

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů

Katedra chemie



Vitaminy v pšenicích se zbarveným zrnem

Bakalářská práce

Autorka práce: Jana Ludvíková

Obor studia: Výživa a potraviny

Vedoucí práce: Ing. Barbora Burešová

© 2020 ČZU v Praze

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci "Vitaminy v pšenicích se zbarveným zrnem" jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autorka uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušila autorská práva třetích osob.

V Praze dne-17.7. 2020

Poděkování

Ráda bych touto cestou poděkovala Ing. Barboře Burešové za odborné vedení, cenné rady, ochotu a vstřícnost při psaní této práce. V neposlední řadě bych chtěla poděkovat mé rodině za podporu během celého studia.

Vitaminy v pšenicích se zbarveným zrnem

Souhrn

Pšenice je obilnina, která plní významnou roli v lidské výživě, protože je bohatým zdrojem sacharidů a bílkovin. Kromě těchto základních živin jsou v pšeničných zrnech obsaženy také některé vitaminy, které jsou nezbytné pro správné fungování lidského organismu. V obilkách pšenice jsou zastoupeny především vitamin C, vitaminy skupiny B a vitamin E. V bakalářské práci byla popsána chemická struktura, způsob biosyntézy a význam těchto vitaminů pro lidský organismus a dále příznaky jejich nedostatečnosti.

V současné době jsou pro lidskou výživu vyžívány především tradiční odrůdy pšenice červené a bílé, ale kromě těchto existují také netradiční genotypy pšenic, které se liší zbarvením obilek a také vyšším obsahem některých biologicky aktivních látek, jako jsou karotenoidy, anthokyany a další nutričně významné látky. V práci byly z těchto látek podrobněji popsány karotenoidy, neboť některé z nich slouží jako prekurzory vitamínu A. Detailněji bylo pojednáno o β -karotenu, protože je z karotenoidů, které vykazují provitaminovou aktivitu, v pšenici zastoupen nejhojněji.

Speciální pozornost byla věnována synergickému účinku vitamínu E, β -karotenu a vitamínu C, jejichž kooperativní účinek výrazně napomáhá ochraně organismu proti nežádoucím oxidačním změnám, které jsou způsobeny volnými radikály. Pomocí této kooperace může docházet ke snížení rizika vzniku a rozvoje některých onemocnění, jako je například cukrovka, některé typy rakoviny nebo ateroskleróza.

Klíčová slova: thiamin, riboflavin, tokoferol, tokotrienol, modrý aleuron, purpurový perikarp, žlutý endosperm

Vitamins in colour-grained wheat genotypes

Summary

Wheat is a cereal that plays an important role in human nutrition because it is a rich source of carbohydrates and proteins. In addition to these essential nutrients, wheat grain also contains some vitamins that are essential for the proper functioning of the human body. Mainly vitamin C, B vitamins and vitamin E are found in the wheat kernel. In this bachelor's thesis is described the chemical structure, method of biosynthesis and the importance of these vitamins for the human body, and the symptoms of their insufficiency.

Nowadays, traditional varieties of red and white wheat are mainly used for human consumption, but in addition to these there are also non-traditional genotypes of wheat, which differ in grain color and higher content of some biologically active substances such as carotenoids, anthocyanins and other nutritionally important substances. Of these substances, carotenoids have been described in more detail in this thesis, as some of them serve as precursors of vitamin A and are able to reduce the risk of the development of certain diseases, such as heart disease, cancer or macular degeneration. β -carotene has been discussed in more detail because it is the most abundant carotenoid in wheat that show provitamin activity.

The thesis has been mainly focused on the synergistic effect of vitamin E, β -carotene and vitamin C, whose cooperative effect significantly helps to protect the body against unwanted oxidative changes caused by free radicals. Through this cooperation, the risk of developing and developing certain diseases, such as diabetes, certain types of cancer or atherosclerosis, can be reduced.

Keywords: thiamine, riboflavin, tocopherol, tocotrienol, blue aleuron, purple perikarp, yellow endosperm

Obsah

1 Úvod	7
2 Cíl práce	8
3 Literární rešerše.....	9
3.1 Pšenice (<i>Triticum aestivum</i>)	9
3.1.1 Stavba zrna pšenice.....	10
3.1.2 Chemické složení zrna	11
3.1.2.1 Sacharidy	11
3.1.2.2 Proteiny.....	12
3.1.2.3 Lipidy.....	13
3.1.2.4 Biologicky aktivní látky	13
3.2 Vitaminy.....	13
3.2.1 Hydrofilní vitaminy	14
3.2.1.1 Vitamin C	14
3.2.1.2 Vitaminy skupiny B.....	15
3.2.2 Lipofilní vitaminy	20
3.2.2.1 Vitamin E.....	20
3.2.2.2 Vitamin A	22
3.3 Barevné genotypy pšenice	23
3.3.1 Karotenoidy	24
3.3.2 Společné působení karotenoidů a vitaminů	25
4 Závěr	27
5 Literatura.....	28
6 Seznam použitých zkratk a symbolů	32

1 Úvod

Obiloviny jsou plodiny, jejichž pěstování je jak v České republice, tak i v celém světě velmi rozšířeno. Tyto plodiny patří mezi nejdůležitější základní složky pro potravinářský i krmivářský průmysl (McKevith 2004). Obiloviny plní významnou roli v lidské výživě, neboť jsou bohatým zdrojem základních živin, zejména sacharidů a bílkovin. V obilovinách je také obsaženo pestré spektrum minerálů, vitaminů a dalších nutričně významných látek. Jednou z nejhojněji pěstovaných plodin globální produkce je pšenice (*Triticum spp.*) (Shewry & Hey 2015).

Běžně má pšenice červeně nebo bíle zbarvené zrno. Netradičně bývají zrna pšenice zbarvena žlutě, modře a purpurově. Žluté zbarvení způsobují karotenoidy. Modré a purpurové zbarvení je dáno anthokyany. Pšenice se zbarveným zrnem jsou lépe zásobeny biologicky aktivními látkami, mezi které jsou řazeny karotenoidy, anthokyany a fenolické kyseliny (Lachman et al. 2017).

Významnou složkou obsaženou v pšenici jsou vitaminy. Z hydrofilních vitaminů jsou v pšenici obsaženy především vitaminy skupiny B a z lipofilních potom vitamin E (Shewry & Hey 2015).

2 Cíl práce

Cílem bakalářské práce bylo zpracovat literární přehled současných poznatků o vitamínech, které se vyskytují v zrnech netradičně zbarvených pšenic. Zjistit, jaké vitaminy jsou v obilkách zastoupeny nejvíce, popsat jejich strukturu, způsob biosyntézy, úlohu v lidském organismu a také nežádoucí projevy nedostatku těchto vitamínů.

3 Literární rešerše

3.1 Pšenice (*Triticum aestivum*)

Pšenice je považována za třetí nejdůležitější plodinu globální produkce, nejpěstovanější je kukuřice a druhá nejpěstovanější je rýže (Shewry & Hey 2015). Pšenice patří mezi jednoděložné rostliny a je zařazena do čeledi lipnicovitých (*Poaceae*). Podle počtu sad chromozomů jsou rozlišovány tři podskupiny pšenic – diploidní, tetraploidní a hexaploidní (Tichá & Vyzínová 2006). Nejvýznamnějším a nejčastěji pěstovaným druhem je hexaploidní pšenice setá neboli *Triticum aestivum* (Příhoda et al. 2004). Celková světová roční produkce tohoto druhu pšenice je kolem 35 až 40 milionů tun. Dalším hojně využívaným druhem je pšenice tvrdá (*T. turgidum* var. *Durum*), jedná se o tetraploidní druh, který se přizpůsobil horkým suchým podmínkám a je pěstován především okolo Středozemního moře a v jiných regionech s podobným podnebím. Tento druh pšenice je využíván především na výrobu těstovin. Ostatní druhy pšenic představují například diploidní pšenice jednozrnka (*Triticum monococcum*) nebo tetraploidní pšenice dvouzrnka (*Triticum turgidum* var. *Dicoccum*), také nazývaná jako emmer (Shewry & Hey 2015).

Pšenice je podle doby setí rozdělena na pšenici jarní a ozimou. Jarní typ pšenice je citlivý na velmi nízké teploty a mráz, proto je tento typ pšenice vyséván až na jaře a proti ozimé pšenici potřebuje také více vláhy. Jarní pšenice se sklízí kolem poloviny léta. Naopak zimní typ pšenice je vyséván na podzim, protože k vernalizaci dochází při nízkých teplotách. Zimní pšenice dozrává na začátku léta (Koehler & Wieser 2013). V České republice bylo v roce 2019, podle údajů z Českého statistického úřadu, sklizeno 4,8 milionů tun pšenice, z toho bylo vypěstováno 4,7 milionů tun pšenice ozimé a zbytek z celkového množství sklizně připadlo na pšenici jarní (Český statistický úřad 2019).

Podle typu zrna jsou rozlišovány pšenice pluchaté a nahé. Mezi pšenice pluchaté jsou řazeny pšenice špalda, jednozrnka a dvouzrnka a mezi pšenice nahé patří pšenice polská, obecná, naduřelá a shloučená (Šašková & Štolfa 1993).

Většina vyprodukované pšenice je využívána v potravinářském průmyslu k výrobě produktů pro lidskou potřebu, nebo slouží jako krmivo hospodářských zvířat po zpracování v průmyslu krmivářském (McKevith 2004).

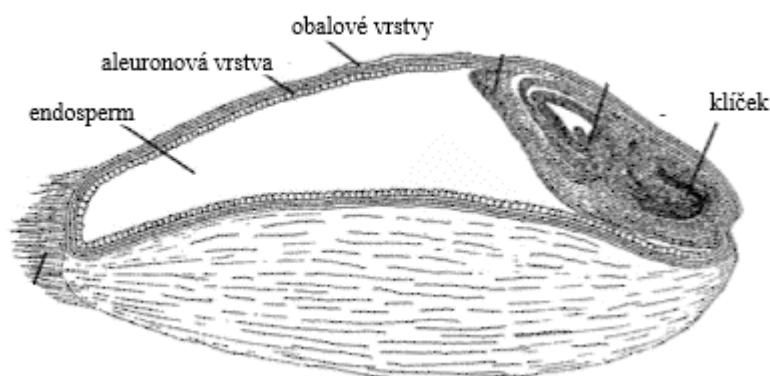
3.1.1 Stavba zrna pšenice

Plodem pšenice je obilka, která je složena z obalů, vnitřního jádra a zárodku (Zimolka 2002). Stavba pšeničné obilky je znázorněna na Obrázku č. 1. Embryo neboli zárodek je tenkostěnná struktura, která obsahuje novou rostlinu. Endosperm je složen z tenkostěnných buněk, které obsahují škrobová zrna. Aby bylo zrno schopné klíčit, musí využít živiny poskytované endospermem až do vývoje zelených listů, které umožňují zahájení fotosyntézy. Endosperm neboli vnitřní jádro je obklopen jednoduchou aleuronovou vrstvou a vnějšími obalovými vrstvami (McKevith 2004).

Obalové vrstvy neboli ektosperm jsou složeny ze dvou částí, a to z osemení a oplodí, a představují kolem 8-12,5 % hmotnosti zrna. Tyto obalové vrstvy vytvářejí ochranu obilky před vnějšími vlivy. V mlýnské technologii jsou nazývány otruby. Oplodí neboli perikarp je tvořeno z pokožky (epidermis), buněk podélných (epikarp), buněk příčných (mesokarp) a buněk hadicových (endokarp). Osemení je složeno z barevné a hyalinní vrstvy (Kučerová 2004). Aleuronová vrstva představuje asi 8 % hmotnosti celého zrna. Vyskytuje se mezi obalovými vrstvami a endospermem, ale z technologického hlediska se zahrnuje do celkového endospermu (Kučerová 2004).

Endosperm tvoří největší podíl zrna, představuje kolem 84-86 % z celé hmotnosti zrna. Vnitřní jádro je vyplněno hranolovitými buňkami, které obsahují především zásobní látky. Mezi tyto zásobní látky patří škrob a bílkoviny (Kučerová 2004).

Embryo neboli klíček je nejmenší částí zrna, u pšenice činí jeho podíl kolem 2,5-3 % z celkové hmotnosti. Klíček je významný pro svůj vysoký obsah tuků, jednoduchých cukrů, bílkovin, enzymů a vitaminů (Kučerová 2004).



Obrázek č. 1 Stavba pšeničného zrna (upraveno dle McKevith 2004)

3.1.2 Chemické složení zrna

Z hlediska chemického složení obilných zrn jsou nejvíce zastoupeny sacharidy, jejichž obsah v zrně činí kolem 66-76 %. Další významnou složku zrn tvoří proteiny, které v obilných zrnech zaujímají kolem 8-11 %. Obiloviny dále obsahují 12-14 % vody a 2-6 % lipidů. Mezi jednotlivými obilovinami existují značné rozdíly v obsahu sacharidů, proteinů a lipidů (Koehler & Wieser 2013). Pšenice je významným zdrojem energie ve formě škrobu a poskytuje také velké množství dalších látek, které jsou prospěšné nebo nezbytné pro zdraví lidského organismu. Těmito látkami jsou především bílkoviny, vitaminy (hlavně vitaminy skupiny B), vláknina a fytochemikálie (Shewry & Hey 2015).

3.1.2.1 Sacharidy

Sacharidy jsou látky složené buď z polyhydroxyaldehydů, nebo polyhydroxyketonů (Velíšek & Hajšlová 2009). Rostliny syntetizují sacharidy pomocí fotosyntézy, což je proces, při kterém rostlina využívá sluneční energii k tvorbě glukózy (a jiných organických molekul) a kyslíku z oxidu uhličitého a vody. Takto vzniklé sacharidy rostlinám slouží jako zásobárna energie (McMurry 2015). Sacharidy tvoří majoritní část obilných zrn, hojně je zde zastoupen škrob, celulóza, hemicelulózy, pentozany a další (Kučerová 2004). Nejmenší podíl sacharidů obsahuje oves (56,2 %), zatímco nejvyšší podíl sacharidů se vyskytuje v rýži (73,7 %), pšeničná zrna obsahují kolem 68 % (Velíšek & Hajšlová 2009).

Největší sacharidový podíl zrna (55-70 %) je tvořen škrobem. Jedná se o zásobní polysacharid, který se nachází pouze v endospermu. Amylóza je tvořena lineárním α -D-(1 \rightarrow 4)-glukanem, což je polymer disacharidu maltózy. Amylopektin je složen z řetězců D-glukózových jednotek, které jsou vázány α -(1 \rightarrow 4) glykosidickými vazbami (polymer maltózy) a průměrně po 25 jednotkách dochází k postrannímu větvení amylopektinu vazbou α -(1 \rightarrow 6), který vytváří disacharid isomaltózu (Velíšek & Hajšlová 2009). Obsah amylózy je kolem 25-28 % a u amylopektinu se většinou pohybuje v rozmezí 72-75 %. V obilných zrnech je škrob v granulované formě, a to buď v podobě větších, elipsoidních A-granul, nebo menších, kulovitých B-škrbových zrn (Koehler & Wieser 2013). Forma B je z důvodu výskytu molekul vody v centrálním kanálu dvojitého helixu méně stabilní (Velíšek & Hajšlová 2009).

Dalším typem sacharidů, které se nacházejí především v buněčných stěnách obilných zrn, jsou neškrbové sacharidy neboli vláknina. Vláknina je řazena mezi nutrienty, které nemohou být v lidském těle tráveny. Vláknina je dělena na vlákninu rozpustnou a nerozpustnou (Hrstková et al. 2008). Rozpustná vláknina je štěpena pomocí bakterií tlustého střeva (Anderson

et al. 2009). Význam rozpustné vlákniny pro člověka spočívá především v tom, že zvětšuje objem stolice a upravuje obsah vody ve stolici, dále koriguje vstřebávání cukru a snižuje hladinu cholesterolu (Hrstková et al. 2008). Nerozpustná vláknina není štěpena bakteriemi tlustého střeva a prochází v nezměněném stavu trávicím traktem (Anderson et al. 2009). Pro člověka má tato vláknina význam v tom, že zpomaluje vstřebávání glukózy a zvyšuje objem stolice. Tato vláknina je obsažena v cereáliích, pšeničném chlebu, Nerozpustná vláknina je lokalizována v pšeničných otrubách, a kromě cerální je obsažena také například v košťálech zeleniny a ovocných slupkách (Hrstková et al. 2008). Mezi nejvýznamnější složku nerozpustné vlákniny pšeničných zrn patří celulóza, která je zde obsažena v množství kolem 1,6 %. Homoglukan celulózy je složen z lineárních polymerů D-glukózových jednotek, které jsou vázány β - (1 \rightarrow 4) glykosidovými vazbami (Velíšek & Hajšlová 2009). Mezi nestravitelnou vlákninu jsou kromě celulózy řazeny také hemicelulózy, z nichž jsou v pšeničných obilkách obsaženy především arabinoxylany. Význam arabinoxylanů spočívá v jejich schopnosti přijímat vodu. Tyto látky jsou schopné zadržet 15-20krát více vody, než je jejich hmotnost. Obsah arabinoxylanů v pšenici se pohybuje kolem 1,5-2 %, nejvyšší množství arabinoxylanů (6-8 %) se vyskytuje v žitu (Koehler & Wieser 2013).

3.1.2.2 Proteiny

Značný rozptyl v obsahu bílkovin v obilných zrnech je způsoben rozdíly mezi jednotlivými druhy obilovin, odrůdami, ale také okolními podmínkami během růstu. K nízkému obsahu bílkovin dochází v situacích, kdy je během vývoje jádra období bohaté na srážky, zatímco sucho během vývoje jádra může být naopak příčinou vysokého obsahu bílkovin (Pomeranz 1988). Největší podíl bílkovin se nachází v aleuronové vrstvě a v klíčku (až 30 %), daleko méně je jich v endospermu (13 %) a obalových vrstvách (7 %) (Kučerová 2004). S ohledem na velikost jednotlivých částí pšeničných zrn je však nejvýznamnějším zdrojem bílkovin endosperm (Koehler & Wieser 2013). Ve srovnání s ostatními druhy obilovin obsahuje pšenice relativně vysoký podíl proteinů, průměrně 13,4 %. Triticale obsahuje o něco víc bílkovin, udává se kolem 14,4 % a žito obsahuje kolem 13,2 % (Bishnoi & Hughes 1979)

Při určování kvality a vlastností pšenice při pečení má významnou roli lepek. Lepek je složen ze dvou frakcí, a to z gliadinů a gluteninů. Samotný lepek není v syrovém zrně obsažen, ale vzniká až při hnětení mouky s vodou, kdy dochází k reakci zmíněných dvou bílkovinných frakcí. Díky lepku získávají obilné výrobky schopnost absorpce vody, soudržnost, viskozitu a elasticitu (Wiesser 2007).

3.1.2.3 Lipidy

Lipidy jsou látky nerozpustné, případně velmi omezeně rozpustné ve vodě, ale dobře rozpustné v nepolárních organických rozpouštědlech, například v benzenu (Foltýn et al. 1970). Obsah lipidů v obilkách se pohybuje kolem 2-6 %. Ve srovnání s žitem a pšenicí, jejichž zrna obsahují kolem 1,9-2 % lipidů, obsahuje oves daleko větší množství lipidů (6-8 %). Oleje všech obilovin mají podobné složení mastných kyselin. Nejvíce zastoupená je linolová kyselina, která může dosahovat 39-69 %, oproti tomu kyseliny olejová a palmitová dosahují nižších hodnot (11-36 %). Lipidy jsou v obilných zrnech lokalizovány zejména v zárodcích, méně v aleuronové vrstvě a endospermu. V zárodcích a aleuronové vrstvě jsou obsaženy hlavně triacylglyceroly, v endospermu pak zejména fosfolipidy a glykolipidy (Koehler & Wieser 2013).

3.1.2.4 Biologicky aktivní látky

3.1.2.4.1 Minerální látky

Množství minerálních látek v obilném zrně je udáváno kolem 1-2,5 %. Zrno pšenice obsahuje z biogenních prvků vyšší množství fosforu a draslíku. Minerály se v zrně nacházejí ve vnějších vrstvách, dále také v otrubách, aleuronové vrstvě a klíčcích (Koehler & Wieser 2013).

3.2 Vitaminy

Vitaminy představují různorodou skupinu nízkomolekulárních sloučenin, které v organismech zastávají řadu důležitých funkcí. Heterotrofní organismy mohou vitaminy syntetizovat jen velmi omezeně, a proto musí být přijímány v podobě potravy nebo pomocí intestinální mikrobioty. Vitaminy jsou děleny do dvou základních skupin, a to na vitaminy rozpustné v tucích neboli lipofilní, a na vitaminy rozpustné ve vodě čili hydrofilní (Velíšek & Hajšlová 2009).

U člověka může dojít k nedostatku nebo přebytku vitaminů, což se projeví jako hypovitaminóza, avitaminóza nebo hypervitaminóza. Hypovitaminóza je způsobena nedostatečným příjmem daného vitamínu. U avitaminózy dochází k úplnému nedostatku vitamínu, kdy nastávají poruchy v některých biochemických procesech. Nadměrný příjem některých vitaminů může být naopak příčinou hypervitaminózy, což je onemocnění způsobené nahromaděním velkého množství vitamínu v organismu. Hypervitaminóza souvisí pouze s příjmem lipofilních vitaminů, jejichž přebytečné množství je v organismu ukládáno zejména

v játrech a v tukové tkáni. U hydrofilních vitaminů hypervitaminóza nehrozí, protože se v organismu neukládají nebo pouze velmi omezeně a jejich přebytek je vylučován močí (Velíšek & Hajšlová 2009).

V obilných zrnech jsou vitaminy obsaženy v aleuronové vrstvě a v klíčku. Jejich množství v moukách závisí na stupni jejího vymletí (Foltýn et al. 1970).

3.2.1 Hydrofilní vitaminy

Mezi hydrofilní vitaminy jsou řazeny vitaminy skupiny B, společně nazývané jako B-komplex a vitamin C. Tyto vitaminy mají katalytický účinek většinou jako kofaktory enzymů v metabolismu bílkovin, sacharidů, tuků a jiných dalších látek. Struktura hydrofilních vitaminů je charakteristická tím, že obsahuje značné množství polárních vazeb s polárními skupinami, které jim umožňují rozpustnost ve vodě (Velíšek & Hajšlová 2009).

Pšenicích jsou obsaženy některé vitaminy skupiny B, jsou to thiamin (B₁), riboflavin (B₂), niacin (B₃) a pyridoxin (B₆). Jejich množství se pohybuje v rozmezí od 1 do 50 mg/kg v závislosti na konkrétním vitaminu (Foltýn et al. 1970). Všechny vitaminy se nacházejí v klíčcích a otrubách. Při mletí zrn dochází k odstranění až 68 % celkového thiaminu, 58-65 % riboflavinu a 85 % pyridoxinu. Obsah těchto jmenovaných vitaminů ve škrobovém endospermu se pohybuje kolem 3 %. Celozrnné mouky obsahují daleko více těchto vitaminů, na rozdíl od mouk bílých (Shewry et al. 2011).

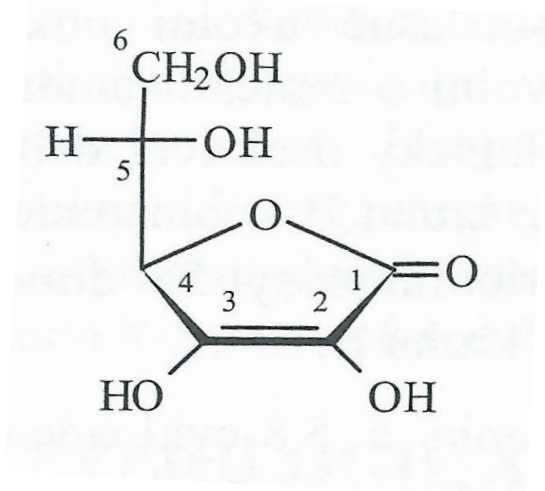
3.2.1.1 Vitamin C

Názvem vitamin C je označována askorbová kyselina, přičemž pouze L-askorbová kyselina vykazuje biologickou aktivitu vitaminu C. Chemická struktura L-askorbové kyseliny je zobrazena na Obrázku č. 2 (Velíšek & Hajšlová 2009).

Vitamin C je hlavní antioxidant a působí jako první obrana proti peroxylovým radikálům v krvi a plazmě (Niki et al. 1995). Pomocí kyseliny askorbové je zmírňován oxidační stres, dochází k neutralizaci volných radikálů a nepřímo je ovlivňován metabolismus glutathionu a vitaminu E. Kyselina askorbová je potřebná pro růst a opravy všech tkání (Zempleni et al. 2007). Vitamin C se v pšeničném zrně nachází v klíčku, jeho obsah se zde pohybuje kolem 30 mg, ale při klíčení semen dochází k jeho zvýšení (Velíšek & Hajšlová 2009).

Biosyntéza vitaminu C u rostlin spočívá v přeměně D-glukosy na L-askorbovou kyselinu, k čemuž dochází prostřednictvím deseti enzymaticky katalyzovaných reakcí, které komplexně označujeme jako Smirnov-Wheelerova dráha (Smělá 2011).

Doporučená denní dávka (DDD) vitamínu C se pohybuje kolem 60-200 mg. Projevem avitaminózy jsou kurděže neboli skobrut (Velíšek & Hajšlová 2009). Příznaky kurděží jsou krvácení, otoky nohou, neuropatie a mozkové krvácení (Zempleni et al. 2007).



Obrázek č. 2 (Velíšek & Hajšlová 2009)

3.2.1.2 Vitaminy skupiny B

Do B-komplexu řadíme vitaminy: thiamin (B₁), riboflavin (B₂), niacin (B₃), kyselinu pantothenovou (B₅), pyridoxin (B₆), biotin (B₇), folacin (B₉) a kobalamin (B₁₂) (Velíšek & Hajšlová 2009). Těchto osm složek je považováno za jeden vitamin, protože se často vyskytují společně ve stejných potravinách (Shewry et al. 2011).

Koncentrace vitaminů B je geneticky řízena a jejich variabilita v množství těchto vitaminů je důležitým faktorem při výběru pšenice (Batifoulier et al. 2006).

3.2.1.2.1 Thiamin

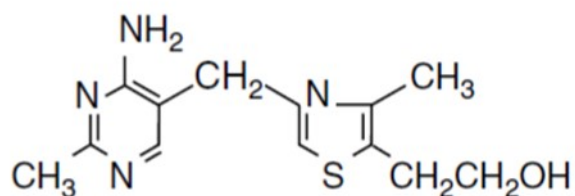
Thiamin je tvořen pyrimidinovým cyklem (4-amino-2-methylpyrimidin), který je propojen methylenovou skupinou na pátém uhlíku s dusíkem thiazolového cyklu 5-(2-hydroxyethyl)-4-methyl-thiazolu. Struktura thiaminu je zachycena na Obrázku č. 3 (Velíšek & Hajšlová 2009). Dvě základní části thiaminu, tedy část thiazolová (5-β-hydroxyethylthiazolfosfát) a pyrimidinová (2-methyl-4-amino-5-hydroxymethylpyrimidindifosfát) jsou v rostlinách syntetizovány zvlášť a jejich následnou kondenzací dochází k vzniku thiaminu (Roje 2007).

Thiamin je v lidském organismu významný zejména proto, že je prekurzorem thiamindifosfátu, který je potřebný pro řadu enzymů podílejících se na metabolismu sacharidů a aminokyselin (Roje 2007). V obilných zrnech se thiamin vyskytuje zejména ve svrchních obalových vrstvách, ale také v aleuronu a klíčku. Množství thiaminu v pšeničném zrne se udává

kolem 0,2-1,1 mg/kg (Foltýn et al. 1970). Obsah thiaminu v pšeničných moukách se pohybuje v rozmezí od 0,6 do 5,5 mg/kg, přičemž bílé mouky mohou mít až desetkrát nižší obsah thiaminu než mouky celozrnné (Velíšek & Hajšlová 2009).

Pšeničná zrna obsahovala 2,60-6,13 mg/kg sušiny thiaminu. Mletím bílé mouky bylo získáno pouze 43 % thiaminu, na rozdíl od celozrnné mouky, ve které bylo 80 % thiaminu (Batifoulier et al. 2006).

Doporučená denní dávka thiaminu u dospělého člověka je kolem 1,2 mg (Velíšek & Hajšlová 2009). Typickým projevem nedostatku thiaminu je nemoc beri-beri, která může být provázena poruchami nervové soustavy, to je tzv. suchá beri-beri. Při mokré beri-beri dochází k otokům dolních končetin, obličejové a poruchám srdečního rytmu (Zempleni et al. 2007).



Obrázek č. 3 Struktura thiaminu (Zempleni et al. 2007)

3.2.1.2.2 Riboflavin

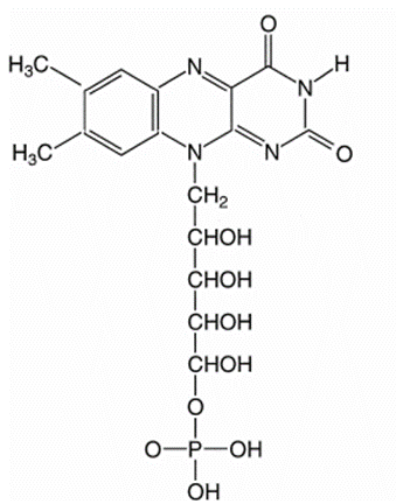
Riboflavin je tvořen flavochinonem, což je isoalloxinové jádro. Na toto jádro je v poloze N-10 poután ribitol. Riboflavin, neboli 7,8-dimethyl-10-(1'-D-ribityl) isoalloxin se může vyskytovat ve formě riboflavin-5'-fosfátu a flavinadeninukleotidu. Flavoproteiny, které obsahují flavinmononukleotidový (FMN) a flavinadeninnukleotidový (FAD) kofaktor, se podílí na oxidačně-redukčních reakcích, například se účastní mitochondriálních přenosů elektronů, fotosyntézy, oxidace mastných kyselin a metabolismu vitaminů B₆ a B₁₂. Riboflavin se účastní biosyntézy 5,6-dimethylbenzimidazolu, který je komponentou pro tvorbu kobalaminu (B₁₂) (Velíšek & Hajšlová 2009). Významnou roli hraje také v metabolismu proteinů a lipidů stejně jako pyridoxin (Batifoulier et al. 2006). Riboflavin se vyskytuje stejně jako thiamin ve svrchních částech zrna a jeho množství v pšeničném zrně se pohybuje v rozmezí 0,02-0,2 mg (Foltýn et al. 1970).

Pšeničná zrna obsahovala 0,48-1,06 mg/kg sušiny riboflavinu. Mletím bílé mouky bylo získáno pouze 67 % riboflavinu, na rozdíl od celozrnné mouky, ve které bylo 100 % riboflavinu (Batifoulier et al. 2006).

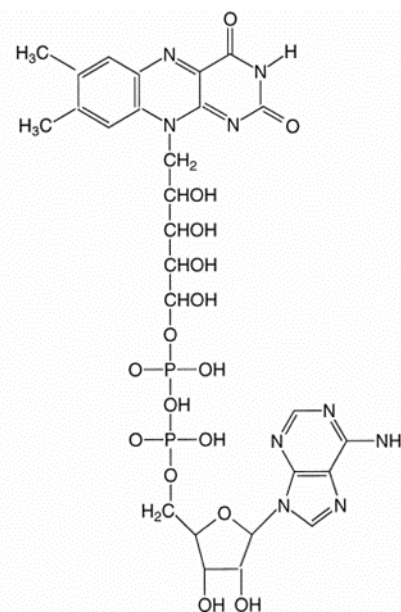
V rostlinách se tento vitamin vyskytuje především jako FMN (Obrázek č. 4) a FAD (Obrázek č. 5). Pro biosyntézu jedné molekuly riboflavinu je potřebná jedna molekula guanosin-5-trifosfátu (GTP) a dvě molekuly ribulózy-5-fosfátu. Kondenzací derivátů těchto dvou látek dochází k vzniku riboflavinu, který je poté fosforylován na FMN, a jeho následnou adenylací je tvořen FAD. Lidský organismus dovede pomocí střevních enzymů hydrolyzovat FMA a FAD za vzniku riboflavinu, a proto jsou zmíněné kofaktory obsažené v potravinách významnými zdroji tohoto vitaminu (Roje 2007).

Doporučená denní dávka riboflavinu je 0,4 mg pro kojence a 1,7 mg u adolescentů a dospělých mužů, u žen je potřeba tohoto vitaminu daleko nižší (1,3 mg) (Velíšek & Hajšlová 2009).

Deficit riboflavinu nemá svůj charakteristický znak jako např. v případě thiaminu. Při nedostatku riboflavinu může docházet ke změnám v metabolismu lipidů, bílkovin a vitaminů, ztrátě vlasů, poruchám kůže, degenerativním změnám nervového systému a zhoršené reprodukci (Zempeni et al. 2007).



Obrázek č. 4 Struktura FMN
(Kubota et al. 1998)



Obrázek č. 5 Struktura FAD
(Kubota et al. 1998)

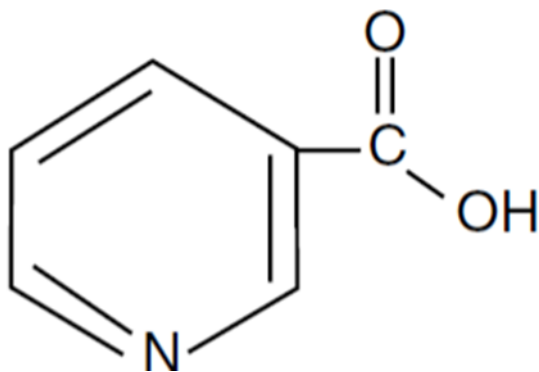
3.2.1.2.3 Niacin

Tento vitamin se dříve nazýval PP faktor nebo vitamin PP, což je přeloženo z anglického označení Pellagra Preventive Factor. Niacin má společné pojmenování pro kyselinu nikotinovou (Obrázek č. 6), což je pyrimidin-3-karboxylová kyselina a její amid. Obě tyto sloučeniny jsou bílé krystalické látky a vyznačují se stejnou biologickou aktivitou (Zempeni

et al. 2007). Niacin je metabolický produkt kofaktorů nikotinamidadeninnukleotid (NAD^+) a nikotinamidadenindinukleotid (NADP^+). Biosyntéza niacinu vychází z chinolové kyseliny, která je u rostlin syntetizována z asparagové kyseliny. V dalším kroku je chinolová kyselina využita k tvorbě nikotinátového mononukleotidu (NaMN), ze kterého je následně syntetizován nikotinamidadenindinukleotid (NAD^+). Hydrolýzou NAD^+ pak vzniká nikotinamidadeninmononukleotid, který je přeměněn na niacin (Roje 2007).

Obiloviny obsahují velké množství niacinu, pšenice obsahuje kolem 30-70 mg/kg. Množství niacinu v moukách závisí na vymletí, protože tento vitamin se nachází především v klíčku a v otrubách. Obsah niacinu v celozrnné pšeničné mouce se pohybuje kolem 30-60 mg/kg, ale bílá mouka ho obsahuje pouze kolem 10 mg/kg. Tento vitamin se vyskytuje v malém množství ve všech potravinách, většinou ve vázané formě na makromolekulární látky (Velíšek & Hajšlová 2009).

Doporučená denní dávka niacinu je kolem 2-12 mg pro děti, 14 mg pro ženy, 16 mg pro muže a 18 mg pro těhotné a kojící ženy. Nedostatek vitaminu způsobuje pellagru, příznaky tohoto onemocnění jsou poškození kůže a poruchy trávicího traktu. Při dlouhodobém nedostatku niacinu dochází k mentálním poruchám až k demenci (Velíšek & Hajšlová 2009). Kyselina nikotinová zvyšuje hladinu vysokodenzitních lipoproteinů, a proto je často využívána k prevenci kardiovaskulárních onemocnění (Zempleni et al. 2007).



Obrázek č. 6 Struktura kyseliny nikotinové (Zempleni et al. 2007)

3.2.1.2.4 *Pyridoxin*

Pod název pyridoxin se řadí tři strukturně příbuzné, biologicky aktivní deriváty pyridoxal-5'-fosfátu (PLP), kterými jsou pyridoxol, pyridoxal a pyridoxamin (Velíšek & Hajšlová 2009). Název pyridoxol je používán pro alkoholovou formu, pyridoxal pro aldehydovou formu a pyridoxamin pro aminovou formu (Zempleni et al. 2007). V potravinách rostlinného původu

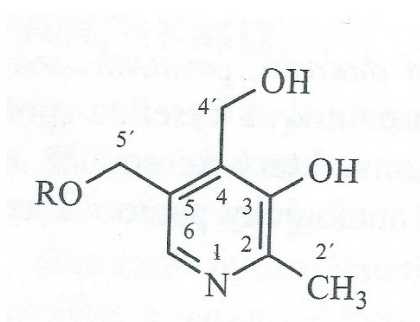
se nalézá především pyridoxol (Obrázek č. 7) a pyridoxal (Obrázek č. 8). PLP v organismu slouží jako významný kofaktor řady enzymů, které hrají roli v metabolické transformaci aminokyselin, jako je například dekarboxylace, transaminace, racemizace a další procesy. Lidský organismus není schopen syntetizovat PLP de novo, získává ho pouze přeměnou jeho derivátů, a proto je nutné zajistit dostatečný příjem vitamínu B₆ z potravy (Velíšek & Hajšlová 2009; Zemleni et al. 2007).

Novotvorba vitamínu B₆ může probíhat pouze u rostlin, které jsou schopné tyto látky syntetizovat z jejich prekurzoru PLP. Výchozími látkami pro biosyntézu pyridoxal-5'-fosfátu, kterou zajišťuje enzymový komplex PLP syntázy, jsou glutamin, ribóza-5-fosfát (nebo z ribulóza-5-fosfát) a dihydroxyaceton fosfát (či glyceraldehyd-3-fosfát). Odštěpením fosfátové skupiny z PLP dochází k vzniku pyridoxalu, který pak může být přeměněn na pyridoxin nebo pyridoxamin (Roje 2007).

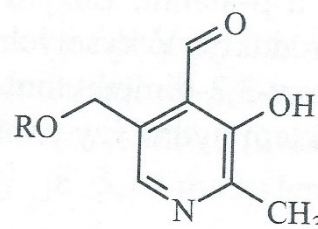
Významným zdrojem pyridoxinu jsou zejména obiloviny, ve kterých se nachází především v klíčku (Velíšek & Hajšlová 2009). Obsah pyridoxinu v pšeničném zrně se pohybuje okolo 0,3-0,6 mg (Foltýn et al. 1970). Při obohacování potravin a doplňků stravy o pyridoxin se nejčastěji používá syntetický hydrochlorid pyridoxolu, touto látkou se fortifikuje dětská mléčná výživa a bílá pšeničná mouka (Velíšek & Hajšlová 2009).

Pšeničná zrna obsahovala 1,45-3,16 mg/kg sušiny pyridoxinu. Mletím bílé mouky bylo získáno pouze 20 % pyridoxinu, na rozdíl od celozrnné mouky, ve které bylo 95 % pyridoxinu (Bautifoulier et al. 2006).

Doporučená denní dávka vitamínu B₆ pro kojence je 0,3 mg, pro těhotné a kojící ženy je to pak 2,6 mg (Velíšek & Hajšlová 2009). Při nedostatku vitamínu B₆ může dojít ke zhoršení somatického růstu, dermatitidě, ale mohou se projevit i příznaky, které souvisí s nervovým systémem, jako jsou to různé ataxie, abnormální pohyby hlavy nebo křeče (Zemleni et al. 2007).



Obrázek č. 7 Struktura pyridoxolu
R=PO₃H₂ (Velíšek & Hajšlová 2009)



Obrázek č. 8 Struktura pyridoxalu
(Velíšek & Hajšlová 2009)

3.2.2 Lipofilní vitaminy

Do skupiny lipofilních vitaminů řadíme vitaminy A, D, E a K. Tyto vitaminy zastávají v organismu řadu různých funkcí. Na rozdíl od vitaminů, které jsou rozpustné ve vodě, se lipofilní vitaminy ukládají do jater. Struktura lipofilních vitaminů je charakteristická dlouhými řetězci s nepolárními skupinami (Velíšek & Hajšlová 2009).

3.2.2.1 Vitamin E

Jako vitamin E je označována skupina látek, kterým říkáme tokoly nebo tokochromanoly (Zempleni et al. 2007). „*Tokol a tokotrienol obsahují chromanový cyklus s hydrofobním nasyceným nebo nenasyceným isoprenoidním postranním řetězcem o 16 atomech uhlíku. Tokol je (2R,4'R,8'R)-3,4,-dimethyl-2-methyl-2-(4',8',12'-trimethyltridecyl)-2H-1-benzopyran-6-ol a tokotrienol je (2R,3'E,7'E,4'R,8'R,11'E)-3,4-dihydro-2-methyl-2-(4',8',12'-trimethyltrideka-3',7',11'-trienyl)-2H-1-benzopyran-6-ol*“ (Velíšek & Hajšlová 2009). Celkem existuje osm různých forem tokolů, kterými jsou α -, β -, λ - a δ -tokoferol a α -, β -, λ - a δ -tokotrienol. Tokoferoly (Obrázek č. 9) obsahují ve své struktuře nasycený postranní řetězec, zatímco postranní řetězec tokotrienolů (Obrázek č. 10) je nenasycený. Jednotlivé tokoferoly a tokotrienoly mají různý počet methylových skupin a nachází se v jiných polohách v chromanovém cyklu, díky tomu se odlišují různou biologickou aktivitou (Velíšek & Hajšlová 2009).

V rostlinných tkáních vykazují aktivitu vitamínu E všechny formy tokolů, ale v souvislosti s lidským organismem může být vitaminem nazýván pouze α -tokoferol, protože jako jediný ze všech tokolů je schopný zvrátit příznaky jeho nedostatku (Zempleni et al. 2007). Vitamin E je významným antioxidantem, jehož schopností je vychytávání volných radikálů (Böhm et al. 1997). Vitamin E má význam i pro rostlinné buňky, chrání je před oxidačními stresy. Jedná se například o reakce, které jsou zodpovědné za rozklad polynasycených mastných kyselin v semenech. Bylo prokázáno, že tokotrienoly mají větší schopnost zachycení volných radikálů a peroxidace lipidů než tokoferoly (Cahoon et al. 2003).

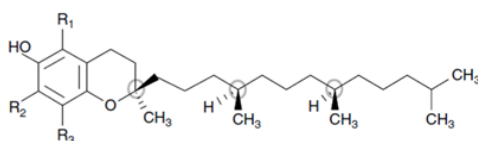
Tokoferoly se nacházejí v listech, semenech, kořenech, hlízách a v dalších částech rostlin, avšak jejich obsah a zastoupení jednotlivých forem se značně liší. V semenech, kde převažuje výskyt β , γ , a δ -tokoferolu, je obvykle uloženo 10-20krát více celkových tokolů než v listech. Vyšší podíl α -tokoferolu je naopak obsažen ve fotosynteticky aktivních tkáních. Tokotrienoly jsou ve srovnání s tokoferoly v rostlinné říši méně rozšířené, jejich přítomnost ve fotosyntetizujících tkáních je velmi vzácná, častěji jsou přítomné v semenech. V obilných

zrnech je vitamin E lokalizován převážně v klíčku a otrubách, stejně jako všechny vitaminy rozpustné ve vodě (Mène-Saffrané & DellaPenna. 2010). Celkový obsah vitaminu E se v obilovinách se pohybuje v rozmezí 15-50 mg/kg. Zastoupení jednotlivých forem tokolů obilovin je uvedeno v Tabulce č. 1. Nejbohatším zdrojem vitaminu E v potravě jsou jedlé rostlinné oleje. Obsah vitaminu E v olejích obilných klíčků se pohybuje kolem 1650-3000 mg/kg. Nejhojněji je zde zastoupen α -tokoferol (60 %) a γ -tokoferol (30 %), tokotrienoly tvoří pouze kolem 5 % celkového obsahu tokolů (Zempleni et al. 2007).

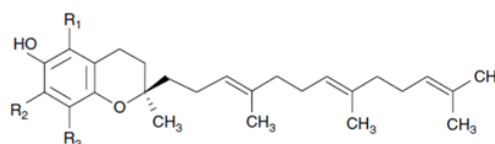
Tabulka č. 1: Obsah tokoferolů a tokotrienolů v mg/kg (Velíšek & Hajšlová 2009)

Vitamin	Pšenice	Žito	Ječmen	Oves
α -tokoferol	9,7-14	8,0-16	3,7-11,6	4,3-8,9
β -tokoferol	3,9-7	2,2-4	0,2-0,7	0,6-0,9
γ -tokoferol		6	0,2-12,9	0,9
δ -tokoferol			0,1-0,9	
α -tokotrienol	2,4-5	12,5-15	13-36	11-25,2
β -tokotrienol	19,0-33	7,0-11,8	2,7-14,3	0,9-3,3
γ -tokotrienol		< 0,2	3,6-8,4	0,2
δ -tokotrienol			0,7-3,9	0,2
Celkem	35-59	32-44	31-80	19-38

Na rozdíl od ostatních vitaminů, které jsou rozpustné v tucích, se jako jediný vitamin E nehromadí v játrech. Vitamin E je oxidován cytochromem P450, pak dochází k jeho konjugaci, kdy je nakonec vyloučen močí nebo žlučí (Zempleni et al. 2007).



Obrázek č. 9 Struktura tokoferolu
(Zempleni et al. 2007)



Obrázek č. 10 Struktura tokotrienolu
(Zempleni et al. 2007)

Začátek biosyntézy tokolů probíhá v rostlinné cytoplazmě a následující fáze pak probíhají v plastidech (Fritsche et al. 2017). Polární chromanová část tokolu je odvozena od homogentisové kyseliny (HGA) (DellaPenna 2005).

Aromatický (chromanový) prekurzor tokoferolů HGA je syntetizován z *p*-hydroxyfenylpyruvátu (HPP). HPP je pomocí enzymu *p*-hydroxyfenylpyruvát

dioxygenázy (HPPD) přeměněn na HGA. Jedná se o nevratnou komplexní enzymatickou reakci, která katalyzuje přidání dvou molekul kyslíku, následnou dekarboxylaci a přeskupení postranního řetězce HPP (DellaPenna 2005).

Pro syntézu hydrofobní části je využíván produkt 1-deoxy-D-xylulosa-5-fosfátové dráhy isopentenylidifosfát. Spojením čtyř jeho molekul vzniká geranylgeranylidifosfát (GGDP) je využíván pro syntézu tokotrienolů. Pro syntézu tokoferolů musí dojít k transformaci GGDP na fytyldifosfát (PDP) pomocí enzymu GGDP reduktázy, díky tomu dochází k přeměně tří ze čtyř dvojných vazeb v GGDP (Collakova & DellaPenna 2003). Kondenzací HGA a fytyldifosfátu (tokoferoly) nebo geranylgeranylidifosfátu (tokotrienoly) vznikají významné meziprodukty, které jsou pak methylovány a cyklizovány za vzniku jednotlivých forem tokoferolů a tokotrienolů (DellaPenna 2005).

Doporučená denní dávka α -tokoferolu pro dospělé se udává kolem 15 mg. Nedostatek vitamínu E není u člověka obvyklý, většinou se objevuje v důsledku genetických abnormalit, které jsou způsobeny různými tukovými malabsorpčními syndromy, progresivní periferní neuropatie, které způsobují nekontrolovatelné pohyby (Zempleni et al. 2007). Deficience vitamínu E má podobné příznaky jako nedostatek selenu. To je dáno tím, že specifické selenoproteiny se účastní přenosu tokoferolů a chrání je před oxidací (Velíšek & Hajšlová 2009). Specifickými příznaky nedostatku vitamínu E jsou resorpce plodu a svalová dystorfie (Zempleni et al 2007). Příznaky nedostatku vitamínu E jsou závislé na příjmu a výdeji α -tokoferolu, stejně jako na citlivosti a stupni oxidačního stresu v dané tkáni. (Cahoon et al. 2003).

3.2.2.2 Vitamin A

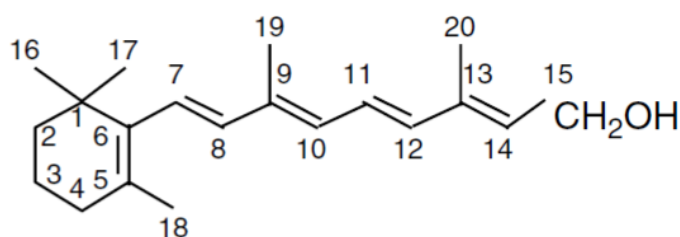
Vitamin A a jeho provitaminy jsou řazeny mezi terpenoidy a isoprenoidy. Vitamin A neboli retinol je isoprenoid, který se skládá z 20 atomů uhlíku a pěti konjugovanými dvojnými vazbami v molekule, dále obsahuje postranní řetězec se čtyřmi konjugovanými dvojnými vazbami, struktura retinolu je zachycena na Obrázku č. 11 (Velíšek & Hajšlová 2009).

Retinol je důležitý mikronutrient pro všechny obratlovce, je potřebný pro normální vidění, reprodukci, embryonální vývoj, dělení buněk a tkání a pro správnou funkci imunity (Zempleni et al. 2007). V pšeničném zrně je vitamin A v podobě provitamínu A neboli β -karotenu, jeho množství se pohybuje od 0,01-0,3 mg (Foltýn et al. 1970).

Biosyntéza vitamínu A u rostlin probíhá přes provitaminy A (karotenoidy). Tyto prekurzory jsou v lidském těle využívány jako substráty pro syntézu vitamínu A (Gul et al. 2015).

Doporučená denní dávka vitamínu A se u dětí pohybuje kolem 0,4 -0,6 mg, u dospělých 0,8-1 mg denně. Příznaky avitaminosy jsou poruchy vidění, inhibice růstu, deformace kostí a reprodukčních orgánů (Velíšek & Hajšlová 2009). Avitaminosa vitamínu A, nazývána jako xenophthamie (nedostatek slz), se projevuje jako noční slepota, při které dochází ke změkčení rohovky. Při nedoplnění vitamínu A může dojít až k úplné slepotě (Zempleni et al. 2007).

U vitamínu A může dojít k nadměrnému příjmu. Příznakem hypervitaminózy je zvýšení jaterní rezervy (Velíšek & Hajšlová 2009). Nadměrný příjem retinolu má teratogenní účinek, proto se udává nejvyšší tolerovaná hranice retinolu, která činí 2,8-3 mg/den (Fajfrová 2011).



Obrázek č. 11 Struktura retinolu (Velíšek & Hajšlová 2009)

3.3 Barevné genotypy pšenice

Mezi tradiční odrůdy pšenice se řadí pšenice červené a bílé. Červené a bílé zbarvení zrna je řízeno R geny. Sytost červené barvy souvisí s počtem R dominantních alel, zatímco bílé zbarvení je dáno kombinací 3 recesivních alel. Červené zbarvení zrna je způsobeno polyfenolovými sloučeninami (floxafen nebo proanthokyanidin) (Lachman et al. 2017).

Kromě těchto pšenic, které jsou v současné době v potravinářském a krmivářském průmyslu využívány nejhojněji, existují také genotypy s netradičním zbarvením zrna, jako jsou pšenice s modrým aleuronem, purpurovým perikarpem a žlutým endospermem. Tyto netradičně zbarvené odrůdy se liší pigmentem a místem pigmentace. Purpurové a modré zbarvení je způsobeno převážně anthokyaniny a na žlutě zbarvený endosperm působí převážně karotenoidy. Pšenice se zbarveným zrnem jsou lépe zásobeny biologicky aktivními látkami, mezi které jsou kromě zmíněných pigmentů řazeny např. fenolické kyseliny (Lachman et al. 2017).

Anthokyaniny jsou glykosidy různých aglykonů, které jsou nazývány jako anthokyanidiny (Andersen & Jordheim 2013). Anthokyaniny jsou řazeny do barevných ve vodě rozpustných pigmentů, které barví ovoce, zeleninu a také zrna pšenic do červené, modré

a purpurové barvy. Přítomnost pigmentu v zrně závisí na genetických faktorech, růstovém předpodkladu a technologických procesech během pěstování (Ficco et al. 2014).

Modré zbarvení aleuronové vrstvy je podmíněno dvěma odlišnými geny Ba1 a Ba2 (Lachman et al. 2017). Toto zbarvení je způsobeno anthokyanem kyanidin-3-glukosidem, a další jsou například delphinidin-3-glukosid, delphinidin-3-rutinosid a kyanidin-3-rutinosid. Úroveň exprese modrého aleuronového zbarvení je ovlivněna teplotou, intenzitou světla a hodnotou pH prostředí (Burešová et al. 2015). Stabilita pigmentů u modrých pšenic je daleko větší než u purpurové odrůdy. To je dáno tím, že pigmenty modrých pšenic jsou uloženy v aleuronové vrstvě, která je chráněna obalovými vrstvami (Garg et al. 2016).

Purpurové zbarvení perikarpu je způsobeno dvěma komplementárními geny Pp1 a Pp2. Nejhojněji zastoupeným anthokyanem je kyanidin-3-glukosid, kyanid-3-galaktosid a malvidin-3-glukosid. Purpurově zbarvená pšenice obsahuje daleko více anthokyanů než modře zbarvená pšenice. Jako modré zbarvení, tak i purpurové zbarvení je ovlivněno vnějšími podmínkami prostředí. Kombinací těchto dvou typů vzniká takzvané černé zbarvení obilky (Lachman et al. 2017).

Žluté zbarvení je určeno dvěma lokusy Psy 1 a Psy 2. Za žlutě zbarvený endosperm je zodpovědný zejména lutein a zeaxantin (Lachman et al. 2017). Nejvyšší množství luteinu obsahuje pšenice jednozrnka (*T. monococcum*), následované pšenicí tvrdou (*T. turgidum* var. *Durum*, emmer (*T. turgidum* var. *Dicoccum*), a špaldou (*T. spelta*) (Lachman et al. 2017).

3.3.1 Karotenoidy

Karotenoidy jsou rostlinné pigmenty, které jsou obsaženy ve všech typech plastidů, chloroplastech, ale také ve většině rostlinných orgánů a tkání. Jsou řazeny k polyenům, které obsahují systém konjugovaných dvojných vazeb mezi 40 uhlíkovými atomy (Nisar et al. 2015). Většina těchto karotenoidů je odvozena od fytoenu (Howitt & Pogson 2006). Karotenoidy jsou děleny na dvě skupiny – na uhlovodíky, které jsou nazývány karoteny, kam patří také β -karoten, a na kyslíkaté sloučeniny, odvozené od karotenů, které jsou označovány jako xantofyly (Howitt & Pogson 2006). Karoteny jsou z chemického hlediska nenasycené uhlovodíky, které zbarvují rostliny do oranžové barvy. Xantofyly jsou hydroxylované deriváty karotenů, charakteristické žlutým zbarvením (Ficco et al. 2014).

Karotenoidy se funkčně podílí na fotosyntéze (Howitt & Pogson 2006). Součinnost karotenoidů a dalších pigmentů mají schopnost zachytit foton a následně dochází k přenosu excitační energie do reakčního centra. Příjem karotenoidů snižuje riziko vzniku a rozvoje

kardiovaskulárních onemocnění a některých nádorových onemocnění (Mellado-Ortega & Hornero-Méndez 2015). Některé karotenoidy slouží jako prekurzory vitamínu A jsou to α a β -karoten a β -kryptoxantin (Trono 2019). Lidský organismus není schopný syntetizovat nový vitamin A, proto jej musí získat z potravin, které jsou bohaté na jeho prekurzory (Gul et al. 2015). Karotenoidy jsou syntetizovány fotosyntetickými rostlinami, některými řasami a bakteriemi (Zempleni et al 2007). Dvě molekuly geranylgeranyldifosfátu (GGDP) jsou kondenzovány za vzniku fytoenu a jeho desaturací je následně vytvořen lykopen. Následnou cyklizací koncových částí lykopenu dochází k vzniku α - a β -karotenu, jejichž oxidací mohou vznikat jednotlivé formy xantofylů. (DellaPenna & Pogson, 2006).

Karotenoidy jsou v pšeničném zrně obsaženy převážně v klíčku a v aleuronové vrstvě. Z xantofylů jsou zde zastoupeny lutein, zeaxantin a β -kryptoxantin a z karotenů α a β -karoten (Trono 2019). Tradiční odrůdy pšenice obsahují oproti netradičně zbarveným, zejména pak žlutým odrůdám, pouze malé množství β -karotenu (2 $\mu\text{g/g}$) (Kandlakunta et al. 2008). Netradičně zbarvené žluté odrůdy obsahují 7,04 $\mu\text{g/g}$ β -karotenu (Paznocht et al. 2018).

β -karoten je řazen mezi isoprenoidy, který obsahuje dvě koncové skupiny cyklohexenového typu (Paiva & Russell 1999). β -karoten je špatně rozpustný ve vodě a nestabilní v přítomnosti tepla, světla a kyslíku. Je to pigment, který je červenooranžově zbarvený. V rostlinných tkáních je lokalizován v buňkách plastidů. β -karoten je významný nejen pro svoji barvu v potravinách, ale také díky svým zdravotním přínosům. Díky β -karotenu dochází ke snížení rizika kardiovaskulárních chorob, některých typů rakoviny, posílení imunitního systému a ochraně před makulární degenerací, která souvisí s věkem a je hlavní příčinou slepoty (Gul et al. 2015).

3.3.2 Společné působení karotenoidů a vitamínů

Oxidační metabolismus je důležitý pro životaschopnost buněk. Nerovnováha mezi oxidanty a antioxidanty, která je ve prospěch oxidantů, může vést k poškození buněk organismu, tento jev je označován jako oxidační stres (Sies 1997). V průběhu buněčného metabolismu jsou produkovány volné radikály, což jsou molekuly, atomy nebo ionty, které mají ve svém elektronovém obalu nepárový elektron a schopnost alespoň krátkodobé samostatné existence. Nízká koncentrace volných radikálů je významná ve fyziologických, regulačních a signalizačních procesech, ale vysoká hladina způsobuje škodlivé změny v buňce (Manisha 2017). Při nadbytku volných radikálů může docházet k přetížení ochranných enzymů a následně k destruktivním buněčným účinkům, jako je například apoptóza (Antolovich et al. 2002). Mezi volné radikály patří mimo jiné reaktivní formy kyslíku, které mají negativní vliv

na rozvoj závažných onemocnění, jako jsou například ateroskleróza, cukrovka, zvýšený krevní tlak, některé typy rakoviny a Parkinsonova nemoc. Volné radikály mohou být eliminovány pomocí antioxidantů, čímž může dojít ke zpomalení nebo zabránění rozvoje onemocnění. Mezi antioxidanty jsou mimo jiné řazeny vitamin C a E a karotenoidy (Pláteník 2009).

Vitamin C, α -tokoferol a β -karoten mají jako antioxidanty kooperativní účinek proti oxidaci lipidů. Pomocí α -tokoferolu je eliminován kyslíkový radikál za vzniku α -tokoferoxylového radikálu, který je pro organismus méně škodlivý než kyslíkový radikál, a pomocí vitaminu C může být α -tokoferoxylový radikál přeměněn zpátky na α -tokoferol (Niki et al. 1995). Při ochraně buněk proti radikálům byl pozorován také synergický účinek β -karotenu a vitaminu E. To může souviset s tím, že β -karoten nezpůsobuje pouze odstranění oxyradikálů, ale také opravuje α -tokoferoxylový radikál, který vzniká vychytáváním kyslíkového radikálu α -tokoferolem. Synergický účinek může být ovlivněn umístěním α -tokoferolu a β -karotenu. β -karoten má více lipofilní charakter než α -tokoferol, proto lze předpokládat, že je přítomen ve vnitřním prostoru membrán a působí na radikály, které se nachází v tomto lipofilním kompartmentu efektivněji než α -tokoferol (Böhm et al. 1997; Nikki et al. 1995). Výrazný synergický účinek β -karotenu s vitaminem E a C byl pozorován také v ochraně buněk před toxickými reaktivními formami dusíku (NO^2) (Böhm et al. 1998).

4 Závěr

Pšenice je nedílnou součástí lidské stravy, je bohatá na základní živiny, jako jsou sacharidy a bílkoviny, ale obsahuje také řadu dalších nutričně významných látek. Netradičně zbarvená zrna pšenice obsahují větší množství biologicky aktivních látek. Například obsah karotenoidů v tradičních odrůdách pšenice je nižší než v odrůdách s netradičně zbarveným zrnem. Některé karotenoidy jsou řazeny mezi prekurzory vitamínu A, který je potřebný především pro normální vidění, reprodukci, vývoj plodu a pro správnou funkci imunitního systému. Významným karotenoidem je z tohoto pohledu β -karoten, který je v pšeničných zrnech hojně zastoupen.

Vitaminy obsažené v pšeničných zrnech jsou uloženy zejména ve svrchních obalech, aleuronové vrstvě a klíčku. V největší míře jsou v obilkách pšenice obsaženy hydrofilní vitaminy skupiny B a lipofilní vitamin E. Vitaminy skupiny B jsou velmi důležité pro správné fungování metabolismu základních živin, činnost nervové soustavy a pro zdravou pokožku. Vitamin E je významným antioxidantem, je důležitý pro správnou činnost nervové soustavy, vstřebávání tuků a funkci imunitního systému. Dalším vitamínem s antioxidačními vlastnostmi, obsaženým v pšeničných zrnech je vitamin C, který je potřebný pro správnou funkci imunitního systému, srdce a cév. Vitaminy E a C a β -karoten vykazují synergický účinek, který lidský organismus chrání před působením volných radikálů.

Netradiční odrůdy pšenic představují dobrý zdroj řady zdraví prospěšných látek, a proto lze konstatovat, že by jejich dlouhodobé využití v potravinářském průmyslu mohlo mít pozitivní vliv na zdraví světové populace.

5 Literatura

- Andersen ØM, Jordheim M. 2013. Basic anthocyanin chemistry and dietary sources. *Anthocyanins in health and disease* **1**: 13-89.
- Anderson JW, Baird P, Davis RH, Ferreri S, Knudtson M, Koraym A, Waters V, Williams CL. 2009. Health benefits of dietary fiber. *Nutrition reviews* **67**: 188-205.
- Antolovich M, Prenzler PD, Patsalides E, McDonald S, Robards K. 2002. Methods for testing antioxidant activity. *Analyst* **127**: 183-198.
- Batifoulier F, Verny MA, Chanliaud E, Rémésy C, Demigné C. 2006. Variability of B vitamin concentrations in wheat grain, milling fractions and bread products. *European Journal of Agronomy* **25**:163-169.
- Bishnoi UR, Hughes JL. 1979. Agronomic Performance and Protein Content of Fall-planted Triticale, Wheat, and Rye 1. *Agronomy Journal* **71**:359-360.
- Böhm F, Edge R, Land EJ, McGarvey DJ, Truscott TG. 1997. Carotenoids enhance vitamin E antioxidant efficiency. *Journal of the american chemical society* **119**:621-622.
- Böhm F, Edge R, McGarvey DJ, Truscott TG. 1998. β -Carotene with vitamins E and C offers synergistic cell protection against NOx. *FEBS letters* **436**: 387-389.
- Burešová V, Kopecký D, Bartoš J, Martinek P, Watanabe N, Vyhnánek T, Doležel J. 2015. Variation in genome composition of blue-aleurone wheat. *Theoretical and applied genetics* **128**:273-282.
- Cahoon EB, Hall SE, Ripp KG, Ganzke TS, Hitz WD, Coughlan SJ. 2003. Metabolic redesign of vitamin E biosynthesis in plants for tocotrienol production and increased antioxidant content. *Nature biotechnology* **21**: 1082-1087.
- Collakova E, DellaPenna D. 2003. Homogentisate phytyltransferase activity is limiting for tocopherol biosynthesis in Arabidopsis. *Plant Physiology* **131**: 632-642.
- DellaPenna D. 2005. A decade of progress in understanding vitamin E synthesis in plants. *Journal of plant physiology* **162**: 729-737.
- DellaPenna D, Pogson BJ. 2006. Vitamin synthesis in plants: tocopherols and carotenoids. *Annual Review of Plant Biology*. **57**:711-738.

- Česká statistický úřad. 2019. Definitivní údaje o sklizni zemědělských plodin. ČSÚ, Praha.
Available from <https://www.czso.cz/csu/czso/definitivni-udaje-o-sklizni-zemedelskych-plodin-2019> (accessed 19.2.2020).
- Fajfrová J. 2011. Vitaminy a jejich funkce v organismu. Interní medicína pro praxi, **13**: 466-468.
- Ficco DB, Mastrangelo AM, Trono D, Borrelli GM, De Vita P, Fares C, Beleggia R, Platani C, Papa R. 2014. The colours of durum wheat: a review. Crop and Pasture Science **65**: 1-15.
- Foltýn, J a kolektiv 1970. Pšenice, SZN Praha.
- Fritsche S, Wang X, Jung C. 2017. Recent advances in our understanding of tocopherol biosynthesis in plants: an overview of key genes, functions, and breeding of vitamin E improved crops. Antioxidants **6**: 99.
- Garg M, Chawla M, Chunduri V, Kumar R., Sharma S, Sharma NK, Kaur N, Kumar A, Munday JK, Saini MK, Singh, SP. 2016. Transfer of grain colors to elite wheat cultivars and their characterization. Journal of cereal science **71**:138-144.
- Gul K, Tak A, Singh AK, Singh P, Yousuf B, Wani AA. 2015. Chemistry, encapsulation, and health benefits of β -carotene-A review. Cogent Food & Agriculture **1**: 1018696.
- Howitt CA, Pogson BJ. 2006. Carotenoid accumulation and function in seeds and non-green tissues. Plant, cell & environment **29**: 435-445.
- Hrstková H, Brázdová Z, Bajer M. 2008. Vláknina ve výživě dětí. Hygiena **53**: 52-53.
- Kandlakunta B, Rajendran A, Thingnganing L. 2008. Carotene content of some common (cereals, pulses, vegetables, spices and condiments) and unconventional sources of plant origin. Food Chemistry **106**: 85-89.
- Koehler P, Wieser H. 2013. Chemistry of cereal grains. In Handbook on sourdough biotechnology. Springer, Boston, MA.
- Kubota LT, Gorton L, Roddick-Lanzilotta A, McQuillan AJ. 1998. Electrochemical behaviour of FAD and FMN immobilised on TiO₂ modified carbon fibres supported by ATR-IR spectroscopy of FMN on TiO₂. Bioelectrochemistry and bioenergetics **47**: 39-46.
- Kučerová J. 2004. Technologie cereálií. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita Brno.
- Lachman J, Martinek P, Kotíková Z, Orsák M, Šulc M. 2017. Genetics and chemistry of pigments in wheat grain—A review. Journal of cereal science **74**:145-154.

- Manisha WH, Rajak R, Jat D. 2017. Oxidative stress and antioxidants: an overview. *International Journal of Advanced Research and Review* **2**: 110-9.
- McKevith B. 2004. Nutritional aspects of cereals. *Nutrition Bulletin* **29**: 111-142.
- McMurry J. 2015. *Organická chemie*. Vutium, VŠCHT Praha.
- Mellado-Ortega E, Hornero-Méndez D. 2015. Carotenoids in cereals: an ancient resource with present and future applications. *Phytochemistry reviews* **14**: 873-890.
- Mène-Saffrané L, DellaPenna D. 2010. Biosynthesis, regulation and functions of tocochromanols in plants. *Plant Physiology and Biochemistry* **48**:301-309.
- Niki E, Noguchi N, Tsuchihashi H, Naohiro G. 1995. Interaction among vitamin C, vitamin E, and β -carotene. *The American Journal of Clinical Nutrition* **62**:1322-13266.
- Nisar N, Li L, Lu S, Khin NC, Pogson BJ. 2015. Carotenoid metabolism in plants. *Molecular Plant* **8**: 68–82.
- Paiva SA, Russell RM. 1999. β -carotene and other carotenoids as antioxidants. *Journal of the American college of nutrition* **18**: 426-433.
- Paznocht L, Kotíková Z, Šulc M, Lachman J, Orsák M, Eliášová M, Martinek P. 2018. Free and esterified carotenoids in pigmented wheat, tritordeum and barley grains. *Food chemistry*, **240**: 670-678.
- Pláteník J. 2009. Volné radikály, antioxidanty a stárnutí. *Interní medicína pro praxi* **11**:30-33.
- Pomeranz Y. 1988. *Wheat: chemistry and technology* American Association of Cereal Chemists, St. Paul, Minnesota Estados Unidos de América.
- Příhoda J, Skřivan P, Hrušková M. 2004. *Cereální chemie a technologie I: cereální chemie, mlýnská technologie, technologie výroby těstovin*. VŠCHT Praha:
- Roje S. 2007. Vitamin B biosynthesis in plants. *Phytochemistry* **68**:1904-1921.
- Shewry PR, Van Schaik F, Ravel C, Charmet G, Rakszegi M, Bedo Z, Ward JL. 2011. Genotype and environment effects on the contents of vitamins B1, B2, B3, and B6 in wheat grain. *Journal of agricultural and food chemistry* **59**:10564-10571.
- Shewry PR, Hey, SJ. 2015. The contribution of wheat to human diet and health. *Food and energy security* **4**:178-202.

- Sies H. 1997. Oxidative stress: oxidants and antioxidants. *Experimental Physiology: Translation and Integration* **82**: 291-295.
- Smělá M. 2011 Stanovení některých nutričních faktorů ve vybraných druzích ovoce. [MSc. Thesis]. Vysoké učení technické v Brně. Brno.
- Šašková D, Štolfa V. 1993. Trávy a obilí. Artia Praha.
- Tichá M, Vyzínová P. 2006. Polní plodiny. Brno: VFU **41**:37-48.
- Trono D. 2019. Carotenoids in Cereal Food Crops: Composition and Retention throughout Grain Storage and Food Processing. *Plants* **8**: 551.
- Velíšek J, Hajšlová J. 2009. Chemie potravin I. 3. vyd. OSSIS, Tábor.
- Zempleni J, Suttie J W, Gregory III JF, Stover PJ. 2007. Handbook of vitamins. CRC Press New York.

6 Seznam použitých zkratek a symbolů

B₁- thiamin

B₂- riboflavin

B₃- niacin

B₆- pyridoxin

B₉- kyselina listová

B₁₂- kobalamin

DDD- doporučená denní dávka

FAD- flavinadeninnukleotid

FMN- riboflavin-5'-fosfát

GGDP- geranylgeranyldifosfát

GTP- guanosin-5-trifosfát

HGA – homogentisová kyselina

HPP- *p*-hydroxyfenylpyruvát

HPPD- hydroxyfenyl dioxygenáza

NAD⁺- nikotinamidadeninnukleotid

NADP⁺- nikotinamidadenindinukleotid

NaMN- nikotinátový mononukleotid

PDP - fityldifosfát

PLP-pyridoxal-5'-fosfát