

Przesłano: 09-12-2022

Zaakceptowano do druku: 09-01-2023



SKORUPA KURZYCH JAJ KONSUMPCYJNYCH: WARTOŚĆ ODŻYWCZA I WŁAŚCIWOŚCI FUNKCJONALNE

Joanna Kobus-Cisowska¹, Tomasz Szablewski², Pamela Ziemniewska³,
Marcin Dziedziński⁴

Abstrakt: Produkcja jaj kurzych na poziomie przemysłowym prowadzi do powstania znacznej ilości pozostałości skorup, które najczęściej stanowią odpady produkcyjne. Skorupy jaj konsumpcyjnych niejednokrotnie uważane są za nieekonomiczny produkt uboczny bądź odpad, pomimo tego że stanowią źródło składników mineralnych, mających znaczenie w żywieniu ludzi, jak i zwierząt. W pracy przedstawiono potencjał i możliwości wykorzystania skorupy jaj jako źródła składników mineralnych. Skorupy charakteryzują się wysoką zawartością wapnia, ale zawierają także bor, chrom, mangan, miedź, jod, żelazo, siarkę, cynk, selen oraz krzem i jednocześnie zawierają niski poziom metali ciężkich. Odpowiednio rozdrobnione skorupy jaj mogą stanowić jedno z najlepszych źródeł wapnia w żywieniu ludzi jak i zwierząt, cechującego się ponad 90% przyswajalnością.

Słowa kluczowe: skorupa jaj, wartość odżywcza, właściwości funkcjonalne

JEL: Q1

SHELL OF TABLE EGGS: NUTRITIONAL VALUE AND FUNCTIONAL PROPERTIES

Joanna Kobus-Cisowska¹, Tomasz Szablewski², Pamela Ziemniewska³,
Marcin Dziedziński⁴

Abstract: The production of chicken eggs at the industrial level leads to a significant amount of shell residue, which most often constitutes production waste. In general, consumer egg shells are considered to have no economic value, despite the fact that they are rich in minerals that could provide an alternative to synthetic dietary supplements. This paper reviews

¹ Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu (Poznań University of Life Sciences) | wkład pracy (work input): 40% | ORCID 0000-0003-2834-0405 | e-mail: joanna.kobus@up.poznan.pl

² Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu (Poznań University of Life Sciences) | wkład pracy (work input): 20% | ORCID 0000-0001-6076-8095 | e-mail: tomasz.szablewski@up.poznan.pl

³ Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu (Poznań University of Life Sciences) | wkład pracy (work input): 30% | e-mail: pamelas_krzypczak@wp.pl

⁴ Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu (Poznań University of Life Sciences) | wkład pracy (work input): 10% | ORCID 0000-0003-1069-0095 | e-mail: marcin.dziedzinski@up.poznan.pl

information on the possibilities of egg shells management. A wide range of possibilities for the processing and use of eggshells as a source of minerals and a raw material with functional properties was demonstrated. Shells are characterized by a high content of calcium, but also contain boron, chromium, manganese, copper, iodine, iron, sulfur, zinc, selenium and silicon, while a low content of heavy metals. Properly crushed shells are considered one of the best sources of calcium for humans and animals, with a bioavailability of more than 90%.

Keywords: eggshell, nutritional value, functional properties

JEL Classification: Q1

1. Wstęp

W budowie jaja można wyszczególnić cztery zasadnicze części: białko, żółtko, błony jajowe oraz skorupę. Skorupa jaja powstaje w procesie biomineralizacji w organizmie kury nioski i stanowi zewnętrzną osłonę, która w 95% zbudowana jest ze związków nieorganicznych, a przede wszystkim z węglanu wapnia (Łukaszewicz, 2008). Ochrania ona zarodek przed niekorzystnymi czynnikami zewnętrznymi, fizycznymi obrażeniami oraz drobnoustrojami (Kopacz i Drazbo, 2018). Umożliwia mu także odpowiednią wymię gazową poprzez znajdujące się w niej liczne pory. Ponadto dostarcza związki mineralne, które są niezbędne do prawidłowego rozwoju kurzego zarodka (Hincke i in., 2008). Najbardziej wewnętrzna struktura związana ze skorupą to siatka splecionych włókien, znanych jako membrany skorupowe. Ta struktura, podzielona na morfologicznie odrębne warstwy wewnętrzne i zewnętrzne, składa się z materiału kolagenopodobnego, w tym kolagenu typu I, V oraz X (Zdrojewicz i in., 2016). Powierzchnię skorupy pokrywa cienka warstwa śluzu jajowodu, który składa się z substancji białkowych (Masuda i Hiramatsu, 2008).

W Polsce kury stanowią najliczniejszą grupę drobiu. Według danych z Głównego Urzędu Statystycznego, w 2021 r. pogłowie drobiu kurzego wynosiło ponad 200 mln sztuk (GUS, 2021). Kury nieśne przez około 60 tygodni znoszą jaja spożywcze, natomiast po spadku nieśności trafiają do rzeźni. Dla zachowania dobrostanu kur niosek i ich odpowiedniej nieśności istotne jest zachowanie odpowiedniej temperatury w kurniku (18-20°C) oraz stosowanie zbilansowanej paszy, tzw. pełnoporcjowej, zaspokajającej zapotrzebowanie na wszystkie niezbędne składniki. Składniki paszy wpływające na masę jaja to: egzogenne kwasy tłuszczowe, aminokwasy egzogenne, witaminy i związki mineralne oraz woda (Łukaszewicz, 2008; Szablewski i in., 2013). Skorupa jaja kurzego stanowi około 10% jego masy (Oliveira i in., 2013). Jaja głównie wykorzystywane są w przemyśle spożywczym

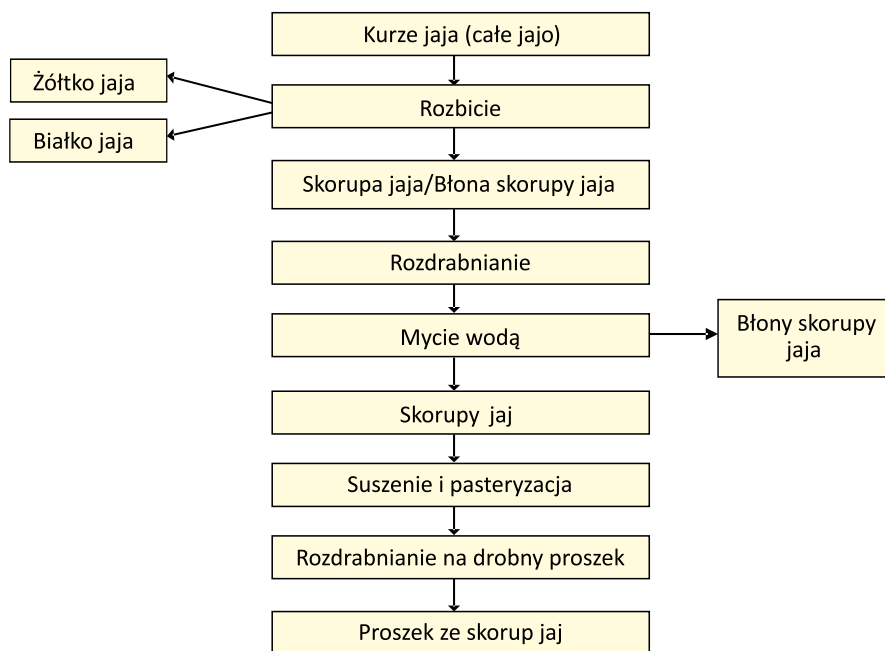
w przetwórstwie żywności, ale także mają zasadnicze znaczenie jako składnik żywności przygotowywanej w gospodarstwach domowych. Zdecydowanie łatwiej kontrolować zagospodarowanie skorupy z przemysłu niż z domostw. Uważa się, że setki tysięcy ton skorup jaj kurzych trafia na wysypiska śmieci każdego roku, w samych Stanach Zjednoczonych produkowanych jest średnio 92 miliardy jaj, co w przybliżeniu powoduje powstanie 465 000 ton odpadów ze skorup (Hassan i in., 2013). Skorupa jaj z procesów przemysłowych może być wykorzystana w wielu gałęziach przemysłu np. rolnictwie, jako środek regulujący pH gleby, jako środek do usuwania metali toksycznych ze skażonej wody i gleby, do produkcji kosmetyków, produkcji cementu czy jako składnik kompozytów polimerowo-metalowych (Vandeginste, 2021). Niniejsza publikacja skupia się na możliwościach zastosowania skorupy jaj kurzych w żywieniu ludzi i zwierząt. Obecnie, w Stanach Zjednoczonych dopuszczone zostało użycie skorup jaj kurzych w proszku jako środka wzbogacającego paszę dla zwierząt gospodarskich, a na rynku amerykańskim pojawiły się produkty spożywcze takie jak kiełbasy, jogurty, ciastka, sery, itd., wzbogacane w wapń pozyskany ze skorup (Aditya i in., 2021).

2. Pozyskiwanie produktów ze skorupy jaj – rodzaje i metody

Wykorzystanie produktów ubocznych takich jak skorupy jaj kurzych jest interesującą alternatywą dla wapnia otrzymywanego syntetycznie (Kobus-Cisowska i in., 2020; Szablewski i in., 2012). Skorupy jaj kurzych są produktem ubocznym, które najczęściej klasyfikowane są jako odpady. Skorupy po rozbiciu, oddzieleniu ich od białka i żółtka są poddawane wstępnemu oczyszczeniu. Następnie są rozdrabniane i przemywane w celu oddzielenia błon jajowych, suszone i pasteryzowane oraz mielone w młynie nożycowym do momentu uzyskania drobnego proszku. Etapy procesu powstawania proszku ze skorup zostały przedstawione na rysunku 1 (Masuda i Hiramatsu, 2008).

Innym sposobem rozdrabniania skorup jaj jest mielenie w młynie kulowym. W raporcie Balaz i in. (2018) skupiono się głównie na właściwościach porów skorup jaj kurzych. Autorzy wykonali wiele eksperymentów zmieniając prędkość obrotową, masę próbki, kierunek oraz czas mielenia (tabela 1). Największą ilość mezoporów otrzymano w przypadku mielenia 1 g skorup jaj przy 400 obrotach na minutę przez 30 minut (Balaz, 2018).

Rycina 1

Proces wytwarzania proszku skorupy jajka

Źródło: Masuda i Hiramatsu, 2008.

Niektóre badania skupiały się głównie na wpływie mielenia na zmiany chemiczne otrzymanego proszku. Podczas intensywnego rozdrabniania skorup jaj kurzych w młynie kulowym powstaje faza kalcytu (bardzo rozpowszechniony minerał skałotwórczy), który może przekształcić się w aragonit (minerał, odmiana węgla wapnia). Intensywne mielenie membran skorup jaj prowadzi do pogorszenia struktury włóknistej (Tomczyk i in., 2018). Mielenie membran i skorup jaj może także poprawić zdolność sorpcyjną w stosunku do metali ciężkich i barwników oraz poszerzyć potencjał aplikacyjny otrzymanego produktu. Optymalne warunki dla usunięcia membran białkowych stwierdzono w trakcie ogrzewania skorup w temperaturze 300°C przez 2 godziny. Zastosowano także bielenie wybielaczem (Clorox). Optymalne warunki bielenia to użycie 10% wybielacza przez 48 godzin lub 50% wybielacza przez 10 minut. Rolą młynów kulowych była redukcja wielkości cząsteczek i homogenizacja mieszaniny (Balaz, 2018).

Tabela 1

**Wyniki eksperymentów dotyczących mielenia skorup jaj
w młynie kulowym**

Prędkość obrotowa (rpm)	Czas (min)	Masa próbki (g)	Powierzchnia właściwa (m ² /g)
-	-	-	0,5
100	30	10	0,7
200	30	10	1,6
300	30	10	5,0
400	30	10	8,7
500	30	10	9,6
600	30	10	11,0
400	1	10	1,0
400	5	10	3,4
400	10	10	4,6
400	30	10	8,7
400	60	10	11,3
400	120	10	10,6
400	180	10	13,8
400	30	0,5	19,7
400	30	1	21,2
400	30	5	13,4
400	30	10	8,7
400	30	20	5,6
400	30	30	4,0

Źródło: Balaz, 2018.

Istnieje także tradycyjny sposób rozdrabniania skorup jaj. Polega on na ręcznym oddzieleniu jaj i membran od skorupy. Następnie skorupy poddaje się pasteryzacji trwającej 10 minut, suszeniu na powietrzu oraz rozdrabnianiu za pomocą młynka kuchennego (El-Shibiny i in., 2018; Zhang i in., 2017).

3. Skład chemiczny skorupy jaj

Skorupa jaja zbudowana jest z organicznych substancji, które tworzą szkielet kolagenowy. Schaafsma i in. (2000) określili skład chemiczny skorup jaj kurzych, a także porównali go z innymi preparatami, które są źródłem wapnia (Rodriguez-

-Navarro i in., 2002; Schaafsma i in., 2000). Wykazano, że pierwiastki występujące w skorupach jaj to przede wszystkim wapń w postaci węglanu wapnia, a także bor, chrom, mangan, miedź, jod, żelazo, siarka, cynk, selen oraz krzem. Wyniki badania Nakano i in. (2003) wykazały, że w skorupach jaj znajdują się także bor i stront (Nakano i in., 2003; Świątkiewicz i in., 2015). W porównaniu z syntetycznie otrzymanym węglanem wapnia skorupa jaja kurzego zawierała podobną ilość wapnia, więcej strontu i selenu, a mniej fluoru. Na korzyść skorup może również przemawiać fakt, iż miały one najmniejszy procentowy udział niekorzystnych metali, takich jak wanad, chrom, ołów, glin i kadm (Ahmed i in., 2005; El-Shibiny i in., 2018).

W tabeli 2 zamieszczono porównanie zawartości metali znajdujących się w skorupie jaj domowych gatunków ptaków (Salwa i in., 2011). Najwyższą zawartość manganu stwierdzono w skorupach jaj przepiórczych, natomiast najniższą w skorupach jaj perliczek. Zupełnie odwrotnie było w przypadku żelaza. Najwyższy poziom odnotowano w skorupach jaj perliczych, a najmniejszy w skorupach jaj przepiórczych. Poziom kobaltu i selenu we wszystkich czterech przypadkach był zbliżony, niski w porównaniu z pozostałymi metalami. Największa zawartość miedzi została odnotowana w przypadku skorup jaj gołębia i przepiórki. W przypadku skorup jaj kurzych i perliczych poziom tego pierwiastka były znacznie niższy. Najwyższe stężenie cynku stwierdzono w przypadku jaj gołębich i przepiórczych, mniejsze w przypadku jaj kur i perliczek. W związku z tym, że stężenia selenu stwierdzono w małej ilości skorup jaj dla wszystkich ptaków, nie stwierdza się znaczących różnic wśród podanych gatunków ptaków (Salwa i in., 2011; Zhang i in., 2017).

Tabela 2

Średnie stężenie metali w skorupach jaj domowych gatunków ptaków
($\mu\text{g g}^{-1}$ suchej masy)

Metale	Kury	Perliczki	Przepiórki	Gołębie
Selen	0,25	0,24	0,174	0,597
Arsen	0,19	0,26	0,162	0,36
Mangan	0,43	0,20	1,67	0,86
Żelazo	1421,9	1682,9	755,0	1535
Kobalt	0,58	0,50	0,67	0,87
Cynk	2,00	1,62	6,19	7,78
Miedź	1,06	1,01	3,34	4

Źródło: Salwa i in., 2011.

4. Wartość odżywcza skorup jaj

Skorupy jaj kurzych stanowią około 10% masy jaja. Są one źródłem soli wapnia, glikoproteidów, białek oraz proteoglikanów. Uważa się, że sole wapnia budujące skorupę, mogłyby być najlepszym źródłem wapnia dla człowieka, cechującym się ponad 90% przyswajalnością (Nowaczewski i in., 2022; Zdrojewicz i in., 2016). W tabeli 3 przedstawiono zawartość składników mineralnych znajdujących się w mączce ze skorup jaj (Schaafsma i in., 2000).

Tabela 3

Skład mineralny proszku skorupy jaj

Składnik	Jednostka	Zawartość składnika	RDA
Wapń	mg/g	386-415	1200mg
Magnez	mg/g	3,5-5,5	320-420mg
Fosfor	mg/g	0,6-1,4	700mg
Stront	mg/g	0,0500-0,0693	1-3mg
Cynk	mg/g	0,004-0,006	12-15mg
Żelazo	mg/g	0,020-0,025	10-15mg
Miedź	mg/g	0,005-0,010	1,5-3,0mg
Bor	µg/g	≤0,5	500-1000µg
Chrom	µg/g	0,03-,0,20	50-200µg
Fluor	mg/g	0,002-0,006	3,1-3,8mg
Selen	µg/g	0,014-0,034	55-70µg
Wanad	µg/g	<0,5	<10µg
Ołów	µg/g	<0,5	430µg
Glin	mg/g	<0,005	70mg
Kadm	µg/g	<0,050	60µg
Rtęć	µg/g	<0,2	29µg

Źródło: Schaafsma i in., 2000.

5. Właściwości funkcjonalne skorupy jaj

Według autorów, proszek ze skorup jaj kurzych cechuje się wysoką rozpuszczalnością ze względu na jego porowatą strukturę (Masuda i Hiramatsu, 2008). W literaturze dostępne są doniesienia, które potwierdzają korzystny wpływ proszku ze skorupy jaj na poprawę gęstości i mineralizacji kości. Badanie wykonane na zwierzętach (szczurach), miało na celu porównanie wpływu na stan kości syn-

tetycznego węglanu wapnia i wapnia pozyskanego ze skorup jaj. Doświadczenie zostało przeprowadzone na szczurach chorych na osteoporozę. Stwierdzono, że gęstość mineralna kości była znacząco wyższa w grupie szczurów suplementowanych węglanem wapnia ze skorupy (Szeleszczuk, 2013). W innym doświadczeniu, w badaniach na szczurach, porównano właściwości syntetycznego węglanu wapnia i wapnia pozyskanego ze skorup jaj z uwzględnieniem stopnia rozdrobnienia (grubo i drobno mielona skorupa). Wykazano, że stopień rozdrobnienia skorupy nie ma wpływu na biodostępność i wchłanianie tego pierwiastka przez organizm zwierzęcia młodego. Natomiast wykazano istotne znaczenie w biodostępności wapnia w przypadku szczurów w okresie rozrodczym. Stwierdzono wyższą wchłanianiałość wapnia z drobno rozdrobnionego proszku i ponad dwukrotnie wyższą wchłanianiałość w porównaniu do syntetycznego odpowiednika (Masuda i Hiramatsu, 2008).

W tabeli 4 zestawiono wyniki testów wykonanych z wykorzystaniem zwierząt laboratoryjnych oraz badań z udziałem ludzi dotyczących właściwości funkcjonalnych preparatów otrzymanych ze skorup jaj w odniesieniu do pierwiastków bioaktywnych takich jak wapń i stront.

Mine i wsp. (2008) badali aktywność przeciwdrobnoustrojową białka wchodzącego w skład skorupy. Autorzy wykazali korzystne właściwości w inaktywacji drobnoustrojów takich jak *Pseudomonas aureginosa*, *Bacillus cereus* i *Staphylococcus aureus* (Mine, 2008). W innym badaniu potwierdzono obecność lizozymu i α -N-acetyloglukozaminidazy w skorupie jaja kurzego. Lizozym posiada właściwości hamujące wzrost bakterii Gram-dodatnich a α -N-acetyloglukozaminidaza uszkadza ścianę komórkową bakterii Gram-ujemnych. Badacze ci potwierdzili również wysoką aktywność preparatu ze skorupy jaja kurzego w zmniejszeniu oporności na wysoką temperaturę bakterii takich jak: *Salmonella enteritidis*, *Salmonella typhimurium*, *Escherichia coli* O157:H7, *Listeria monocytogenes* i *Staphylococcus aureus* (Szeleszczuk, 2013).

W literaturze dostępne są także badania, które potwierdziły, możliwość uzyskania hydroksyapatytu ze skorupy jaj. Oznaczono minimalną temperaturę, która pozwala na całkowitą kalcynację materiału, która wynosi 900°C. Otrzymywany produkt może stać się ważnym krokiem w tworzeniu nowej generacji biomateriałów implantacyjnych (Pluta i in., 2017).

Tabela 4

**Badania dotyczące funkcjonalności preparatów wapnia i strontu otrzymanych
ze skorup jaj kurzych**

Związek bioaktywny	Wielkość badania/ uczestnicy	Interwencja dietetyczna	Źródło związków bioaktywnych	Efekty	Odniesienia
WAPŃ	Szczury z osteoporozą	Wapń ze skorup jaj (grupa 1) Syntetyczny węglan wapnia (grupa 2)	Proszek ze skorup jaj Suplementacja	Wzrost gęstości mineralnej kości Istotne różnice pomiędzy grupami – grupa 1 znacznie większy wzrost gęstości kości niż w grupie 2	(Szeleszczuk, 2013) (Masuda i Hiramatsu, 2008)
	Pacjenci w podeszłym wieku cierpiący na zatorowość naczyń mózgowych	Wapń ze skorup jaj (grupa 1) Syntetyczny węglan wapnia (grupa 2)	Proszek ze skorup jaj Suplementacja	Wyższa biodostępność wapnia z proszku ze skorup jaj	(Szeleszczuk, 2013) (Masuda i Hiramatsu, 2008)
	Szczury	Wapń ze skorup jaj (grupa 1) Preparat ze szpiku kostnego i muszli skorupiaków (grupa 2)	Proszek ze skorup jaj Proszek ze szpiku kostnego i muszli skorupiaków	Wzrost przyrostu i gęstości mineralnej kości w grupie 1	(Szeleszczuk, 2013)
	Młode szczury (grupa 1) Szczury w wieku reprodukcyjnym (grupa 2)	Mineralny węglan wapnia Wapń ze skorup jaj	Suplementacja Grubo zmielony proszek ze skorup jaj Drobno zmielony proszek ze skorup jaj	W grupie 1- brak zmian we wchłanianiu Grupa 2- najwyższa biodostępność wapnia z drobno zmielonego proszku, najniższe wchłanianie mineralnego węglanu wapnia	(Masuda i Hiramatsu, 2008)
	Ciężarne szczury	Syntetyczny węglan wapnia Wapń ze skorup jaj	Suplementacja Grubo zmielony proszek ze skorup jaj Drobno zmielony proszek ze skorup jaj	Najwyższa biodostępność wapnia z drobno zmielonego proszku, najmniejsze wchłanianie syntetycznego węglanu wapnia	(Szeleszczuk, 2013)
	Pacjenci cierpiący na niewydolność nerek	Wapń ze skorup jaj (grupa 1) Syntetyczny węglan wapnia (grupa 2)	Proszek ze skorup jaj Suplementacja	Spadek poziomu fosforu w surowicy Znacznie większa skuteczność – grupa 1	(Masuda i Hiramatsu, 2008)
	20 uczestników	2,5 g proszku ze skorup jaj i 300 mg kwasu askorbinowego (1 grupa) 2,5 g dekstryn (2 grupa - kontrolna)	Proszek ze skorup jaj Suplementacja	Grupa 1-wzrost wartości MED. I MPPD= długotrwałe skutki fotochronne	(Szeleszczuk, 2013)

Związek bioaktywny	Wielkość badania/uczestnicy	Interwencja dietetyczna	Źródło związków bioaktywnych	Efekty	Odniesienia
STRONT	9 196 kobiet w wieku średnio 74 lata Badania były randomizowane, podwójnie zaślepione, kontrolowane, placebo	500 lub 1000 mg Ca 400-800 IU witaminy D	Suplementacja kontynuowana przez 2-24 tygodni	Wyrównanie niedoborów	(Czerwiński i Bieda, 2005)
	1649 kobiet w wieku powyżej 50 lat z co najmniej jednym złamanym kręgiem Badania były randomizowane, podwójnie zaślepione, kontrolowane, placebo	500 lub 1000 mg Ca 400-800 IU witaminy D 2 g strontu (SR) placebo	Suplementacja Raz dziennie wieczorem przez 3 lata	Po 1 roku - spadek częstości złamań kręgosłupa w grupie SR o 49 % w porównaniu do grupy placebo Po 3 latach spadek częstości złamań o 41 % Wzrost gęstości mineralnej kości o 6,7 % w grupie SR, w grupie placebo nastąpił spadek o 1,3 %	(Czerwiński i Bieda, 2005)
	5091 kobiet w wieku powyżej 70 lat z obecnością co najmniej jednego czynnika ryzyka złamania Badania były randomizowane, podwójnie zaślepione, kontrolowane, placebo	500 lub 1000 mg Ca 400-800 IU witaminy D 2 g strontu (SR) placebo	Suplementacja raz dziennie wieczorem przez 3 lata	W grupie SR nastąpił spadek częstości złamań o 33 % w porównaniu z grupą placebo Wzrost poziomu kostnej fosfatazy alkalicznej	(Czerwiński Bieda, 2005)

6. Podsumowanie

Skorupy jaj są naturalnym źródłem wapnia w postaci węglanu wapnia, a oprócz tego zawierają związki magnezu i fosforu oraz związki organiczne, takie jak glikoproteiny i proteoglikany. W porównaniu z innymi naturalnymi źródłami węglanu wapnia, skorupy jaj charakteryzują się wyższą zawartością strontu i selenu, a niższą fluoru czy niekorzystnych z żywieniowego punktu widzenia metali ciężkich takich jak ołów, kadm, chrom oraz glin. Ze względu na atrakcyjne właściwości skorupy jaj, suplementy i produkty spożywcze wzbogacone w ten produkt uboczny mogą stanowić dobre źródło biodostępnego wapnia oraz innych makro- i mikrośladników i być przydatne w bilansowaniu diety. Ich szersze zastosowanie w produktach tj. pieczywo, produkty ciastkarskie, jogurty, napoje czy suplementy, pozwoliłoby zagospodarować ten surowiec klasyfikowany jako odpad, ograniczyć

zanieczyszczenie środowiska i zapewnić dostęp do wapnia o wysokiej biodostępności. Obecnie największym wyzwaniem jest wytworzenie wapnia w formie, która byłaby niedroga, bezpieczna mikrobiologiczna oraz atrakcyjna dla konsumentów pod względem sensorycznym.

LITERATURA

1. Aditya, S., Stephen, J., Radhakrishnan, M. (2021). Utilization of eggshell waste in calcium-fortified foods and other industrial applications: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 115, 422-432. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.06.047>
2. Ahmed, A. M. H., Rodriguez-Navarro, A. B., Vidal, M. L., Gautron, J., García-Ruiz, J. M., Nys, Y. (2005). Changes in eggshell mechanical properties, crystallographic texture and in matrix proteins induced by moult in hens. *British Poultry Science*, 46(3), 268-279. <https://doi.org/10.1080/00071660500065425>
3. Balaz, M. (2018). Ball milling of eggshell waste as a green and sustainable approach: A review. *Advances in Colloid and Interface Science*, 256, 256-275. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2018.04.001>
4. Czerwiński, E., Bieda, T. (2005). Ranelinian strontu-Nowa opcja leczenia osteoporozy. *Terapia*, 2(2), 49-50.
5. El-Shibiny, S., El-Gawad, M. A. E.-K. M. A., Assem, F. M., El-Sayed, S. M. (2018). The use of nano-sized eggshell powder for calcium fortification of cow's and buffalo's milk yogurts. *Acta Scientiarum Polonorum. Technologia Alimentaria*, 17(1), 37-49. <https://doi.org/10.17306/J.AFS.0541>
6. GUS. (2021). *Zwierzęta gospodarskie w 2021 roku*. stat.gov.pl. <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/rolnictwo-lesnictwo/produkcja-zwierze-cia-zwierze-cia-gospodarskie/zwierze-cia-gospodarskie-w-2021-roku,6,22.html>
7. Hassan, T. A., Rangari, V. K., Rana, R. K., Jeelani, S. (2013). Sonochemical effect on size reduction of CaCO₃ nanoparticles derived from waste eggshells. *Ultrasonics Sonochemistry*, 20(5), 1308-1315. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2013.01.016>
8. Hincke, M. T., Wellman-Labadie, O., McKee, M. D., Gautron, J., Nys, Y., Mann, K. (2008). Biosynthesis and structural assembly of eggshell components. *Egg bioscience and biotechnology*, 97-128.
9. Kobus-Cisowska, J., Szymanowska-Powałowska, D., Szymandera-Buszka, K., Rezler, R., Jarzębski, M., Szczepaniak, O., Marciniak, G., Jędrusek-Golińska, A., Kobus-Moryson, M. (2020). Effect of fortification with calcium from eggshells on bioavailability, quality, and rheological characteristics of traditional Polish bread spread. *Journal of Dairy Science*, 103(8), 6918-6929. <https://doi.org/10.3168/jds.2019-18027>
10. Kopacz, M., Drazbo, A. (2018). Zmiany jakości jaj konsumpcyjnych w zależności od sposobu i czasu przechowywania. *Roczniki Naukowe Polskiego Towarzystwa Zootechnicznego*, 14(3). <http://agro.icm.edu.pl/agro/element/bwmeta1.element.agro-e328e0c0-6557-40e7-ac61-786670c67e24>
11. Łukaszewicz, E. (2008). *Choroby drobiu oraz ptaków ozdobnych*. Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu.

12. Masuda, Y., Hiramatsu, H. (2008). Bioavailability and physiological function of eggshells and eggshell membranes. *Egg bioscience and biotechnology*, 129-140.
13. Mine, Y. (2008). *Egg bioscience and biotechnology*. John Wiley & Sons.
14. Nakano, T., Ikawa, N., Ozimek, L. (2003). Chemical composition of chicken eggshell and shell membranes. *Poultry Science*, 82(3), 510-514. <https://doi.org/10.1093/ps/82.3.510>
15. Nowaczewski, S., Babuszkiewicz, M., Szablewski, T., Stuper-Szablewska, K., Cegielska-Radziejewska, R., Tomczyk, Ł., Kaczmarek, S., Sechman, A., Lis, M. W., Kwaśniewska, M., Racewicz, P., Jarosz, Ł., Ciszewski, A., Nowak, T., Hejdsz, M. (2022). Effect of weight and storage time of broiler breeders' eggs on morphology and biochemical features of eggs, embryogenesis, hatchability, and chick quality. *Animal*, 16(7), 100564. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2022.100564>
16. Oliveira, D. A., Benelli, P., Amante, E. R. (2013). A literature review on adding value to solid residues: Egg shells. *Journal of Cleaner Production*, 46, 42-47. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.09.045>
17. Pluta, K., Malina, D., Sobczak-Kupiec, A. (2017). Skorupy jaj kurzych jako surowiec do produkcji fosforanów wapnia. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich, nr I/2*. <https://doi.org/10.14597/infraeco.2017.1.2.026>
18. Rodriguez-Navarro, A., Kalin, O., Nys, Y., Garcia-Ruiz, J. M. (2002). Influence of the microstructure on the shell strength of eggs laid by hens of different ages. *British Poultry Science*, 43(3), 395-403. <https://doi.org/10.1080/00071660120103675>
19. Salwa, A., Othman, M., Babji, A. (2011). Variation in Trace Elements Levels among Chicken, Quail, Guinea Fowl and Pigeon Eggshell and Egg Content. *Research Journal of Environmental Toxicology*, 5, 301-308. <https://doi.org/10.3923/rjet.2011.301.308>
20. Schaafsma, A., Pakan, I., Hofstede, G. J., Muskiet, F. A., Van Der Veer, E., De Vries, P. J. (2000). Mineral, amino acid, and hormonal composition of chicken eggshell powder and the evaluation of its use in human nutrition. *Poultry Science*, 79(12), 1833-1838. <https://doi.org/10.1093/ps/79.12.1833>
21. Szablewski, T., Cegielska-Radziejewska, R., Kaczmarek, A., Kijowski, J. (2012). Competition effects of microorganisms on shell surface of table eggs. *ŻYWNOSĆ. Nauka. Technologia. Jakość*, 19(2), 119-130.
22. Szablewski, T., Gornowicz, E., Stuper-Szablewska, K., Kaczmarek, A., Cegielska-Radziejewska, R. (2013). Skład mineralny treści jaj kur ras zachowawczych z chowu ekologicznego. *ŻYWNOSĆ. Nauka. Technologia. Jakość*, nr 5 (90), 42-51.
23. Szeleszczuk, Ł. (2013). Skorupa jaja kurzego – niedoceniane źródło wapnia. *Lek w Polsce*.
24. Świętkiewicz, S., Arczewska-Włosek, A., Krawczyk, J., Puchała, M., Józefiak, D. (2015). Dietary factors improving eggshell quality: An updated review with special emphasis on microelements and feed additives. *World's Poultry Science Journal*, 71(1), 83-94. <https://doi.org/10.1017/S0043933915000082>
25. Tomczyk, Ł., Lewko, L., Konieczny, P., Cegielska-Radziejewska, R. (2018). An Assessment of the Influence of Silver Stabilized Hydrogen Peroxide on the Eggshell Condition. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 131-136. <https://doi.org/10.9755/ejfa.2018.v30.i2.1605>

26. Vandeginste, V. (2021). Food waste eggshell valorization through development of new composites: A review. *Sustainable Materials and Technologies*, 29, e00317. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2021.e00317>
27. Zdrojewicz, Z., Herman, M., Starostecka, E. (2016). Hen's egg as a source of valuable biologically active substances. *Postępy Higieny i Medycyny Doświadczalnej*, 70, 751-759. <https://doi.org/10.5604/17322693.1208892>
28. Zhang, Y. N., Wang, J., Zhang, H. J., Wu, S. G., Qi, G. H. (2017). Effect of dietary supplementation of organic or inorganic manganese on eggshell quality, ultrastructure, and components in laying hens. *Poultry Science*, 96(7), 2184-2193. <https://doi.org/10.3382/ps/pew495>
29. Zhang, Y. N., Zhang, H. J., Wu, S. G., Wang, J., Qi, G. H. (2017). Dietary manganese supplementation modulated mechanical and ultrastructural changes during eggshell formation in laying hens. *Poultry Science*, 96(8), 2699-2707. <https://doi.org/10.3382/ps/pex042>