

[9] Moore M. C., Smith M. S., Sinha V. P., Beals J. M., Michael M. D., Jacober S. J., Cherrington A. D., 2014, Novel PEGylated Basal Insulin LY2605541 Has a Preferential Hepatic Effect on Glucose Metabolism, *Diabetes*, 63(2), 494–504.

[10] Wronkowitz N., Hartmann T., Görgens S. W., Dietze-Schroeder D., Indrakusuma I., Choi I. Y., Park S. H., Lee Y., Kwon S. C., Kang Y., Hompesch M., Eckel J., 2017, LAPS Insulin115 : A novel ultra-long-acting basal insulin with a unique action profile, *Diabetes, Obesity and Metabolism*, 19(12), 1722–1731.

[11] Faust C., Ochs C., Korn M., Werner U., Jung J., Dittrich W., Schiebler W., Schauder R., Rao E., Langer T., 2020, Production of a novel heterodimeric two-chain insulin-Fc fusion protein, *Protein Engineering, Design and Selection*, 14(33), article gzaa026.

[12] Hansen B. F., Kurtzhals P., Jensen A. B., Dejgaard A., Russell-Jones D., 2011, Insulin X10 revisited: a super-mitogenic insulin analogue, *Diabetologia*, 54(9), 2226–2231.

[13] Baghban Taraghdari Z., Imani R., Mohabatpour F., 2019, A Review on Bioengineering Approaches to Insulin Delivery: A Pharmaceutical and Engineering Perspective, *Macromolecular Bioscience* 19(4), article 1800458.

[14] Wang J., Yu J., Zhang Y., Kahkoska A. R., Wang Z., Fang J., Whitelegge J. P., Li S., Buse J. B., Gu Z., 2019, Glucose transporter inhibitor-conjugated insulin mitigates hypoglycemia, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(22), 10744–10748.

[15] Chen Y.-S., Gleaton J., Yang Y., Dhayalan B., Phillips N. B., Liu Y., Broadwater L., Jarosinski M. A., Chatterjee D., Lawrence M. C., Hattier T., Michael M. D., Weiss M. A., 2021, Insertion of a synthetic switch into insulin provides metabolite-dependent regulation of hormone–receptor activation, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(30), article e2103518118.

Patrycja Schab

e-mail: patrycja.schab@dokt.p.lodz.pl

Institut Chemii Ogólnej i Ekologicznej, Wydział Chemiczny, Politechnika Łódzka

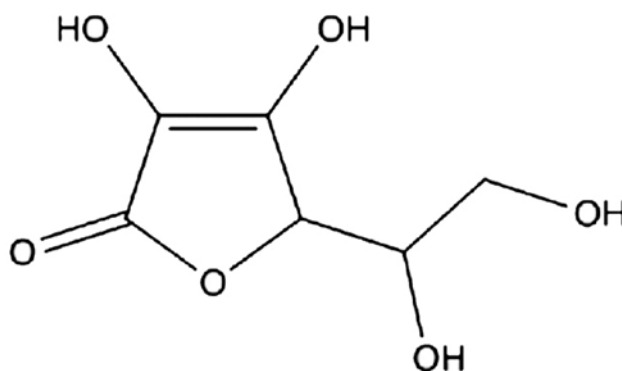
Witamina C – najpopularniejsza i nadal odkrywana witamina

Witamina C – ogólna charakterystyka i właściwości

Zwycięzca Nagrody Nobla Szent-Györyi po raz pierwszy wyizolował witaminę C w 1928 roku [1]. Z uwagi na fakt, że jej niedobór wywoływał skorbut (scorbutus), witaminę C nazwano kwasem askorbinowym [2]. Po niespełna stu latach od tego osiągnięcia substancja ta stanowi nadal obiekt badań naukowców na całym świecie. Jest także jedną z najbardziej popularnych witamin. W literaturze można znaleźć informacje, że również nadal wyróżnia się jako najmniej zrozumiana spośród związków z tej grupy. Ma wielokierunkowe działanie na organizm człowieka. Jednakże ten związek jest szczególnie popularny ze względu na swoje antyoksydacyjne właściwości [3].

Witamina C to pochodna sacharydów. Kwas L-askorbinowy ma wzór sumaryczny $C_5H_8O_6$. Jest to γ -lakton kwasu 2,3-dehydro-L-gulonowego. Występuje w postaci białej, krystalicznej substancji bez zapachu, o kwaśnym smaku. Ma masę cząsteczkową wynoszącą 176,13 g/mol. Posiada kwasowy charakter, wynikający z występowania w cząsteczce ugrupowania endiolowego, a szczególnie dzięki łatwości dysocjacji protonu grupy hydroksylowej przy C-3. [4]. pK_{a1}

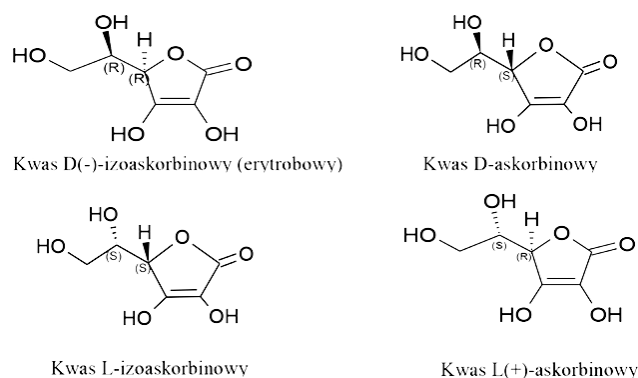
jest równe 4,17, a pK_{a2} – 11,57. Temperatura topnienia wynosi 190–192°C, a gęstość związku 1,65g/cm³. Witamina C jest substancją dobrze rozpuszczalną w wodzie (hydrofilowa cząsteczka) oraz praktycznie nierozpuszczalną w rozpuszczalnikach niepolarnych takich jak eter, chloroform czy benzen [5]. Strukturę związku stabilizuje pięciocłonowy pierścień γ -laktonowy, który znajduje się w centrum cząsteczki. Jego rozerwanie powoduje osydatywny rozpad kwasu L-askorbinowego z utworzeniem kwasu szczawioowego i L-treonowego [4].



Rys. 1. Struktura chemiczna kwasu askorbinowego [6]

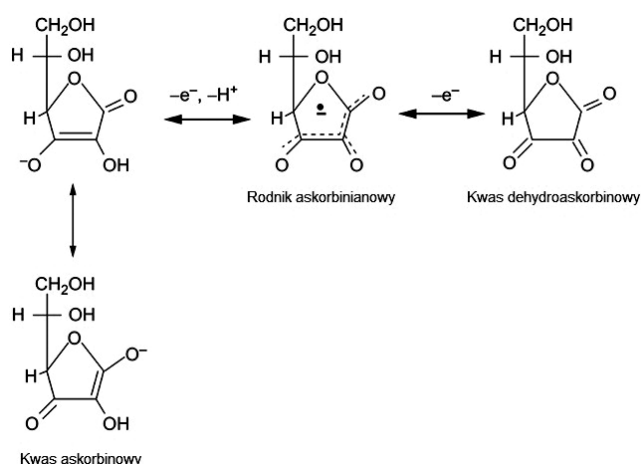


W projektowaniu leków chiralność odgrywa ważną rolę, ponieważ cząsteczki chiralne posiadają dwie formy enancjomeryczne o takich samych właściwościach chemicznych, ale różnych biologicznych. Różnice w aktywności na ludzki organizm wynikają z faktu, że systemy biologiczne także są chiralne [7, 8]. W cząsteczce kwasu askorbinowego występują dwa atomy węgla, które tworzą centra chiralności. Z tego względu teoretycznie mogą występować cztery izomery tego związku: kwas L-askorbinowy, kwas D-askorbinowy, kwas L-izoaskorbinowy oraz kwas D-izoaskorbinowy (rys. 2) [9]. W organizmach żywych tylko naturalnie występujący kwas L-askorbinowy jest bioaktywny [10]. Biorąc pod uwagę aktywność optyczną, witamina C skręca płaszczyznę światła spolaryzowanego w prawo, czyli stanowi kwas L(+)-askorbinowy [9].



Rys. 2. Stereoizomery kwasu askorbinowego [9]

Kwas askorbinowy charakteryzuje się silnymi właściwościami redukującymi, które są spowodowane występowaniem ugrupowania endiolowego, łatwo oddającego po dwa protony i elektrony. Przy fizjologicznym pH wynoszącym 7,4 witamina C występuje w postaci anionu kwasu askorbinowego. Utrata elektronu prowadzi do utworzenia rodnika kwasu askorbinowego, który ma relatywnie długi okres półtrwania (wielu sekund do minut). Strata kolejnego elektronu sprawia, że powstaje utleniona forma witaminy C, kwas dehydroaskorbinowy. Poprzez enzymatyczne lub redukcyjne szlaki metaboliczne witamina C wraca do postaci zredukowanej. Zarówno forma utleniona jak i zredukowana są czynne biologicznie i mają taką samą aktywność witaminową. Mają odrębne drogi wnikania do komórek. Kwas askorbinowy wykorzystuje transportery błonowe zależne od sodu, a kwas dehydroaskorbinowy wykorzystuje środki ułatwiające transportery glukozy. To sprawia, że witamina C jest ważnym przeciwutleniaczem [4]. Na rys. 3. przedstawiono formy kwasu askorbinowego [11].



Rys. 3. Formy kwasu askorbinowego [11]

Gatunki zwierząt posiadające w wątrobie enzym oksydazy L-gulono- γ -laktonowej wykazują zdolność do syntezy w organizmie kwasu L-askorbinowego. Powstaje on z D-glukozy. Wyjątek stanowią m.in. małpy, świniki morskie, nietoperze owocożerne, pstrągi, łososie, a także niektóre rasy psów (np. dalmatyńczyk). Biosynteza tego związku jest także możliwa wśród roślin dzięki występowaniu dehydrogenazy galaktono-laktonowej. Kwas L-askorbinowy może powstać z D-glukozy lub D-galaktozy. W organizmie człowieka występuje defekt genu kodującego osydazę L-gulono-laktonu – ostatniego enzymu ze szlaku syntezy witaminy C. To powoduje brak możliwości syntezy tego związku. Z tego względu należy ją dostarczać z pożywieniem [4].

W przemyśle kwas L(+)-askorbinowy jest wytwarzany z D-glukozy metodą Reichsteina. Proces ten ma kilka etapów chemicznych i biotechnologicznych. Następuje katalityczne uwodornienie D-glukozy do D-sorbitolu. Reakcja zachodzi w wysokiej temperaturze i pod wysokim ciśnieniem, z wykorzystaniem niklu jako katalizatora. Następnie zachodzi biokonwersja do L-sorbozy z wykorzystaniem bakterii szczepu *Gluconobacter oxydans* przy pH 4-6 i temperaturze 30°C. Kolejnym etapem jest utlenienie L-sorbozy do kwasu 2-keto-L-gulonowego. Zostaje on przekształcany w kwas L-askorbinowy podczas laktonizacji. Otrzymuje się stały związek o czystości frakcji masowej w zakresie 96-98%. Ten wynik jest osiągnięty poprzez kilka etapów rekryształizacji z wody [12].

Funkcje witaminy C

Na przestrzeni lat naukowcy na całym świecie próbują poznać możliwe zastosowania witaminy C w zapobieganiu lub leczeniu chorób. Wiadomo, że jest ona donorem elektronów i kofaktorem dla piętnastu enzymów ssaków. Będąc reduktorem dostarcza elektrony do reakcji zachodzących

spontanicznie oraz katalizowanych enzymatycznie. Może tworzyć układy oksydacyjno-redukcyjne z glutationem, witaminą E oraz flawonoidami. Kwas askorbinowy, będąc kofaktorem beta-hydroksylazy dopaminowej, bierze udział w syntezie adrenaliny. Witamina C jest niezbędna do syntezy kolagenu. Pełni funkcję kofaktora hydroksylazy prolinowej i hydroksylazy lizynowej, które są odpowiedzialne pośrednio za tworzenie wiązań poprzecznych między włóknami tropokolagenu. Z tego względu witamina C pomaga w utrzymaniu zdrowej tkanki łącznej, której składnikiem jest kolagen. Ułatwia gojenie się ran i złamań. Badania wskazują, że wstępne leczenie witaminą C przyspiesza regenerację ran i minimalizuje powstawanie blizn [9, 13, 14]. W badaniu na hodowlach komórkowych wykazano, że kwas askorbinowy może hamować aktywność osteoklastów czyli komórek niszczących tkankę kostną, a także stymulować dojrzewanie osteoblastów [15]. Wyniki prac badawczych potwierdzają, że keratynocyty skóry mają zdolność gromadzenia wysokich stężeń witaminy C i to w połączeniu z witaminą E zapewnia ochronę przed promieniowaniem UV. Ponadto oznaki starzenia się ludzkiej skóry można złagodzić poprzez dostarczanie witaminy C [16]. Witamina C ma duży wpływ na prawidłowe funkcjonowanie układu sercowo-naczyniowego. Może zapobiegać peroksydacji lipoprotein o niskiej gęstości przez reaktywne formy tlenu. To zmniejsza ryzyko powstawania miażdżycowych zmian naczyniowych, które mogą prowadzić do uszkodzenia tętnic. Ponadto ma wpływ na zapobieganie niektórym rodzajom krwotoku śródmózgowego, ponieważ chroni ściany naczyń wraz z kontrolą ciśnienia krwi [17]. Witamina C zwiększa dostępność oraz wchłanianie żelaza pochodzącego ze źródeł żelaza niehemowego. Jest to możliwe poprzez redukcję żelaza Fe^{3+} do Fe^{2+} w jednoelektrodowej reakcji, samemu przekształcając się w kwas monodehydroaskorbinowy, ponieważ żelazo jest absorbowane w dwunastnicy w postaci zredukowanej. Ma to duży wpływ w przypadku osób niespożywających pokarmu pochodzenia zwierzęcego. Potwierdzono, że suplementacja witaminą C zwiększa biodostępność żelaza ze zbóż i roślin strączkowych [4, 18]. Uzupełnianie braków witaminy C może wspomagać w leczeniu niepłodności, ponieważ w przypadku mężczyzn możliwa jest poprawa jakości nasienia. U kobiet z defektem fazy lutealnej zwiększa poziom progesteronu [19, 20]. Niektóre badania wskazują na korzystne działanie witaminy C w profilaktyce przeciwnowotworowej oraz w leczeniu różnych typów raka. Naukowcy zauważyli, że niektóre typy komórek nowotworowych albo nie rosną przy zwiększonym stężeniu witaminy C lub guz się kurczy pod wpływem dużej ilości tej substancji [21, 22]. Inne badania wskazują, że przyjmowanie kwasu askorbinowego

utrudnia przerzuty i wzrost guza [23, 24]. Możliwe, że podawanie witaminy C w dużych dawkach poprawia stan zdrowia i jakość życia pacjentów nawet w zaawansowanym stadium choroby [25]. Przeprowadzono badania, w których okazało się, że u osób mających w osoczu stężenie witaminy C powyżej 51 $\mu\text{mol/l}$ ryzyko występowania raka żołądka było o 45% niższe w porównaniu do osób ze stężeniami poniżej 29 $\mu\text{mol/l}$. U mężczyzn ze stężeniem witaminy C w surowicy poniżej 28 $\mu\text{mol/l}$ po 12–16 latach obserwacji ryzyko zgonu z powodu nowotworu było o 62% wyższe niż u mężczyzn powyżej 73,8 $\mu\text{mol/l}$ [11]. Badano także wpływ tej substancji na układ odpornościowy organizmu. Witamina C reguluje jego działanie poprzez wpływ na aktywność fagocytów i limfocytów oraz na produkcję cytokin. Podczas infekcji czy stresu stężenie witaminy C gwałtownie spada. Wykazano, że przyjmowanie kwasu askorbinowego wspomaga układ odpornościowy i działa korzystnie w różnych stanach zapalnych [9, 26, 27]. Z prac badawczych można wnioskować, że ta substancja chroni przed równoczesnym narażeniem na metale ciężkie i promieniowanie [28]. Owoce zawierające duże ilości witaminy C mogą chronić przed hepatotoksycznością indukowaną metalami [29, 30]. Praca badawcza El-Sokkary i współpracowników wskazuje, że suplementacja witaminą C miała ochronną rolę dla płuc i mózgu szczurów narażonych na zwiększoną ekspozycję na kadm [31]. Oceniono także rolę witaminy C w zapobieganiu chorobom oczu. Wykazano, że połączenie askorbinianu z innymi przeciwutleniającymi witaminami i minerałami spowalnia postęp zaawansowanego zwyrodnienia plamki związaneego z wiekiem i utraty ostrości wzroku u osób z objawami tej choroby [32]. Witamina C razem z witaminą E ma działanie neuroprotektoryjne, więc minimalizuje ryzyko zapadnięcia na Alzheimera [33]. Potwierdzono, że u pacjentów w stanie krytycznym stężenie witaminy C w osoczu i leukocytach jest często poniżej normy. Podczas sepsy zwiększa się produkcja reaktywnych form tlenu i nadtlenoazotynów, które utleniają białka i lipidy. Ustalono, że podanie witaminy C pacjentom z sepsą wpływa na ich szybszy powrót do zdrowia [32]. Korzystne działanie witaminy C na organizm jest powiązane przede wszystkim z jej właściwościami antyoksydacyjnymi. Chroni ona makrocząsteczki biologiczne przed niebezpiecznym utlenianiem. Uniemożliwia powstawanie wolnych rodników, np. poprzez reakcje z reaktywnymi formami tlenu. Kwas askorbinowy ulegając deprotonacji tworzy anion askorbinowy, który utlenia się i tworzy rodnik – monodehydroaskorbinian. Jest to struktura korzystna energetycznie. Rodnik ten z reaguje z niebezpiecznymi wolnymi rodnikami, zapobiegając ich utlenianiu [34].



Źródła witaminy C

W porównaniu do innych witamin, zawartość witaminy C w produktach spożywczych jest relatywnie wysoka – zwykle 10-100 mg/100g. Stosunkowo duża zawartość tej substancji jest najprawdopodobniej spowodowana faktem, że powstaje ona z cukrów, które są powszechnymi związkami w organizmach [35]. Największą zawartością witaminy C charakteryzuje się śliwka kakadu z Australii, camu-camu i acerola z Ameryki Południowej. W Europie i Azji najbogatszym źródłem tej substancji jest dzika róża i rokitnik. Ponadto czarna porzeczka, kiwi i truskawka cechują się jej wysoką zawartością, o wiele wyższą niż w popularnych cytrusach. W przypadku warzyw dobrym źródłem kwasu askorbinowego są brokuły, jarmuż czy papryka. Ilość witaminy C w kiszzonej kapuście jest bardzo wysoka. Ziemniaki nie zawierają jej dużo, jednak zwykle są często spożywane i w krajach europejskich stanowią średnio 8% całkowitego dziennego spożycia witaminy C. Ilość kwasu askorbinowego w przypadku obróbki termicznej produktów, w którym jest zawarty, gwałtownie spada (szczególnie podczas długoterminowego gotowania w dużej objętości wody). Ta substancja zostaje wypłukiwana z pożywienia. Najkorzystniejszym sposobem na przechowywanie owoców i warzyw bez utraty witaminy C jest ich zamrożenie. W Tabeli 1 przedstawiono źródła witaminy C wraz z jej zawartością [36, 37].

Tabela 1. Źródła witaminy C wraz z jej zawartością [36]

Źródło witaminy C	Zawartość witaminy C [mg/100 g _{świeżej masy}]
camu-camu	850-5000
acerola	820-4023
kiwi	60-78
truskawka	65
pomarańcza	41-58
cytryna	31
brokuły	25-130
jarmuż	51-120
papryka	107-154
ziemniak	8-30
kiszona kapusta	103-277

Zalecane spożycie witaminy C

Zalecane spożycie witaminy C średnia dawka, która jest wystarczająca do zaspokojenia tej substancji prawie wszystkich (97-98%) zdrowych osób. Na jego wartość ma wpływ wiek osób i płeć. Kobiety w okresie ciąży i laktacji mają zwiększone zapotrzebowanie na witaminę C. Ponadto

palacze średnio potrzebują o 35 mg dziennie więcej tego składnika w porównaniu do osób niepalących. W Tabeli 2 zawarto zalecane dzienne spożycie witaminy C z uwzględnieniem wieku i płci. W przypadku niemowląt od urodzenia do 12 miesiąca życia ustalono odpowiednie spożycie witaminy C, która odpowiada średniemu spożyciu witaminy C u zdrowych niemowląt karmionych piersią. Wartość odpowiedniego spożycia zakłada, że przyjmowanie substancji w takiej dawce zapewnia odpowiednią wartość odżywczą. Jest ona ustalana w sytuacji, gdy liczba zbadanych przypadków jest niewystarczająca do opracowania wartości zalecanego dziennego spożycia. Niemowlęta do szóstego miesiąca życia powinny przyjmować 40 mg witaminy C dziennie. Odpowiednie spożycie między siódmym a 12 miesiącem powinno wynosić 50 mg każdego dnia. Wartości te są takie same dla obu płci [38].

Tabela 2. Zalecane dzienne spożycie witaminy C w zależności od wieku i płci [38]

Wiek [lata]	Zalecane dzienne spożycie witaminy C [mg]	
	Mężczyźni	Kobiety
1-3	15	15
4-8	25	25
9-13	45	45
14-18	75	65
>19	90	75

Wchłanianie witaminy C

Witamina C jest wchłaniana z pożywienia w jelitach. W zależności od dawki może być absorbowana od 70 do 95%. W przypadku dużej zawartości cukrów wartość ta się zmniejsza. Stężenie kwasu askorbinowego w osoczu nie jest stałe, ponieważ na jego wartość mają wpływ różne czynniki, m.in. dostarczane pożywienie. Jednak osiąga poziom ok. 1,5 mg/dl. Witamina C jest gromadzona w m.in. limfocytach, mózgu, tarczycy, śledzionie, płucach, wątrobie. Jej zawartość w nadnerczach, przysadce mózgowej, grasicy, ciałku żółtym i siatkówce jest nawet stukrotnie wyższa niż w osoczu. Kotransportery sodowo-askorbinowe dostarczają witaminę C do komórek w formie zredukowanej na drodze transportu aktywnego. Transportery glukozowe przenoszą zaś jej formę utlenioną. Jest ona szybko konwertowana w komórkach do kwasu askorbinowego. Organizm wydalą witaminę C wraz z moczem w formie utlenionej [9, 39].

Skutki niedoboru i nadmiaru witaminy C

Niedobór i nadmiar witaminy C w organizmie człowieka zaburza prawidłowe funkcjonowanie organizmu oraz może mieć poważne konsekwencje dla zdrowia i życia. Skorbut jest wywołany w wyniku ostrego niedoboru witaminy C, a nieleczony może być śmiertelny. Początkowe objawy niedoboru zwykle to zmęczenie, złe samopoczucie oraz zapalenie dziąseł. Dalszy niedobór tej substancji ujawnia się poprzez wybroczyny, bóle stawów czy słabe gojenie się ran. Jest to związane z zaburzeniem syntezy kolagenu. Może występować depresja, opuchnięte i krwawiące dziąsła, a nawet utrata zębów z powodu kruchości tkanek i naczyń włosowatych. Zmniejszone wchłanianie żelaza niehemowego w wyniku zbyt małego spożycia witaminy C powoduje anemię [40]. Spożycie witaminy C musi spaść poniżej ok. 10 mg/dobę przez wiele tygodni, aby doprowadzić do gnilca [41]. Występują jednak grupy osób szczególnie narażone na niedobór witaminy C. Należą do nich: palacze i bierni „palacze”; niemowlęta karmione krowim mlekiem, szczególnie gotowanym; osoby nadużywające alkoholu lub narkotyków; osoby z chorobami psychicznymi oraz niektóre osoby starsze lub ubogie, które przygotowują sobie jedzenie o ograniczonej różnorodności. Ponadto pacjenci z zaburzeniami wchłaniania jelitowego oraz z niektórymi chorobami przewlekłymi (np. nowotwory czy niewydolność nerek) są zagrożeni deficytem tej substancji [38].

Witamina C charakteryzuje się niską toksycznością. Nie zaobserwowano poważnych skutków ubocznych przy zażyciu dużych jej ilości. Przeważnie nadmiar jest wydalany z organizmu wraz z moczem. Nadmiar tej substancji może powodować czasami takie dolegliwości jak: biegunka, nudności, skurcze brzucha i inne zaburzenia żołądkowo-jelitowe. Nadmierne jej spożycie może zwiększyć wydalanie szczawianu i kwasu moczowego z moczem, a to może spowodować wystąpienie kamieni nerkowych. Jest to szczególnie prawdopodobne w przypadku osób z zaburzeniami czynności nerek [41]. Wysokie dawki witaminy C u osób chorych na anemię sierpowatą mogą wywołać ostry kryzys komórek sierpowatych [4].

Wnioski

Witamina C jest niezbędna do prawidłowego funkcjonowania organizmu. Choć została odkryta dawno temu, nadal stanowi obiekt zainteresowania naukowców. Charakterystyczna budowa związku sprawia, że posiada on duże właściwości antyoksydacyjne. Ma to wpływ na zapobieganie różnym chorobom. Jednak potrzebnych jest wiele badań, aby w pełni zrozumieć działanie witaminy C na organizm. Możliwe jest również używanie witaminy C w tworzeniu

związków koordynacyjnych. Będzie to opisane w drugiej części artykułu.

Literatura

- [1] Szent-Gyorgyi A., 1928, Observations on the function of peroxidase systems and the chemistry of the adrenal cortex: Description of a new carbohydrate derivative, *Biochemical Journal*, 6, 1387-1409.
- [2] Maćkowiak K., Torliński L., 2007, Współczesne poglądy na rolę witaminy C w fizjologii i patologii człowieka, *Nowiny Lekarskie*, 4, 349-356.
- [3] Zumreoglu-Karan B., 2006, The coordination chemistry of Vitamin C: An overview, *Coordination Chemistry Reviews*, 250, 2295 – 2307.
- [4] Janda K., Kasprzak M., Wolska J., 2015, Vitamin C – structure, properties, occurrence and functions, *Pomeranian Journal of Life Sciences*, 4, 419-425.
- [5] O'Neil M. J., *The Merck Index – An Encyclopedia of Chemicals, Drugs, and Biologicals*, Royal Society of Chemistry, Londyn, 2013.
- [6] Jovic T. H., Ali S.R., Ibrahim N., Jessop Z. M., Tarassoli S. P., Dobbs T. D., Holford P., Thornton C. A., Whitaker I.S, 2020, Could Vitamins Help in the Fight Against COVID-19?, *Nutrients*, 9, 2550.
- [7] Brooks W. H., Guida W. C., Daniel K. G., 2011, The significance of chirality in drug design and development, *Current Topics in Medicinal Chemistry*, 11, 760.
- [8] Pandey I.; Jha S. S., 2015 Molecularly imprinted polyaniline-ferrocene-sulfonic acid-Carbon dots modified pencil graphite electrodes for chiral selective sensing of D-Ascorbic acid and L-Ascorbic acid: A clinical biomarker for preeclampsia, *Electrochimica Acta*, 182, 917-928.
- [9] Kalemba-Drożdż M., 2018 Witamina C w leczeniu nowotworów i profilaktyce chorób niezakaźnych, *Państwo i Społeczeństwo*, 28, 91-104.
- [10] Leffingwell J. C., 2003, Chirality & Bioactivity I.: Pharmacology, *Leffingwell Reports*, 3, 1-27.
- [11] Granger M., Eck P., 2018, Dietary Vitamin C in Human Health, *Advances in Food and Nutrition Research*, 83, 281-310.
- [12] Duliński R., 2010, Biotechnologiczne metody produkcji witamin z wykorzystaniem mikroorganizmów, *Żywność. Nauka. Technologia. Jakość*, 68, 5-19.
- [13] Padayatty S. J., Levine M., 2016, Vitamin C: the known, the unknown, and Goldilocks, *Oral Diseases*, 6, 463-493.
- [14] Jagetia G. C., Rajanikant G. K., Mallikarjun R., 2007, Ascorbic acid increases healing of excision wounds of mice whole body exposed to different doses of c-radiation, *Burns*, 2007, 33, 484-494.
- [15] Ratajczak A., Szymczak-Tomczak A., Skrzypczak-Zielińska M., Rychter A., Zawada A., Dobrowolska A., Krela-Kaźmierczak I., 2020, Vitamin C Deficiency and the Risk of Osteoporosis in Patients with an Inflammatory Bowel Disease, *Nutrients*, 12, 2263.
- [16] Pullar J., Carr A., Vissers M., 2017, The Roles of Vitamin C in Skin Health, *Nutrients*, 9, 866.
- [17] Khonsary S. A., Vitamin C in human health and disease, 2021, *Surgical Neurology International*, 12, 142.
- [18] Zhang Y., Zhao D., Xu J., Xu C., Dong C., Liu Q., 2013, Effects of dietary factors on the pharmacokinetics of (58)Fe-labeled hemin after oral administration in normal rats and the iron-deficient rats, *Biological Trace Element Research*, 153, 243-250.



- [19] Verma A., Kanwar K. C., 1998, Human sperm motility and lipid peroxidation in different ascorbic acid concentrations: an invitro analysis, *Andrologia*, 30, 325-329.
- [20] Henmi h., Endo T., Kitaiima Y., 2002, Effects of ascorbic acid supplementation on serum progesterone levels in patients with a luteal phase defect, *Fertility and Sterility*, 80, 459-461.
- [21] Chen Q., Espey M.G., Krishna M.C., Mitchell J.B., Corpe C.P., Buettner G.R., 2005 Pharmacologic ascorbic acid concentrations selectively kill cancer cells: action as a pro-drug to deliver hydrogen peroxide to tissues, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 102, 13604–13609.
- [22] Cabanillas F., 2010, Vitamin C and cancer: what can we conclude—1, 609 patients and 33 years later? *Puerto Rico Health Sciences Journal*, 29, 215-217.
- [23] Cha J., Roomi M.W., Ivanov V., Kalinovsky T., Niedzwiecki A., Rath M., 2011, Ascorbate depletion increases growth and metastasis of melanoma cells in vitamin C deficient mice, *Experimental Oncology*, 33, 226-230.
- [24] Cha J., Roomi M.W., Ivanov V., Kalinovsky T., Niedzwiecki A., Rath M., 2013, Ascorbate supplementation inhibits growth and metastasis of B16FO melanoma and 4T1 breast cancer cells in vitamin C-deficient mice, *International Journal of Oncology*, 42, 55–64.
- [25] Yeom C. H., Jung G.C, Song K. J., 2007, Changes of terminal cancer patients' health-related quality of life after high dose vitamin C administration, *Journal of Korean Medical Science*, 22, 7-11.
- [26] Wintergerst E. S., Maggini S., Hornig D. H., 2006, Immune-enhancing role of vitamin C and zinc and effect on clinical conditions, *Annals of Nutrition and Metabolism*, 50, 85-94.
- [27] Chambial S., Dwivedi S., Shukla K., Kant J., Placheril J., Sharma P., 2013, Vitamin C in Disease Prevention and Cure: An Overview, *Indian Journal of Clinical Biochemistry*, 28, 314–328.
- [28] Gajawat S., Sancheti G., Goyal P.K, 2005, Vitamin C against concomitant exposure to heavy metal and radiation: a study on variations in hepatic cellular counts, *Asian Journal of Experimental Sciences*, 19, 53–58.
- [29] Singh S., Rana S.V., 2010, Ascorbic acid improves mitochondrial function in liver of arsenic-treated rat, *Toxicology and Industrial Health*, 26, 265-272.
- [30] Singh M. K., Dwivedi S., Yadav S. S, Sharma P., Khattri K., 2013, Arsenic-induced hepatic toxicity and its attenuation by fruit extract of *Embolica officinalis* (amla) in mice, *Indian Journal of Clinical Biochemistry*, 29, 29-37.
- [31] El-Sokkary G. H., Awadalla E. A., 2011, The protective role of vitamin C against cerebral and pulmonary damage induced by cadmium chloride in male adult albino rat, *The Open Neuroendocrinology Journal*, 4, 1–8.
- [32] Grosso G., Bei R., Mistretta A., Marventano S., Calabrese G., Masuelli L., Giganti M., Modesti A., Galvano F., Gazzolo D., 2013, Effects of vitamin C on health: a review of evidence. *Frontiers in Bioscience-Landmark*, 18(3), 1017-1029.
- [33] Colin R., Preedy M., Preedy V.R., *Diet and Nutrition in Dementia and Cognitive Decline*, Academic Press, Cambridge, 2015.
- [34] Njus D., Kelley P.M., Tu Y.J., Schlegel B.H., 2020, *Ascorbic Acid: The Chemistry Underlying Its Antioxidant Properties*, *Free Radical Biology and Medicine*, 159, 37-43.
- [35] Linster C.L., Schaftingen E., 2007, Vitamin C. Biosynthesis, recycling and degradation in mammals, *FEBS J.*, 274, 1-22.
- [36] Dosedel M., Jirkovsky E., Macakova K., Kujovska-Krcmova L., Javorska L., Pourova J., Mercolini L., Remiao F., Novakova L., Mladenka P., 2021, Vitamin C – Sources, Physiological Role, Kinetics, Deficiency, Use, Toxicity, and Determination, *Nutrients*, 13, 615.
- [37] EFSA Panel on Dietetic Products, Nutrition and Allergies. Scientific opinion on dietary reference values for vitamin C, 2013, *EFSA Journal*, 11, 3418.
- [38] National Institutes of Health, Vitamin C – Fact Sheet for Health Professional, <https://ods.od.nih.gov/factsheets/VitaminC-HealthProfessional>, 12.10.2023.
- [39] Corti A., Casini A.F., Pompella A., 2010, Cellular Pathways for Transport and Efflux of Ascorbate and Dehydroascorbate, *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 500, 107-115.
- [40] Weinstein M., Babyn P., Zlotkin S., 2001, An orange a day keeps the doctor away: scurvy in the year 2000, *Pediatrics*, 108, 55.
- [41] Institute of Medicine. Food and Nutrition Board, *Dietary Reference Intakes for Vitamin C, Vitamin E, Selenium, and Carotenoids*, National Academy Press, Washington 2000.

Aleksander Kucharek, Elżbieta Kuśmierek

e-mail: aleksander.kucharek@dokt.p.lodz.pl; elzbieta.kusmierek@p.lodz.pl

Instytut Chemii Ogólnej i Ekologicznej, Wydział Chemiczny, Politechnika Łódzka

Zielone inhibitory korozji

Wprowadzenie

Korozja jest zjawiskiem, z którym spotykamy się praktycznie codziennie. Powoduje ona niszczenie wielu materiałów, a wynikiem tego są niebagatelne sumy pieniędzy wydawane na usuwanie skutków tego procesu. Szacuje się, że w Stanach Zjednoczonych bezpośrednie koszty korozji w 1998 roku wyniosły 275 miliardów dolarów, co odpowiada 3,1% PKB [1].

Jedną z metod ochrony przed tym zjawiskiem jest stosowanie inhibitorów korozji. Powszechnie stosowane inhibitory korozji są substancjami, które często wykazują negatywny wpływ nie tylko na środowisko, ale także na zdrowie człowieka. Przykładem takiego związku chemicznego może być benzotriazol [2], którego strukturę chemiczną przedstawiono na Rys. 1.

