

**Anti-nutritional and health promoting properties of glucosinolates**

Patyra E., Kowalczyk E., Kwiatek K., Department of Hygiene of Animal Feedingstuffs, National Veterinary Research Institute in Pulawy

The purpose of this review was to present the properties of glucosinolates, substances in *Brassica* spp. crops, which are degraded in the rumen to thiocyanates. Glucosinolates are secondary metabolites of plants from the family *Brassicaceae*. The ingestion of a substantial amount of glucosinolates may be deleterious to animal health, since they may cause congenital goiter by interfering with the absorption of iodine. Administration of glucosinolates in feed for a long time can lead to the hypertrophy of liver, kidney and thyroid gland. In humans nutrition however, glucosinolates are responsible for the secretion of detoxifying enzymes that remove carcinogens for the organism. Furthermore, they activate proteins and II phase detoxifying enzymes. The aim of this work was to present glucosinolates and their anti-nutritional properties for farm animals in comparison with their health-promoting properties for the humans.

**Keywords:** glucosinolates, livestock, anti-nutritional properties, human health-promoting properties, isothiocyanates.

Rośliny kapustne (*Brassicaceae*) cechuje duża różnorodność związków fitochemicznych. Brane są tu pod uwagę głównie metabolity wtórne roślin, które nie są bezpośrednio niezbędne do wzrostu i rozwoju rośliny, a odgrywają rolę np. w jej obronie przed patogenami czy w interakcjach z organizmami symbiotycznymi. W skład związków bioaktywnych występujących w roślinach kapustnych wchodzi m.in. związki fenolowe, fitosterole, karotenoidy oraz najbardziej charakterystyczne dla tej rodziny roślin – glukozynolany (1, 2, 3, 4).

**Charakterystyka i występowanie glukozynolanów**

Glukozynolany (GLs) to anionowe związki organiczne zaliczane do drugorzędowych metabolitów roślinnych, które posiadają cząsteczkę  $\beta$ -D-glukozy, sulfonowany oksym i łańcuch boczny pochodzący od aminokwasów indolowych (tryptofan), alifatycznych (alanina, walina, leucyna i metionina) lub aromatycznych (fenyloalanina, tyrozyna; 5, 6, 7). Na proces biosyntezy glukozynolanu składają się takie etapy, jak wydłużanie łańcucha aminokwasowego, konwersja do tiohydroksymu i ewentualne dalsze modyfikacje powstałej cząsteczki. Różnorodność występujących kombinacji łańcucha bocznego

**Antyżywniowe i prozdrowotne właściwości glukozynolanów**

Ewelina Patyra, Ewelina Kowalczyk, Krzysztof Kwiatek

z Zakładu Higieny Pasz Państwowego Instytutu Weterynaryjnego – Państwowego Instytutu Badawczego w Puławach

sprawia, że do chwili obecnej zidentyfikowano około 120 różnych glukozynolanów (8).

Glukozynolany występują w gatunkach roślin należących do rodzaju kapustowców (*Brassicales*), m.in. z rodziny roślin kapustnych (*Brassicaceae*), kaparowatych (*Capparaceae*) oraz melonowatych (*Carricaceae*; 9). W roślinach glukozynolany występują w postaci glikozydowej, dzięki czemu nie wykazują one toksyczności w stosunku do zwierząt, roślin, jak i patogenów (10). Skład ilościowy i jakościowy glukozynolanów zależy od gatunku rośliny, organu i fazy rozwojowej. Obecne są w różnych stężeniach, zarówno w korzeniach, liściach, pędach, nasionach, kwiatostanach i młodych siewkach (11). W fazie kwitnienia w organach wegetatywnych obserwuje się spadek zawartości glukozynolanów, a w miarę starzenia się roślin ich dominującą formą są glukozynolany indolowe (6). Zawartość glukozynolanów mogą także modyfikować czynniki środowiska oraz cząsteczki sygnałowe związane z reakcjami na stres biotyczny i abiotyczny (12, 13). Na ich zawartość mają wpływ warunki uprawy, takie jak klimat, dostępność składników odżywczych oraz termin zbioru. Ponadto na zawartość tej grupy związków wpływają również czynniki abiotyczne, takie jak: niedobór wody (prowadzi do obniżenia zawartości glukozynolanów, ponieważ ograniczeniu ulega pobieranie siarki przez roślinę, pierwiastka biorącego udział w syntezie tych związków), nadmiar wody (prowadzi do bujnego wzrostu roślin, w wyniku czego następuje efekt rozcieńczenia glukozynolanów w roślinie oraz może występować wymywanie siarki z korzeni), nawożenie siarką (największy wpływ tego pierwiastka obserwowany jest po 6 tygodniach od zastosowania nawozu, prawdopodobnie jest to okres potrzebny, aby siarka stała się dostępna dla rośliny; 10).

W roślinach kapustnych najczęściej występuje kilkanaście glukozynolanów. Ilość i skład tych związków w poszczególnych roślinach różni się w zależności od gatunku, odmiany, fazy rozwojowej oraz warunków klimatycznych uprawy. Największą różnorodnością pod względem składu glukozynolanów charakteryzuje się kapusta biała, która zawiera

osiem różnych glukozynolanów. Bogaty skład posiada również rzepak i gorczyca. Natomiast w najmniejszej ilości glukozynolany występują w kalafiorze, w którym całkowita zawartość tych związków wynosi ok. 13  $\mu$ mol/100 g świeżej masy. W tabeli 1 zestawiono informacje literaturowe odnośnie do ilościowego i jakościowego składu glukozynolanów w wybranych roślinach kapustnych.

Glukozynolany są związkami o dużej stabilności chemicznej, są stosunkowo trwałe i odporne na działanie wysokiej temperatury, natomiast łatwo ulegają hydrolizie enzymatycznej pod wpływem enzymu mirozynazy ( $\beta$ -tioglukozydazy), który jest odpowiedzialny za pierwszy etap hydrolizy glukozynolanów (21). W tkankach roślin kapustnych mirozynaza najprawdopodobniej zlokalizowana jest w komórkach mirozynowych. Ich obecność zaobserwowano już w 1884 r. na podstawie różnic w morfologii oraz rozmiarze w porównaniu z komórkami sąsiednimi (22). Rozmieszczenie komórek mirozynowych różni się w poszczególnych częściach roślin, zależy również od stadium rozwojowego i gatunku rośliny. Na przykład w okresie kwitnienia wysoką aktywność mirozynazy stwierdzono w górnej części korzeni, a najmniejszą w łądydze i kwiatostanach (23). W pobliżu komórek mirozynowych, w wakuolach znajdują się glukozynolany. Do kontaktu enzymu i glukozynolanów dochodzi dopiero podczas uszkodzenia komórek roślinnych w wyniku miażdżenia lub innych procesów technologicznych oraz w trakcie żucia pokarmów i może być katalizatorem procesu hydrolizy wiązania glikozydowego (24).

Mirozynaza katalizuje proces hydrolizy wiązań tioglukozydowych glukozynolanów, w wyniku czego powstaje niestabilny produkt przejściowy – tiohydroksan-o-sulfonowy, który w zależności od środowiska reakcji oraz dodatkowych czynników białkowych może zostać przekształcony do izotiocyanianów, tiocyanianów, nitryli lub epinitryli. Następnie niestabilne izotiocyaniany zawierające grupę beta-hydroksylową lub pierścień indolowy, ulegają samorzutnemu przekształceniu do związków indolowych i oksazolidyno-2-tionów (ryc. 1; 25, 26). Wszystkie

produkty degradacji glukozynolanów charakteryzują się wysoką aktywnością biologiczną. Na zawartość poszczególnych produktów hydrolizy glukozynolanów wpływa wiele czynników, m.in.: gatunek rośliny i jej odmiana, miejsce hydrolizy, występowanie kofaktorów, takich jak np. witamina C, pH środowiska, temperatura czy wilgotność (27).

Rośliny z rodziny kapustnych w Polsce są chętnie stosowane w gastronomii, a obecnie znajdują coraz szersze zastosowanie nie tylko w tej dziedzinie. Kapusta biała i czerwona, brukselka czy kalafior są składnikami wielu potraw, a ich charakterystyczny smak i zapach pochodzi od zawartych w nich glukozynolanów. Rośliny z rodziny Brassicaceae wykorzystywane są również w żywieniu zwierząt. Powstająca po produkcji oleju śruta lub makuch rzepakowy wydają się dobrymi komponentami pasz, szczególnie gdy pod uwagę weźmie się ograniczenia w stosowaniu niektórych pasz pochodzenia zwierzęcego (mączki mięsno-kostne) w mieszankach ze względu na możliwość transmisji czynnika chorobotwórczego, jakim jest np. BSF (29). Jednak ze względu na obecność w śrucie czy makuchu rzepakowym glukozynolanów zastosowanie ich w paszach ma pewne ograniczenie.

Od lat sześćdziesiątych XX wieku prowadzone są badania nad zmniejszeniem zawartości glukozynolanów i kwasu erukowego w nasionach rzepaku. W wyniku prowadzonych badań uzyskano rzepak bezerukowy, zerowy („0”), o lepszych parametrach jakościowych i obniżonej zawartości kwasu erukowego. Dalsze prace doprowadziły do powstania odmian podwójnie ulepszonych – dwuzerowych („00”) o niskiej zawartości kwasu erukowego oraz glukozynolanów. Na przestrzeni ostatnich kilkunastu lat zabiegi technologiczne umożliwiły wytworzenie odmian rzepaku potrójnie ulepszonych „000” o zmniejszonej zawartości włókna surowego, jednak jego wrażliwość na choroby i szkodniki sprawiła, że nie jest on powszechnie uprawiany (30). Do Krajowego Rejestru Odmian Roślin Uprawnych (COBORU) wpisywane są tylko te odmiany rzepaku, w których zawartość glukozynolanów nie przekracza 15  $\mu\text{M/g}$  suchej masy beztłuszczowej (s.m.b.), np. rzepak ozimy odmiana – Acapulco, Amazon, Bojan, Kuga; rzepak jary odmiany – Delight, Dodger, Medicus czy Tamarin. Z kolei do Katalogu Odmian Europejskich odmiany, w których zawartość glukozynolanów wynosi nie więcej niż 25  $\mu\text{M/g}$  suchej masy beztłuszczowej. Natomiast za dopuszczalną normę glukozynolanów w paszach rzepakowych dla zwierząt rzeźnych przyjęto zawartość 15–20  $\mu\text{M/g}$  s.m.b. (30).

### Źródła glukozynolanów w żywieniu zwierząt gospodarskich

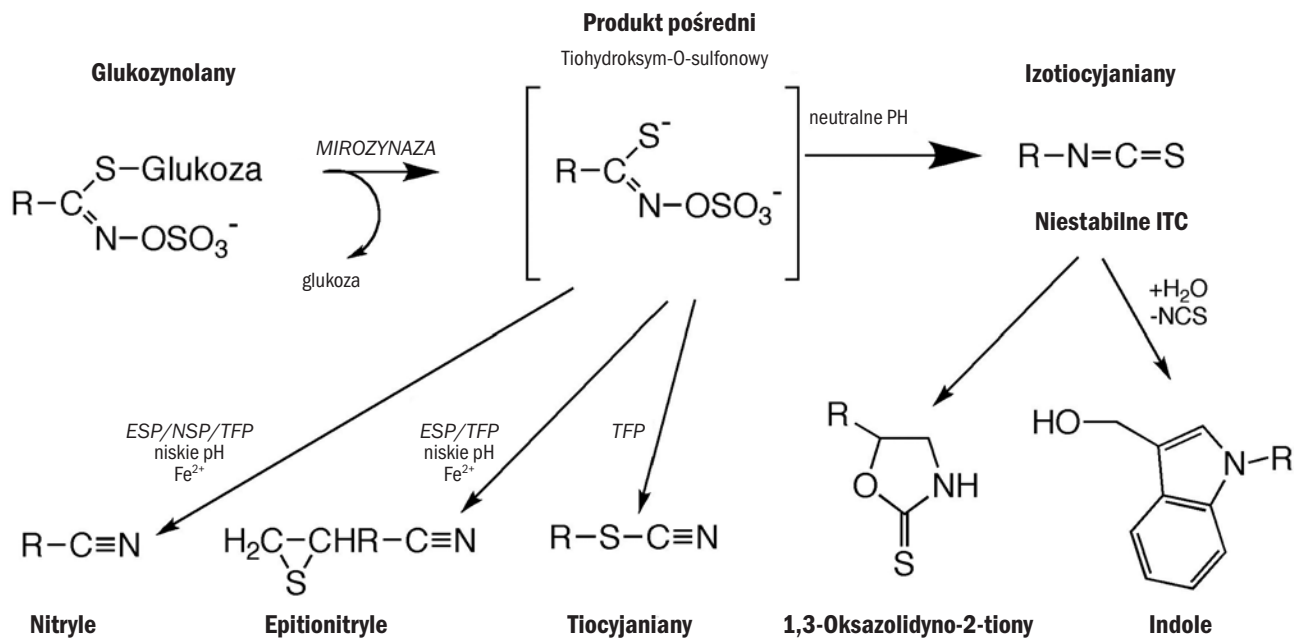
Jak już wspomniano śruta i makuch rzepakowy stosowane są jako komponenty białkowe w mieszankach paszowych dla zwierząt gospodarskich. Niestety, obecność progoitryny i produktu jej degradacji, goitryny, stanowi problem w wykorzystaniu ubocznych produktów powstających w procesie uzyskiwania oleju z nasion rzepaku. Goitryna, czyli 5-winylookszolidyno-2-tion, może zaburzać gospodarkę jodem w organizmie oraz utrudniać

prawidłowe funkcjonowanie enzymu peroksydazy tarczycowej, przez co przyczynia się do efektu wolotwórczego (26). U zwierząt otrzymujących pasze zawierające dodatek rzepaku stwierdzono m.in. powiększenie wątroby i nerek, obserwowano również brak apetytu i spowolnienie wzrostu (32).

W zależności od gatunku zwierząt gospodarskich, którym podawane są pasze zawierające makuch lub śrutę rzepakową, obserwuje się zróżnicowaną tolerancję na ich obecność. W przypadku trzody chlewnej młode osobniki są bardziej

Tabela 1. Zawartość glukozynolanów w wybranych roślinach kapustnych

Warzywo	Glukozynolan	Zawartość $\mu\text{mol}/100 \text{ g}$ świeżej masy	Piśmiennictwo
Brukselka	sinigrina	8,6	14
	glukonapina	2,7	
	progoitryna	2,4	
	glukoiberyna	1,5	
	glukonasturcyna	1,1	
	glukorafanina	0,5	
Brokuły	glukorafanina	29,4	14
	glukoiberyna	17,1	
	glukonasturcyna	4,4	
	progoitryna	3,3	
	glukonapina	2,8	
	sinigrina	1,4	
Kalafior	sinigrina	5,3	14
	glukonapina	3,4	
	glukoerucyna	2,8	
	glukoiberyna	1,3	
	progoitryna	0,4	
	glukorafanina	0,3	
Kapusta biała	glukoiberyna	1,7–90,6	15, 16
	glukobrassycyna	17,2–76,9	
	progoitryna	1,3–61,0	
	sinigrina	15,6–55,8	
	glukorafanina	1,4–27,1	
	metoksyglukobrassycyna	2,9–21,5	
	hydroksyglukobrassycyna	0,3–4,0	
	neoglukobrassycyna	0,6–3,4	
Kapusta czerwona	sinigrina	33,0	17
	glukorafanina	20,8	
	metoksyglukobrassycyna	8,8	
	glukobrassycyna	8,6	
	hydroksyglukobrassycyna	5,4	
Rzepa	glukonapina	62,7	18
	glukobrassycyna	15,0	
	glukobrassykonopina	14,4	
	geoglukobrassycyna	12,4	
	glukonasturcyna	12,3	
	progoitryna	8,3	
	hydroksyglukobrassycyna	4,7	
Rzepak	progoitryna	125,6	19
	hydroksyglukobrassycyna	39,6	
	glukonapina	38,9	
	glukobrassykonopina	13,7	
	glukonapoleiferyna	5,3	
	glukonasturcyna	5,1	
Gorczyca biała	sinalbina	90,0	20
	progoitryna	18,9	
	glukoerucyna	13,6	
	glukonapina	5,4	



Ryc. 1. Rozkład glukozynolanów katalizowany przez mirozynazę i produkty hydrolizy (28)

narażone niż dorosłe na negatywne działanie tej grupy związków (5). W żywieniu loszek obserwowano opóźnienie rui, obniżenie wagi miotów i mniejszą przeżywalność prosiąt (33). Mieszanki paszowe dla loch karmiących nie powinny zawierać pasz rzepakowych, ponieważ glukozynolany w nich zawarte mogą przenikać do mleka i zakłócać metabolizm jodowy prosiąt, przez co obniżyć tempo ich wzrostu i doprowadzać do przerostu gruczołu tarczycy (34). Z badań przeprowadzonych przez Shōne i wsp. (35) wynika, że dodatek makuchu rzepakowego może doprowadzić do wydalania jodu z moczem oraz zmniejszać jego stężenie w mleku. Tuczniaki, w zależności od okresu tuczu, mogą dostawać mieszanki paszowe zawierające znaczne ilości makuchu lub sruły rzepakowej. Jednakże w pierwszym okresie żywienia warchlaków (30–60 kg m.c.) powinno się te materiały stosować w ograniczonym zakresie, ze względu na możliwość negatywnego oddziaływania, głównie na tarczycę, wątrobę i nerki oraz obniżenia poziomu hormonów tarczycy we krwi. Sruła rzepakowa zawierająca do 5 µM/g glukozynolanów może być stosowana w żywieniu trzody o dużym potencjale wzrostu jako jedyne białko uzupełniające zboże, pod warunkiem prawidłowego zbilansowania dawki pokarmowej, głównie w lizynę (36).

Glukozynolany zawarte w diecie drobiu są bardziej szkodliwe dla kur niosek i indyków niż brojlerów. Wynika to z krótkiego okresu hodowli brojlerów wynoszącego od 6 do 8 tygodni, który nie jest wystarczająco długi, aby glukozynolany zawarte w mieszance paszowej wpłynęły negatywnie na organizm ptaków (37). U kur niosek i indyków, dla których okres hodowli

jest znacznie dłuższy, glukozynolany zawarte w paszach mogą doprowadzić do obniżenia ich spożycia, zaburzenia wzrostu i wzrostu śmiertelności. Z badań przeprowadzonych przez Karunajeewą i wsp. (38) wynika, że dodatek sruły rzepakowej w ilości 149 g/dzień w istotny sposób przyczynił się do wzrostu śmiertelności kurcząt brojlerów. Przyczyną zgonów były zaburzenia w funkcjonowaniu wątroby, serca oraz układu ruchu. Palander i wsp. (39) obserwowali podobne przypadki, ponadto w przeprowadzonych badaniach zaobserwowali pęknięcie tętnic brzusznych u drobiu. W obu przypadkach za przyczynę zmian patologicznych uznano toksyczny wpływ produktów hydrolizy glukozynolanów. Dlatego w mieszankach paszowych dla drobiu udział makuchu lub sruły rzepakowej należy ograniczyć do około 10% (31).

Największą tolerancję na szkodliwe działanie glukozynolanów wykazują przeżuwacze. Wynika to z faktu posiadania przez te zwierzęta żołądka wielokomorowego, w którym część glukozynolanów ulega hydrolizie i rozkładowi w procesie bakteriologicznego trawienia i fermentacji żwaczowej, tracąc swoje szkodliwe właściwości (34). Pomimo dużej tolerancji przeżuwaczy na obecność w paszy ich długotrwałe podawanie może być przyczyną wzrostu stężenia tiocyanianów oraz obniżenia poziomu tyroksyny w osoczu (40). W żywieniu krów mlecznych wysoka zawartość glukozynolanów w dawce pokarmowej może doprowadzić do zaburzenia płodności oraz indukować zaburzenia tarczycy (41). Wykazano, że m.in. goitryna może przechodzić do mleka zwierząt karmionych paszą z dodatkiem rzepaku, co z kolei wiąże się z zagrożeniem dla dzieci pijących takie mleko (23). U jagniąt i cieląt

nie obserwuje się zahamowania wzrostu i zmniejszonej konwersji paszy nawet w przypadku zawartości glukozynolanów w paszy na poziomie 7,7 µM/g s.m.b. dla cieląt oraz 4,2 µM/g s.m.b. w przypadku jagniąt. Stąd w mieszankach paszowych dla bydła i owiec możliwy jest większy udział sruły czy makuchu rzepakowego (40, 42).

### Działania prozdrowotne glukozynolanów na człowieka

Glukozynolany występujące w roślinach kapustnych mają istotne znaczenie w przypadku chemoprewencji nowotworów (21). Liczne badania epidemiologiczne, a także doświadczenia przeprowadzone na zwierzętach wykazały, że duże spożycie warzyw z rodziny krzyżowych, takich jak brokuły, brukselka, kapusta (biała, czerwona, pekińska) czy kalafior, może chronić organizm ludzki przed rozwojem nowotworów. W związku z tym warzywa z rodziny krzyżowych wzbudziły zainteresowanie badaczy jako potencjalne składniki profilaktycznych diet antynowotworowych (43, 44). Za najważniejsze pochodne glukozynolanów w profilaktyce nowotworowej, a także w przypadku innych dietozależnych chorób przewlekłych, uważane są izotiocyaniany. Chemoprewencyjne działanie warzyw kapustnych wiązane jest przede wszystkim z obecnością izotiocyanianów, natomiast w mniejszym stopniu z obecnością pochodnych indolowych. Przeprowadzone badania *in vitro* i *in vivo* wykazały, że najsilniejsze właściwości antykancerogenne posiadają izotiocyaniany (ITC): sulforafan (SF) i izotiocyanian fenyletylu oraz indole: indolo-3-karbinol (I3C) i produkty jego kondensacji 3,3'-diindolilometan (DIM; 5, 45). Wiadomo, że produkty

rozpadu glukozynolanów wpływają na wiele procesów zachodzących w komórce poprzez regulację poziomu czynników transkrypcyjnych, szlaków sygnalizacyjnych, a także regulację cyklu komórkowego i apoptozy, zahamowanie proliferacji komórek czy zatrzymanie cyklu komórkowego, a ponadto biorą udział w metabolizmie estrogenów (46).

Opracowano wiele hipotez, które tłumaczą antykancerogenne właściwości izotiocyanianów. Najlepiej poznany z nich jest mechanizm oparty o zahamowanie metabolicznej aktywacji związków rakotwórczych przez cytochrom P450 (I faza), w połączeniu z indukcją enzymów II fazy odpowiedzialnych za detoksykację ksenobiotyków. Izotiocyaniany aktywują enzymy II fazy, zwłaszcza takie jak S-transferazy glutationowe (GST), które katalizują reakcję sprzęgania glutationu z różnymi typami ksenobiotyków, ułatwiając w ten sposób eliminację szkodliwych związków z organizmu, a także UDP-glukuronyltransferazy (UGT) oraz oksydoreduktazy chinonowe (25, 47). Oksydoreduktaza chinonowa katalizuje redukcję chinonów, m.in. chinonów oraz tlenków azotu, chroniąc w ten sposób komórki przed kancerogenezą (48, 49). Ponadto istotne znaczenie ma fakt, że indukcja enzymów II fazy trwa pewien czas i efekt ochronny spowodowany obecnością izotiocyanianów jest przedłużony w przeciwieństwie do przeciwutleniających, których działanie jest „jednorazowe” (21). Przez to odgrywają ważną rolę w ochronie komórek przed uszkodzeniami DNA wywołanymi przez czynniki rakotwórcze i reaktywne formy tlenu (50). W przeciwieństwie do izotiocyanianów, związki indolowe indukują enzymy I i II fazy detoksykacji (51). Kancerogen, aby zostać unieszkodliwiony przez enzymy II fazy detoksykacji, musi ulec aktywacji w I fazie, czym tłumaczy się wykazywane przez indole właściwości antynowotworowe (46).

W przeprowadzonych badaniach wykazano, że izotiocyaniany zawarte w sokach z kapusty świeżej i kiszzonej wykazują silną zdolność indukcji enzymów II fazy detoksykacji w liniach komórek raka okrężnicy HT-29 i raka wątroby HepG2 oraz indukcji enzymów naprawczych DNA w linii komórek HT-29 (52). W przeciwieństwie do ITC, które są modulatorami o działaniu różnicującym dla enzymów I i II fazy detoksykacji, związki indolowe są traktowane jako stymulatory dwufunkcyjne, ponieważ mogą wpływać zarówno na indukcję enzymów I, jak i II fazy detoksykacji (51).

Pomimo faktu, że warzywa z rodziny kapustnych zawierają wiele związków antykancerogennych, indol-3-karbinol (I3C) wykazuje najwyższą skuteczność w zapobieganiu nowotworom piersi,

endometrium i szyjki macicy (53). Należą one do nowotworów, które są estrogenozależne – estrogen jest czynnikiem promującym wzrost i przeżywalność komórek nowotworowych. Estrogeny wykazują działanie estrogenne poprzez wiązanie się z receptorem estrogenów (ER). W jądrze, kompleks estrogen – ER może przyłączyć się do sekwencji DNA znanych jako element odpowiedzi na estrogeny (ERE), zwiększając transkrypcję genów zależnych od estrogenów (54). Niektóre działania, w których pośredniczy receptor estrogenów, mogą prowadzić do zwiększenia ryzyka nowotworów. W badaniach przeprowadzonych przez Jin i wsp. (27) stwierdzono, że indolo-3-karbinol dodany do komórek raka piersi wykazuje zdolność hamowania transkrypcji genów kodujących receptor estrogenów. Wykazano również, że powstałe w środowisku kwaśnym żołądka produkty kondensacji indolo-3-karbinolu (głównie DIM) mogą zahamować transkrypcję genów receptorów estrogenowych, a także przyczynić się do zwiększenia metabolizmu estrogenów (52, 55). Ponadto wykazano, że I3C i DIM indukują apoptozę po dodaniu ich do kultur nowotworowych komórek szyjki macicy, piersi oraz stercza. Stwierdzono również, że w przypadku uszkodzenia DNA liczna grupa izotiocyanianów oraz indoli, np. I3C, powoduje zatrzymanie cyklu rozwojowego w hodowli różnych linii komórek nowotworowych (56, 57, 58).

Ponadto stwierdza się, że oprócz działania przeciwnowotworowego glukozynolany biorą udział w ochronie organizmu przed reaktywnymi formami tlenu, ochraniają komórki przed stresem oksydacyjnym, a także wykazują działanie przeciwbakteryjne i przeciwwirusowe (21).

Zaznaczyć jednak należy, że nadmierne spożywanie znacznych ilości glukozynolanów może doprowadzić do upośledzenia funkcji wydzielniczej tarczycy, a następnie do wzrostu aktywności tyreotropowej i przerostu tarczycy. Z tego względu istotne jest, aby spożycie warzyw kapustnych związane było z obecnością jodu w pożywieniu (5). W badaniach przeprowadzonych w kilku laboratoriach stwierdzono negatywne działanie indolo-3-karbinolu, który przyczynił się albo stymulował rozwój nowotworu, kiedy podawano go w sposób ciągły po czynniku rakotwórczym. Pierwsze negatywne skutki I3C ujawniające jego wpływ na rozwój nowotworu dostrzeżono w przypadku nowotworu wątroby w badaniach przeprowadzonych na pstrągach oraz na szczurach, gdzie zaobserwowano wpływ I3C na rozwój nowotworu wątroby, tarczycy i macicy (15, 21). Wpływ długotrwałej suplementacji I3C na ryzyko wystąpienia raka u ludzi nie jest jeszcze poznany.

## Podsumowanie

Glukozynolany zawarte w roślinach krzyżowych stanowią pewne ograniczenie w skarmianiu zwierząt gospodarskich mieszankami paszowymi zawierającymi sruinę lub makuch rzepakowy ze względu na właściwości antyżywniowe, jakie wykazują – zmniejszenie przyrostów masy ciała czy zaburzenia gospodarki jodem (działanie wolotwórcze). Najlepszym przeznaczeniem żywieniowym dla sruin i makuchów rzepakowych są mieszanki paszowe dla bydła i owiec, ponieważ ta grupa zwierząt wykazuje największą tolerancję na obecność glukozynolanów oraz produktów ich degradacji. W przypadku żywienia człowieka glukozynolany, a szczególnie produkty ich degradacji, takie jak izotiocyaniany oraz indole, wykazują szereg działań ochronnych na organizm ludzki, głównie w profilaktyce nowotworowej. Dzięki informacjom o antykancerogennych właściwościach glukozynolanów, warzywa kapustne są przedmiotem zainteresowania licznych badaczy.

## Piśmiennictwo

- Jeffery E., Brown A., Kurilich A., Matusheski N., Klein B.: Variation in content of bioactive components in broccoli. Study review, *J. Food Compos. Anal.* 2003, **16**, 323–330.
- Kurilich A., Tsau G., Brown A., Howard L., Klein B., Jeffery E., Carotene, tocopherol, and ascorbate contents in subspecies of Brassica oleracea, *J. Agric. Food Chem.* 1999, **47**, 1576–1581.
- Lisiewska Z., Kmieciak W.: Effects of level of nitrogen fertilizer, processing conditions and period of storage of frozen broccoli and cauliflower on vitamin C retention, *Food Chem.* 1996, **57**, 267–270.
- Vallejo F., Tomas-Barberan F., Garcia-Viguera C.: Potential bioactive compounds in health promotion from broccoli cultivars grown in Spain, *J. Sci. Food Agric.* 2002, **82**, 1293–1297.
- Dżigan M.: Znaczenie warzyw kapustnych w profilaktyce nowotworów. *Zdrowie Publiczne.* 2007, **117**, 397–401.
- Clarke B., Glucosinolates, structures and analysis in food. *Anal. Methods.* 2010, **2**, 310–325.
- Troczyńska J.: System mirozynaza – glukozynolany – charakterystyka i funkcje w roślinie. *Rośliny oleiste – Oilseed Crops.* 2005, **26**, 51–64.
- Fahey J.W., Zalcmann A.T., Talalay P.: The chemical diversity and distribution of glucosinolates and isothiocyanates among plants. *Phytochemistry.* 2001, **56**, 5–51.
- Clarke B., Glucosinolates, structures and analysis in food. *Anal. Methods.* 2010, **2**, 310–325.
- Oleszek W.: Glukozynolany – występowanie i znaczenie ekologiczne. *Wiad. Bot.* 1995, **39**, 49–58.
- Patyra E., Kwiatek K.: Glukozynolany – składniki antyżywniowe pasz. *Życie Wet.* 2015, **90**, 674–677.
- Hosegawa T., Yamada K., Kosemura S., Yamamura S., Hasegawa K.: Phototropic stimulation induces the conversion of glucosinolate to phototropism-regulating substances of radish hypocotyls. *Phytochem.* 2000, **54**, 275–279.
- Koritsas V.M., Lewis J.A., Fenwick G.R.: Glucosinolate response of oilseed rape, mustard and kale to mechanical wounding and infestation by cabbage stem flea beetle (*Psyllodes chrysocephala*). *Ann. Appl. Biol.* 1991, **118**, 209–221.
- Song L., Thornalley P.: Effect of storage, processing and cooking on glucosinolate content of Brassica vegetables. *Food Chem. Toxicol.* 2007, **45**, 216–224.
- Oganesian A., Hendricks J.D., Pereira C.B., Orner G.A., Bailey G.S., Williams D.E.: Potency of dietary indole-3-carbinol as a promoter of aflatoxin B1-initiated hepatocarcinogenesis: results from a 9000 animal tumor study. *Carcinogenesis.* 1999, **20**, 453–458.
- Volden J., Wicklund T., Verkerk R., Dekker M., Kinetics changes in glucosinolate concentrations during long-term

- cooking of white cabbage, (*Brassica oleracea* L. ssp. *capitata* f. *alba*). *J. Agric. Food Chem.* 2008, **56**, 2068–2073.
17. Verkerk R., Dekker M., Glucosinolates and myrosinase activity in red cabbage after various microware treatments. *J. Agric. Food Chem.* 2004, **52**, 7318–7323.
  18. Heinricher E.: Über Eiweißstoffe führende Idioblasten bei einigen Cruciferen, *Ber. Dtsch. Bot. Ges.* 1884, 463–467.
  19. Millan S., Sampedro M., Gallejones P., Castellon A., Ibargoitia M., Goicolea M., Barrio R., Identification and quantification of glucosinolates in rapeseed using liquid chromatography-ion mass spectrometry. *Anal. Bioanal. Chem.* 2009, **294**, 1661–1669.
  20. Brown P., Morra M., Brassicaceae tissues as inhibitors of nitrification in soil *J. Agric. Food Chem.* 2009, **57**, 7706–7711.
  21. Szejda-Grzybowska J.: Antykancerogenne składniki warzyw kapustnych i ich znaczenie w profilaktyce chorób nowotworowych. *Bromat. Chem. Toksykol.* 2011, **4**, 1039–1046.
  22. Heinricher E.: Über Eiweißstoffe führende Idioblasten bei einigen Cruciferen, *Ber. Dtsch. Bot. Ges.* 1884, 463–467.
  23. Bachmann M., Theus R., Luthy J., Schlatter C.: The occurrence of goitrogenic substances in milk. 1. Release of goitrin in the milk of cows fed on rapeseed extract cakes. *Z. Lebensm. Unters. Forsch.* 1985, **181**, 375–378.
  24. Kissen R., Rossiter J., Bones A.: The 'mustard oil bomb': not so easy to assemble?! Localization, expression and distribution of the components of the myrosinase enzyme system. *Phytochem Rev.* 2009, **8**, 69–86.
  25. Mithen R., Glucosinolates – biochemistry, genetics and biological activity. *Plant Growth Regul.* 2001, **34**, 91–103.
  26. Keum Y.S., Jeong W.S., Kong A.N.: Chemoprevention by isothiocyanates and their underlying molecular signaling mechanisms. *Mutat. Res.* 2004, **555**, 191–202.
  27. Jin L., Qi M., Chen D.Z., Anderson A., Yang G.Y., Arbeit J.M.: Indole-3-carbinol prevents cervical cancer in human papilloma virus type 16 (HPV 16) transgenic mice. *Cancer Res.* 1999, **59**, 3991–3997.
  28. Piekarska A.: *Ocena roślin kapustowatych jako źródła substancji bioaktywnych dla procesów biofumigacji. Poszukiwanie metod zwiększenia potencjału biofumigacyjnego.* Rozprawa doktorska, Gdańsk 2014.
  29. Vig A., Rampal G., Singh T., Arora S.: Bio-protective effects of glucosinolates – a review. *LWT* 2009, **42**, 1561–1572.
  30. Walczak M., Kwiatek K.: Wybrane aspekty uprawy i wykorzystania rzepaku w Polsce. *Pasze Przem.* 2006, **15**, 5–9.
  31. Smulikowska S.: Brązowe zabarwienie skorpury jaj ogranicza zastosowanie pasz rzepakowych w żywieniu niosek. *Pol. Drob.* 2002, **12**, 18–19.
  32. Hanczakowska E., Świątkiewicz M., Węglarzy K.: Wykorzystanie produktów ubocznych produkcji biopaliw: makucho rzepakowego i glicerolu w żywieniu prosiąt. *Zeszyty Naukowe IUP we Wrocławiu-Biologia zwierząt.* 2011, **580**, 199–206.
  33. Fenwick G.R., Spinks E.A., Wilkinson A.P., Heaney R.K., Legoy M.A.: Effect of processing on the antinutrient content of rapeseed. *J. Sci. Food Agric.* 1986, **37**, 735–741.
  34. Brzóska E., Śliwiński B., Michalik-Rutkowska O.: Pasze rzepakowe – wykorzystanie w żywieniu zwierząt oraz bioenergetyce. *Cz. 2, Wiad. Zootech.* 2010, **2–3**, 19–29.
  35. Schöne F., Tischendorf F., Leiterer M., Hartung H., Bargholz J.: Effects of rapeseed-press cake glucosinolates and iodine on the performance, the thyroid gland and the liver vitamin A status of pigs. *Arch. Tierernähr.* 2001, **55**, 333–350.
  36. Fenwick G.R., Curtis R.F.: Rapeseed meal and its use in poultry diets *Anim. Feed Sci. Technol.* 1980, **5**, 255–298.
  37. Rotkiewicz D., Kozłowska H., Smulikowska S.: Changes of rapeseed glucosinolates in digestive tract of hen. *Proc. 7th International Rapeseed Congress.* Poznań, 1987, 1698–1703.
  38. Karunajeewa H., Ijagbui E.G., Reece R.L.: Effect of dietary levels of rapeseed meal and polyethylene glycol on the performance of male broiler chickens. *Brit. Poultry Sci.* 1990, **31**, 545–556.
  39. Palander S., Nasi M., Ala-Fossi I.: Rapeseed and soybean products as protein sources for growing Turkey of different ages. *Brit. Poultry Sci.* 2004, **45**, 664–671.
  40. Anderssen H.R., Sorensen H.: Double low rapeseed meal in diets of young bulls. Advances in the production and utilization of cruciferous crops. *Proceedings of the Seminar in the CEC Programme of Research on Plant Protein Improvement,* Copenhagen, 11–13 September 1984 (1985), 208–217.
  41. Waldern D.E.: Rapeseed meal versus soybean meal as the only protein supplement for lactating cows fed corn silage roughage. *Can. J. Anim. Sci.* 1973, **53**, 107–112.
  42. Ingalls J.R., Sharma H.R.: Feeding of Bronowski, Span and commercial rapeseed meal with or without addition of molasses or mustard in ration of lactating cows. *Can. J. Anim. Sci.* 1975, **55**, 721–729.
  43. Higdon J.V., Delage B., Williams D.E., Dashwood R.H.: Cruciferous vegetables and human cancer risk: epidemiologic evidence and mechanistic basis. *Pharmacol. Res.* 2007, **55**, 224–236.
  44. Thomson C.A., Newton T.R., Graver E.J., Jackson K.A., Reid P.M., Hartz V.L., Cussler E.C., Hakim I.A.: Cruciferous vegetable intake questionnaire improves cruciferous vegetable intake estimates. *J. Am. Diet Assoc.* 2007, **107**, 631–643.
  45. Sawicka B., Kotiuk E.: Gorczyce jako rośliny wielofunkcyjne. *Acta Sci. Pol. Agricultura.* 2007, **6**, 17–27.
  46. Śmiechowska A., Bartoszek A., Namieśnik J.: Przeciwnakotwórcze właściwości glukozynolanów zawartych w kapuście (*Brassica oleracea* var. *Capitata*) oraz produktów ich rozpadu. *Postępy Hig. Med. Dośw.* 2008, **62**, 125–140.
  47. Kwon K.H., Barve A., Yu S., Huang M.T., Kog T.A.: Cancer chemoprevention by phytochemicals: potential molecular targets, biomarkers and animal models. *Acta Pharmacol. Sin.* 2007, **28**, 1409–1421.
  48. Kusznierewicz B., Piasek A., Lewandowska J., Śmiechowska A.: Właściwości przeciwnowotworowe kapusty białej. *Zywność. Nauka. Tech. Jakość.* 2007, **6**, 20–34.
  49. Wang L.J., Hunter D., Neuberger D., Christiani D.C.: Dietary intake of cruciferous vegetables glutathione-S-transferase (GST) polymorphisms and lung cancer risk in a Caucasian population. *Cancer Causes Control.* 2004, **15**, 977–985. – 17.
  50. Steinkellner H., Rabot S., Freywald C., Nobis E., Scharf G., Chabicosky M., Knasmüller S., Kassie F.: Effect of cruciferous vegetables and their constituents on drug metabolizing enzymes involved in the bioactivation of DNA-reactive dietary carcinogens. *Mutat. Res.* 2001, **480–481**, 285–297.
  51. NIH, Natl. Inst. Environmental Health Sci. Indole-3-carbinol. Background Information indole-3-carbinol (I3C). 700–06–1, June 28, 2000.
  52. Śmiechowska A., Piasek A., Czapińska K., Kusznierewicz B.: The influence of fresh cabbage and sauerkraut juices on the activity of protective enzymes in human cell lines. *Acta Bioch. Pol.* 2008, **55**, 28–29. – 19.
  53. NIH, Natl. Inst. Environmental Health Sci. Indole-3-carbinol. Background Information indole-3-carbinol (I3C). 700–06–1, June 28, 2000.
  54. Jordan V.C., Schafer J.M., Levenson A.S., Liu H., Pease K.M., Simons L.A., Zapf J.W.: Molecular classification of estrogens. *Cancer Res.* 2001, **61**, 6619–6623.
  55. Rahman K.W., Li Y., Wang Z., Sarkar S.H., Sarkar F.H.: Gene expression profile revealed survival as a target of 3,3'-diindolylmethane-induced cell growth inhibition and apoptosis in breast cancer cells. *Cancer Res.* 2006, **66**, 4952–4960.
  56. Fimognari C., Berti E., Iori R., Hreialia P.: A mixture of isothiocyanates induces cyclin B10 and p53-mediated cell-cycle arrest and apoptosis of human T lymphoblastoid cells. *Mutat. Res.* 2004, **554**, 205–214.
  57. Gamet-Payrastre L., Li P., Lumeau S., Cassar G., Dupont M.A., Gasc N., Tulliez J., Terce F.: Sulforaphane, a naturally occurring isothiocyanate, induces cell cycle arrest and apoptosis in HT29 human colon cancer cells. *Cancer Res.* 2000, **60**, 1426–1433.
  58. Pappa G., Lichtenberg M., Iori R., Barillari J., Bartsch H., Gerhauser C.: Comparison of growth inhibition profiles and mechanisms of apoptosis induction in human colon cancer cell lines by isothiocyanates and indoles from Brassicaceae. *Mutat. Res.* 2006, **599**, 76–87.