różnych częściach roślin. Najbardziej wrażliwe na niedobory są rośliny wykazujące najwyższe zapotrzebowanie na siarkę do których należy rzepak. Zboża charakteryzują się średnim zapotrzebowaniem na ten składnik. Jest ono uzależnione od gatunku zboża i waha się w zakresie 15-25 kg S/ha (Podleśna 2020). Najczęściej objawy niedoboru siarki na pszenicy obserwuje się w stadium strzelania w źdźbło. Nawożenie siarką nie tylko zapobiega niedoborowi u zbóż, ale

wpływa także na jakość uzyskanego ziarna. U pszenicy w jednej tonie ziarna akumuluje się 8-10 kg siarki. Obecnie stosowane nawozy zawierające siarkę można podzielić na dwie grupy:

- azotowo-siarkowe, których mankamentem jest ograniczenie terminu stosowania zgodnie z dyrektywą azotanową (atutem jest dostarczenie siarki i azotu jednocześnie),
- siarkowe nieazotowe jak: siarczan wapnia, siarczan magnezu czy siarczan potasu.

Podobnie jak w przypadku azotanowej formy azotu, również forma siarczanowa SO_4^{2-} jest łatwo wymywana w głąb profilu glebowego, co powoduje straty siarki oraz możliwość toksycznego jej działania na organizmy wodne. Forma elementarna siarki nie jest wymywana z profilu glebowego, a jednocześnie ta forma ma przedłużone działanie, ponieważ jest przekształcana stopniowo w formy siarczanowe dostępne dla roślin (Podleśna 2020). W celu zdiagnozowania niedoborów siarki należy obserwować plantacje pod kątem charakterystycznych, wizualnych niedoborów siarki w glebie, ale możliwe jest także diagnozowanie stanu odżywienia zbóż w ten pierwiastek na podstawie analiz w tzw. częściach wskaźnikowych. W przypadku pszenicy jest to faza przed kwitnieniem, gdzie optymalna zawartość tego składnika w zielonych częściach powinna wynosić 0,18-30% S. Ponieważ siarka wspomaga pobieranie azotu, wzajemny stosunek N:S powinien wynosić 8,7-7,4 (Podleśna 2020).

4. Podsumowanie

Podsumowując należy podkreślić, że efektywne wykorzystanie makroelementów z nawożenia mineralnego obejmuje utrzymanie w glebie odpowiedniego pH oraz zawartości materii organicznej. Stosowanie nawozów powinno uwzględniać potrzeby nawozowe roślin oraz termin stosowania, a także odpowiednią formę (jak w przypadku azotu i siarki). Makroelementy są pierwiastkami, które są niezbędne dla prawidłowego przebiegu procesów fizjologicznych w roślinie i w zależności od rodzaju pełnią również funkcje strukturalne. Siarka jest ściśle powiązana z azotem, a niedobór jednego składnika ogranicza pobieranie i działanie drugiego. Konkluzją przeprowadzonego przeglądu badań na podstawie najnowszej literatury jest rekomendacja dotycząca stosowania odpowiednich dawek nawozów dostosowanych do danego typu gleby oraz gatunku zboża, co zapewni efektywność ekonomiczną prowadzonej uprawy przy jednoczesnym dbaniu o jak najmniejszy negatywny wpływ na środowisko.

5. Literatura

- Ciechanowski M, Szulc T, Rogacki R i in. (2018) Metody pomiaru plonu pasz objętościowych połączone z terenowym mapowaniem plonu na potrzeby rolnictwa precyzyjnego. *Technika Rolnicza Ogrodnicza Leśna*, 6: 6-8.
- Grzebisz W (2015) www.ipipotash.org/pdf/countrysp/polbrosch6.
- Kuś J (2016) Rola warunków siedliskowych i agrotechniki w poprawie gospodarki wodnej roślin w : *Innowacyjne metody gospodarowania zasobami wody w rolnictwie.*: 137-164
- Jaguś A (2020) Monitoring środowiska gruntowego w Polsce. *Inżynieria Ekologiczna*, 21(3): 24-32. DOI: <https://doi.org/10.12912/23920629/125378>
- Jamal A, Moon YS, Abdin M (2010) Sulphur – a general overview and interaction with nitrogen. *Australian Journal of Crop Science*, 4(7): 523-529.
- Klikocka H (2010) Znaczenie siarki w biosferze i nawożeniu roślin. *Przem. Chem.*, 89(7):903-908.
- Kopiński J (2017) Ocena zmian efektywności wykorzystania azotu w produkcji rolniczej Polski. *Roczniki Naukowe Stowarzyszenia Ekonomistów Rolnictwa i Agrobiznesu*, 19 (1): 85-91.
- Kopiński J (2018) Zróżnicowanie gospodarki nawozowej azotem w polskim rolnictwie. *Polish Journal of Agronomy*, 32: 3–16.
- Kopiński J, Nieróbca A, Ochal P (2013) Ocena wpływu warunków pogodowych i zakwaszenia gleb w Polsce na kształtowanie produktywności roślinnej. *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie*, T. 13. Z. 2 (42): 53-63.
- Lipiński W, Lipińska H, Kornas R i in. (2017) Zmiany wybranych właściwości agrochemicznych gleb Podlasia. *Zeszyty Naukowe WSA w Łomży* 6: 45-55.

- Małecka-Jankowiak I, Bleharczyk A, Sawińska Z i in. (2018) Wpływ następczy łubinów i grochu na plonowanie pszenicy ozimej w zależności od uprawy roli i nawożenia azotem. *Fragmenta Agronomica*, 35(4): 67–79.
- Głowacka A, Klikocka H, Szostak B i in. (2017) Regulacja zachwaszczenia i sposób uprawy a dostępność fosforu dla roślin uprawnych. *Polish Journal of Agronomy*, 28: 3–11.
- Ochal P (2015) Aktualny stan i zmiany żyzności gleb w Polsce. *Studia i Raporty IUNG – PIB*, 45(19): 9-25.
- Podleśna A (2020) Siarka – ważny makroskładnik pokarmowy. *Studia i Raporty IUNG-PIB*, 63(17): 85-101.
- Wach D (2020) Potas w glebie i roślinie – aktualny stan wiedzy. *Polsce. Studia i Raporty IUNG – PIB*, 63(17): 67-84.
- Wojciechowska E, Matej-Łukowicz K, Nawrot N i in. (2019) Wstępna ocena wielkości stężeń związków azotu i fosforu odprowadzanych z wodami powierzchniowymi do Zatoki Puckiej z terenu gminy Puck. *Technologia Wody* 4 (66): 14-21.

12. Znaczenie gospodarcze jęczmienia zwyczajnego (*Hordeum vulgare* L.)

The economic importance of barley

Stadnik Barbara

Instytut Nauk Rolniczych, Ochrony i Kształtowania Środowiska, Kolegium Nauk Przyrodniczych,
Uniwersytet Rzeszowski

Opiekun naukowy: dr hab. inż. Renata Tobiasz-Salach prof. UR

Stadnik Barbara: bajda1493@gmail.com

Słowa kluczowe: produkcja jęczmienia, wykorzystanie ziarna

Streszczenie

Jęczmień zwyczajny należy do najważniejszych gatunków roślin uprawnych na świecie. Powierzchnia jego uprawy w Polsce wynosi prawie milion hektarów i skoncentrowana jest w południowo-zachodnich i zachodnich regionach kraju. Skład chemiczny jęczmienia zwyczajnego zależy od odmiany oraz warunków glebowo-klimatycznych. Wymagania jakościowe stawiane ziarnu zależne są od kierunku jego wykorzystania. Obecnie w Krajowym Rejestrze COBORU wszystkie odmiany jęczmienia browarnego są odmianami jarymi. Jęczmień ma duże znaczenie w całokształcie gospodarki zbożowej zarówno w kraju, jak i na świecie. Wynika to z uniwersalności wykorzystania ziarna. Najczęściej jest ono przeznaczane do sporządzania pasz treściwych dla zwierząt. Ponadto służy jako surowiec w przemyśle browarniczym i spożywczym. Ziarno i słoma jęczmienna przeznaczane mogą być do bezpośredniego spalania oraz jako surowiec do produkcji biopaliw.

1. Wstęp

Jęczmień zwyczajny (*Hordeum vulgare* L.) jest gatunkiem należącym do rodziny wiechlinowatych (*Poaceae*). Wywodzi się ze stref umiarkowanych półkuli północnej. Obecnie uprawiany jest na wszystkich kontynentach. Jest zbożem o umiarkowanych wymaganiach klimatycznych i glebowych oraz cechuje się stosunkowo wysokim potencjałem plonowania. Jęczmień można uprawiać w różnych warunkach glebowych, jednak duży udział zbóż w strukturze zasiewów niesie za sobą konieczność uwzględnienia niekorzystnych warunków siedliskowo-agrotechnicznych. Uprawa jęczmienia po: –pszenicy, pszenżycie i życie sprzyja wzrostowi zachwaszczenia oraz porażeniu przez choroby podstawy źdźbła. Najkorzystniejszym przedplonem dla jęczmienia zwyczajnego są okopowe, bobowate drobno i grubonasienne oraz oleiste. Należy unikać uprawy tego gatunku w monokulturze. Wyróżnia się formy jęczmienia: dwu- i czterorzędowe (Kotecki i in. 2020). Jęczmień jest gatunkiem o dużym znaczeniu gospodarczym. Obok pszenicy, ryżu i kukurydzy jest jednym z najważniejszych zbóż uprawianych na świecie. Powierzchnia uprawy tego gatunku w 2019 roku wyniosła ponad 51 milionów hektarów (FAO 2021). Popularność jęczmienia zwyczajnego wynika z możliwości jego wszechstronnego zastosowania. Wykorzystywany jest jako pasza dla zwierząt, surowiec do produkcji środków spożywczych oraz produkcji piwa. Wzrasta również zainteresowanie jego użyciem jako surowca do produkcji biopaliw (Newton i in. 2011). W Polsce powierzchnia przeznaczona pod uprawę tego gatunku wynosi prawie milion ha (GUS 2020). W kraju występuje regionalne zróżnicowanie produkcji upraw roślin na które wpływ ma jakość gleby, poziom agrotechniki, struktura obszarowa gospodarstw oraz warunki organizacyjno-ekonomiczne i przyrodnicze. Większą intensywnością produkcji jęczmienia odznaczają się południowo-zachodnie i zachodnie regiony kraju, które ze względu na dość wysoki wskaźnik waloryzacji rolniczej przestrzeni produkcyjnej i poziom kultury rolnej posiadają lepsze warunki do produkcji ziarna o wysokiej jakości (Leszczyńska 2015). Skład chemiczny jęczmienia zwyczajnego uwarunkowany jest zarówno czynnikami genetycznymi, jak i środowiskowymi, (Gąsiorowski 1997; Noworolnik i in. 2013). Podstawowym materiałem energetycznym zbóż jest skrobia. W jęczmieniu zwyczajnym jej zawartość wynosi 47–64% s.m. Zawartość białka waha się w granicach 10–16%, osiągając nawet 18% w zależności od odmiany i zastosowanej w uprawie dawki

nawożenia azotowego. W porównaniu z pszenicą i kukurydzą frakcje białka jęczmienia wykazują wyższą wartość odżywczą. Zawartość tłuszczów w ziarnie w zależności, czy jest to forma oplewiona, czy naga mieści się w przedziale 1,9–7,0% s.m. W tłuszczu jęczmiennym, wśród lipidów niepolarnych dominuje frakcja triacylogliceroli o wysokim udziale kwasów tłuszczowych nienasyconych. Oprócz węglowodanów, białka i tłuszczów znaczny udział w ziarnie ma celuloza. Jej zawartość mieści się w przedziale od 2 do 8 % (Gąsiorowski 1997; Wirkijowska i in. 2016).

Hodowla nowych odmian jęczmienia zwyczajnego skupia się przede wszystkim na zmniejszeniu wrażliwości na odczyn gleby, suszę oraz zwiększeniu MTZ i zawartości białka w ziarniakach, a także na zwiększeniu mrozoodporności jęczmienia ozimego. Podział odmian jęczmienia na pastewne i browarne wynika z różnic w wymaganiach jakościowych stawianym ziarnu w zależności od sposobu wykorzystania. Według stanu na 30 kwietnia 2020 w Krajowym Rejestrze COBORU zarejestrowanych było 87 odmian jęczmienia jarego i 32 odmiany jęczmienia ozimego. Wśród odmian jarych 27 z nich to odmiany browarne, zaś 60 to odmiany pastewne. Obecnie brak formy ozimej w typie browarnym (COBORU 2020). Ziarno jęczmienia przeznaczone jako surowiec do produkcji piwa oceniane jest pod innym kątem niż odmiany pastewne. Najważniejszym kryterium wyboru odmiany browarnej, poza plennością, jest jej wartość technologiczna. Jednym z najważniejszych parametrów jest zawartość białka w ziarnie, która powinna być niska z przeznaczeniem dla browarnictwa, a wysoka na cele pastewne i spożywcze (Tab. 1).

Tab. 1. Kryteria jakości ziarna jęczmienia jako surowca do produkcji słodu, celów paszowych i konsumpcyjnych (Gąsiorowski 1997).

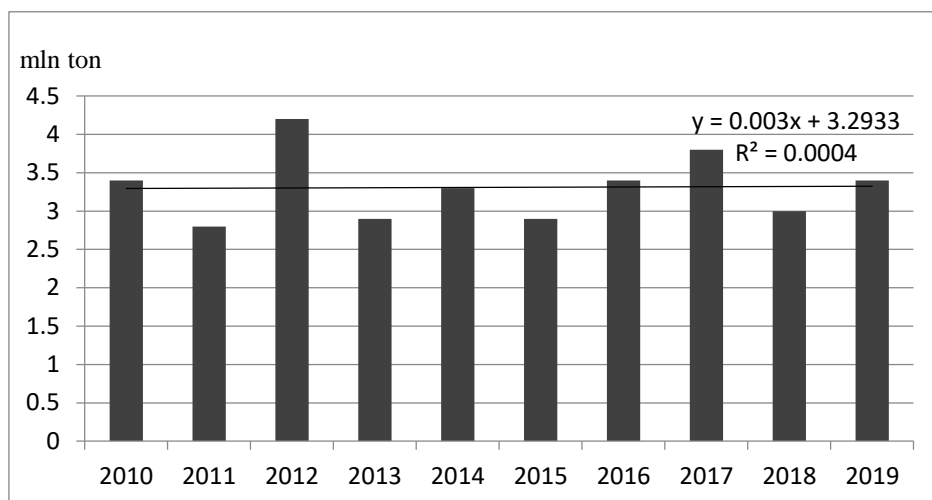
Kryterium jakości	Jęczmień browarny	Jęczmień paszowy	Jęczmień konsumpcyjny
Plewka (łuska)	pożądana, cienka	niepożądana	niepożądana
Zawartość:			
białka ogółem	niska	wysoka	wysoka
lizyny	-	wysoka	wysoka
skrobi	wysoka	wysoka	wysoka
tłuszczów	-	wysoka	wysoka
β -glukanów	niska	niska	wysoka
Zdolność kiełkowania	bardzo wysoka	wysoka	wysoka

2. Wielkość produkcji jęczmienia zwyczajnego

Światowa produkcja ziarna jęczmienia wynosi około 159 milionów ton rocznie. Największym producentem na świecie jest Rosja, z wielkością produkcji 20,4 mln ton. Na drugim miejscu znajduje się Francja (13,5 mln ton), tuż za nią Niemcy (11,6 mln ton). Polska plasuje się na 16 miejscu (FAO 2021). W 2019 r. ogólna powierzchnia zasiewów w Polsce wyniosła ok. 10,9 mln ha⁻¹. Największy udział w strukturze zasiewów miały zboża – 72,4%. Ich powierzchnia uprawy ogółem wyniosła ponad 7,9 mln ha⁻¹. Jęczmień zwyczajny uprawiany był na areale 975 tys. ha⁻¹. Średni udział jęczmienia w powierzchni uprawy pięciu podstawowych zbóż i mieszanek zbożowych wynosi około 10,9% (GUS 2020). Plonowanie jęczmienia jest ściśle determinowane przebiegiem warunków atmosferycznych występujących w poszczególnych latach. Zbiory tego gatunku w Polsce utrzymują się na stałym poziomie i wynoszą około 3-3,5 mln ton (Tab. 1 (Rys.1)). W 2019 roku najwięcej upraw jęczmienia zlokalizowanych było na terenie województwa wielkopolskiego (16%), lubelskiego i kujawsko-pomorskiego (po około 11%). Eksport jęczmienia w roku gospodarczym 2019/2020 wyniósł 119 tys. ton i stanowił 2% polskiego eksportu ziarna zbóż. Największymi partnerami handlowymi Polski są kraje Unii Europejskiej do których trafia około 75% eksportowanego ziarna. Spośród nich pierwsze miejsce zajmują Niemcy (84 tys. ton – 71% eksportu

ziarna z Polski), natomiast głównym kierunkiem wywozu tego zboża do krajów trzecich jest Maroko (29 tys. ton – blisko 25% eksportu) (GUS 2020).

Rys. 1. Zbiory jęczmienia w Polsce w latach 2010-2019 (GUS 2011-2020).



3. Znaczenie paszowe

Rośliny zbożowe są przede wszystkim surowcem paszowym dla produkcji zwierzęcej. Do czynników decydujących o wyborze gatunku zboża jako surowca do produkcji pasz przemysłowych należy jego wartość paszowa, gatunek karmionych zwierząt, poziom wydajności jednostkowej, a także cena i dostępność danego surowca na rynku (Jaśkiewicz i Sułek 2017). Jęczmień jest jednym z najbardziej wartościowych zbóż pastewnych. Głównym kierunkiem użytkowania tego gatunku zarówno w Polsce jak i na świecie jest uprawa na ziarno przeznaczane na cele paszowe (Leszczyńska 2015). W naszym kraju prawie 70 % plonów służy do skarmiania zwierząt. Większość skarmiana jest bezpośrednio w gospodarstwach. Niewielką część przeznaczają się na sporządzanie pasz treściwych (Kotecki i in. 2020). Wysoka zawartość białka (ustępująca pod tym względem tylko pszenicy) oraz mniejszy udział w ziarnie substancji nieżywniowych sprawia, że jest gatunkiem podstawowym w żywieniu wielu gatunków zwierząt gospodarskich. Jęczmień stanowi wartościową paszę szczególnie dla zwierząt przeżuwających, wykorzystanie ziarna przez zwierzęta monogastryczne jest gorsze z powodu dużej zawartości włókna surowego. Ziarno jęczmienia zwyczajnego, ze względu na sprzyjające uprawie tej rośliny warunki klimatyczno-glebowe Polski oraz wysoką zawartość skrobi jest podstawowym surowcem w naszym kraju do sporządzania mieszanek treściwych dla bydła wysokoprodukcyjnego. W 1 kg suchej masy zawiera około 55–74% skrobi, około 12,6% białka ogólnego, 1,2–2,4% tłuszczu i 2–20% β-glukanów, natomiast wartość pokarmowa w systemie INRA dla energii netto to 1,07 JPM (jednostek paszowych produkcji mleka) oraz 1,05 JPŻ (jednostek paszowych produkcji żywca) (Śliwiński 2017).

4. Znaczenie żywieniowe

Produkty zbożowe od wieków były podstawą diety człowieka. Współczesnemu człowiekowi zboża i ich przetwory dostarczają w codziennej racji pokarmowej około 30 % energii i białka oraz około 54 % węglowodanów. Oprócz składników energetycznych są one bogatym źródłem licznych substancji bioaktywnych (Zieliński i in. 2012). Aktualnie coraz więcej uwagi poświęca się tzw. zbożom niechlebowym do których zaliczany jest również jęczmień zwyczajny (*Hordeum vulgare*). W naszym kraju na spożycie przez ludzi przeznaczają się 3,2 % zbiorów jęczmienia zwyczajnego (Kotecki i in. 2020). Zawartość białka i skład aminokwasowy w produktach jęczmiennych są

uwarunkowane technologią obróbki ziarna oraz stopniem ich przetworzenia. W przemyśle spożywczym z ziarna jęczmienia pozyskuje się głównie pęczak (zwykły i obtaczany), kaszę łamaną i perłową (grubą, średnią, drobną), płatki, otręby oraz mąkę (Gąsiorowski 1997). Pod względem żywieniowym obróbka mechaniczna ziarna zbóż związana z obłuskiwaniem i przemiałem na mąki wyciągowe (jasne), usuwająca zewnętrzne części ziarniaka oraz zarodek oceniana jest przez dietetyków negatywnie, gdyż powoduje utratę cennych związków odżywczych (Zieliński i in. 2012, Kołodziejczyk i Michniewicz 2018). Leżące u podstawy piramidy żywienia pełnoziarniste, niskoprzetworzone produkty zbożowe, w tym jęczmieniane, są szczególnie cenne w diecie ludzi dzięki wysokiej zawartości błonnika pokarmowego oraz szeregu związków biologicznie aktywnych. Podkreśla się również wysoką zawartość witaminy E, polifenoli, steroli roślinnych i przeciwutleniaczy (Gawęcki i Obuchowski 2016; Wirkijowska i in. 2016). Ogólna zawartość białka w niskoprzetworzonych produktach jęczmiennych mieści się w przedziale od około 9% s.m. w płatkach jęczmiennych typu „hot meals” do 12% s.m. w kaszy jęczmiennej. W porównaniu z pszenicą i kukurydzą białka jęczmienia wykazują wyższą wartość odżywczą. W ziarniakach oplewionych jęczmienia średnia zawartość aminokwasów egzogennych wynosi około 32%, w formach nieoplewionych około 31% (Kawka 2004; Wirkijowska i in. 2016). Błonnik pokarmowy, a szczególnie β -glukany jęczmienia wykazują korzystne oddziaływanie w profilaktyce i leczeniu wielu dietozależnych chorób cywilizacyjnych takich jak otyłość, cukrzyca, choroby układu krążenia, nowotwory jelita grubego. Procesy przetwórcze mają ujemny wpływ na wartość żywieniową i funkcjonalną produktów jęczmiennych, dlatego należy sięgać po produkty niskoprzetworzone takie jak np. pęczak, otręby, a także kasze i płatki typu „hot meals”, które są głównymi produktami jęczmiennymi dostępnymi na rynku. Wysoką zawartością przeciwutleniaczy charakteryzują się przede wszystkim otręby jęczmieniane, ponieważ substancje te przechodzą do nich podczas obróbki mechanicznej zbóż. Sprawia to, że produkt ten jest atrakcyjnym dla konsumenta pośrednim produktem przemiału ziarna. W przemyśle kaszarskim najbardziej przydatne jest ziarno dorodne, dobrze wypielnione, charakteryzujące się dużą zawartością białka o szklistym bielmie. Na kaszę najlepsze jest ziarno jęczmienia dwurzędowego, głównie jarego (Zieliński i in. 2012; Kawka i in. 2015; Wirkijowska i in. 2016).

5. Surowiec dla przemysłu

Zastosowanie jęczmienia zwyczajnego w przemyśle polega przede wszystkim na produkcji słodu. W tym celu wykorzystywane są odmiany jare w typie browarnym. Słód jęczmienny jest mieszaniną węglowodanów wymaganych w procesie fermentacji alkoholowej. Wykorzystywany jest głównie w browarnictwie do produkcji piwa i gorzelnictwie do produkcji etanolu (Kotecki i in. 2020). Branża piwna w Polsce charakteryzuje się od wielu lat dynamicznym rozwojem. Z roku na rok wzrasta popyt na napoje alkoholowe, który wynika ze wzrostu konsumpcji i zwiększonego eksportu. Spożycie piwa na 1 mieszkańca w 2019 roku w naszym kraju wyniosło 97,1 l (GUS 2020). W 2018 roku przemysł słodowniczo-piwowarski przetworzył 730 tys. ton ziarna jęczmienia. Krajowa produkcja zaspokaja około 70% potrzeb przemysłu piwowarskiego, pozostała część pochodzi z importu (Kotecki i in. 2020). Do produkcji słodu na potrzeby browarnictwa najbardziej odpowiedni jest jęczmień jary dwurzędowy. Przydatność jęczmienia do celów browarniczych determinowana jest przez zespół cech. Przede wszystkim są to parametry technologiczne, które pozwalają scharakteryzować jakość uzyskanego z ziarna słodu. Uprawa jęczmienia browarnego w porównaniu z uprawą jęczmienia pastewnego wymaga większej konsekwencji i dokładności, aby stworzyć optymalne warunki do uzyskania wysokiego plonu ziarna z zachowaniem jego określonych cech jakościowych. Ważnym aspektem jest dawka nawożenia azotem oraz stosowanie niektórych herbicydów, które wpływają dodatnio na plon, ale mogą ujemnie oddziaływać na jakość ziarna (Noworolnik 2014). Najważniejszym kryterium w doborze odmiany browarnej jest jej wartość technologiczna, na którą składają się parametry jakościowe słodu i brzeczki oraz określone cechy ziarna (Gąsiorowski 1997). Ziarno jęczmienia przeznaczonego do produkcji słodu musi spełniać określone wymogi. Powinno cechować się jednolitością odmianową, odpowiednim kształtem, wysokim wyrównaniem, niską zawartością zanieczyszczeń oraz wysoką zdrowotnością, swoistym kolor i zapachem, brakiem szkodników zbożowo-mącznych, a także niską zawartością białka (9,5-

11,5% s.m.), wysoką zdolnością i energią kiełkowania oraz dużą wydajnością ekstraktu w słodzie. O ekstraktywności ziarna jęczmienia decyduje zawartość skrobi, która podczas przerobu ulega scukrzeniu i przechodzi do brzcзки (mieszaniny słod, chmielu i wody), a przez to wpływa na wydajność warzelni (Kotecki i in. 2020).

6. Surowiec dla energetyki

Podstawowym zadaniem rolnictwa jest produkcja surowców do produkcji żywności i pasz dla zwierząt hodowlanych. Niewykorzystana w tych sektorach nadwyżka biomasy może być traktowana jako potencjalny surowiec energetyczny. W ostatnich latach wzrosło zainteresowanie wykorzystaniem zbóż na cele energetyczne. Stwarza to możliwość zagospodarowania ziarna nienadającego się na paszę, wilgotnego, zainfekowanego grzybami, czy też zanieczyszczonego szkodnikami (Jaśkiewicz i Sułek 2017). Ziarno zbóż, w tym jęczmienia może być przeznaczane na bezpośrednie spalanie lub służyć do produkcji bioetanolu. Wśród najważniejszych efektów wykorzystania ziarna na cele energetyczne wymienia się ograniczenie zużycia surowców kopalnych, zmniejszenie emisji szkodliwych związków do atmosfery, zerowy bilans emisji dwutlenku węgla, a także możliwość wykorzystania powstałego popiołu do nawożenia pól. Zboża jako paliwo, służące do ogrzewania są wygodnym i bezpiecznym surowcem ekologicznym. Wartość opałowa jęczmienia mieści się w przedziale 16,4-17,2 MJ kg⁻¹ i zależna przede wszystkim od jego wilgotności. Na przydatność ziarna dla pozyskania energii wpływ ma również nawożenie azotowe, warunki glebowe oraz rozkład temperatur i opadów w okresie wegetacji tego gatunku (Kaszkowiak i Kaszkowiak 2010). Oprócz ziarna do produkcji energii może być wykorzystany produkt uboczny powstający z upraw jęczmienia – słoma. Podobnie jak w przypadku ziarna najważniejszą cechą decydującą o jej przydatności jest jej wilgotność. Maksymalna dopuszczalna wilgotność słomy do celów energetycznych powinna zawierać się w granicach 18-22%. Zbyt wysoka wilgotność powoduje problemy podczas magazynowania, rozdrabniania oraz transportu oraz wpływa ujemnie na wartość opałową. Słoma zbożowa wykorzystywana w energetyce z reguły wymaga odpowiedniego przetworzenia. Do spalania przeznaczana jest zwykle w formie zagęszczonej – brykietu lub peletu (Żabiński i Sadowska 2013).

7. Podsumowanie

Jęczmień zwyczajny ma duże znaczenie gospodarcze, dzięki możliwości wielokierunkowego wykorzystania ziarna. W naszym kraju jest ono przeznaczane przede wszystkim jako pasza dla zwierząt hodowlanych, szczególnie przydatna w żywieniu zwierząt przeżuwających. Poza tym służy jako surowiec dla przemysłu zbożowo-młynarskiego. Z ziarna jęczmienia produkuje się m.in. mąkę, kaszę i otręby. Pełnoziarniste produkty jęczmienne charakteryzują się wysokimi walorami odżywczymi i spełniają rolę żywności funkcjonalnej. Specyficznym kierunkiem wykorzystania ziarna jęczmienia jest produkcja słod, którego największe ilości wykorzystuje się w przemyśle piwowarskim. Ziarno i słoma z upraw jęczmienia służyć mogą jako surowiec do produkcji energii. Każdy z kierunków użytkowania jęczmienia wymaga innych cech jakościowych ziarna.

8. Literatura

- Centralny Ośrodek Badania Odmian Roślin Uprawnych (2020) Lista opisowa odmian roślin rolniczych 2020. Rośliny zbożowe.
- Gawęcki J, Obuchowski W (2016) Produkty zbożowe. Technologia i rola w żywieniu człowieka, Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu.
- Gąsiorowski H (1997) Jęczmień – chemia i technologia. Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne.
- Główny Urząd Statystyczny (2011-2020) Rolnictwo w latach 2010-2019.
- Główny Urząd Statystyczny (2020) Dostawy na rynek krajowy oraz spożycie niektórych artykułów konsumpcyjnych na 1 mieszkańca w 2019 roku.
- <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC> (dostęp w dniu 15.04.2021)

- Jaśkiewicz B, Sułek A (2017) Kierunki zmian produkcji zbóż w Polsce. Roczniki Naukowe Stowarzyszenia Ekonomistów Rolnictwa i Agrobiznesu 19(1): 66-73.
- Kaszkowiak E, Kaszkowiak J (2010) Energetyczne wykorzystanie ziarna owsa i jęczmienia jarego. Inżynieria i Aparatura Chemiczna 49(5): 57-58.
- Kawka A (2010) Współczesne trendy w produkcji piekarskiej – wykorzystanie owsa i jęczmienia jako zbóż niechlebowych. Żywność Nauka Technologia Jakość 17(3): 25-43.
- Kawka A (2004) Jęczmień i jego produkty. Charakterystyka, otrzymywanie i wykorzystanie w żywieniu człowieka. Roczniki Akademii Rolniczej Poznań, Rozprawy Naukowe 342: 1-78.
- Kawka A, Patelska A, Jakubowski D (2015) Całoziarnowa mąka jęczmienna w produkcji pieczywa prozdrowotnego. Bromatologia i Chemia Toksykologiczna 48: 361 – 366.
- Kołodziejczyk P, Michniewicz J (2018) Ziarno zbóż i produkty zbożowe jako źródło błonnika pokarmowego. Żywność Nauka Technologia Jakość 25(3): 5-22.
- Kotecki A (red.), Artyszak A, Bielski S i in. (2020) Uprawa roślin. Tom II. Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu.
- Leszczyńska D. 2015. Regionalne zróżnicowanie produkcji jęczmienia w Polsce. Roczniki Naukowe Stowarzyszenia Ekonomistów Rolnictwa i Agrobiznesu 17(6): 151-156.
- Newton AC, Flavell AJ, George TS i in. (2011) Crops that feed the world 4. Barley: a resilient crop? Strengths and weaknesses in the context of food security. Food Security 3: 141-178.
- Noworolnik K (2014) Plonowanie i jakość ziarna jęczmienia jarego browarnego w zależności od wybranych czynników agrotechnicznych. Studia i Raporty IUNG-PIB 41(15):129-146.
- Noworolnik K, Wirkijowska A, Rzedzicki Z (2013) Znaczenie błonnika pokarmowego w diecie oraz jego zawartość w ziarnie jęczmienia jarego w zależności od odmiany i gęstości siewu. Fragmenta Agronomica 30(3): 132-139.
- Śliwiński B (2017) Skrobia jęczmienna i jej wykorzystanie w żywieniu bydła. Wiadomości Zootechniczne 55(2): 145–150.
- Wirkijowska A, Rzedzicki Z, Sobota A i in. (2016) Produkty jęczmienne w żywieniu człowieka. Polish Journal of Agronomy 25: 41–50.
- Zieliński H, Achremowicz B, Przygodzka M (2012) Przeciwtleniacze ziarniaków zbóż. Żywność. Nauka. Technologia. Jakość. 1(80): 5-26.
- Żabiński A, Sadowska U (2013) Ciepło spalania słomy jęczmienia uprawianego w warunkach zmiennego poziomu nawożenia potasowego. Inżynieria Rolnicza Agricultural Engineering 3(145): 387-392.

13. Uprawa roślin na cele energetyczne

Cultivation of plants for energy purposes

Stadnik Barbara, Migut Dagmara

Instytut Nauk Rolniczych, Ochrony i Kształtowania Środowiska, Kolegium Nauk Przyrodniczych, Uniwersytet Rzeszowski

Opiekun naukowy: dr hab. inż. Renata Tobiasz-Salach prof. UR

Stadnik Barbara: bajda1493@gmail.com

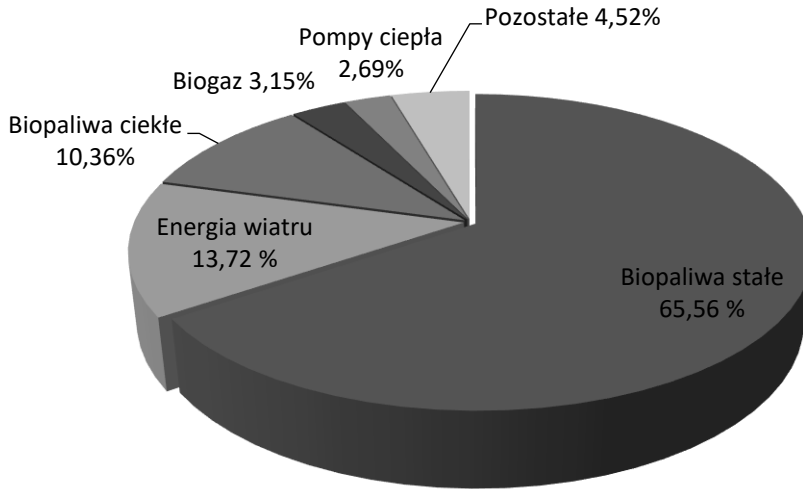
Słowa kluczowe: biomasa, rośliny energetyczne, energia odnawialna

Streszczenie

Wraz z rozwojem cywilizacji zwiększa się zapotrzebowanie na energię przy jednoczesnym stałym, silnym wyczerpywaniu się zasobów paliw kopalnianych. Wykorzystywanie konwencjonalnych źródeł energii przyczynia się do zwiększenia zanieczyszczenia środowiska oraz występowania efektu cieplarnianego. W związku z tym w ostatnich latach kładziony jest nacisk na poszukiwanie możliwości wykorzystania energii pochodzącej ze źródeł odnawialnych, które można uznać za niewyczerpywalne oraz przyjazne środowisku. Jednym z rodzajów alternatywnych źródeł energii jest biomasa roślinna pochodzenia rolniczego. Powszechność jej występowania i ogólnodostępność powodują, że ten rodzaj odnawialnego źródła energii cieszy się coraz większym zainteresowaniem sektora energetyki. W Polsce istnieją sprzyjające warunki dla uprawy roślin przeznaczanych na cele energetyczne. Najpopularniejszymi gatunkami uprawianymi dla pozyskania energii są wierzba wiciowa, topola, ślazowiec pensylwański, słonecznik bulwiasty, miskant olbrzymi, proso różgowe, mozga trzciniowa i perz wydłużony. Najczęściej spotykanym w uprawie gatunkiem jest wierzba. Spośród typowych roślin rolniczych na cele energetyczne przeznacza się przede wszystkim ziarno i słomę zbóż, nasiona rzepaku i słonecznika oraz buraki cukrowe i ziemniaki. Wartość energetyczna biomasy roślinnej zależy przede wszystkim od rodzaju, stanu surowca i jego wilgotności. Plony z upraw energetycznych można przeznaczać na bezpośrednie spalanie lub do produkcji biopaliw ciekłych i biogazu.

1. Wstęp

W ostatnich latach zasoby wydobywanych paliw kopalnych w szybkim tempie maleją. Z kolei energetyka konwencjonalna korzystająca z tych paliw w znacznym stopniu przyczynia się do wzrostu zanieczyszczenia środowiska. W związku z tym niezbędnym działaniem jest wykorzystywanie odnawialnych źródeł energii. Stanowią one alternatywę dla tradycyjnych nieodnawialnych nośników energii. Ich zasoby uzupełniają się w naturalnych procesach, co praktycznie pozwala traktować je jako niewyczerpywalne. Ponadto pozyskiwanie energii z tych źródeł uznaje się za wywierające mniejszy wpływ na środowisko naturalne w porównaniu do źródeł konwencjonalnych poprzez ograniczenie emisji szkodliwych substancji (Grzybek 2003). Unia Europejska kładzie nacisk na wzrost zużycia energii pochodzącej z OZE oraz inwestowanie w innowacyjne technologie. Polska, podobnie jak wszystkie kraje członkowskie Unii Europejskiej, musi ograniczać emisje gazów cieplarnianych. Jednym z ważniejszych sposobów realizacji tego zadania jest zastępowanie części tradycyjnych paliw transportowych biopaliwami, zaś węgla biomasą. Ramy polityki klimatyczno-energetycznej do roku 2030 zakładają zwiększenie do co najmniej 32 % udziału energii ze źródeł odnawialnych w całkowitym zużyciu energii (<https://ec.europa.eu>). W 2019 r. w Polsce wskaźnik udziału energii ze źródeł odnawialnych w końcowym zużyciu energii brutto wzrósł w skali roku o 0,70% p.proc i wyniósł 12,18% (GUS 2020). W przeważającym stopniu jej źródłem były biopaliwa stałe (Rys. 1), które uzyskuje się z przetwórstwa biomasy.



Rys. 2. Struktura pozyskania energii ze źródeł odnawialnych w Polsce wg nośników w 2019 r. (GUS 2020).

Biomasa to według Ustawy z dnia 20 lutego 2015 r. o odnawialnych źródłach energii stałe lub ciekłe substancje pochodzenia roślinnego lub zwierzęcego, które ulegają biodegradacji, pochodzące z produktów, odpadów i pozostałości z produkcji rolnej i leśnej oraz przemysłu przetwarzającego ich produkty oraz ziarna zbóż niespełniające wymagań jakościowych dla zbóż w zakupie interwencyjnym określonych w art. 7 rozporządzenia Komisji (WE) nr 1272/2009 z dnia 11 grudnia 2009 r. ustanawiającego wspólne szczegółowe zasady wykonania rozporządzenia Rady (WE) nr 1234/2007 w odniesieniu do zakupu i sprzedaży produktów rolnych w ramach interwencji publicznej (Dz. Urz. UE L 349 z 29.12.2009, str. 1, z późn. zm.) i ziarna zbóż, które nie podlegają zakupowi interwencyjnemu, a także ulegająca biodegradacji część odpadów przemysłowych i komunalnych, pochodzenia roślinnego lub zwierzęcego, w tym odpadów z instalacji do przetwarzania odpadów oraz odpadów z uzdatniania wody i oczyszczania ścieków, w szczególności osadów ściekowych, zgodnie z przepisami o odpadach w zakresie kwalifikowania części energii odzyskanej z termicznego przekształcania odpadów. Do produkcji biopaliw wykorzystuje się biomasę pozyskiwaną z różnych źródeł, do których zalicza się rolnictwo, leśnictwo, przemysł, gospodarkę komunalną. Głównymi składnikami energetycznymi biomasy roślinnej są: celuloza, hemicelulozy i lignina będące wielocząsteczkowymi biopolimerami (Niedziółka i Szpryngiel 2014). Jeden z rodzajów biomasy - biomasa roślinna w ostatnich latach jest obiektem coraz szerszego zainteresowania sektora energetyki oraz polityki. Zwiększaniu jej popularności sprzyja również rosnąca świadomość ekologiczna społeczeństw oraz chęć walki z globalnym ociepleniem. Biomasa roślinna jest stosunkowo trudnym w użytkowaniu paliwem, które wymaga odpowiedniego przetworzenia. Głównie jest to paliwo o znaczeniu lokalnym, które stanowi materiał niejednorodny, często o wysokiej wilgotności. Biomasa roślinna w stanie nieprzetworzonym charakteryzuje się stosunkowo małą gęstością, utrudniającą jej transport, magazynowanie i wykorzystanie w praktyce. Stąd zachodzi konieczność jej zagęszczenia np. w postaci pelletów lub brykietów. Dlatego też, w porównaniu z innymi powszechnie stosowanymi nośnikami energii, biomasa może wydawać się dość kłopotliwym surowcem energetycznym. Jednak jej potencjał energetyczny oraz ogólnodostępność, powodują, że jest powszechnie stosowanym w praktyce, odnawialnym źródłem energii (Piotrowski i in. 2004; Kuś i Matyka 2008). Wartość energetyczna biomasy roślinnej zależy zarówno od rodzaju, stanu surowca, a przede wszystkim od jego wilgotności. Wysoka zawartość wody powoduje obniżenie wartości opałowej, a tym samym ilości ciepła uzyskiwanego podczas spalania surowca. W związku z tym przed wykorzystaniem biomasy często wymagany zabiegiem jest jej dosuszenie, co z kolei zwiększa wymagane nakłady na produkcję energii z tego rodzaju źródła (Malinowska i in. 2014). W Polsce istnieją znaczne zasoby odłogowanej ziemi rolnej, które

z powodzeniem można przeznaczyć pod uprawy roślin energetycznych (Kacprzak i in. 2012; Niedziółka i Szpryngiel 2014).

2. Rośliny na cele energetyczne

Uprawy energetyczne to takie, których plon wykorzystuje się do wytworzenia ciepła, energii elektrycznej oraz paliwa ciekłego i gazowego. Możliwość wykorzystania roślin na cele energetyczne determinowana jest przede wszystkim wysokością plonu z jednostki powierzchni, zapotrzebowaniem na składniki pokarmowe oraz podatnością danego gatunku na niekorzystne czynniki środowiska. Rośliny przeznaczane do uprawy na cele energetyczne powinny charakteryzować się stabilnym plonowaniem oraz wysoką odpornością na choroby i szkodniki. Ważnym aspektem jest zdolność do adaptacji na możliwie rozległym obszarze oraz na terenach marginalnych –na których występuje problem zakwaszenia, zasolenia, czy też okresowych susz lub zalewania (Martyniak 2016). Najważniejszym warunkiem, jaki musi spełniać roślina energetyczna, jest wysoka wartość opałowa. Powinna ona mieścić się w granicach 15-19 MJ kg⁻¹ (Smaga 2017). O przydatności roślin do intensywnej uprawy dla wykorzystania w energetyce decyduje również efektywność energetyczna uprawy, czyli stosunek energii zawartej w biomasie do energii potrzebnej do jej wytworzenia, a także rodzaj węglowodanów tworzących biomasę ze względu na różną sprawność procesu jej przetwarzania. Ważna jest także możliwość mechanizacji prac agrotechnicznych, co ogranicza nakłady (Czeczko 2012). Dzięki uprawom roślin energetycznych można z powodzeniem wykorzystać grunty gorszej jakości, które obecnie są ugorowane lub odłogowane. Pod produkcję na ten cel mogą być także wykorzystane grunty zdewastowane i zdegradowane, do których należą m.in. gleby zanieczyszczone metalami ciężkimi, zasolone, nieprzydatne do uprawy roślin na cele konsumpcyjne i paszowe, ale spełniające wymagania dla upraw roślin energetycznych (Małuszyńska i in. 2013). Podstawowe grupy roślin energetycznych to rośliny drzewiaste szybkiej rotacji (wierzba, topola, robinia akacja), wieloletnie, szybko rosnące, corocznie plonujące byliny (ślazowiec pensylwański, topinambur), wieloletnie, szybko rosnące, corocznie plonujące trawy (mozga trzcinowata, miskant olbrzymi, miskant chiński, perz wydłużony, proso różgowate), oraz rośliny jednoroczne należące do takich grup jak zboża, oleiste, okopowe (Kacprzak i in. 2012).

3. Uprawy wieloletnie

Do uprawy na cele energetyczne preferowane są rośliny wieloletnie, których okres użytkowania wynosi przynajmniej 10-20 lat, gdyż zmniejsza to koszty ich uprawy. Konkretny dobór gatunków zależy od warunków glebowo-klimatycznych, wyposażenia technicznego gospodarstwa, a także wymagań punktów skupu odnośnie jakości biomasy (Malinowska i in. 2014; Buczyńska 2017). Najpopularniejszą obecnie w naszym kraju rośliną energetyczną jest wierzba (*Salix viminalis*) i jej liczne klony. Najwyższy plon z uprawy tego gatunku uzyskuje się przy zbiorze co 3 lata i wynosi on około 22 t ha⁻¹ na rok. Zaletą wierzby energetycznej są jej niskie wymagania glebowe. Można ją uprawiać praktycznie na każdym typie gleby. Inną rośliną drzewiastą, która z powodzeniem może być uprawiana jest topola (*Populus sp.*), która jest najszybciej rosnącym drzewem w naszych warunkach klimatycznych. Posiada zbliżone znaczenie użytkowe oraz środowiskowe jak wierzba. Najwyższe plony biomasy uzyskuje w warunkach odpowiedniej wilgotności gleby w okresie wegetacji. Biomasa pozyskiwana jest w cyklu 4 letnim lub 6 letnim, a jej roczna wydajność wynosi około 6- 12 ton suchej masy z hektara (Czeczko 2012). Wśród bylin popularnym gatunkiem uprawianym na cele energetyczne jest ślazowiec pensylwański (*Sida hermaphrodita*). Gatunek ten rośnie w postaci kęp o silnym systemie korzeniowym. Plantacje ślazuwca mogą być eksploatowane przez okres 15-20 lat. Roślina ta może być uprawiana na glebach wszystkich klas z wyjątkiem VI i słabych klas V. Zbioru biomasy dokonuje się w zależności od regionu od lutego do kwietnia. Oprócz ślazuwca inną popularną byliną uprawianą w naszym kraju jest słonecznik bulwiasty, zwany powszechnie topinamburem (*Helianthus tuberosus*). Zbiór w przypadku tego gatunku dokonywany jest pod koniec zimy. Bulwy można przeznaczyć do produkcji etanolu lub biogazu. Natomiast zeschnięte na pniu części nadziemne, mogą służyć do bezpośredniego spalania, produkcji brykietów lub peletów. Topinambur wykazuje wiele istotnych cech z punktu widzenia wykorzystania

energetycznego. Najważniejsze z nich to wysoki potencjał plonowania, niska wilgotność biomasy bez konieczności energochłonnego suszenia oraz możliwość pozyskania zarówno części nadziemnych, jak i podziemnych organów spichrzowych. Spośród wieloletnich traw uprawianych na cele energetyczne szczególnie popularny jest miskant olbrzymi (*Miscanthus sinensis gigantea*). Jest on rośliną typu fotosyntetycznego C4, przez co charakteryzuje go większa absorpcja CO₂ i bardzo szybki przyrost masy. Starsze okazy są odporne na niskie temperatury i cechują się wysokim plonem do 25 t ha⁻¹ (Kacprzak i in. 2012). Oprócz miskanta popularnym gatunkiem jest mozga trzcinowata (*Phalaris arundinacea* L.) której plon uzyskany z plantacji dwuletniej może wynosić 5-7 t ha⁻¹. W kolejnych latach wzrasta do zakresu 8-9 t ha⁻¹ przy wartości opałowej około 15 MJ kg⁻¹ (Tab.1). Celowo założona plantacja mozgi trzcinowatej może być intensywnie użytkowana okres 8-10 lat. Innym przykładem rośliny wieloletniej przydatnej w uprawie do celów energetyki jest perz wydłużony (*Agropyron elongatum*). Jest to trawa energetyczna przydatna do bezpośredniego spalania jak i wykorzystania masy zielonej do produkcji biogazu. Plantacja może być użytkowana podobnie jak w przypadku mozgi trzcinowatej przez 8 do 10 lat. Perz ma niewielkie wymagania glebowe oraz małe potrzeby wodne, toleruje w uprawie gleby skażone i zasolone. Zaletą gatunku jest niewielki koszt założenia plantacji w porównaniu z innym i roślinami energetycznymi, wysoki plon suchej biomasy po drugim roku uprawy na poziomie 12-15 ton z hektara. Wartość opałowa roślin wieloletnich uprawianych na cele energetyczne zależy od gatunku i mieści się w przedziale od 15,0 MJ·kg⁻¹ w przypadku ślazuwca pensylwańskiego do 18,4 MJ·kg⁻¹ u wierzby (Tab. 1).

Tab. 1. Orientacyjna wartość opałowa wybranych gatunków wieloletnich (Majtkowska i Majtkowski 2005, Komorowicz i in. 2009, Zawadzka i in. 2010).

Surowiec	Wartość opałowa [MJ kg ⁻¹]
Wierzba	17,6-18,4
Miskant olbrzymi	18,3
Topinambur	16,6
Rdest sachaliński	16,5
Róża wielokwiatowa	18,7
Ślazuwec pensylwański	15,0
Proso różgocate	16,0
Perz wydłużony	17,5
Mozga trzcinowata	16,0

4. Gatunki jednoroczne

Spośród gatunków jednorocznych do produkcji energii przeznaczac można nadwyżki ziarna zbóż (w tym kukurydzy), które nie zostały wykorzystane do celów spożywczych lub nie nadają się do spożycia przez ludzi lub zwierzęta (Mólka i Łapczyńska-Kordon 2011). Produkcja ziarna zbóż z przeznaczeniem na cele energetyczne jest jedną z alternatyw w działalności gospodarstw rolniczych. Ziarno i słoma każdego gatunku zbóż charakteryzuje się różną przydatnością do celów energetycznych. Wilgotność spalanego materiału ma znaczący wpływ zarówno na zawartość popiołu jak i na ciepło spalania. Wartość opałowa zbóż kształtuje się na poziomie od 15,3 MJ kg⁻¹ dla jęczmienia do 16,6 MJ kg⁻¹ dla owsa (Tab. 2) Ilość energii pozyskiwanej ze spalania zbóż i opłacalność uprawy poszczególnych gatunków przeznaczonych na cele energetyczne determinuje wysokość plonu możliwa do uzyskania w określonych warunkach pogodowych panujących w okresie wegetacji, przy optymalnym poziomie nawożenia azotowego. Owies ze względu na niskie wymagania glebowe oraz odporność na choroby podstawy źdźbła jest gatunkiem, który z powodzeniem wykorzystać można do produkcji energii. Wykorzystanie owsa na cele energetyczne jest efektywne ekonomicznie, zwłaszcza jeśli ziarno jest produkowane we własnym gospodarstwie, z wykorzystaniem technologii niskonakładowych (Głowacka i in. 2016). Kukurydza jest gatunkiem szczególnie przydatnym do produkcji biogazu, który produkowany jest przede wszystkim z kiszonki z całych roślin oraz CCM, a także kiszzonego i suszonego ziarna. Ziarno kukurydzy charakteryzuje się także wysoką przydatnością do produkcji bioetanolu, dzięki wysokiej wydajności alkoholu z jednego

hektara (Kaszkowiak i Kaszkowiak 2011). Ważnym surowcem otrzymywanym z uprawy zbóż, którego nadwyżki mogą być użyte do produkcji energii oprócz ziarna jest słoma. Jest ona odpadem z gospodarki rolnej, który może być wykorzystywany w energetyce i spalany jako sieczka, snopki, baloty lub pellet w zależności od rodzaju pieca do spalania biomasy. Wartość opałowa słomy owsianej jest stosunkowo wysoka i wynosi około 16,5 MJ·kg⁻¹ (Tab. 2). W wyniku nowych metod chowu zwierząt częstym odpadem z produkcji jest także siano. Z kilograma siana uzyskać można 17,2 MJ energii (Tab. 2) Siano i słoma to surowce chętnie wykorzystywane w energetyce. Jednak minusem ich użycia jest konieczność przetworzenia na produkt o większej gęstości co zwiększa koszty produkcji tego typu paliwa (Mółka i Łapczyńska-Kordon 2011).

Tab. 2. Wartość opałowa wybranych płodów rolnych (Kaszkowiak i Kaszkowiak 2011; Żabiński i Sadowska 2012; Mółka i Łapczyńska-Kordon 2012).

Surowiec	Wartość opałowa [MJ·kg ⁻¹]
Jęczmień	17,7
Pszenica	17,2
Owies	18,6
Kukurydza	16,0
Słoma owsiana	16,5
Siano	17,2

Oprócz zbóż przydatnymi dla przemysłu energetycznego gatunkami rolniczymi są rzepak, słonecznik, ziemniaki i buraki cukrowe. Rzepak jest gatunkiem uprawianym przede wszystkim dla tłoczenia z jego nasion oleju spożywczego, ale może być również wykorzystywany w energetyce do produkcji biodiesla. Obecnie ten rodzaj paliwa w naszym kraju produkowany jest przede wszystkim z oleju z rzepakowego i w znacznie mniejszej ilości z oleju słonecznikowego. Produkcja biopaliwa z rzepaku związana jest z powstawaniem produktów ubocznych, takich jak: poekstrakcyjna śruta rzepakowa, wytlók, słoma i glicerol (KOWR 2020). Rośliny okopowe w przemyśle energetycznym przeznaczone są głównie do produkcji bioetanolu i biogazu. Buraki cukrowe wykorzystywane są poprzez zagospodarowanie odpadu powstałego w procesie produkcji cukru - melasy. Melasa obok kukurydzy oraz pozostałości produkcyjnych skrobi z przetwórstwa pszenicy jest podstawowym surowcem wykorzystywanym w naszym kraju do produkcji bioetanolu. Buraki cukrowe i ziemniaki o podwyższonej zawartości suchej masy są przydatnym surowcem do produkcji biogazu (KOWR 2020).

5. Podsumowanie

W wyniku działań i regulacji prawnych mających na celu ograniczenie negatywnego wpływu wykorzystywania paliw kopalnych na środowisko w ostatnich latach wzrasta zainteresowanie pozyskiwaniem energii ze źródeł odnawialnych. Jednym z nich jest biomasa roślinna pochodzenia rolniczego. W Polsce na cele energetyczne przeznaczają się plony z wieloletnich plantacji energetycznych m.in. takich gatunków jak wierzba wiciowa, ślazier pensylwański i miskant olbrzymi. Na cele energetyczne przeznaczane są również plony z upraw jednorocznych. Najpopularniejsze rośliny rolnicze uprawiane na cele energetyczne to zboża, rzepak, burak cukrowy. Liczba i różnicowanie gatunków roślin przydatnych do uprawy na cele energetyczne sprawia, że można uznać je za jedno z najbardziej obiecujących źródeł energii odnawialnej w Polsce.

6. Literatura

- Buczyńska E (2017) Uprawy energetyczne w Polsce. http://swiatoze.pl/aktualnosci/uprawy-energetyczne-w-polsce_61.html (dostęp w dniu 15.04.2021).
- Czczeko R (2012) Uprawy wybranych roślin energetycznych. *Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe* 13(10): 170-172.
- Głowacka A, Zych M, Żońniczek J (2016) Środowiskowe i ekonomiczne skutki wykorzystania ziarna owsa na cele energetyczne. *Inżynieria Ekologiczna* 49: 117–123.

- Główny Urząd Statystyczny (2020) Energia ze źródeł odnawialnych w 2019 r.
- Grzybek A (2003) Kierunki zagospodarowania biomasy na cele energetyczne. *Więś Jutra* 9(62): 10-11.
- <https://ec.europa.eu> (dostęp w dniu 13.04.2021)
- Kacprzak A, Michalska K, Romanowska-Duda BZ i in. (2012) Rośliny energetyczne jako cenny surowiec do produkcji biogazu. *Kosmos. Problemy Nauk Biologicznych* 2(295): 281-293.
- Kaszkwiał E, Kaszkwiak J (2011) Wykorzystanie ziarna kukurydzy na cele energetyczne. *Inżynieria i Aparatura Chemiczna* 50: 35–36.
- Krajowy Ośrodek Wsparcia Rolnictwa (2020) Biuletyn Informacji Publicznej. Informacje dotyczące produkcji biokomponentów.
- Kuś J, Matyka M (2008) Produkcja biomasy na cele energetyczne jako alternatywny kierunek produkcji. *Więś Jutra* 8-9(121-122): 8-10.
- Majtkowska G, Majtkowski W (2005) Trawy źródłem energii. [w:] *Trawy i rośliny motylkowate*. IHAR-Agroserwis: 94–97.
- Malinowska E, Wiśniewska-Kadżajan B, Jankowski K i in. (2014) Ocena przydatności biomasy różnych roślin na cele energetyczne. *Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Przyrodniczo-Humanistycznego w Siedlcach, Seria: Administracja i Zarządzanie* 102: 49-61.
- Małuszyńska I, Wodziński M, Małuszyński M (2013) Wykorzystanie biomasy do celów energetycznych. Możliwości i ograniczenia, *Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska* 62: 487–497.
- Martyniak D (2016) Rośliny energetyczne przydatne do zagospodarowania gleb o słabej wartości rolniczej. Materiały konferencyjne. Fundusz Promocji Ziarna Zbóż i Przetworów Zbożowych 14.10.2016 r. Radzików: 1-56.
- Mółka J, Łapczyńska-Kordon B (2011) Właściwości energetyczne wybranych gatunków biomasy. *Inżynieria Rolnicza* 6(131): 141–147.
- Niedziółka I, Szpryngiel M (2014) Możliwości wykorzystania biomasy na cele energetyczne. *Inżynieria Rolnicza* 1(149): 155-164.
- Piotrowski K., Wiltowski T, Mondal K (2004) Biomasa – kłopotliwe pozostałości czy strategiczne rezerwy czystej energii? Cz. II. *Czysta Energia* 11(37): 16-18.
- Smaga M (2017) Porównanie roślin energetycznych uprawianych w Polsce. *Magazyn Biomasa* 01/2017: 22-24.
- Ustawa z dnia 20 lutego 2015 r. o odnawialnych źródłach energii.
- Zawadzka A, Imbierowicz M i in. (2010) Inwestowanie w energetykę odnawialną. Polska Akademia Nauk Oddział w Łodzi, Komisja Ochrony Środowiska: 169–184.
- Żabiński A, Sadowska U (2012) Ciepło spalania ziarniaków zbóż. Wstęp i cel badań *Materiał i metodyka* 2: 353–359.

14. Bezpieczeństwo energetyczne Polski – stan aktualny i perspektywy

Sources of potential internal crises in Poland

Tomasz Staszewski

Wydział Budownictwa i Nauk o Środowisku, Politechnika Białostocka

Opiekun naukowy dr hab. inż. Mariusz Adamski prof. PB

Słowa kluczowe: odnawialne źródła energii, środowisko, ekologia, dywersyfikacja

Streszczenie

W opracowaniu przedstawiono istotę pojęcia bezpieczeństwa i bezpieczeństwa energetycznego, a także strategię energetyczną Polski i jej podstawowe cele. Następnie wyróżniono rodzaje odnawialnych źródeł energii oraz dokonano ich charakterystyki, w szczególności wskazując korzyści z ich wykorzystywania płynące dla środowiska i człowieka. Wiele miejsca w niniejszym opracowaniu poświęcono omówieniu istoty gospodarki o obiegu zamkniętym i jej znaczeniu dla problematyki ochrony środowiska, w tym głównie korzystnego wpływu na ograniczenie zmian klimatu. Rozważania zawarte w opracowaniu zostały podsumowane i zakończone sporządzeniem wniosków.

Celem niniejszego opracowania jest przedstawienie istoty bezpieczeństwa energetycznego Polski oraz jego wpływu na bezpieczeństwo narodowe i gospodarkę kraju, a także minimalizowanie zagrożeń ekologicznych, które przyczyniają się do niekorzystnych zmian klimatu.

1. Wstęp

W wyniku zmian transformacyjnych w Europie Środkowej i Wschodniej przełomu lat osiemdziesiątych i dziewięćdziesiątych XX wieku oddaliło się widmo wojny globalnej i pojawiła się nadzieja na lepszą przyszłość. Ludzkość przystąpiła do realizacji marzenia zbudowania świata bez wojen, nędzy, terroryzmu państwowego oraz niedorzecznych ideologii i wynaturzeń systemowych. Bezpieczeństwo przestało być iluzją i nabrało konkretnych kształtów pozbawionych paranoi strachu, opierając się na realnych kryteriach osadzonych w coraz bardziej pozytywnej rzeczywistości.

„Sielanka” została przerwana 11 września 2001r. atakiem samobójczym wykonanym przy użyciu porwanych samolotów pasażerskich w budynki *World Trade Center* i *Pentagon*, który spowodował śmierć około 3000 osób (Tomczyk 2010). W roku 2002 dokonano zamachów terrorystycznych w Bali, w 2003 w Madrycie, w 2005 w Londynie, a także wielu innych w kolejnych latach. Nie mniejsze przerażenie budziła zbrodnicza działalność powstałego państwa islamskiego. Coraz bardziej radykalizować zaczęła się Rosja, która prowokowała konflikty ze swoimi sąsiadami, a w 2014 roku dokonała aneksji Krymu, a następnie przy pomocy separatystów konflikt z Ukrainą w Donbasie.

Jednocześnie zaczęło narastać zagrożenie bezpieczeństwa ekologicznego, szczególnie poprzez zmiany klimatu, które niosą ze sobą różne katastrofy naturalne (tsunami, powódzie, susze, pożary, utrata bioróżnorodności, zanieczyszczenie powietrza, wody, gleby itd.), a także epidemie (COVID-19 oraz wiele innych nie mniej groźnych). Powodem wielu z tych nieszczęść jest nieodpowiedzialna działalność człowieka, w tym także realizowana w obszarze energetyki, głównie poprzez powszechne wykorzystywanie nieprzyjaznych dla środowiska naturalnego źródeł energii, zaniebując możliwości tkwiące w odnawialnych źródłach. W konsekwencji doszło do sytuacji, w której bezpieczeństwo energetyczne kraju jest istotnie zagrożone. Wynika to z ograniczania się zasobów naturalnych (głównie ropy i gazu) i dostępu do nich, a także gromadzenia zapasów. Wpływ na to mają również wymagania stawiane przez UE, ONZ i inne organizacje międzynarodowe, które nakładają różne ograniczenia w wykorzystywaniu nieprzyjemnych dla środowiska i ludzi źródeł energii (np. węgla, który stanowi nadal podstawę polskiej energetyki), a także wymogi w zakresie zwiększenia udziału odnawialnych źródeł energii w polskiej energetyce. Bezpieczeństwu energetycznemu Polski nie sprzyja również istniejące nadal pewne uzależnienie się od dostaw gazu i ropy naftowej z nieprzewidywalnej Rosji. Należy podkreślić, iż niedoskonałość bezpieczeństwa

energetycznego niekorzystnie wpływa na gospodarkę, bezpieczeństwo kraju, a także poszczególnych jego mieszkańców.

2. Pojęcie i istota bezpieczeństwa energetycznego

Utrzymujący się od marca 2014r. kryzys ukraiński unaoczniał kruchość podstaw bezpieczeństwa zarówno w wymiarze narodowym jak i globalnym. To, co wydawało się przeszłością niepodziewanie powróciło w postaci aneksji Krymu przeprowadzonej przez „zielonych ludzików” (faktycznie rosyjskie oddziały specjalne). Zapędy imperialistyczne stopniowo „cywilizowanej,, Rosji odżyły wzbudzając niepokój sąsiadów i mocarstw europejskich, a także Stanów Zjednoczonych. Był to szok, którego skala była podobna do tej, która towarzyszyła zamachom terrorystycznym z dnia 11 września 2001r., a obecnie koronawirusowi COVID-19. Problematyka bezpieczeństwa stała się żywa i komentowana różnorodnie. Stała się również częścią analiz niniejszego artykułu, stanowiąc wprowadzenie do ich zasadniczego przedmiotu (Staszewski 2021).

Współcześnie bezpieczeństwo utożsamiane jest z aktywnością opartą na przemyślanych działaniach wyprzedzających, charakteryzujących się rozsądkiem, brakiem zbędnego ryzyka, oparciem na wiedzy i doświadczeniu. Zazwyczaj w bardziej okrojonym wymiarze było celem i wartością człowieka w każdej epoce (Haliżak i Kuźniar 2001).

W starożytności (m.in. Platon i Arystoteles) rozumiano bezpieczeństwo, jako przestrzeganie harmonii zasad przyjętych przez ówczesne społeczeństwa. Mijały stulecia, a dyskusje w obszarze bezpieczeństwa odbywały się z uwzględnianiem podobnych standardów (w szczególności takich, jak: sprawiedliwość, państwo dobrze zorganizowane, w którym funkcjonuje wewnętrzna harmonia, ład moralny i porządek, a także przejrzyste zasady polityki i gospodarki oraz prawość rządzących itp.). Jednak najczęściej postrzegano bezpieczeństwo przez pryzmat wojny i pokoju, ponieważ te dwa zjawiska stanowiły stały element cykli rozwojowych społeczeństw (Królikowski 2003).

W średniowieczu w rozważaniach dotyczących problematyki bezpieczeństwa przede wszystkim akcentowano potrzebę harmonii władzy, której gwarantem powinno być właściwe prawo, aczkolwiek częste wówczas wojny traktowane jako zjawisko, które nie wymagało usprawiedliwienia, jeśli przestrzegano „ceremoniału zabijania”, zaś zwycięzcy nie byli stawiani przed sądami (Tehler 2003). W swoich krajach zazwyczaj uznawano ich za wielkich i godnych szacunku.

W okresie odrodzenia koncepcja w zakresie bezpieczeństwa w istotnym stopniu kształtowana była przez czołowego teoretyka tej epoki Machiarellego. Zasadniczo był on kontynuatorem koncepcji bezpieczeństwa wylansowanych w poprzednich okresach, aczkolwiek istotę rozumienia analizowanego pojęcia oparł na twierdzeniu, „że człowiek, aby mógł czuć się szczęśliwym i szczęśliwym, musi żyć w państwie bezpiecznym”. Zapewnienie szczęścia i bezpieczeństwa państwu danego państwa scedował na polityków, którzy w osiągnięciu tego celu (także i innych) powinni kierować się dewizą „cel uświęca środki”, co oznaczało możliwość stosowania przemocy, obłudy i podstęp (Nicco Machiarello 1469-1527).

W okresie oświecenia jednym z czołowych teoretyków w zakresie problematyki bezpieczeństwa był filozof Immanuel Kant (1724-1804), który analizując kwestie pokoju w kategoriach filozoficznych zauważył, iż „można go osiągnąć w drodze przewyciężenia konfliktów”. Upowszechniona przez Kanta dewiza rzymska „si vis pacem, para in” (chcesz mieć pokój, przygotuj odpowiednie prawo) niejako jest wyrazem ciągłości przemyśleń poprzedników w tym obszarze.

Zarówno w przeszłości jak i obecnie na kształt obrazu bezpieczeństwa istotny wpływ mają katastrofy powodowane przez naturę (np. powodzie, trzęsienia ziemi, wybuchy wulkanów, susze, tornada, nadmierne opady, epidemie, zmiany klimatu, COVID-19 i wiele innych zagrożeń generowanych przez naturę oraz przez samego człowieka), a także terroryzmu, przestępczość pospolita i od połowy XX wieku przestępczość zorganizowana.

W świetle dokonanych rozważań można stwierdzić, iż bezpieczeństwo w ujęciu historycznym postrzegano zawsze w kontekście określonych uwarunkowań. W ich grupie klasyfikowane są przede wszystkim takie, jak: zdefiniowanie; przyjęcie; wdrożenie; przestrzeganie norm i gwarancji prawnych; sposób zorganizowania władzy w państwie, w tym szczególnie, organów decyzyjnych i sadowniczych; określenie zasad zorganizowania i funkcjonowania organów

administracji publicznej z uwzględnieniem instytucji urzędniczych; a także warunki i poziom życia społeczeństwa oraz stworzenie odpowiednich warunków zapewniających ochronę ludności przed zjawiskami groźnymi dla zdrowia, życia i mienia, a ponadto właściwe przygotowanie do ograniczania skutków nieszczęśliwych zdarzeń, katastrof i wszelkich trudnych do przewidzenia nieszczęść zagrażających człowiekowi i jego otoczeniu (Królikowski 2005). Ponadto zgodnie wskazywano we wszystkich epokach na konieczności zapewnienia harmonii w otoczeniu i całej „globalnej wiosce”.

Stosunkowo duże podobieństwo dawnych i obecnych koncepcji w zakresie bezpieczeństwa wyraża ich wspólny motyw, który wyartykułować można w formie następującego twierdzenia: „W tworzeniu i realizacji możliwie najskuteczniejszej strategii bezpieczeństwa należy oprzeć się na ludziach najlepszych z najlepszych, a więc mądrych, dobrze wykształconych, posiadających bogate doświadczenie, których charakteryzuje prawość i wysoki poziom moralności (Teher 2003). Z charakterystycznych dla poszczególnych okresów koncepcji wyłania się jeszcze inny motyw wspólny, a mianowicie traktowanie bezpieczeństwa jako dobra wspólnego, co jeszcze bardziej akcentuje potrzebę powierzenia organizacji i realizacji tego procesu właściwym ludziom.

Wśród wielu definicji pojęcia bezpieczeństwa występujących w literaturze przedmiotu oprócz przedstawionych powyżej na uwagę zasługuje ta, która określa te zjawisko jako stan braku zagrożenia oraz stan pewności i pokoju. Natomiast według jeszcze innej (Zgółkowska 1995) bezpieczeństwo oznacza stan pewności istnienia państw i ludzi w wymiarze podmiotowym, przedmiotowym oraz procesualnym (Kukułka 2006). Z kolei w słowniku języka polskiego bezpieczeństwo zdefiniowano jako stan braku zagrożenia. Również w przeszłości analizowane pojęcie definiowano bardzo ogólnie. Dlatego niezbędne jest jego uszczegółowienie, którego można dokonać poprzez wskazanie jego rodzajów (Hebda 2019). W literaturze występują różne klasyfikacje bezpieczeństwa w zależności od zasięgu, stosunku do obszaru państwa oraz przedmiotu i dziedziny, w której występuje. Zastosowanie tych kryteriów pozwala wyróżnić następujące jego rodzaje:

- ze względu na zasięg: bezpieczeństwo globalne, międzynarodowe, regionalne, narodowe i lokalne;
- według kryterium stosunku do obszaru państwa: bezpieczeństwo zewnętrzne i wewnętrzne;
- według kryterium przedmiotowego i dziedziny, w której występuje: bezpieczeństwo militarne, kulturowe, polityczne, społeczne, informatyczne, ekologiczne, ekonomiczne oraz energetyczne.

Na potrzeby niniejszego opracowania analizie zostanie poddane tylko bezpieczeństwo energetyczne, które od kryzysu naftowego z lat siedemdziesiątych minionego stulecia stało się jednym z najważniejszych elementów polityki większości państw, w tym szczególnie wysokorozwiniętych. W tym miejscu należy jednocześnie zauważyć, że przez wiele stuleci, aż do połowy XX wieku (w Polsce do roku 1990, czyli wdrażania modelu gospodarki rynkowej) posiadanie lub dostęp do paliw, surowców i innych dóbr rzadkich stanowił o przewadze konkurencyjnej danego podmiotu gospodarczego na rynku. Dzisiaj wolny rynek ułatwia dostęp do kapitału, a tym samym do surowców i paliw, stanowiących podstawowe źródło energii niezbędnej dla gospodarki oraz funkcjonowania społeczeństw ludzkich, państw, przedsiębiorstw, itp. (Łucki i Misiak 2012).

Doświadczenia ostatnich dziesięcioleci pokazują, iż powyższe ułatwienia, a także procesy globalizacji, integracji gospodarczej i pogłębiającej się liberalizacji handlu nie wystarczają do zapewnienia bezwzględного bezpieczeństwa energetycznego danego kraju. Zasadność tego twierdzenia wynika nie tylko z dotychczasowych doświadczeń, ale również samej istoty bezpieczeństwa energetycznego, które doczekało się w literaturze wielu definicji, ale żadna z nich nie posiada waloru powszechnej akceptacji (Braun 2018). W ustawie z dnia 10 kwietnia 1997r. – prawo energetyczne (Dz.U.2006, nr 89, poz.625, z póź.zm.) bezpieczeństwo energetyczne jest jako „stan gospodarki oraz zapotrzebowania perspektywicznego odbiorców na paliwa i energię w sposób uzasadniony technicznie i ekonomicznie, przy jednoczesnym zachowaniu wymagań ochrony środowiska”.

Ta ustawowa definicja po dokonaniu niewielkiej modyfikacji została zamieszczona w dokumencie *Polityka energetyczna Polski do 2023r.* opracowanego w 2004r. przez Zespół ds. Polityki Energetycznej powołany przez Ministerstwo Gospodarki i Pracy. Członkowie tego zespołu nadali swojej definicji następujące brzmienie: „Bezpieczeństwo energetyczne oznacza stan

gospodarki, który umożliwia pokrycie bieżącego i perspektywicznego zapotrzebowania odbiorców na paliwa i energię, w sposób ekonomicznie i technicznie uzasadniony, przy jednoczesnej minimalizacji oddziaływania negatywnego sektora energetycznego na środowisko naturalne oraz warunki życia społeczeństwa”. W dokumencie tym zaakcentowano ochronę środowiska naturalnego, co pozostaje w zgodzie z podejściem Unii Europejskiej do rozumienia bezpieczeństwa energetycznego także w kontekście ekologicznym (Młynarski 2017).

Kolejnym przykładem szerokiego rozumienia pojęcia bezpieczeństwa jest definicja, w której oznacza ono „stan zagwarantowania wszystkim obywatelom i funkcjonującym na terenie państwa przedsiębiorstwom dostępu do źródeł energii pokrywających ich zapotrzebowanie, bez zakłóceń w procesie przesyłu, sprzedawanej po akceptowanych cenach, których poziom jest możliwy do oszacowania w bliskiej perspektywie czasowej (Janowski 2016). W ramach uzupełnienia tej definicji M. Golarz (*Bezpieczeństwo energetyczne Polski na przykładzie zaopatrzenia w gaz ziemny, ropę naftową i energię elektryczną, 2016*) dodaje takie czynniki bezpieczeństwa energetycznego, jak: stan oraz sprawność i przepustowość infrastruktury, a także poziom zabezpieczeń systemów wydobywanych, wytwórczych i przesyłowych.

Natomiast w znaczeniu znacznie uogólnionym bezpieczeństwo energetyczne jest definiowane jako „stabilność dostaw energii oraz jej nośników”. Według innej definicji jest to zapewnienie dostaw energii w odpowiedniej ilości i jakości po uzasadnionych ekonomicznie cenach (Ney 2000). Podobnie w piśmiennictwie angielskim pojęcie bezpieczeństwa energetycznego jest ograniczane do zagwarantowania ciągłości dostaw surowców energetycznych (Hoogeveen i Periot 2007). Z kolei Komisja Europejska, a także rząd niemiecki uważają, iż bezpieczeństwo energetyczne należy rozumieć jako „możliwość produkcji i wykorzystywania energii w miarę taniej, pewnej i przyjaznej środowisku (Müller-Kraenner 2009). Natomiast w Stanach Zjednoczonych bezpieczeństwo energetyczne zazwyczaj jest utożsamiane z nieustanną zdolnością państwa do utrzymania swego funkcjonowania bez większych zaburzeń (Szcześniak 2010).

Niemalże we wszystkich propozycjach definicji element bezpieczeństwa energetycznego uważa się niezawodność dostaw energii, a nie jej cenę. Należy jednak pamiętać, że bezpieczeństwo energetyczne to nie tylko zapewnienie bezpiecznych i stałych źródeł dostaw energii. Jest ono również warunkowane przez takie czynniki, jak: umiejętność budowy proenergetycznych bloków i sojuszy międzypaństwowych; strategiczne planowanie i wyznaczanie głównych celów długoterminowej polityki energetycznej państwa; innowacyjność, a od pewnego czasu (zarysowania się istotnych zmian klimatycznych oraz szeregu zagrożeń ekologicznych generowanych przez siły natury, a także człowieka) kształtowanie świadomości w społeczeństwie. Oznacza to, iż osiągnięcie trwałego stanu bezpieczeństwa energetycznego wymaga opracowania i realizacji stosownej strategii w tym zakresie (Ruszel i Podmiotko 2019).

3. Strategia energetyczna Polski

Każde państwo powołane jest do realizacji określonych funkcji, celów i zadań, której wymiernym efektem jest zapewnienie rozwoju, sprawnego funkcjonowania oraz stosownych warunków życia jego mieszkańcom. Realizację tak określonych zadań może zapewnić tylko rozumne i nowoczesne zarządzanie nim, które może zagwarantować odpowiednią strategią odnoszącą się do poszczególnych obszarów funkcjonowania państwa. Jednym z tych obszarów jest niewątpliwie bezpieczeństwo energetyczne, które wywiera istotny wpływ przede wszystkim na funkcjonowanie gospodarki państwa (Kraś 2011). Pomimo, że termin „strategia” wywodzi się z terminologii wojskowej (związany on jest z niemieckim marszałkiem Karl von Clausewitz, który w swoim dziele „O wojnie” z pierwszej połowy XIX w. określił zasady działania militarnego) to w pełni wykorzystywany jest także do działań w sferze gospodarczej. Rozumiana jest w niej jako program działania wyznaczający główne cele organizacji i sposoby ich osiągnięcia (Wachowiak 2011).

Natomiast w obszarze energetyki państwa *strategia energetyczna* wyraża się długofalowymi działaniami ze stosownym wyprzedzeniem, które pozwalają zapobiec zagrożeniom dla żywotnych interesów narodowych pozostających w związku z funkcjonowaniem państwa, a także obejmuje działania, które likwidują powstałe zagrożenia oraz mogą one stanowić odpowiedź na różne

wyzwania w tym obszarze, czy też działania wykorzystujące dla zapewnienia w/w interesów pojawiające się szanse (Soroka 2015).

Generalnie uważa się, iż opracowana strategia energetyczna państwa powinna dotyczyć długiego okresu. Jednocześnie wskazuje się, że „długi okres” należy traktować jako pojęcie względne, zależne od stabilności otoczenia i „reguł gry” w zakresie energetyki. W zasadzie strategia energetyczna powinna dotyczyć okresów 3-5 letnich. W przypadku niektórych państw wybiegają one w dalszą przyszłość (niekiedy nawet powyżej 10-15 lat). Są również i takie (np. Stany Zjednoczone), które tworzą strategię krótkoterminowe (poniżej 3 lat). W Polsce ze względu na dużą zmienność i niewystarczającą przewidywalność polityki gospodarczej, a przede wszystkim burzliwa zmienność otoczenia (COVID-19; kryzys ukraiński; przewartościowanie polityki zagranicznej przez Stany Zjednoczone, głównie odnośnie Chin, Rosji i Białorusi) oraz niewielkie zasoby surowcowe (szczególnie ropy naftowej i gazu ziemnego), już plany strategiczne trzy, cztero- bądź pięcioletnie uznawane są zazwyczaj za przejaw odwagi i pozostają obarczone znacznym ryzykiem (Waniowski, Sobotkiewicz, i Daszkiewicz 2010).

Tworząc strategię energetyczną państwa powinni przede wszystkim zdefiniować jego żywotny interes w zakresie bezpieczeństwa energetycznego, a także określić zagrożenia występujące i mogące wystąpić w tym obszarze. Muszą również sformułować wyzwania dla energetyki, których spełnienie jest niezbędne dla właściwego funkcjonowania państwa, a także zmianom klimatu. Pomimo nieustających zmian otoczenia, postępującej globalizacji i integracji, a także pojawiania się różnych zakłóceń w funkcjonowaniu „globalnej wioski” konieczne jest sformułowanie celów tej strategii, które powinny korespondować z założeniami polityki państwa. Ich zgodność powinna się również odnosić do polityki Unii Europejskiej realizowanej w obszarze energetyki (Hebda 2019). Przy opracowywaniu naszej strategii energetycznej wiele miejsca poświęcono uniezależnieniu się od dostaw gazu i ropy z Rosji, oficjalnie może ono nastąpić w roku 2022, w którym wygasa umowa na zakup tych paliw od państwa zarządzanego przez nieobliczalnego przywódcę, za jakiego uważany jest W. Putin (Miś 2019). Pamiętać również trzeba o narastającym od ostatniego ćwierćwiecza XX wieku kryzysie ekologicznym, który objął naszą planetę. Uwzględnić także należy wyzwania jakie z niego wynikają dla szeroko rozumianej energetyki, a które zostały wyartykułowane przez UE, ONZ i liczne organizacje międzynarodowe działające w tym obszarze. Nie można również zapomnieć o kwestiach społecznych, które są związane z tym sektorem (Łucki i Misiak 2010), a także o tym, że stabilność gospodarki kraju zależy w znacznym stopniu od poziomu bezpieczeństwa energetycznego.

Wskazane powyżej, a także inne liczne uwarunkowania pozwalają określić pięć podstawowych celów dla polskiej strategii bezpieczeństwa energetycznego. Pierwszy z nich polega na zrównoważeniu popytu i podaży energii, aby system energetyczny państwa funkcjonował stabilnie. Drugi cel strategii wiąże się z zapewnieniem nieprzerwanych i niezawodnych dostaw nośników energii, które zasilają podsystemy sektora energetycznego państwa (tj. system ciepłowniczy, naftowy, elektroenergetyczny, gazowy itd.). Kolejny cel tej strategii mówi o stworzeniu niezawodnej technicznie i właściwie rozmieszczonej infrastruktury produkcyjnej, przetwórczej, przesyłowej oraz magazynowej energii, a także surowców energetycznych. Zgodnie z czwartym celem niezbędne jest stworzenie sektora energetycznego państwa, który będzie efektywny i bezpieczny dla ludzi oraz środowiska naturalnego. Istota celu piątego polega na zagwarantowaniu odpowiedniego tempa transformacji energetycznej, uwzględniając przyszłe potrzeby społeczne oraz możliwości gospodarki i wymagania międzynarodowe w tym zakresie (Soroka 2019).

Ponadto należy zapewnić: odpowiednio wysoki stan zapasów paliw, w ilości zapewniającej ciągłości dostaw do odbiorców; racjonalne zróżnicowanie struktury nośników energii tworzących krajowy bilans paliwowy; poprawę stanu technicznego oraz sprawności urządzeń i instalacji, w których dochodzi do przemiany energetycznej nośników energii, a także usprawnienie systemów przesyłowych, transportowych oraz dystrybucyjnych energii i paliw; możliwie największy stopień dywersyfikacji źródeł dostaw gazu, ropy i energii przy racjonalnym poziomie kosztów; właściwe warunki funkcjonowania przedsiębiorstw energetycznych, a także odpowiednio wysoki poziom regionalnego bezpieczeństwa energetycznego, czyli zdolności do pełnego zaspokojenia potrzeb energetycznych zgłaszanych przez społeczność lokalną (Kraś 2011).

Analizy celów polskiej polityki w obszarze bezpieczeństwa energetycznego można również dokonać w oparciu o *Krajowy plan na rzecz energii i klimatu na lata 2021-2030. Założenia i cele oraz polityki i działania*, którego projekt został opracowany w 2019r. Zgodnie z projektem tego planu uruchomienie pierwszego bloku (o mocy ok. 1-1,5GW) pierwszej elektrowni jądrowej przewidziana na 2033r., zaś kolejnych pięciu takich bloków do 2043r. Kolejny cel zakłada zmniejszenie do roku 2030 udziału węgla w wytwarzaniu energii elektrycznej do 60%. Ponadto w planie tym mówi się o dywersyfikacji ropy naftowej i gazu ziemnego i rozbudowie infrastruktury przesyłowej, magazynowej i przetwórczej, a także utrzymaniu dotychczasowego poziomu wydobycia gazu ziemnego dzięki wdrożeniu innowacyjnych metod; rozwój e-mobilności i paliw alternatywnych w transporcie; utrzymanie autonomii w zakresie importu energii elektrycznej z państw trzecich; powstanie 300 obszarów zrównoważonych energetycznie na poziomie lokalnym (klastry energii, spółdzielnie energetyczne itp.) do roku 2030. W planie tym zakłada się również utrzymać krajowe wydobycie węgla na poziomie pozwalającym na pokrycie zapotrzebowania przez sektor energetyczny. Natomiast do roku 2030 udział energii ze źródeł odnawialnych (udział OZE) w zużyciu energii finalnej brutto ma wynieść 21%.

4. Odnawialne źródła energii

Aktualnie polityka energetyczna Polski oparta jest o trzy strategiczne dokumenty ramowe, a mianowicie: Polityka energetyczna Polski do 2040r.; Strategia Odpowiedzialnego Rozwoju do roku 2020 – z perspektywą do 2030r. oraz Krajowy plan na rzecz energii i klimatu na lata 2021-2030, założenia i cele oraz polityki i działania. W świetle tych dokumentów celem głównym polityki energetycznej Polski jest bezpieczeństwo energetyczne przy zapewnieniu konkurencyjności gospodarki, optymalnym wykorzystaniu rodzinnych zasobów energetycznych, a także wysokiej efektywności energetycznej oraz zminimalizowaniu oddziaływania sektora energii na środowisko. Natomiast jednym z głównych kierunków działania tej polityki czyni się rozwój odnawialnych źródeł energii.

Generalnie istota odnawialnych źródeł energii polega na tym, że nie zużywają one zasobów naturalnych, które tym samym mogą być uzupełniane przez naturę. W literaturze przedmiotu odnawialne źródła energii często nazywane są zieloną energią i obejmują szereg źródeł pierwotnych, które mogą być wykorzystywane do produkcji energii elektrycznej lub paliw (Łucki i Misiak 2012). Klasyfikacje tych źródeł przedstawia tabela 1.

Największą zaletą odnawialnych źródeł energii jest wytwarzanie energii poprzez procesy naturalne, a także to, że energia ta nie generuje zanieczyszczeń. Ponadto wytwarzanie z tych źródeł paliw nie generuje kosztów, a w przypadku biomasy unika się kosztów transportu paliw na duże odległości. W literaturze funkcjonuje powszechne przekonanie, że rozwój odnawialnych źródeł energii jest przede wszystkim przyjazny środowisku, a także sprzyja wzmocnieniu bezpieczeństwa energetycznego oraz umożliwi poprawę zaopatrzenia energetycznego terenów o niezbyt dobrze rozwiniętej infrastrukturze energetycznej. Rozwój infrastruktury (w szczególności podejmowanie nowych inwestycji) w obszarze OZE w znacznym stopniu prowadzi do redukcji emisji CO₂, a ponadto przyczynia się do oszczędności energii oraz poprawy efektywności energetycznej.

W grupie najbardziej znanych i najczęściej wykorzystywanych odnawialnych źródeł energii klasyfikowane są takie, jak: biomasa, biogaz, energia słoneczna, energia wiatrowa, energia geotermalna, energia wodna i energia pływów morskich.

Najstarszym i często wykorzystywanym ekologicznym źródłem energii jest biomasa. W art. 2 ust. 1 pkt 2 ustawy o biokomponentach i paliwach ciekłych z dnia 25 sierpnia 2006r, Dz. U. z 2020 r. poz. 1233 biomasa jest definiowana jako „stałe lub ciekłe substancje pochodzenia rodzinnego bądź zwierzęcego, które ulegają biodegradacji, powstała z produktów, a także odpadów i pozostałości z produkcji rolnej i leśnej oraz przemysłu przetwarzającego ich produkty, a również części pozostałych odpadów, które ulegają biodegradacji, a w szczególności surowce rolnicze. Biomasa może również pochodzić z uprawy roślin energetycznych (Adameczyk, Frąckowiak i Zbytek 2010).

Kolejnym odnawialnym źródłem energii jest biogaz, który w art. 3 ust. 20a ustawy – prawo energetyczne z 10 kwietnia 1997r. (Dz. U. z 2006 r., nr 89, poz. 625 z późn. zm.) definiuje biogaz rolniczy, jako „paliwo gazowe otrzymane w procesie fermentacji metanowej surowców

rolniczych, produktów ubocznych rolnictwa, płynnych lub stałych odchodów zwierzęcych, produktów ubocznych lub pozostałości z przetwórstwa produktów pochodzenia rolniczego bądź biomasy leśnej z wyłączeniem gazu pozyskanego z surowców pochodzących z oczyszczalni ścieków i składowisk odpadów. Paliwo te może również być wytwarzane poprzez rozpadu gnilnego ścieków i odpadów komunalnych. Wykorzystywanie biogazu sprzyja redukcji emisji gazów cieplarnianych, podtlenku azotu oraz metanu (Jędrzejczak 2007).

Tab. 1. Rodzaje odnawialnych źródeł energii (Małachowski 2021).

PIERWOTNE ŹRÓDŁA ENERGII		NATURALNE PROCESY PRZEMIANY ENERGII	PROCESY TECHNICZNE PRZEMIANY ENERGII	FORMA UZYSKANEJ ENERGII
SŁOŃCE	WODA	Parowanie, topnienie lodu i śniegu, opady	Elektrownie wodne	Energia elektryczna
	WIATR	Ruch atmosfery	Elektrownie wiatrowe	Energia elektryczna i ciepła
		Energia fal	Elektrownie falowe	
	PROMIENIOWANIE SŁONECZNE	Prądy oceaniczne	Elektrownie wykorzystujące prądy oceaniczne	Energia elektryczna
		Nagrzewanie powierzchni ziemi i atmosfery	Elektrownie wykorzystujące ciepło oceanów	Energia elektryczna
		Promieniowanie słoneczne	Kolektory i ciepłe elektrownie słoneczne	Energia ciepła
			Fotoogniwa i elektrownie słoneczne	Energia elektryczna
			Fotoliza	Paliwa
	Biomasa	Produkcja biomasy	Ogrzewanie i elektrownie geotermalne	Energia ciepła i elektryczna
	ZIEMIA	Rozpad izotopów	Źródła geotermalne	Ogrzewanie i elektrownie geotermalne
KSIĘŻYC	Grawitacja	Wpływy wód	Elektrownie pływowe	Energia elektryczna

Specyficzną formą energii odnawialnej jest energia słoneczna, która może być przetwarzana przy pomocy kolektorów w energię ciepłą i za pomocą ogniw fotowoltaicznych w energię elektryczną. Jej obecny udział w zaspokojeniu potrzeb energetycznych w naszym kraju wynosi nieco więcej niż 0,05%.

Odnawialnym źródłem energii, aczkolwiek nieobojętnym dla środowiska jest energia wiatru. Za jej wykorzystywaniem do celów energetycznych przemawia to, że: może być stosowana na lądzie i u wybrzeży; niezbyt dużym kosztem dostarcza energię produkowaną lokalnie; stanowi źródło czystej energii, wolnej od emisji dwutlenku węgla. Jej mankamentem jest natomiast to, że prowadzi do zmiany krajobrazu, aczkolwiek działalność rolna i przemysłowa nadal może być prowadzona (Małachowski 2021). Specyficznym odnawialnym źródłem energii jest pochodząca z wnętrza ziemi energia geotermalna, wykorzystująca ciepło wewnętrzne naszej planety, które ogrzewa wody podziemne. Część z tych wód wydostaje się na powierzchnię jako para wodna lub ciepła woda (gorąca), która po wykorzystaniu do celów energetycznych „oddawana” jest ponownie Ziemi. Oprócz wykorzystywania jej do celów grzewczych przydatna jest także w rekreacji, hodowli ryb oraz produkcji rolnej.

Powszechnie znanym i w miarę często wykorzystywanym odnawialnym źródłem energii jest energia wodna, która w Polsce jest wytwarzana przez elektrownie wodne (przepływowe i zbiornikowe, a także przyzaporowe i derywacyjne niezależnie od sposobu uzyskania spadku). Korzystne warunki do budowy małych elektrowni wodnych istnieją w Karpatach, Sudetach, a także na Roztoczu i Pomorzu.

Ekologiczny charakter mają również elektrownie pływów morskich, które wytwarzają energię elektryczną poprzez zastosowanie specjalnych urządzeń wykorzystujących przepływy i odpływy morza. Wraz ze wzrostem pływów zwiększa się ilość wyprodukowanej energii. Należy podkreślić, iż elektrownie te pracują zarówno podczas przyptywów, jak i odpływów, co nie ma miejsca w przypadku pozyskiwania energii z wiatrów (dni bezpowietrzne, huragany i wichury). Zazwyczaj tego typu elektrownie budowane są w wąskich ujściach rzek, cieśninach i zatokach (Lewandowski 2007).

5. Ograniczanie zmian klimatu poprzez upowszechnianie gospodarki o obiegu zamkniętym

Gospodarka o obiegu zamkniętym (w skrócie GOZ) doczekała się w literaturze wielu definicji, aczkolwiek jej powstanie wiąże się z końcem lat sześćdziesiątych minionego stulecia. Natomiast szerszy opis jej istoty miał miejsce w latach osiemdziesiątych XX wieku przez Stahela i Redaya-Mulveya, którzy twierdzili, że oprócz recyklingu należy zadbać o regenerację wyrobów i ich ponowne wykorzystywanie. Według Stahela gospodarka o obiegu zamkniętym jest modelem ekonomicznym, charakteryzującym „gospodarkę opartą na systemie spiralnym”, w ramach której minimalizuje się zużycie materiałów oraz zmniejsza przepływ energii, a przy tym nie dochodzi do ograniczenia wzrostu gospodarczego oraz postępu technicznego i społecznego (Kulczycka i Pędziwiatr 2019).

Stahel w roku 1998 wskazał na konieczność zamknięcia cyklu obiegu produktu poprzez wprowadzenie następującego schematu: pozyskanie surowców i produkcja – użytkowanie produktu – odzysk i ponowne wykorzystanie surowców, co przedstawiono graficznie na rysunku 1. Ten schemat wyraźnie różni się od tego, który charakteryzuje obecna gospodarkę linearną, która funkcjonuje według schematu: pozyskanie surowców i produkcja – użytkowanie produktu – składowanie odpadów.

W oparciu o koncepcje gospodarki o obiegu zamkniętym rozwijała się równoległe idea ekologii przemysłowej, która wskazywała na konieczność wykorzystywania odpadów jako wkład do procesów produkcyjnych i promowania recyklingu.

Jednym z pierwszych krajów, który podjął się wprowadzenia gospodarki o obiegu zamkniętym były Chiny. Z uwagi na znacznie ograniczone zasoby i wysokie zużycie energii w 2005r. przyjęto i wdrożono krajową strategię dla GOZ w tym kraju. Celem zasadniczym chińskiej strategii w zakresie GOZ uczyniono uzyskanie wysokiej jakości zasobów oraz efektywności poprzez „ograniczenie, ponowne użycie i recykling”. Sukcesy Chin związane z GOZ zachęciły również inne kraje, a także niektóre przedsiębiorstwa do organizowania działalności gospodarczej, wykorzystującej procesy sprzężenia zwrotnego i naśladujące naturalne ekosystemy poprzez

zastosowanie następującego cyklu: zasoby naturalne → transformacja w wytwarzane produkty → produkty uboczne stosowane jako zasoby dla innych gałęzi przemysłu (Kulczycka 2019).

Rys 1. Schemat gospodarki o obiegu zamkniętym (Gwiadzowicz 2019).



Jako strategii GOZ został zdefiniowany w 2011r. przez Hislopa i Hilla, której zastosowanie pozwala zmaksymalizować efektywność zasobów oraz istotnie ograniczyć produkcję odpadów. Kraje, które zaczęły wprowadzać GOZ zazwyczaj najpierw podejmowały działania usprawniające gospodarkę odpadami, następnie starały się ograniczać zużycie zasobów, a także energii, a dopiero potem starały się wykorzystać odpady jako zasoby. Od 2012r. GOZ jest traktowany jako system służący odtwarzaniu i regeneracji. Natomiast w roku 2013 zauważono, iż GOZ może być przydatny jako system ekonomiczny, który między innymi w celu zachowania zasobów naturalnych mówi o konieczności ponownego wykorzystania produktów i materiałów. Dzięki temu tworzy się dodatkowa wartość dla gospodarki, środowiska i oczywiście ludzi (Karwacka 2017).

Zgodnie z koncepcją GOZ, aby każdy składnik produktu mógł być biodegradowalny bądź w pełni podlegał recyklingowi należy odpowiednio projektować produkty.

Pewne elementy GOZ występują w wielu dokumentach Unii Europejskiej zarówno związanych z gospodarką jak i ekologią, w tym również mówiących o zagrożeniach dla środowiska naturalnego i zmianach klimatu. Z reguły wskazuje się w nich znaczenie działań, które promują racjonalne gospodarowanie zasobami naturalnymi, a także umiejętne zarządzanie odpadami. Ponadto wskazuje się w nich potrzebę odmaterializowania gospodarki, a także konieczność zwiększenia efektywności wykorzystywania zasobów i zmniejszenie ilości odpadów (powstałe powinny podlegać segregacji). W Polsce gospodarka o obiegu zamkniętym została określona w *Mapie drogowej transformacji* w kierunku gospodarki o obiegu zamkniętym. Zgodnie z tym dokumentem należy dołożyć wszelkich starań, aby ograniczyć maksymalnie wytwarzanie odpadów, co można osiągnąć poprzez wydłużenie obiegu produktów, materiałów i surowców. Jak już wcześniej wspomniano w literaturze funkcjonuje ponad 200 definicji GOZ, a najbardziej popularne z nich zamieszczono w tabeli 2.

Tab. 1. Rodzaje odnawialnych źródeł energii (Kulczycka i Pędziwiatr 2019).

Źródło	Definicja
Andersen (2007)	Koncepcja GOZ – obecnie szeroko promowana w Azji – ma swoje korzenie w ekologii przemysłowej, która przewiduje formę symbiozy przemysłowej pomiędzy różnymi podmiotami i procesami produkcyjnymi. Ekologia przemysłowa podkreśla korzyści z recyklingu reszkowych materiałów odpadowych i produktów ubocznych, na przykład poprzez rozwój złożonych powiązań, takich jak te w odnowionych projektach symbiozy

Źródło	Definicja
	przemysłowej. Jednak bardziej ogólnie, promuje minimalizację zasobów i przyjęcie czystszych technologii.
Tisserant I inni (2007)	Koncepcja GOZ ma na celu wydłużenie okresu użytkowania materiałów i promuje recykling w celu maksymalizacji użycia materiałów przypadających na zasób przy jednoczesnym zmniejszeniu wpływu na środowisko i wykorzystania zasobów. Jest ściśle związana z Zasadami 3U: unikanie, ponowne użycie i utylizowanie.
Pin i Hutao (2007)	GOZ wymaga organizowania działań gospodarczych w celu wytworzenia przepływu zwrotnego „zasobów-produktów-zasobów wtórnych” o cechach niskiej eksploatacji, wysokiego wykorzystania i niskiej emisji. Cała substancja i energia mogą być wykorzystywane w rozsądny i trwały sposób w nieustannym obiegu gospodarczym, aby w jak najmniejszym stopniu zmniejszyć wpływ na środowisko naturalne powodowany przez działalność gospodarczą.
Zhu, Geng i Lai (2010)	Model GOZ wdraża się na trzech poziomach: w ekoregionach na poziomie makro, ekoprzemysłowych parkach na poziomie mezo i przedsiębiorstwach ekologicznych na poziomie mikro. Praktyki GOZ obejmują wymogi ochrony środowiska w zakresie redukcji, ponownego użycia i recyklingu (3R) z naciskiem na osiągnięcie jednocześnie celów w zakresie ochrony środowiska i wydajności ekonomicznej.
OECD (2011)	Poprawa produktywności zasobów dzięki zrównoważonemu zarządzaniu materiałami wymaga zintegrowanej polityki opartej na cyklu życia odpadów, materiałów i produktów, takich jak GOZ lub inicjatywy związane z 3R, zintegrowane zarządzanie łańcuchem dostaw oraz wykorzystanie instrumentów mających na celu stymulowanie zmian technologicznych. Oznacza to również internalizację kosztów gospodarowania odpadami na ceny towarów konsumpcyjnych i usług zarządzania odpadami oraz zapewnienie większej opłacalności i pełnego zaangażowania społeczeństwa w projektowanie.
Hilsop i Hill (2011)	GOZ stanowi strategię rozwoju, która maksymalizuje efektywność zasobów i minimalizuje produkcję odpadów w kontekście zrównoważonego rozwoju gospodarczego i społecznego.
Aldersgate (2012)	GOZ to odradzająca się gospodarka przemysłowa, w której występują przepływy materiałowe dwojakiego rodzaju: biologiczne zaprojektowane w celu ponownego bezpiecznego wejścia do biosfery, oraz techniczne które są zaprojektowane do obiegu w wysokiej jakości z zachowaniem lub wzmocnieniem ich wartości ekonomicznej.
Geng, Sarkis, Ulgiati i Zhang (2013)	GOZ to system przemysłowy skoncentrowany na zamknięciu pętli przepływów materiałów i energii oraz przyczyniający się do długoterminowej stabilności. GOZ zawiera zasady i strategie na rzecz bardziej efektywnego zużycia energii, materiałów i wody, a jednocześnie emituje minimalne ilości odpadów do środowiska.
Thomas i Birat (2013)	Ekologia przemysłowa, zasady 3R (Reduce, Reuse, Recycle) lub zrównoważone projektowanie to koncepcje, które powinny doprowadzić do koncepcji „gospodarki o obiegu zamkniętym”. Oznacza to, że firmy produkcyjne lub surowcowe powinny współpracować ze sobą w celu wymiany materiałów, odpadów, energii i wody, tak aby nowe produkty mogły być projektowane z odpadów. GOZ jest definiowana materiał po materiałne i przemysł wytwórczy za przemysłem wytwórczym, co określa, w jakim stopniu i kiedy można osiągać idealny stan. Praktycznie,

Źródło	Definicja
	w przypadku wysoce nadającego się do recyklingu materiału, takiego jak stal, można podejść do GOZ tylko w szczycie produkcyjnym, tak aby ilość materiału końcowego i poziom popytu były zbliżone
Park i Chertow (2014)	Wraz z pojęciem systemu obiegu zamkniętego, ekonomii materiałów cyrkularnych i zrównoważonego zarządzania materiałami, paradygmat oparty na zasobach opiera się na przekonaniu, że to, co poprzednio postrzegaliśmy jako odpady, powinno być uważane za potencjalne zasoby, dopóki nie zostanie ustalone inaczej.
Stahel (2016)	W krajach słabiej rozwiniętych GOZ polegająca na ponownym wykorzystaniu towarów i recyklingu materiałów jest powszechna. Ekonomia cyrkularna rozpoczyna się po zakończeniu użytkowania towarów. Celem GOZ jest przywrócenie towarów i molekuł do nowego wykorzystania w podejściu <i>grave-to-cradle</i> . Zmniejsza to zarówno ilość odpadów końcowych (po wykorzystaniu), jak i zapotrzebowanie na surowce pierwotne na początku obiegu (produkcja materiału podstawowego).
Circular Academy	GOZ to zmieniająca się gospodarka, która redefiniuje wzorce produkcji i konsumpcji, inspirowana zasadami ekosystemów i projektowaniem odtwórczym, co zwiększa odporność, eliminuje marnotrawstwo i tworzy wspólną wartość dzięki zwiększonemu obiegowi przepływów materialnych i niematerialnych.
Cullen (2017)	GOZ to taka, która jest odtwarzająca i regeneracyjna z założenia i ma na celu utrzymanie produktów, komponentów i materiałów na najwyższym poziomie użyteczności i wartości przez cały czas.
den Hollander, Bakker i Hultink (2017)	W GOZ ekonomiczna i środowiskowa wartość materiałów jest zachowywana tak długo, jak to możliwe, przez utrzymywanie ich w systemie gospodarczym, albo przez wydłużenie życia wytworzonych z nich produktów, albo przez włączenie ich z powrotem do systemu dla ponownego użycia. Pojęcie odpadów już nie istnieje w GOZ, ponieważ produkty i materiały są, co do zasady, ponownie wykorzystywane i przetwarzane bez końca.

6. Podsumowanie i wnioski

Rozważania w niniejszej pracy oparto o analizę bogatej literatury obejmującej problematykę szeroko rozumianego bezpieczeństwa, a także jeden z jego rodzajów, a mianowicie bezpieczeństwo energetyczne. W ogólnym rozumieniu bezpieczeństwo oznacza brak zagrożeń oraz stan pewności istnienia państwa i ludzi w wymiarze podmiotowym, przedmiotowym oraz procesualnym. Jego rozumienie ewoluowało w poszczególnych okresach historycznych, aczkolwiek zawsze uważane było za szczególną wartość; wspólne dobro, którego zapewnienie należy powierzyć właściwym ludziom – najlepszym z najlepszych. Ponadto jego obraz kształtuje wiele różnych czynników i uwarunkowań, których liczba i rodzaj zwiększa się wraz z rozwojem społeczeństw, państw i pojawianiem się nowych zagrożeń (wzrost zanieczyszczenia powietrza, wody i gleby; zmiany klimatyczne; katastrofy powodowane siłami natury, a także działalnością człowieka; imperialistyczne zapędy Rosji i terroryzm; przestępczość zorganizowana; migracja ludności; epidemie – COVID-19 itd.). Na jego obraz składają się również jego rodzaje, w tym również bezpieczeństwo energetyczne stanowiące zasadniczy przedmiot rozważań niniejszego opracowania.

Na gruncie ustawy z dnia 16 lutego 2007r. o *zapasach ropy naftowej, produktów naftowych i gazu ziemnego oraz zasadach postępowania w sytuacjach zagrożenia bezpieczeństwa paliwowego państwa i zakłóceń na rynku naftowym* (Dz. U. 2007r. nr 52, poz. 343) bezpieczeństwo energetyczne

zostało zdefiniowane jako bezpieczeństwo paliwowo-surowcowe, które oznacza stan pozwalający na bieżąco pokrywać zapotrzebowanie odbiorców na surowce energetyczne oraz paliwa z nich wytwarzane w określonej jakości i ilości, a także czasie dostawy i akceptowanej cenie, co umożliwi właściwe funkcjonowanie polskiej gospodarki. Uzupełnieniem definicji przedstawionych w punkcie drugim opracowania może być definicja Komisji Europejskiej, która określa bezpieczeństwo jako bezpieczeństwo dostaw oznaczające nieprzerwaną, rzeczywistą dostępność do rynku produktów energetycznych, po cenie akceptowanej przez wszystkich konsumentów, z uwzględnieniem wpływu podejmowanych działań na środowisko naturalne.

Sprawne funkcjonowanie sektora energetycznego, a także jego odpowiedni kształt korzystnie wpływa na gospodarkę oraz środowisko spowolnienia zmian klimatu, a także życie ludzi. Istotny wpływ na poziom bezpieczeństwa energetycznego ma posiadanie zasobów surowcowych (szczególnie gazu, ropy i węgla) i dostęp do nich. W przypadku Polski wystarczające są tylko zasoby węgla, zaś niewystarczający gaz i ropa. Istotne braki są uzupełniane eksportem tych paliw z różnych krajów, w tym również z Rosji, która nie jest zbyt odpowiedzialnym i pożądanym partnerem. Innym ważnym problemem polskiej energetyki jest zbyt małe wykorzystywanie odnawialnych źródeł energii, co klóci się między innymi z wymaganiami Unii Europejskiej i ONZ w tym zakresie. Kraj nasz nie może również pochwalić się działaniami w zakresie popularyzacji i stosowania w praktyce gospodarki o obiegu zamkniętym. Ciągłe zbyt mało robimy w zakresie przekształcania dotychczasowej energetyki opartej na węglu w bardziej nowoczesną, bazującą na odnawialnych źródłach energii (biomasa, biogaz, energia słoneczna, energia wiatrowa, energia wodna, energia geotermalna, energia pływów morskich itd.). Dalszej budowy i usprawnienia wymaga infrastruktura techniczna, aczkolwiek w tej dziedzinie zrobiono stosunkowo duży.

W oparciu o analizę dokonane w niniejszym opracowaniu można pokusić się o sformułowanie bezpieczeństwa energetycznego następujące wnioski”

- a) Istotne zdynamizowanie rozwoju odnawialnych źródeł energii, a także innych nośników energii niskoemisyjnej, w tym szczególnie wykorzystywanych w transporcie alternatywnych paliw.
- b) Ograniczanie popytu na energię w gospodarce oraz gospodarstwach domowych i infrastrukturze społecznej.
- c) Opracowanie strategii sprostania wyzwaniom związanym ze zmianami klimatycznymi oraz zanieczyszczeniem powietrza.
- d) Opracowanie strategicznego planu innowacyjnych technologii energetycznych, który pozwoli w sposób optymalny wykorzystać zasoby Polski na potrzeby energetyki.
- e) Poprawienie bezpieczeństwa energetycznego Polski poprzez dywersyfikację kierunków i źródeł dostaw oraz zapewnienie pełnej ochrony strategicznych obiektów polskiej energetyki (Naftoport w Gdańsku, terminal LNG w Świnoujściu, budowa Baltic Pipe itd.).
- f) Pozostawienie w zarządzie państwa polskich koncernów paliwowych (także udziałów w nich), a także systemów infrastruktury przesyłowej.
- g) Przyspieszenie procesu wdrażania gospodarki o obiegu zamkniętym.
- h) Usprawnienie zarządzania bezpieczeństwem energetycznym, w szczególności na poziomie lokalnym.

Lista tych wniosków nie stanowi katalogu zamkniętego i wraz z rozwojem sytuacji w obszarze problematyki bezpieczeństwa energetycznego powinna być modyfikowana i ewentualnie wzbogacana o nowe zadania.

7. Literatura:

- Biuro Bezpieczeństwa Narodowego (2013) Biała Księga Bezpieczeństwa Narodowego Rzeczypospolitej Polskiej
Fehler W (2003) Współczesne bezpieczeństwo, Wyd. A. Marszałek
Gwiazdowicz M (2019) Gospodarka o obiegu zamkniętym, Infos nr 6 (259)

- Halizak E, Kuźniar R (2001) Stosunki międzynarodowe: geneza, struktura, dynamika, Wyd. UW, Warszawa
- Hebda W (2019) Polityka oraz sektor energetyczny w wybranych państwach Europy Południowo-Wschodniej, Wyd. Księgarnia Akademicka, Kraków
- Karwacka M (2017) Gospodarka o obiegu zamkniętym, biznes i konsument na ścieżce zmiany. Koalicja na Rzecz Gospodarki Obiegu Zamkniętego, RECONOMY
- Ministerstwo Energetyki (2019) Krajowy plan na rzecz energii i klimatu na lata 2021-2030. Założenia i cele oraz polityki i działania
- Kraś J (2011) Bezpieczeństwo energetyczne Unii Europejskiej, Prace naukowe Akademii im. Jana Długosza w Częstochowie
- Królikowski H (2005) Filozofia bezpieczeństwa – bezpieczeństwo w ujęciu historycznym, Instytut Historii Akademii Podlaskiej
- Królikowski H (2003) Zmiany w pojmowaniu bezpieczeństwa, IWAP
- Kulczycka J. (red.) (2019) Gospodarka o obiegu zamkniętym w Polityce i Badaniach Naukowych, Wyd. IGSMiE PAN
- Łucki Z, Misiak W (2012) Energetyka a społeczeństwo. Aspekty socjologiczne, Wyd. Naukowe PWN
- Małachowski K (red.) (2021) Gospodarka a środowisko i ekologia, Wyd. CeDeWu,
- Ney R (2000) Perspektywy energetyczne Polski w świetle technologii światowych. „Polityka Energetyczna”
- Ministerstwo Gospodarki i Pracy (2004) Polityka energetyczna Polski do 2025r., Zespół ds. Polityki Energetycznej
- Reszel M (2014) Bezpieczeństwo energetyczne Polski. Wymiar teoretyczny i praktyczny, RAMBLER
- Ruszel M, Podmiotko S, (2019) Bezpieczeństwo energetyczne Polski i Europy, Instytut Polityki Energetycznej im. Ignacego Łukaszczyka
- Sienkiewicz M (2008) Pojęcie bezpieczeństwa energetycznego państwa – problemy definicyjne, „Racja Stanu. Studia i materiały”, 2008, nr 1(3)
- Soroka P (2006) Strategia bezpieczeństwa zewnętrznego Polski. Proces formułowania,
- Symonides E (2007) Ochrona przyrody, WUW, Warszawa
- Tomczak M (2010) Ewolucja terroryzmu, sprawy – metody – finanse, Wyd. Instytut Zachodni
- Ustawa z dnia 10 kwietnia 1997r. – prawo energetyczne, Dz. U. 2006, nr 89
- Ustawa z dnia 16 lutego 2007 o zapasach ropy naftowej, produktów naftowych i gazu ziemnego oraz zasadach postępowania w sytuacjach zagrożenia bezpieczeństwa paliwowego państwa i zakłóceń na rynku naftowym, Dz.U. 2007 nr 52, poz. 343
- Wachowiak P (red.) (2011) Funkcjonowanie przedsiębiorstwa w gospodarce rynkowej, SKwP, Warszawa
- Waniowski P, Sobotkiewicz D, Daszkiewicz M (2010) Marketing. Teoria i przykłady, Placet
- Żukowska K, Grącik M (red.) (2006) Bezpieczeństwo międzynarodowe. Teoria i praktyka, SGH