

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů

Katedra mikrobiologie, výživy a dietetiky



**Česká zemědělská
univerzita v Praze**

Karotenoidy ve výživě nosnic a jejich vliv na kvalitu vajec

Diplomová práce

Autor práce: Bc. Jan Szmek

Obor studia: Výživa a potraviny

Vedoucí práce: prof. MVDr. Eva Skřivanová, Ph.D.

Konzultant: Ing. Michaela Englmaierová, Ph.D.

© 2023 ČZU v Praze

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci "Karotenoidy ve výživě nosnic a jejich vliv na kvalitu vajec" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 12. dubna 2023

Bc. Jan Szmek

Poděkování

Touto cestou bych velice rád poděkoval vedoucí mé diplomové práce, prof. MVDr. Evě Skřivanové, Ph.D., za odborné vedení, projevenou pomoc, množství cenných a inspirativních rad, podnětů, doporučení, ale i za důvěru, kterou mi poskytla při zpracování této práce. Dále bych rád vyjádřil velké poděkování konzultantovi mé diplomové práce, Ing. Michaele Englmaierové, Ph.D., za poskytnutí literatury a dalších nezbytných materiálů vztahujících se k tématu a za pečlivé vedení, rady, připomínky a odbornou pomoc, kterou mi věnovala při zpracování metodické a experimentální části této práce. Ing. Tomáši Vítovi děkuji za projevenou pomoc v laboratoři oddělení Fyziologie výživy a jakosti produkce Výzkumného ústavu živočišné výroby, v.v.i. v Praze Uhřetěvsi. V neposlední řadě patří také velké poděkování mé rodině, blízkým a kamarádům, kteří mě nejen v průběhu psaní této práce, ale i po dobu navazujícího magisterského studia podporovali.

Karotenoidy ve výživě nosnic a jejich vliv na kvalitu vajec

Souhrn

Chov drůbeže hraje důležitou roli při podpoře hospodářského rozvoje, zajištění trhu zásobováním a zvyšování příjmů zemědělců. Význam chovu nosnic spočívá v produkci vajec. Vejce patří mezi výživově nejhodnotnější potraviny. Z hlediska kvality je pro zjednodušeně hodnotící spotřebitelskou veřejnost nejdůležitějším znakem barva žloutku. Preference sytosti žloutku se dle požadavků spotřebitelů v jednotlivých zemích výrazně liší. Z tohoto důvodu se do krmných směsí pro nosnice často přidávají buď přírodní, nebo syntetické karotenoidy. Karotenoidy se dělí na dvě základní skupiny, karoteny a xantofyly. Xantofyly přírodního původu si v nynější době získávají velkou oblibu u těch spotřebitelů, kteří odmítají používání syntetických látek ve výživě hospodářských zvířat. Cílem experimentální části této diplomové práce bylo vyhodnotit vliv biofortifikované pšenice odrůdy PEXESO se zvýšeným obsahem přírodních karotenoidů ve výživě nosnic na užitkové vlastnosti a kvalitu vajec. Experiment byl realizován na oddělení Fyziologie výživy a jakosti produkce Výzkumného ústavu živočišné výroby, v.v.i. v Praze Uhřetěvesi. Do pokusu bylo zařazeno 240 nosnic genotypu Lohmann Brown ve věku 42 týdnů. Tyto nosnice byly ustájeny v obohacených klecích a rozděleny do 4 skupin dle odrůdy pšenice (TERCIE × PEXESO) a dle zdroje tuku (řepkový olej × vepřové sádlo) v dietě. V každé skupině bylo 6 opakování po deseti slepicích. Pokus trval 10 týdnů. Výsledky byly statisticky vyhodnoceny programem SAS. Přídavek pšenice PEXESO se projevil zlepšením parametrů užitkovosti, konkrétně snížil příjem krmiva ($P < 0,001$) a konverzi krmiva ($P = 0,013$). Nosnice, jejichž krmné směsi zahrnovaly pšenici PEXESO, produkovaly vejce se sníženou hodnotou Haughových jednotek ($P < 0,001$), ale na druhou stranu s vyšší intenzitou barvy žloutku ($P < 0,001$) a vyšší hodnotou tloušťky ($P = 0,037$) a pevnosti ($P < 0,001$) vaječné skořápky. Obsah karotenoidů luteinu ($P < 0,001$) a zeaxantinu ($P < 0,001$) ve žloutku byl výrazně vyšší u skupin s PEXESEM. Na ukládání luteinu ($P = 0,001$) a zeaxantinu ($P = 0,001$) mělo rovněž pozitivní vliv vepřové sádlo. Dieta s pšenicí PEXESO a řepkovým olejem zvýšila koncentraci α -tokoferolu ($P = 0,008$) a γ -tokoferolu ($P = 0,012$) ve žloutku. Pšenice PEXESO a vepřové sádlo výrazně zvýšily oxidační stabilitu čerstvých ($P < 0,001$, $P = 0,008$) i skladovaných ($P = 0,050$, $P = 0,021$) vajec. Závěrem lze říci, že pšenice odrůdy PEXESO zvýšila retenci biologicky aktivních látek, což se následně odrazilo na užitkovosti nosnic a kvalitě vyprodukovaných vajec. Pšenice PEXESO je vhodnou komponentou krmných směsí pro nosnice, ale pro výraznější zbarvení vaječného žloutku je nutný dodatečný přídavek jiného zdroje karotenoidů.

Klíčová slova: karotenoidy, výživa, drůbež, nosnice, kvalita, vejce, barva žloutku, zdraví

Carotenoids in laying hens nutrition and their effect on egg quality

Summary

Poultry farming plays an important role in promoting economic development, securing the market with supply and increasing farmers' income. The importance of laying hen farming lies in egg production. Eggs are one of the most nutritionally valuable foods. In terms of quality, the most important feature for the simplistic consumer is the colour of the yolk. The preference for yolk richness varies considerably from country to country according to consumer requirements. For this reason, either natural or synthetic carotenoids are often added to the feed mixtures for laying hens. Carotenoids are divided into two main groups, carotenes and xanthophylls. Xanthophylls of natural origin are now gaining great popularity with those consumers who reject the use of synthetic substances in livestock nutrition. The aim of the experimental part of this thesis was to evaluate the effect of biofortified wheat variety PEXESO with increased content of natural carotenoids in the diet of laying hens on performance characteristics and egg quality. The experiment was carried out at the Department of Nutritional Physiology and Animal Product Quality of the Institute of Animal Science in Prague Uhřetěves. The experiment included 240 laying hens of the Lohmann Brown genotype at the age of 42 weeks. These layers were housed in enriched cages and divided into 4 groups according to wheat variety (TERCIE × PEXESO) and fat source (rapeseed oil × pork lard) in the diet. There were 6 repetitions of ten hens in each group. The experiment lasted 10 weeks. The results were statistically evaluated by SAS software. The addition of PEXESO wheat resulted in an improvement in performance parameters, specifically, it reduced feed intake ($P < 0.001$) and feed conversion ($P = 0.013$). Laying hens whose diets included PEXESO wheat produced eggs with reduced Haugh units ($P < 0.001$), but on the other hand, higher yolk color intensity ($P < 0.001$) and higher egg shell thickness ($P = 0.037$) and firmness ($P < 0.001$). The carotenoids lutein ($P < 0.001$) and zeaxanthin ($P < 0.001$) contents of the yolk were significantly higher in the PEXESO groups. Lutein ($P = 0.001$) and zeaxanthin ($P = 0.001$) deposition was also positively affected by lard. The diet with PEXESO wheat and rapeseed oil increased the concentration of α -tocopherol ($P = 0.008$) and γ -tocopherol ($P = 0.012$) in the yolk. PEXESO wheat and lard significantly increased the oxidative stability of fresh ($P < 0.001$, $P = 0.008$) and stored ($P = 0.050$, $P = 0.021$) eggs. In conclusion, PEXESO wheat variety increased the retention of biologically active substances, which was subsequently reflected in the performance of laying hens and produced egg quality. PEXESO wheat is a suitable component of feed mixtures for laying hens, but additional addition of another source of carotenoids is necessary for more pronounced egg yolk colouration.

Keywords: carotenoids, nutrition, poultry, laying hens, quality, egg, yolk colour, health

Obsah

1 Úvod	8
2 Cíl práce a hypotéza	10
2.1 Cíl práce	10
2.2 Hypotéza	10
3 Literární rešerše	12
3.1 Základy výživy nosnic	12
3.1.1 Výživa slepic nosného typu	12
3.1.2 Výživa slepic nosného typu v odchovu	12
3.1.3 Výživa slepic nosného typu ve snášce.....	14
3.1.4 Tuk ve výživě slepic nosného typu.....	16
3.2 Karotenoidy	23
3.2.1 Obecná charakteristika karotenoidů	23
3.2.2 Chemická struktura karotenoidů.....	24
3.2.3 Základní rozdělení karotenoidů	25
3.2.4 Biosyntéza karotenoidů	26
3.2.5 Výskyt karotenoidů.....	27
3.2.6 Ochranná funkce karotenoidů.....	28
3.2.7 Antioxidační funkce karotenoidů	29
3.2.8 Karotenoidy jako prekurzory vitamínu A.....	31
3.2.9 Protizánětlivá funkce karotenoidů	33
3.3 Metabolismus a efektivita ukládání karotenoidů u drůbeže	33
3.4 Zdroje karotenoidů	36
3.4.1 Přírodní karotenoidy	36
3.4.1.1 Aksamitník vzpřímený (<i>Tagetes erecta</i>).....	38
3.4.1.2 Tolice vojtěška (<i>Medicago sativa</i>).....	38
3.4.1.3 Pastevní porost.....	39
3.4.1.4 Kopřiva dvoudomá (<i>Urtica dioica</i>)	39
3.4.1.5 Stévie sladká (<i>Stevia rebaudiana</i>)	40
3.4.1.6 Kukuřice setá (<i>Zea mays</i>)	40
3.4.1.7 Pšenice setá (<i>Triticum aestivum</i>)	41
3.4.1.8 Mrkev obecná (<i>Daucus carota</i>).....	41
3.4.1.9 Paprika setá (<i>Capsicum annuum</i>)	42
3.4.1.10 Lilek rajče (<i>Solanum lycopersicum</i>)	42
3.4.1.11 <i>Chlorella vulgaris</i>	43
3.4.2 Syntetické karotenoidy	44
3.4.2.1 Žluté syntetické karotenoidy.....	44

3.4.2.2	Červené syntetické karotenoidy	45
3.5	Vitaminy přítomné ve žloutku	48
3.6	Faktory ovlivňující obsah karotenoidů a vitaminů ve žloutku	50
3.7	Barevný tón žloutku a preference spotřebitelů	52
3.8	Vliv karotenoidů na kvalitu vajec.....	54
3.9	Nutriční benefity vajec obohacených o karotenoidy.....	57
3.9.1	Věkem podmíněná makulární degenerace a šedý zákal	59
3.9.2	Poškození kůže a rakovina kůže	61
3.9.3	KVO, oxidační stres, Alzheimerova choroba a rakovina	61
3.9.4	Další významné účinky zdraví prospěšných karotenoidů.....	63
4	Metodika	66
4.1	Metodika experimentu.....	68
4.1.1	Nosnice, pšenice PEXESO v krmných směsích pro nosnice, ustájení	68
4.1.2	Technologická hodnota vajec	70
4.1.3	Příjem karotenoidů a stanovení obsahu karotenoidů ve žloutku	70
4.1.4	Stanovení obsahu vitaminů ve žloutku	71
4.1.5	Stanovení oxidační stability lipidů žloutku	73
4.1.6	Statistická analýza.....	73
5	Výsledky	74
6	Diskuse.....	80
7	Závěr.....	86
8	Seznam zkratk a symbolů použitých v textu	88
9	Literatura.....	90
10	Obrázky	114

1 Úvod

Chov hospodářských zvířat představuje významný vědní obor. Chov drůbeže, jako jedno ze základních odvětví chovu zvířat, hraje důležitou roli při podpoře hospodářského rozvoje, zajištění trhu zásobováním a zvyšování příjmů zemědělců (Ruiz-Garcia et al. 2009).

Na pozadí tzv. čtvrté průmyslové revoluce s rostoucím rozvojem informačních technologií, celosvětovým populačním růstem, zlepšováním úrovně spotřeby a zrychleným procesem urbanizace dochází neustále k řízení tržní poptávky po drůbežích produktech (Wu et al. 2022). Vlivem silné poptávky se během posledních padesáti let stal drůbeží sektor nejrychleji rostoucím a nejflexibilnějším ze všech odvětví živočišné výroby (McLeod et al. 2009). Tato skutečnost je pravděpodobně zapříčiněna i tím, že chov drůbeže není jako jiné chovy a odvětví živočišné výroby vázán na hospodaření na zemědělské půdě. Efektivita v drůbežářském sektoru je řízena hlavně kvalitou složení krmiva a rychlejším růstem drůbeže, který je ovlivněn genetikou a zdravotním stavem chovaných ptáků (Gerber et al. 2015).

Význam chovu drůbeže spočívá v produkci potravin živočišného původu a konkrétně u nosnic v produkci vajec. Drůbež se vyznačuje velice intenzivním metabolismem, kterému odpovídá vysoká intenzita růstu, raná pohlavní dospělost, vysoká reprodukční, resp. produkční schopnost a vysoká míra adaptace na podmínky prostředí a systém chovu. Drůbež může dosáhnout nejvyššího růstu a nejnižších nákladů na jednotku produkce, především díky účinné konverzi krmiva, tj. relativně rychlé a efektivní přeměně rostlinné hmoty na biologicky plnohodnotnou živočišnou hmotu (maso, vejce), což je výhodou drůbeže oproti jiným druhům hospodářských zvířat, které to ve stejné míře neumí (Stupka et al. 2013; Gerber et al. 2015).

Z hlediska užitečnosti je nejdůležitější vlastností slepic schopnost snášet vejce. Příčinou celoroční schopnosti slepic snášet vejce je šlechtění (Verhoef 2005). Snáška vajec drůbeže je charakteristická a specifická u jednotlivých druhů drůbeže, kde se především liší počtem a hmotností snesených vajec (Stupka et al. 2013). Výrobou vajec se v současné době rozumí produkce konzumních vajec, která se získávají od kura domácího (*Gallus gallus* f. *domestica*), při splnění požadavků na vejce, určená k lidskému konzumu. V České republice, ale i v Evropě, převažuje chov hnědovaječných nosnic produkující vejce s pevnější skořápkou. Na tyto slepice připadá v České republice více než 90 % stavů slepic chovaných na produkci konzumních vajec (Tůmová et al. 2019). Spotřeba vajec v posledních letech hodně kolísá. Dle ČSÚ bylo v roce 2018 v České republice spotřebováno na osobu v průměru 263 ks vajec. Za rok 2020 však domácí spotřeba vajec meziročně poklesla, a to o 5,3 % (MZe ČR 2022).

Slepičí vejce lidé používají jako potravu již od starověku a neexistuje žádná jiná potravina živočišného původu, kterou by konzumovalo tolik lidí ve většině oblastí světa (Fraeye et al. 2012; Fernández-Martín et al. 2017). Velmi dobře stravitelná vejce patří mezi výživově nejhodnotnější potraviny. Vaječný obsah je zdrojem vysoce kvalitních plnohodnotných bílkovin, 60 % aminokyselin vaječného bílku patří mezi esenciální. Lipidy žloutku jsou tvořeny ze 70 % nenasycenými mastnými kyselinami, 12 – 20 % připadá na polynenasycené mastné kyseliny (Dostálová & Kadlec 2014). Vaječné lipidy mají vysoký podíl fosfolipidů, které kromě vysoké výživové hodnoty mají i význam technologický (Pánek et al. 2002). Díky optimálnímu poměru jednotlivých složek živin a jejich dokonalou využitelností člověkem mají vejce nejvyšší biologickou hodnotu ze všech bílkovin rostlinného i živočišného původu.

Jedním z nejdůležitějších kvalitativních znaků vajec, zejména z pohledu konzumenta, je barva vaječného žloutku. Ta je důležitou charakteristikou a kritériem výběru potravin spotřebitelem obzvláště v Evropské unii, kde se preference sytosti vaječného žloutku v každém státu výrazně liší (Hernandez et al. 2000, Englmaierová et al. 2013). Z tohoto důvodu se pro náležité zbarvení vaječného žloutku do krmných směsí pro slepice chované v provozních podmínkách často přidávají buď přírodní, nebo syntetické pigmenty – karotenoidy.

Karotenoidy představují jednu z nejrozšířenějších skupin přírodních žlutých, oranžových a červených lipofilních pigmentů účastnících se fotosyntézy v rostlinách, řasách a některých mikroorganismech. Organismy, které nejsou schopny fotosyntézy, stejně jako slepice, musí karotenoidy přijímat potravou. Biologicky aktivní karotenoidy přítomné v krmných směsích drůbeže zvyšují pigmentaci vaječných žloutků a díky svým antioxidačním vlastnostem zlepšují oxidační stabilitu žloutkových lipidů. Karotenoidy jsou skupinou tetraterpenů, syntetizovaných z osmi izoprenových jednotek. Podle struktury se dělí na karoteny (např. β -karoten, lykopen) a xantofyly (např. lutein, zeaxantin). Dle původu se karotenoidy dělí na přírodní, které se přirozeně nacházejí v některých krmivech, pastevním porostu, a na syntetické známé pod různými obchodními názvy (např. kantaxantin jako Carophyll[®] Red). Ten je ale v Evropské unii řazen k potenciálně nebezpečným látkám pro zdraví člověka a ve Švédsku dokonce zakázán. Proto lze očekávat, že časem dojde k širšímu zákazu jeho používání. Počet spotřebitelů produktů chovu drůbeže, kteří se zajímají o podmínky chovů slepic, původ a konečnou kvalitu a jakost produktů živočišného původu, se dle aktuálních údajů stále zvyšuje. Je tedy na místě zefektivnit v současné době existující tendenci nahrazovat syntetická krmná aditiva přírodními látkami, které nezpůsobují nežádoucí vedlejší účinky, prodlužují trvanlivost živočišných produktů a mají široké spektrum vlivů na zdraví člověka jako konečného konzumenta.

2 Cíl práce a hypotéza

2.1 Cíl práce

Cílem této diplomové práce bylo vypracovat literární rešerši zaměřenou na využití karotenoidů ve výživě nosnic a jejich vliv na kvalitu vajec. Dále bylo cílem této práce poukázat na samotnou výživu kuřic a nosnic, a to v jednotlivých stupních odchovu a chovu, a zmínit vliv přírodních karotenoidů na fortifikaci vajec a zdraví člověka jako konečného konzumenta.

V návaznosti na cíle literárního přehledu této diplomové práce byly stanoveny i cíle vědeckého pokusu. Cílem pokusu bylo porovnat dvě odrůdy pšenice s rozdílným obsahem karotenoidů a dva zdroje tuku s kontrastním zastoupením mastných kyselin v krmných směsích pro nosnice a stanovit jejich vliv na užitkovost nosnic a kvalitu vyprodukovaných vajec, zejména pak zvýšení obsahu dietárních karotenoidů luteinu a zeaxantinu v lyofilizovaných vaječných žloutcích. Pozornost v rámci pokusu byla věnována i obsahu lipofilních vitaminů (α -tokoferol, γ -tokoferol a retinol) ve vaječném žloutku a jeho samotné oxidační stabilitě vyjádřené v hodnotách malondialdehydu na kilogram vaječného žloutku.

2.2 Hypotéza

Náhradou synteticky vyráběných karotenoidů mohou být karotenoidy z přírodních zdrojů. Předpokládáme, že přírodní karotenoidy z pšenice spolu se zdroji tuku v dietě nosnic ovlivní kvalitu živočišných produktů – vajec. Je známo, že lipidy mají vliv na ukládání karotenoidů do vaječného žloutku. Otázkou však zůstává, jak odlišný profil mastných kyselin dvou zdrojů tuku ovlivní retenci a využití karotenoidů ze dvou odrůd pšenice a výslednou kvalitu vajec.

3 Literární rešerše

3.1 Základy výživy nosnic

Pro fyziologicky správný tělesný vývoj, funkci organismu a produkci konzumních vajec je výživa nosnic základem každého chovu. Produkci konzumních vajec, jako hlavnímu účelu chovu slepic nosného typu, je podřízeno šlechtění, výběr vhodného systému ustájení nosnic, výživa a řízení mikroklimatických podmínek. Výživa nosnic hraje ze všech realizačních faktorů a ekonomiky chovu drůbeže jednu z nejdůležitějších rolí.

Kodeš et al. (2003) uvedli, že výživa drůbeže v tuzemských podmínkách směřuje jednoznačně k trendům platným v celé Evropské unii, což se v následujících letech potvrdilo. Jedná se o výčet těchto charakteristických rysů:

- ✓ bezpečnost potravin – ochrana zdraví lidí jako konzumentů,
- ✓ ochrana životního prostředí před biologickým znečištěním,
- ✓ welfare zvířat a jejich ochrana před škodlivými vlivy a týráním.

3.1.1 Výživa slepic nosného typu

Nosný typ slepic se krmí výhradně směsmi o sypké konzistenci. Tato forma směsi je zárukou pravidelného a úměrného příjmu živin bez překrmování, proto se jí dává přednost před směsí granulovanou. Výživa slepic nosného typu zahrnuje dva stupně: krmení v odchovu a krmení ve snášce.

3.1.2 Výživa slepic nosného typu v odchovu

Do odchovu jsou zařazovány pouze kuřičky. Období odchovu zahrnuje období od vylíhnutí kuřete po dosažení pohlavní dospělosti kuřice. Ta je charakterizována snesením prvního vejce a začátkem snáškového cyklu. Při odchovu kuřic není kladen důraz na dosažení maximálního přírůstku živé hmotnosti, ale na dosažení pohlavní dospělosti v odpovídajícím věku. Zároveň je zde žádoucí vytvoření většího tělesného rámce, který umožňuje optimální rozvoj všech orgánů potřebných pro produkci vajec. Cílem odchovu kuřic je získání odolné nosnice schopné dosáhnout vysoké užitkovosti. Nejdůležitějšími faktory ovlivňujícími věk dosažení pohlavní zralosti jsou řádný světelný režim a správné krmení (Skřivanová 2011).

Odchov kuřic se provádí do 15. – 17. týdne věku. Mezi 18. – 20. týdnem věku dosahují kuřice pohlavní dospělosti (Stupka et al. 2013). Požadovaná živá hmotnost při jejím dosažení by měla odpovídat 1,2 – 1,5 kg (Tůmová et al. 2019). Optimální věk a hmotnost kuřic

se u jednotlivých hybridních kombinací může lišit, a je tedy potřeba respektovat požadavky na podmínky prostředí a krmit dle odpovídajícího technologického postupu (Skřivanová 2011).

Výživu slepic nosného typu v odchovu lze rozdělit do tří období.

První období je obdobím nejintenzivnějšího růstu kuřic. Záměrem je vytvoření velkého tělesného rámce. Hmotnost kuřic zde není rozhodující. V těle velkého tělesného rámce je dostatek prostoru pro rozvoj výkonného trávicího a rozmnožovacího ústrojí. Prostorné tělo produkuje velká vejce. Pro toto první období je charakteristický růst zejména kostí a vysoká intenzita ukládání minerálních látek (Tůmová et al. 2019). Během prvních týdnů života je kuřice potřeba krmit s ohledem na skutečnost, že právě tyto první týdny života představují období kritické pro růst a mineralizaci kostí (Skřivanová 2011). Do věku 3 týdnů se krmí převážně *ad libitum* (podle libosti), a to nejkvalitnější krmnou směsí bohatou na dusíkaté látky. Od 4. do 9. týdne se dává krmivo o něco chudší na živiny. Bělovaječným hybridům je tato krmná směs zkrmována *ad libitum*, protože mají malý příjem krmiva. U žravějších hnědovaječných hybridů se provádí restrikce dle živé hmotnosti (Tůmová et al. 2019).

Druhé období trvá od 10. do 16. týdne věku a je charakterizováno vývinem organismu, zejména zvýšením kapacity a výkonnosti trávicího ústrojí. Toho je dosahováno především krmivem s větším obsahem balastu (Tůmová et al. 2019). Balast krmiva tvoří všechny látky, které odcházejí trusem, aniž by byly zvířetem využity a jsou to nestrávené dusíkaté látky, tuky, sacharidy, minerální látky a hlavně vláknina (Staněk 1963). Přechází se tedy na směs s nízkým obsahem dusíkatých látek a energie (viz Tabulka č. 1). Při tomto odchovu se sleduje růstová křivka kuřic a podle zjištěných skutečností (tj. váhy kuřic) se buď zvýší, nebo restrikcí sníží denní spotřeba krmiva (Kodeš et al. 2003). V případě restrikce se krmí jednou denně, nejlépe ráno a u krmítek musí být dostatek prostoru, aby mohla všechna zvířata přijímat krmivo současně. Bělovaječní hybridi se krmí *ad libitum* (Tůmová et al. 2019).

Třetím obdobím je období bezprostřední přípravy na snášku. Toto tzv. přednáškové období nastává od 16. týdne věku kuřic. Jedná se o období největšího růstu vaječnicku a vejcovodu. Z toho vyplývají i vysoké nároky na dusíkaté látky v krmivu, které jsou téměř stejné, jako bude pozdější potřeba pro produkci konzumních vajec. Proto se přechází na směs bohatou na dusíkaté látky. Rovněž se zvyšuje i obsah vápníku v krmné směsi na 2 – 2,5 %. Kuřice si tak vytvoří značnou rezervu tohoto prvku v medulárních kostech. Krmná směs se v tomto období zkrmuje *ad libitum*. Zvláště jestli jsme v předchozím období krmili restringovaně, musíme zajistit rovnoměrný příjem krmiva u všech zvířat (Tůmová et al. 2019).

Během odchovu by měly mít kuřice dostatečný krmný a napájecí prostor a musí mít k dispozici dostatečné množství čerstvé pitné vody. Kuřice se z odchovných hal přemísťují do snáškových hal přibližně 10 – 15 dnů před snesením prvního vejce (Tůmová et al. 2019).

3.1.3 Výživa slepic nosného typu ve snášce

Cílem chovu slepic nosného typu, tj. nosnic, je produkce konzumních vajec. Produkce vajec je výsledkem snášky, která vyjadřuje hlavně počet snesených vajec za určitou dobu, jejich hmotnost a kvalitu (Stupka et al. 2013). Snáška, nejdůležitější ukazatel z hlediska užitkovosti, je u slepic nosného typu poměrně vysoká. Průměrná roční snáška vajec na nosnici dosáhla v roce 2020 v zemědělském sektoru 309,7 ks, v domácím hospodářství podle odhadu ČSÚ zůstala na úrovni 180 ks vajec/nosnici/rok (MZe ČR 2022). V rámci chovu slepic nosného typu se však nehledí pouze na užitkovost, ale i na kvalitu produktu – vejce. Ztráty při výrobě konzumních vajec způsobené špatnou kvalitou skořápky celosvětově dosahují 6 až 8 %. Tyto ztráty lze omezit především zkvalitněním výživy slepic, zejména optimalizací hladiny a poměru vápníku a fosforu, výběrem vhodných zdrojů vápníku, velikostí částic vápence a řízením příjmu solí (Tůmová et al. 2019). Navíc bylo zpozorováno, že na kvalitu skořápky vajec pocházejících nejenom od starších nosnic má vliv i dodatečná suplementace hořčíku (Kim et al. 2013).

Výživa hraje velkou roli i v úpravě složení vaječného obsahu, a tedy i jeho kvality. Složením krmné směsi lze ovlivnit množství některých stopových prvků, zastoupení zdraví prospěšných esenciálních nenasycených mastných kyselin a obsah vitaminů a karotenoidů, které působí mimo jiné i jako silné antioxidanty (Tůmová et al. 2019).

Do snáškových hal jsou kuřice přemísťovány nejpozději ve věku 17 týdnů. Období od ustájení kuřic ve snáškové hale do vrcholu snášky je z hlediska výživy a následné produkce obdobím rozhodujícím (Tůmová et al. 2019). Snáška začíná zhruba v 19. týdnu věku nosnic (Kodeš et al. 2003). Růst nároků na živiny při strmě stoupající snáškové křivce na začátku snášky je rychlejší, než zvyšování příjmu krmiva, a proto se volí směs na živiny a energii co nejkoncentrovanější a osvědčuje se i její tukování nebo granulace. Do věku 30 týdnů se doporučuje krmit *ad libitum*, poté je příjem krmiva usměřován (Tůmová et al. 2019). Denní spotřeba činí u bělovaječných nosnic 100 – 115 g a u hnědovaječných nosnic 110 – 125 g krmné směsi. Průměrná spotřeba krmiva na tvorbu 1 vejce je 120 – 150 g (Stupka et al. 2013).

Na začátku snášky mají tedy nosnice vyšší požadavky na živiny (dusíkaté látky) a nižší požadavky na minerální látky (vápník), což se s přibývajícím věkem změní. Tůmová et al. (2019) uvádějí, že nejvhodnější by bylo během snášky použít více krmných směsí s klesajícím

obsahem dusíkatých látek, aminokyselin a fosforu a s rostoucím obsahem vápníku. V tomto případě pak hovoříme o tzv. fázové výživě, charakteristické využitím rozdílných směsí s rozdílným obsahem dusíkatých látek v jednotlivých obdobích snášky (viz Tabulka č. 1).

Tabulka č. 1: Potřeba živin v 1 kg krmné směsi pro kuřice a slepice nosného typu při denní spotřebě 115 g krmiva (upraveno podle Zelenka et al. 2007)

Krmná směs	K1	K2	KZK	N0	N1	N2
Týden odchovu/chovu	1. – 3.	4. – 9.	10. – 16.	17. *	do 45 týdnů	nad 45 týdnů
ME _N (MJ)	12,3	11,9	11,5	11,5	11,5	11,5
Dusíkaté látky (g)	200	185	155	165	170	162
Linolová kyselina (g)	12,5	12,5	12,5	12,5	15,0	14,0
Ca (g)	10	10	10	21**	37	39
P využitelný (g)	4,9	4,5	4,0	4,5	4,1	3,9
Mg (g)	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6

* 17. týden až 2 % snášky

** 50 % Ca v částicích o velikosti 3 – 5 mm, aby se nesnížil příjem krmiva

Nejkoncentrovanější krmná směs N1 je směsí pro období nejvyšší intenzity snášky s relativně nižším příjmem krmiva. Krmná směs N2 se zkrmuje při období nástupu přirozeného a plynulého poklesu snáškové křivky, resp. když nosnice přijímají již více krmiva, avšak o něco méně snášejí (Kodeš et al. 2003). Slepícím nosného typu se zkrmuje kompletní krmná směs, která obsahuje 15 – 17 % dusíkatých látek. Limitujícími aminokyselinami pro drůbež jsou zejména sirné aminokyseliny (methionin a cystein), a to z důvodu jejich potřeby pro růst peří.

Pro zajištění správné výživy ve snáškovém období musí být nosnicím poskytnut dostatečný krmný prostor a rovněž se nesmí zapomenout na čerstvou pitnou vodu, které mají mít nosnice dostatek (Tůmová et al. 2019). Krmné směsi musí obsahovat takové množství živin, které zajistí vysokou užitkovost nosnic při respektování genetické a individuální variability v potřebě živin a ekonomické efektivity (Stupka et al. 2013). Také ty živiny, které nejsou hlavním zdrojem energie a patří k biostimulátorům, např. vitaminy, značně ovlivňují užitkovost a zdravotní stav zvířat (Skřivanová 2011). Stejně jako u všech ostatních zvířat jsou základem výživy drůbeže biologicky významné látky – živiny. Zajištění optimální koncentrace živin

je z nutričního hlediska výslednicí záchovy, tedy živin potřebných pro základní metabolismus a produkce, tedy užítkovosti, která je u slepic nosného typu charakterizovaná formou produkce vajec. Nejdůležitější živinou, která úzce souvisí s problematikou této práce, je tuk.

3.1.4 Tuk ve výživě slepic nosného typu

Lipidy (z řeckého slova *lipos* – tučný) jsou rozmanitou skupinou přírodních látek živočišného i rostlinného původu, mezi které patří především tuky, oleje, vosky, některé vitaminy a hormony. Lipidy jsou tvořeny ze strukturních jednotek s výraznou hydrofobností. Tato vlastnost rozpustnosti, resp. nerozpustnost ve vodě, je pro tuto třídu sloučenin jedinečná. Lipidy jsou rozpustné v organických rozpouštědlech, ale ne ve vodě. Nerozpustnost ve vodě slouží jako základ pro oddělení lipidů od bílkovin a sacharidů. Klasifikaci lipidů podle vlastností acylového zbytku / skupiny a amfifilní nebo neutrální povahy uvádí Tabulka č. 2. Povrchově aktivní lipidy s amfifilní povahou (tj. polární lipidy) obsahují obě hydrofilní a hydrofobní části, čímž se výrazně liší od neutrálních lipidů (Belitz et al. 2009).

Tuky (neboli lipidy) mají několik důležitých funkcí:

- ✓ Jsou koncentrovaným zdrojem energie, poskytují přibližně 9 kcal/g (38 kJ/g).
- ✓ Vytvářejí tepelnou vrstvu pod kůží, která pomáhá udržovat tělesnou teplotu.
- ✓ Vytvářejí stavební komponenty v těle, jako např. buněčné membrány.
- ✓ Poskytují funkční složky pro mnoho metabolických procesů.
- ✓ Jsou nositelem pro příjem a vstřebávání vitaminů rozpustných v tucích.
- ✓ Významným dílem přispívají k příchuti, textuře a celkové chuti jídla či krmiva.

(Sharma 2018)

Podle Kodeše et al. (2003) plní tuky v organismu řadu funkcí, jsou nejkoncentrovanějším zdrojem energie ze všech živin, nosičem provitaminů, vitaminů, esenciálních mastných kyselin a jejich prekurzorů, uplatňují se jako stavební, strukturální složky buněk a membrán.

Tuky a oleje mají vysoký energetický obsah (viz výše) a lze je použít ke zvýšení energetického obsahu (energie) ve stravě tak, aby bylo možné uspokojit požadavek na energii u vysoce výkonných ptáků (Marounek et al. 2019). Tuky vyvolávají po určité době po požití pocit sytosti, který je vyvolán hydrolyzou na mastné kyseliny v tenkém střevě (Pánek et al. 2002). Pocity sytosti nastává až po delší době po požití a přetrvává po delší dobu. Zvíře obvykle přijímá jen takové množství směsi, aby uspokojilo svou potřebu energie (Zelenka et al. 2007). Tuk však podle Zelenky et al. (2007) zvyšuje chutnost krmiva, a tak snížení spotřeby u tukované směsi je vždy o něco menší, než odpovídá doplňkem tuku zvýšené energetické hodnotě.

Oxidací tuku v těle získává drůbež pohotovový zdroj energie, mimo to se část tuků může přímo zabudovat do tělesného přírůstku, nebo jiného produktu drůbeže (např. vejce). Tuky jako nosiče lipofilních látek (např. vitaminů, karotenoidů) zlepšují jejich transport a využití v těle. Při zpracování směsí tuky rovněž minimalizují prašnost a ztráty živin, zlepšují homogenitu směsí, jejich strukturu, barvu i chutnost (Kodeš et al. 2003). Těchto nepostradatelných vlastností lipidů je využíváno i při manipulaci nebo zpracování potravin (Sharma 2018).

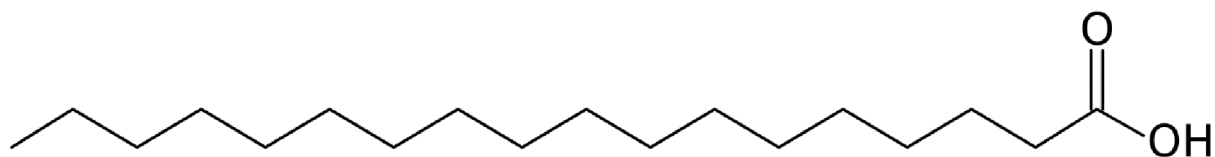
Tabulka č. 2: Klasifikace lipidů (upraveno podle Belitz et al. 2009)

A. Klasifikace lipidů podle vlastností acylové skupiny	
I. Jednoduché lipidy (nezmýdelnitelné)	
volné mastné kyseliny, isoprenoidní lipidy – steroidy, monoterpeny, karotenoidy, lipofilní vitaminy (tokoferoly, např. vitamin E)	
II. Acyl lipidy (zmýdelnitelné)	Složení
mono-, di-, triacylglyceroly	mastná kyselina, glycerol (např. tuk, olej)
fosfolipidy	mastná kyselina, glycerol/sfingosin, kyselina fosforečná, organická báze
glykolipidy	mastná kyselina, glycerol/sfingosin, mono-, di- nebo oligosacharid (např. galaktolipidy)
diolové lipidy	mastná kyseliny, etan, propan nebo butandiol
vosky	mastná kyseliny, alkohol – cetylalkohol nebo myricylalkohol (např. včelí vosk)
estery sterolů	mastná kyselina, sterol
B. Klasifikace lipidů podle neutrální nebo amfifilní povahy	
Neutrální lipidy	Polární (amfifilní) lipidy
mastné kyseliny (> C ₁₂), mono-, di-, triacylglyceroly, steroly, estery sterolů, karotenoidy, vosky, tokoferoly	glycerofosfolipidy, glyceroglykolipidy, sfingofosfolipidy, sfingoglykolipidy

Nejdůležitější lipidy ve výživě jsou triacylglyceroly (TAG, známé také jako triglyceridy). Triacylglyceroly, jako hlavní součást tuků, obsahují ve své molekule 3 stejné, 2 stejné a jednu odlišnou, nebo 3 odlišné mastné kyseliny připojené (esterifikované) k molekule glycerolu (Pánek et al. 2002; Sharma 2018). TAG tvoří až 95 % lipidů ve stravě (Sharma 2018). Tuky obsahují přibližně 90 % mastných kyselin a 10 % glycerolu. Určitá část (asi 5 – 15 %) těchto mastných kyselin není vázána na glycerol a jsou označovány jako volné mastné kyseliny. Jejich obsah v tuku musí být limitovaný a rizikovost těchto složek tuku lze částečně omezit přidáním antioxidantů (např. vitamin E) do krmných směsí (Kodeš et al. 2003).

Mastné kyseliny se skládají z uhlíkového řetězce, s karboxylovou (-COOH) skupinou na jednom konci a methylovou (-CH₃) skupinou na druhém konci. Mastné kyseliny se od sebe liší mnoha způsoby, včetně délky jejich řetězců, počtu dvojných vazeb, polohou dvojných vazeb podél řetězce a izomerickou (tj. *cis* nebo *trans*) konfigurací kolem dvojných vazeb. Díky těmto strukturálním variacím jsou fyzikální vlastnosti mastných kyselin (a lipidů, které je obsahují) rozmanité, a to ovlivňuje jejich roli v metabolismu a dopad na zdraví (Sharma 2018). Podle počtu dvojných vazeb, uvedených v závorce, se mastné kyseliny dělí na nasycené (Saturated Fatty Acid – SFA, 0), monoenoové (mononenasycené, Monounsaturated Fatty Acid – MUFA, 1) a polyenoové (polynenasycené, Polyunsaturated Fatty Acid – PUFA, 2-6).

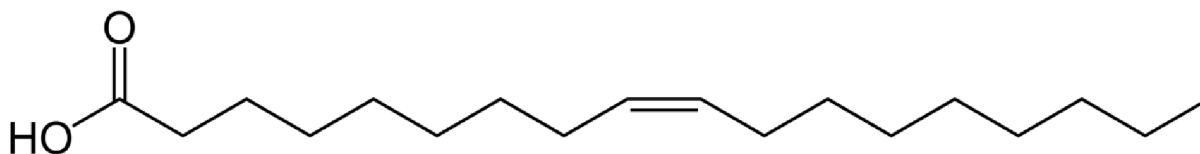
Nasycené mastné kyseliny obsahují maximální množství vodíkových atomů připojených na každý uhlík (tzn. že zde nejsou dvojně vazby) a mají tendenci být v pevném stavu při pokojové teplotě. Většina nasycených mastných kyselin ve stravě obsahuje 14, 16 a 18 uhlíků a vyskytují se v kokosovém oleji (C14, myristová kyselina), palmovém oleji (C16, palmitová kyselina) a v živočišných a hydrogenovaných tucích (C18, stearová kyselina, viz Obrázek č. 1) (Sharma 2018). Zástupcem živočišného tuku s relativně vysokým podílem nasycených mastných kyselin je vepřové sádlo. Z veškerých mastných kyselin přítomných ve vepřovém sádle připadá až 40 % na nasycené mastné kyseliny (Pánek et al. 2002).



Obrázek č. 1: Chemická struktura: nasycená mastná stearová kyselina
(Wikimedia Commons contributors)

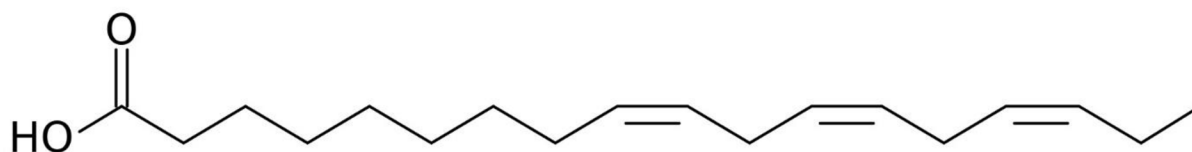
Mononenasycené mastné kyseliny obsahují jednu dvojnou vazbu. Hlavním příkladem je olejová kyselina (18:1, *n*-9, viz Obrázek č. 2), pocházející primárně z oliv a řepkového oleje.

Potravinářsky významný řepkový olej obsahuje velmi málo nasycených mastných kyselin, a naopak významné množství mononenasycených a polynenasycených mastných kyselin, včetně těch esenciálních (Sharma 2018). Belitz et al. (2009) uvedli, že řepkový olej obsahuje 63 % olejové kyseliny (*n*-9), 20 % linolové kyseliny (*n*-6) a 9 % α -linolenové kyseliny (*n*-3).

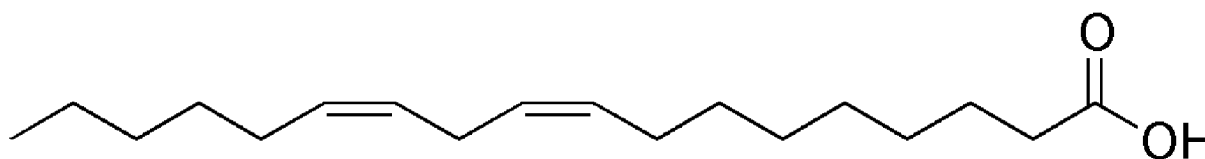


Obrázek č. 2: Chemická struktura: mononenasycená mastná olejová kyselina (*n*-9)
(Wikimedia Commons contributors)

Polynenasycené mastné kyseliny mají díky většímu počtu dvojných vazeb nejnižší bod tání ze všech druhů mastných kyselin a při pokojové teplotě jsou v kapalném stavu. Nejvýznamnější polynenasycené mastné kyseliny obsahují 18, 20 či 22 uhlíků, mají až 6 dvojných vazeb a patří do skupin *n*-3 nebo *n*-6. Polynenasycené mastné kyseliny mají první dvojnou vazbu ve směru od methylového (ω , -CH₃) konce řetězce mastné kyseliny na 3. nebo 6. uhlíku a podle toho se dělí do dvou řad: *n*-3 a *n*-6 (Marounek & Havlík 2020). Mezi *n*-3 (omega-3) mastné kyseliny se řadí α -linolenová kyselina (ALA, C18:3, viz Obrázek č. 3), eikosapentaenová kyselina (EPA, C20:5, viz Obrázek č. 6) a dokosahexaenová kyselina (DHA, C22:6, viz Obrázek č. 7). α -linolenová kyselina může sloužit rovněž jako prekurzor k syntetizaci EPA a DHA. Do skupiny *n*-6 (omega-6) mastných kyselin patří linolová kyselina (LA, C18:2, viz Obrázek č. 4), γ -linolenová kyselina (GLA, C18:3) a arachidonová kyselina (AA, C20:4, viz Obrázek č. 5). AA se může v organismu biosyntetizovat z LA.

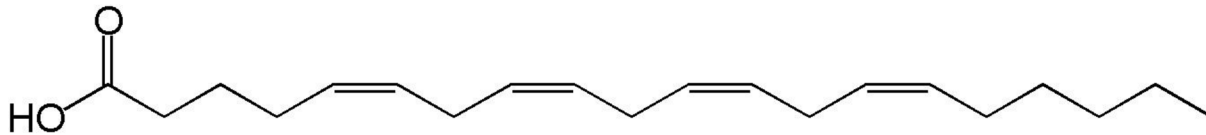


Obrázek č. 3: Chemická struktura: polynenasycená mastná α -linolenová kyselina (*n*-3)
(Wikimedia Commons contributors)

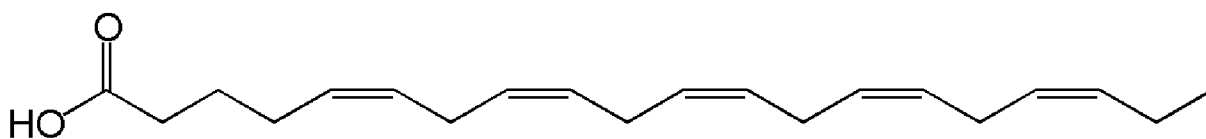


Obrázek č. 4: Chemická struktura: polynenasycená mastná linolová kyselina (*n*-6)
(Wikimedia Commons contributors)

Obsah mastných kyselin v tucích ovlivňuje stravitelnost, nenasycené mastné kyseliny jsou metabolizovány snadněji než nasycené (Skřivanová 2011), a to zvláště u mladších zvířat (Kodeš et al. 2003). Rostlinné oleje, obsahující více nenasycených mastných kyselin, jsou využívány lépe než tuky živočišného původu (Kodeš et al. 2003).



Obrázek č. 5: Chemická struktura: polynenasycená mastná arachidonová kyselina ($n-6$)
(Wikimedia Commons contributors)

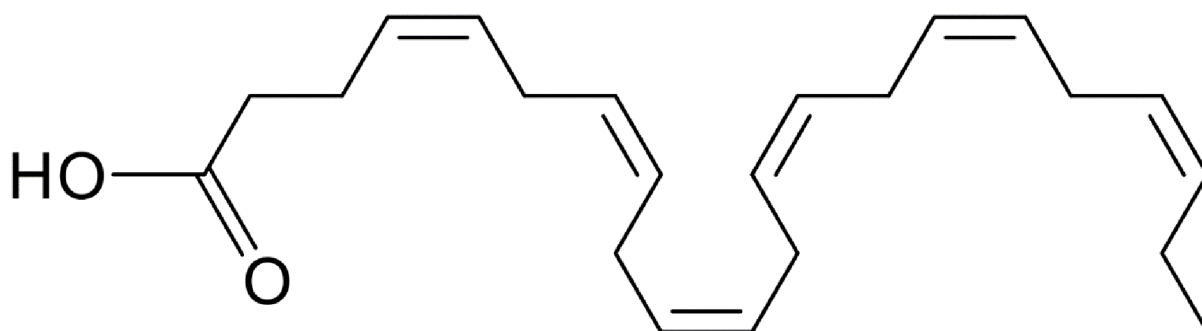


Obrázek č. 6: Chemická struktura: polynenasycená mastná eikosapentaenová kyselina ($n-3$)
(Wikimedia contributors)

Esenciálními živinami nejenom pro drůbež jsou hlavně α -linolenová kyselina ($n-3$) a linolová kyselina ($n-6$) (Kodeš et al. 2003; Zelenka et al. 2007). Neschopnost syntetizovat tyto sloučeniny nadřazené skupinám $n-3$ a $n-6$ je dána skutečností, že tělo není schopné vložit dvojnou vazbu blíže než 7 uhlíků od methylového konce mastné kyseliny. Tyto kyseliny jsou proto esenciálními mastnými kyselinami, které musí být dodávány stravou či krmivem. Když se dostanou do buňky, mohou být vystavěny do delších $n-3$ a $n-6$ mastných kyselin sekvencí desaturačních a elongačních reakcí, zahrnujících tvorbu nových dvojných vazeb a přidávání nových 2-C jednotek (Sharma 2018). Největší množství esenciálních mastných kyselin se spotřebuje na tvorbu buněčných a intracelulárních membrán, včetně membrán pokožky. Dále mají esenciální mastné kyseliny významnou úlohu při rozmnožování, při výstavbě nervových tkání a asi 1 % slouží k syntéze metabolických regulátorů zvaných eikosanoidy (Pánek et al. 2002; Sharma 2018). Do této kategorie sloučenin patří prostaglandiny, prostacykliny, tromboxany a leukotrieny. Eikosanoidy (z řec. *eikosi* = dvacet) odvozené z $n-3$ a $n-6$ skupin mastných kyselin se liší biologickou účinností a funkcí a změna rovnováhy mezi nimi může v organismu ovlivnit fyziologické procesy, např. homeostázu či zánět (Sharma 2018).

Podle švédské studie Nyberg (2017) porovnávající kvalitu vajec z různých produkčních systémů nakoupených v tržní síti bylo zjištěno, že bio vejce (tj. vejce nosnic mající přístup k travnatým výběhům) obsahují ve žloutku více DHA ($n-3$) s ochranným účinkem.

Doporučený denní příjem esenciální linolové kyseliny ($n-6$) pro dospělého člověka (25 – 50 let) je 2,5 % energie. Doporučený denní příjem esenciální α -linolenové kyseliny ($n-3$) pro dospělého člověka (25 – 50 let) je 0,5 % energie; zde se jedná pouze o odhadované hodnoty (Společnost pro výživu 2011). Dietní nerovnováha esenciálních mastných kyselin je základní příčinou mnoha onemocnění (Baucells et al. 2000). Ideální poměr $n-6$: $n-3$ mastných kyselin v lidské stravě by se měl podle doporučení snižovat; zpravidla na hodnoty nižší než 4 : 1.



Obrázek č. 7: Chemická struktura: polynenasycená mastná dokosahexaenová kyselina ($n-3$)
(Wikimedia contributors)

Tuky jsou tedy důležité nejen pro svou vysokou energetickou hodnotu, ale i pro obsah esenciálních mastných kyselin (Zelenka et al. 2007). Nenasycené mastné kyseliny, zpravidla PUFA, přítomné například v řepkovém oleji, jsou náchylnější k oxidaci, což může ovlivnit i oxidační stabilitu, resp. trvanlivost živočišných produktů jako jsou maso nebo vejce.

Podle skupenství při pokojové teplotě se lipidy dělí na tuhé tuky (např. vepřové sádlo) a kapalné oleje (např. řepkový olej). S rostoucí délkou řetězce roste bod tání tuků, s rostoucím počtem dvojných vazeb, resp. se stupněm nenasycenosti mastných kyselin zase bod tání klesá a roste polarita (a tím i rozpustnost ve vodě, resp. krevní plazmě) (Marounek & Havlík 2020). Na druhé straně ale roste i jejich náchylnost k oxidačnímu žluknutí (Pánek et al. 2002).

Z důvodu zajištění dostatečné hladiny linolové kyseliny ($n-6$) a zlepšení chutnosti a snížení prašnosti krmiva se všechny diety pro drůbež doplňují minimálně 1 % přidaného tuku, bez ohledu na další ekonomické nebo nutriční aspekty (Leeson & Summers 2005). Nutriční kvalita vajec, profil a množství mastných kyselin přítomných ve vaječném žloutku mohou být upraveny podle zdroje tuku, resp. lipidů použitých v dietě (Oliveira et al. 2010). Složení mastných kyselin ve vaječném žloutku se vždy odráží od složení mastných kyselin živočišných tuků nebo rostlinných olejů přidávaných do krmiva nosnic (Omidi et al. 2015; Lee et al. 2016). Dle Van Elswyk (1997) lze například vejce obohacená o PUFA získat obohacením krmiva pro nosnice mořskými rybími oleji nebo oleji z olejnatých semen (např. len, slunečnice, řepka),

protože tyto snadno podporují začlenění *n*-3 mastných kyselin do slepičích vajec. Přidání těchto zdrojů tuku bohatých na PUFA do krmiv pro nosnice má za cíl změnit lipidový profil vajec, což představuje vynikající marketingovou strategii pro segment těch spotřebitelů, kteří se zajímají o potraviny prospěšné lidskému zdraví (da Silva Filardi et al. 2005). Vysoký příjem *n*-3 PUFA (tj. ALA, EPA a DHA) je spojen se sníženým rizikem vzniku kardiovaskulárních onemocnění (tj. KVO) (Marckmann & Grønbaek 1999). Na druhou stranu ve výživě drůbeže často používané živočišné tuky (např. vepřové sádlo) obohacují vaječné žloutky o spíše negativní a méně prospěšné SFA. Slepice mají schopnost syntetizovat SFA, a pokud se jejich hodnoty v krmné dávce sníží, mohou slepice nedostatek těchto mastných kyselin kompenzovat (Baucells et al. 2000). Důležité je zmínit, že kromě stravy může lipidové složení vaječných žloutků ovlivnit také plemeno nebo věk nosnice (Ribeiro et al. 2007).

Ve výživě drůbeže se používá rozmanitá škála tuků a olejů: palmové tuky a oleje, rostlinné oleje, vedlejší produkty tavení (tj. sádlo, lůj), vedlejší produkty rafinace rostlinných olejů a regenerované oleje na smažení (Ravindran et al. 2016). Předpokladem efektivnosti použití tuků je jejich vysoká kvalita (Zelenka et al. 2007). Před žluknutím je potřeba tuky chránit antioxidanty (např. vitamin E, karotenoidy), které je vhodné zařadit do krmných směsí.

Lipidy se dělí na jednoduché lipidy (acylglyceroly, vosky), složené lipidy (sfingolipidy, fosfolipidy, glykolipidy a lipoproteiny) a odvozené lipidy. Odvozené lipidy jsou látky lipidické povahy, které svou strukturou ale nemohou být řazeny mezi ostatní lipidy, protože se jim pouze podobají. Do odvozených lipidů jsou řazeny steroidy (např. cholesterol, ergosterol), lipofilní vitaminy, prostaglandiny a nejdůležitější v přírodě se vyskytující barviva – karotenoidy.

3.2 Karotenoidy

„Sdružení barev a přijatelnost potravin je univerzální a vhodně zbarvené potraviny jsou vnímány se silnější intenzitou a kvalitnější vůní a chutí“ (Christensen 1983).

Již na přelomu dvacátého prvního století bylo zpozorováno, že se spotřebitelé naučili spojovat standard kvality (tj. čerstvost, chuť, nutriční hodnota) a příchuti s barvou potravin. Vizualní podněty totiž umožňují identifikaci potravy a prostřednictvím opakovaných dietních zkušeností vyvolávají očekávaný soubor orálních vjemů (Nys 2000). Kodeš et al. (2003) uvedli, že důvodem k přistoupení barvení vaječných žloutků s využitím žlutých a červených pigmentů bylo to, že většina spotřebitelů upřednostňuje jasně oranžově zbarvené žloutky vajec z domácího malochovu před zcela bílým žloutkem, který byl charakteristický pro intenzivní chovy slepic. Z pohledu konzumentů bývá kvalita vajec velmi často hodnocena právě na základě vzhledu, resp. barvy vaječného žloutku, jejíž preference se v závislosti na různých zeměpisných oblastech výrazně liší. To, jaký odstín žluté bude snesené vejce mít, závisí na množství, zdroji a polaritě karotenoidů obsažených v krmivu (Englmaierová et al. 2019).

3.2.1 Obecná charakteristika karotenoidů

Karotenoidy, zodpovědné za zbarvení tukové tkáně, vaječného žloutku, kůže a běháků u drůbeže, představují jednu z nejrozšířenějších skupin přírodních lipofilních pigmentů. Jedná se o skupinu žlutých, oranžových, červených až červenofialových vysoce nenasycených alifatických uhlovodíků a jejich oxidačních produktů. Karotenoidy patří většinou mezi isoprenoidní tetraterpeny. Terpeny, též terpenoidy, tvořící tzv. nezmýdelnitelné lipidy, jsou rozsáhlou skupinou biomolekul, strukturně odvozenou od isoprenu (Kodíček 2007).

Taxonomicky velmi rozšířené karotenoidy slouží jako pigmenty u rostlin a zvířat a jsou důvodem rozmanitých a intenzivních barev přítomných v přírodě (Klassen & Rodriguez-Valera 2010). Výzkum těchto přírodních pigmentů byl zahájen již počátkem 19. století (Nabi et al. 2020). Svůj název dostaly karotenoidy od hlavního zástupce skupiny karotenů, oranžového pigmentu β -karotenu, který byl poprvé izolován německým chemikem Wackenroderem v roce 1831 z mrkve karotky (*Daucus carota*) (Gross 1991). Následně, v roce 1837, došlo švédským chemikem Berzelieusem k první izolaci a definování karotenoidů ze skupiny xantofylů přítomných v podzimním listí (Martínez-Cámara et al. 2021). V současné době je známo více než 750 karotenoidů nacházejících se v přírodě. Celkový počet v důsledku konjugovaných dvojných vazeb, které mohou tvořit četné izomery, však přesahuje 200 000 (Olson & Krinsky 1995). Asi 50 karotenoidních sloučenin vykazuje aktivitu vitamínu A a řadí se mezi retinoidy.

V rostlinné říši jsou široce rozšířené karotenoidy syntetizovány *de novo* (lat. od počátku), a to všemi rostlinami a některými mikroorganismy (řasy, bakterie, kvasinky, plísně, houby) (Nabi et al. 2020). Zvířata, ptáci a lidé nejsou schopni syntetizovat karotenoidy *in vivo* (lat. v živém), a proto musí být tyto pigmenty doplňovány stravou (O'Byrne & Blaner 2013; Singh et al. 2015). V živočišné říši se tedy karotenoidy hromadí buď beze změny ve stravě, nebo jsou metabolicky modifikovány (Goodwin 1984). V poslední době byl zaznamenán výrazně zvýšený zájem o používání karotenoidů jako krmných složek pro drůbež díky jejich bioaktivním a zdraví prospěšným vlastnostem (Arain et al. 2018; Changxing et al. 2018).

3.2.2 Chemická struktura karotenoidů

Z chemického hlediska patří karotenoidy, lipofilní sloučeniny nerozpustné ve vodě, do rozsáhlé skupiny tetraterpenoidů. Karotenoidy jsou složeny z osmi izoprenových jednotek navázaných tak, že jednotky isoprenu jsou obráceně, a to ve středu molekuly (Nys 2000). Prekurzorem jejich biosyntézy je isopentenylpyrofosfát (Kodíček 2007). Vlastní karotenoidy se vyznačují pouze několika variantami uhlíkového skeletu: mají buď ryze alifatický řetězec, nebo řetězec zakončený jedním nebo dvěma cykly (šestičlenným nebo pětičlenným) (Douša 2009). Karotenoidy obecně sestávají z nenasyceného centrálního řetězce konjugovaných dvojných vazeb o 22 atomech uhlíku s methylovým větvením (Barreiro & Barredo 2018). Díky velkému množství dvojných vazeb se karotenoidy vyskytují v celé řadě *poly-*, *cis-* a *trans-* izomerů. V přírodě však převažují karotenoidy s „*all-trans*“ konfigurací (Marounek & Havlík 2020). Konfigurace *cis-* má nižší stabilitu a vyskytuje se jen ve dvojných vazbách nesubstituovaných metyly (Nys 2000; Douša 2009). Pigmentace těchto sloučenin a schopnost absorbovat světlo jsou výsledkem chromoforu vytvořeného sérií střídajících se dvojných a jednoduchých vazeb, kde jsou π elektrony delokalizovány po celém řetězci (Nys 2000). Důvodem charakteristické žluté až načervenalé barvy karotenoidů je schopnost polyenového řetězce pohlcovat světlo ve viditelném rozsahu vlnových délek s maximální absorpční 400 – 500 nm (Nys 2000; Barreiro & Barredo 2018). Čím více konjugovaných dvojných vazeb řetězce karotenoidů obsahují, tím jsou absorpční maxima posunuta k delším vlnovým délkám (Šesták 1985). Chemická struktura každého karotenoidu tak určuje jeho výslednou barvu, ale i fotochemické vlastnosti jeho molekuly. Ze struktury dále vyplývá i chemická reaktivita vzhledem k oxidačním agens nebo volným radikálům, které v organismu živočichů konzumujících karotenoidy v potravě hraje významnou roli (Hlúbik & Opltová 2004). Nevýhodou vysoce nenasycených řetězců karotenoidů je značná reaktivita s oxidačními činidly, které způsobují výraznou nestabilitu karotenoidů a ztrátu jejich barvy (Nys 2000).

3.2.3 Základní rozdělení karotenoidů

Karotenoidy se podle struktury dělí na dvě základní skupiny:

- ✓ velmi hydrofobní uhlovodíky – karoteny
- ✓ méně hydrofobní kyslíkaté sloučeniny odvozené od karotenů – xantofyly

(Douša 2009; Sharma 2018; Marounek & Havlík 2020).

Kyslíkaté funkční skupiny xantofylů se omezují na hydroxyl, karbonyl, karboxyl a epoxidovou vazbu. Kromě karotenoidů s konjugovanými dvojnými vazbami jsou známy i allenové karotenoidy (tj. dieny s kumulovanými dvojnými vazbami) a deriváty s trojnou vazbou (Douša 2009). Stupeň hydrofobie je důležitý, protože ovlivňuje způsob štěpení karotenoidů v lipidovém prostředí, jakým jsou membrány a lipoproteiny, což může ovlivnit jejich biologickou aktivitu (Sharma 2018). Lipofilnost karotenoidů nerozpustných ve vodě klesá zejména se vzrůstajícím počtem kyslíkových atomů v molekule (Šesták 1985).

Mezi významné zástupce první skupiny, tj. karotenů patří α -karoten, β -karoten, γ -karoten, δ -karoten a lykopen. Acyklický polynenasycený uhlovodík lykopen je nejjednodušším prototypem karotenů (Douša 2009). Lykopen, jako nejvýznamnější karotenoid rajčat, tvoří například u červenoplodých odrůd až 90 % celkového obsahu karotenoidů (Gross 1991). Uhlovodíky karoteny jsou v přírodě zodpovědné za oranžovo-červené zbarvení. Díky obsahu jednoho nebo více β -iononových kruhů jsou karoteny α -karoten, β -karoten aj. karotenoidy (např. β -kryptoxantin) významnými prekurzory retinolu. Z celkového množství karotenoidů vykazuje pouze 10 % aktivitu vitamínu A a tyto se nazývají retinoidy (Gross 1991).

Oxykarotenoidy xantofyly jsou hlavními karotenoidy rostlin. Primárně vznikají jako produkty biochemické oxidace (hydroxylace, epoxidace) karotenů. Xantofyly, způsobující zbarvení od žluté až po červenofialovou barvu, jsou nejčastější skupinou pigmentů využívaných ve výživě drůbeže. Významnými zástupci této skupiny karotenoidů jsou například astaxantin, citranaxantin, kapsantin, kapsorubin, β -kryptoxantin, lutein a zeaxantin. Synteticky vyráběné xantofyly jsou pak reprezentovány především kantaxantinem (označovaný jako Carophyll[®] Red) a ethyl-esterem kyseliny β -apo-8'-karotenové (označovaný jako Carophyll[®] Yellow).

Poměrně malou, avšak velmi významnou, skupinou xantofylů jsou apokarotenoidy. Tyto sloučeniny, tzv. degradované karotenoidy vzniklé štěpením molekuly karotenoidů, obsahují ve své molekule méně než 40 atomů uhlíku. Apokarotenoidy vykazují různé biologické funkce. Základním a nejvýznamnějším biologicky aktivním apokarotenoidem živočišných tkání je vitamín A₁ (all-*trans*-retinol, viz Obrázek č. 9) (Velíšek 1999; Velíšek & Hajšlová 2009).

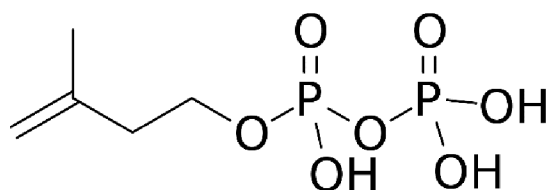
Podle uhlovodíkové struktury molekuly můžeme karotenoidy rozdělit do těchto skupin:

- ✓ karotenoidy s acyklickou strukturou (např. lykopen)
- ✓ karotenoidy s monocyklickou strukturou (např. γ -karoten, δ -karoten)
- ✓ karotenoidy s bicyklickou strukturou (např. α -karoten, β -karoten, lutein)

(Masák et al. 1992).

3.2.4 Biosyntéza karotenoidů

Biosyntéza karotenoidů v přírodě vychází z aktivované formy octové kyseliny, tzv. acetylkoenzymu A (acetyl-CoA). Postupnou kondenzací molekul acetylkoenzymu A vzniká acetoacetylkoenzym A (acetoacetyl-CoA), který je prekurzorem syntézy mevalonové kyseliny. Dekarboxylací a odštěpením vody z mevalonové kyseliny vzniká isopentenylpyrofosfát (IPP, jinak také isopentenylidifosfát), který představuje tzv. „aktivní isoprenoidní jednotku“. Z isopentenylpyrofosfátu (viz Obrázek č. 8) a jeho tautomerní formy dimethylallylpyrofosfátu je potom tvořen adičními reakcemi postupně geranylpyrofosfát (GPP), farnezylypyrofosfát (FPP) a geranylgeranylpyrofosfát (GGPP) s 20 atomy uhlíku v molekule (Procházka 1998). Zatímco u eukaryot pocházejí tyto prekurzorové molekuly z mevalonátové dráhy, u prokaryot a rostlin pocházejí z methylerytritolfosfátové dráhy (tzv. nemevalonátová dráha) (Lehmann et al. 2021). Redukční kondenzací dvou molekul geranylgeranylpyrofosfátu vzniká nejjednodušší karotenoid, resp. karoten, fytoen, který jako prekurzor tetraterpenů (tj. karotenoidů) podléhá postupně dehydrogenaci za vzniku „all-trans“ konfigurace karotenoidů (Masák et al. 1992; Vodrážka 1996; Velišek & Cejpek 2008; Velišek & Hajšlová 2009). Xantofyl lutein, přítomný hlavně v rostlinách, lze například biosyntetizovat z karotenu lykopenu, a to spolupůsobením dvou lykopenacykláz a dvou hydroxyláz (Lehmann et al. 2021)



Obrázek č. 8: Chemická struktura: isopentenylpyrofosfát

(Wikipedia contributors)

Základní syntéza karotenoidů probíhá ve vnitřní membráně chloroplastové obálky. Většina karotenoidů je však lokalizována v thylakoidech (viz dále). Nepřímou syntézu karotenoidů stimuluje světlo přes tvorbu vazebných proteinů, což vede ke snížení hladiny volných karotenoidů v místě jejich syntézy a ke zvýšení jejich tvorby (Pavlová 1996).

3.2.5 Výskyt karotenoidů

Karotenoidy se vyskytují ve všech fotosyntetizujících rostlinných pletivech, kde jsou přítomny jako fotochemicky aktivní složky plastidů – chloroplastů a chromoplastů (Velíšek 2002). Základním pigmentem, který je přítomen u všech fotosyntetizujících plastidů, je modrozelený chlorofyl *a*. U vyšších rostlin a zelených řas se vyskytuje chlorofyl *b*, u jiných skupin řas také chlorofyl *c* a chlorofyl *d*. Dále fotosyntetizující plastidy obsahují karotenoidy (tj. karoteny a xantofyly). V zelených částech rostlin však bývá přítomnost karotenoidů maskována, a to zeleným chlorofylem. Vzhledem k různým pigmentům v plastidech řas a sinic a jejich zbarvení, se v algologické literatuře používá názvu chromatofor pro plastidy, zejména když je jeden nebo jich je jen několik (Novák & Skalický 2017).

Chloroplasty (z řec. *chloros* = zelený), místa fotosyntézy, obsahují pigmenty typu chlorofylů a karotenoidů. Ty jsou vystavěny do membránového systému thylakoidů, tvořící vnitřní strukturu stromatu chloroplastu. Chromoplasty (z řec. *chroma* = barevný) jsou také pigmentové plastidy. Vyskytují se v rozmanitých tvarech, syntetizují a obsahují karotenoidy. Nabývají nejčastěji žlutého, oranžového až červeného zbarvení. Chromoplasty mohou vznikat z dříve existujících zelených chloroplastů odbouráním chlorofylu a vnitřní membránové struktury a jejich nahrazením karotenoidy. K tomuto procesu dochází například při dozrávání mnoha plodů rostlin. Vnitřní struktura chromoplastů je značně rozmanitá, karotenoidy se vyskytují v lipidových globulích, v membránových útvarech nebo také v krystalické podobě (Novák & Skalický 2017). Určitá část karotenoidů vytváří vazbu s bílkovinami, tzv. pigment-proteinový komplex, podobně jak je tomu u chlorofylů. Tyto konjugáty se obecně nazývají karotenoproteiny. Literatura uvádí, že pouze ve vazbě s bílkovinou mohou karotenoidy vykonávat základní funkce ve fotosyntéze.

Více než 90 % rostlinných karotenoidů je obsaženo v buňkách listů, a to obvykle jako směs 20 – 40 % karotenů (více než 70 % z nich tvoří β -karoten) a 60 – 80 % jejich oxidačních produktů – xantofylů. U živočichů jsou karotenoidy přítomné hlavně v povrchových tkáních (kůže, krovky, šupiny, peří, zobáky), ale též ve žloutku ptačích vajec a jako zrakové pigmenty (Vodrážka 1996). Karotenoidy živočišných tkání jsou však rostlinného původu, protože živočichové nejsou schopni syntetizovat karotenoidy *de novo*, pouze přeměňují potravou získané rostlinné pigmenty na látky odlišné struktury nebo je skladují jako látky tukové. Hlavními pigmenty depotních tuků drůbeže, ale i savců jsou xantofyly lutein a zeaxantin. Ty jsou spolu s dalšími karotenoidy, vyskytujícími se v depotním tuku slepic, hlavními pigmenty zodpovědnými za zbarvení vaječných žloutků (Velíšek 1999; Velíšek & Hajšlová 2009).

3.2.6 Ochranná funkce karotenoidů

Významnou vlastností karotenoidů jako doplňkových asimilačních barviv je ochrana fotosyntetického aparátu rostlin při nadměrném světelném ozáření. Karotenoidy napomáhají jako ostatní barviva rostlinných plastidů absorbovat energii fotonů viditelné části slunečního spektra, tj. fotonů vlnových délek 400 až 750 nm. Sluneční světlo obsahuje spojitě široký interval vlnových délek; jedná se o polychromatické záření. Karotenoidy zachycují fotony v modrozelené části spektra, tj. 400 až 500 nm. Zachycením světla rostlinným asimilačním barvivem začíná proces vlastní fotosyntézy (Jelínek & Zicháček 2000; Klouda 2016).

Nadbytečná energie absorbovaná chlorofylem *a* ve světlosběrném komplexu může vést k excitovaným stavům molekulárního kyslíku (O_2). Ten vzniká při nedostatku akceptorů elektronů, takže nakonec může excitovaný elektron vytvořit triplet chlorofylu reakčního centra, který reakcí s kyslíkem vytvoří vysoce toxický první excitovaný stav – singlet kyslíku 1O_2 (Pavlová 1996). Singletový kyslík je reaktivní forma kyslíku vznikající při různých chemických, biochemických a fotochemických reakcích (Goodwin 1986).

V rostlinách a protistech (tj. řasy, prvoci, protisté podobní houbám apod.) fungují karotenoidy jako lapače vysoce aktivního singletového kyslíku (1O_2) produkovaného během procesu fotosyntézy. Při reakci (viz rovnice níže) se generuje základní tripletový kyslík (3O_2) společně s tzv. tripletovým karotenem (3car), který rozptýluje svou energii do blízkého okolí a následně se vrací do svého základního stavu (*car*). Teprve poté je připraven pokračovat v reakci cyklickým způsobem (Bramley 1981; Goodwin 1986).



Ochranný účinek karotenoidů spočívá ve zhášení buď tripletových molekul chlorofylu, anebo bezprostředně singletového kyslíku. Velice reaktivní singletový kyslík se ve chvíli, po kterou existuje, slučuje například s nenasycenými mastnými kyselinami za vzniku nežádoucích lipidových peroxidů (Pavlová 1996). Například ve studii Dixit et al. (1983) byla peroxidace lipidů, měřená v epidermálních mikrosomech u pokusných potkanů, výrazně inhibována samotnou přítomností karotenoidu β -karotenu. V rostlinách mají karotenoidy mnoho biochemických rolí, včetně důležité funkce sběru světla, fotoprotekce a prevence fotodynamické senzibilizace chlorofylů. (Nys 2000). Metoda fotoprotekce využívá přírodních karotenoidů za účelem vytvoření ochrany před škodlivými účinky slunečního záření. Fotoprotekce souvisí s délkou chromoforu obsaženého v molekule karotenoidu, jež musí obsahovat minimálně 9 konjugovaných dvojných vazeb (Masinovskij & Věchet 1986).

3.2.7 Antioxidační funkce karotenoidů

Antioxidanty mohou být definovány jako všechny biologicky aktivní látky, které inhibují, resp. zpomalují, zabraňují a odstraňují oxidační poškození cílové molekuly nebo jako látky, které snižují oxidační stres způsobený reaktivními formami kyslíku (ROS) a nestabilními sloučeninami produkovanými vlastními těly organismů v reakci na environmentální stresy (Halliwell 2007; Abd El-Baky & El-Baroty 2013; Arain et al. 2018).

Reaktivní forma kyslíku je typ nestabilní molekuly, která obsahuje kyslík a snadno reaguje s jinými molekulami v buňce. Reaktivní formy kyslíku neboli ROS (Reactive Oxygen Species) spolu s reaktivními formami dusíku neboli RNS (Reactive Nitrogen Species), patří do skupiny tzv. volných radikálů, které se významně podílejí na vzniku oxidačního stresu.

Volný radikál je typ nestabilní molekuly, která vzniká jednak při běžném buněčném metabolismu (tj. chemických reakcích probíhajících v buňkách) a jednak působením některých vnějších faktorů (např. ultrafialové záření, ionizující záření, cigaretový kouř nebo toxiny v životním prostředí) (NZIP 2023). Volný radikál, obsahující jeden nebo více nepárových elektronů, je schopný nezávislé existence. Příkladem je vodíkový radikál (H), hydroxylový radikál (OH), superoxidový radikál (O_2^-) a oxid dusnatý (NO) (Sharma 2018). Mezi neradikálové formy ROS se pak řadí peroxid vodíku (H_2O_2). Přítomnost nepárových elektronů dělá volné radikály nestabilní a některé, zejména hydroxylové radikály, jsou vysoce reaktivní.

Volné radikály lze stabilizovat několika způsoby. Většina z nich však zahajuje řetězovou reakci, která může poškozovat buňky, pokud se jí nezabrání nebo pokud se neukončí (Sharma 2018). Volné radikály, hromadící se v buňkách, mohou poškozovat DNA, RNA i proteiny, a tím se podílet na vzniku zhoubných nádorů, srdečně-cévních onemocnění, cévní mozkové příhody a dalších onemocnění, které souvisejí se stárnutím (NZIP 2023).

Ve vyšších organismech jsou upřednostňovaným cílem ROS buněčné tuky, konkrétně MUFA a PUFA nacházející se v membránových lipidech. U těch dochází nejprve, díky jejich nenasycenosti, ke žluknutí (tj. oxidaci) a poté k nalepení na stěny arterií, čímž vzniká kornatění tepen – ateroskleróza. Volné radikály se tak podílejí na vzniku srdečně-cévních onemocnění, Alzheimerovy nemoci, demence a řady dalších chronických onemocnění (Jopp 2014).

V různých oddílech v těle existuje mnoho antioxidantů, jež hrají ochrannou a antioxidační roli. Obecně je antioxidant jakákoli látka, která významně opoždí nebo brání oxidaci cílové látky, většinou tím, že se sama oxidační (Sharma 2018). Z endogenních antioxidantů jsou těmi nejvýznamnějšími vitamin C, vitamin E, flavonoidy a karotenoidy.

Karotenoidy jako antioxidační látky, snižují pravděpodobnost vzniku ROS tvořených při fotochemických reakcích, omezují jejich aktivitu nebo je převádí do nereaktivních stavů (Ginter 1998). Karotenoidy mohou chránit buněčné membrány a plazmatické lipoproteiny proti lipidovým volným radikálům a kůži a oči proti škodlivým účinkům UV záření (Sharma 2018). Ochrana buněk a organismů obecně před oxidačním poškozením spočívá ve schopnosti karotenoidů zhaset volné radikály (především alkylperoxylové radikály v lipidech) (Gross 1991). Singletový kyslík dokáží karotenoidy tzv. „zchladit“ tím, že pohltí jeho excitační energii. Z tohoto pohledu se za hlavní karotenoid považuje β -karoten. Studie Greenberg (1996) ukázala, že suplementace β -karotenu (50 mg/den) minimalizuje úmrtnost na srdečně-cévní onemocnění. Suplementace vysokých dávek β -karotenu však může na druhou stranu působit i prooxidačně, a podporovat tak tvorbu nestabilních ROS (Procházková et al. 2011; NZIP 2023).

Schopnost karotenoidů zhaset volné radikály je ovlivněna přítomností polárních funkčních skupin (tj. karbonylových a hydroxylových) stejně jako počtem konjugovaných dvojných vazeb. Nejvíce efektivním antioxidantem je karotenoid lykopen s jedenácti konjugovanými dvojnými vazbami. Karoteny s jedenácti konjugovanými dvojnými vazbami jsou aktivnějšími zhasěči než xantofyly (Miller et al. 1996). Pořadí antioxidační aktivity karotenoidů určili tito autoři jako následující: lykopen > β -kryptoxantin \approx β -karoten > lutein \approx zeaxantin > α -karoten > astaxantin \approx kantaxantin. Díky konjugovaným dvojným vazbám a prodloužené struktuře je lykopen nejúčinnější karotenoid chránící buňky před oxidačním poškozením způsobeným ROS (Arain et al. 2018). Kromě toho lykopen také zlepšuje produkci antioxidačních endogenních enzymů, jako je superoxid dismutáza, glutathiontransferáza a chinonreduktáza (Sahin et al. 2013). Schopnost karotenoidů luteinu a zeaxantinu pohlcovat singletový kyslík je hlavním ochranným mechanismem makuly oka působícím proti oxidačnímu poškození vyvolaným modrou částí spektra slunečního záření (Alves-Rodrigues & Shao 2004; Ma & Lin 2010). Dle Sharma (2018) je klíčovou vlastností karotenoidů také jejich schopnost spolupracovat i s dalšími antioxidanty, např. vitaminy C a E a glutationem.

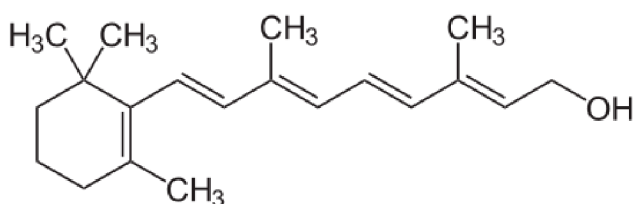
Ve výživě drůbeže se pro doplnění krmiv využívá přírodních a synteticky vyráběných antioxidantů. Přírodní antioxidanty jsou široce distribuovány ve fotosyntetických organismech a jejich produktech, jako jsou byliny, ovoce a zelenina (Nabi et al. 2020). Účinnými látkami jsou v tomto kontextu hlavně přítomné karotenoidy, které mají široké uplatnění ve výživě drůbeže. Antioxidační vlastnosti těchto látek zmírňují tepelný stres zvířat, podporují jejich zdraví a prodlužují trvanlivost vyprodukovaných živočišných produktů – masa a vajec. Navíc mají některé karotenoidy i významnou provitaminovou aktivitu, resp. aktivitu vitamínu A.

3.2.8 Karotenoidy jako prekurzory vitamínu A

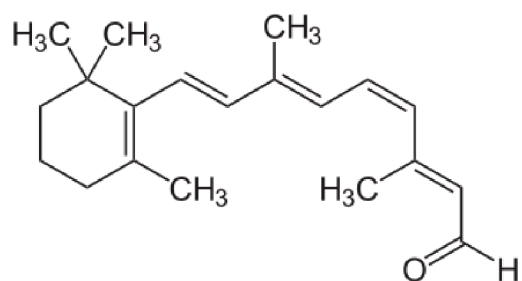
Jednou z nejdůležitějších funkcí karotenoidů je aktivita vitamínu A, resp. schopnost působit jako prekurzory tohoto vitamínu. Provitamin neboli neaktivní prekursor vitamínu je sloučenina stojící na počátku biosyntetické dráhy určitého metabolitu – aktivního vitamínu (Kodíček 2007). Důležitosti karotenoidů jako hlavního zdroje vitamínu A si odborníci na výživu poprvé uvědomili až v roce 1957, kdy vědec Thomas Moore přesvědčivě dokázal, že karotenoid β -karoten je u savců jednoznačně prekurzorem vitamínu A (Severinghaus 1958). Retinolovou aktivitu vykazuje v současné době asi 50 přirozeně se vyskytujících sloučenin ze skupiny karotenoidů. Z celkového množství karotenoidů nacházejících se v přírodě vykazuje pouze 10 % aktivitu vitamínu A a tyto karotenoidy se nazývají retinoidy (Gross 1991).

Vitamin A je isoprenoidní lipofilní, tzn. v tucích rozpustný, vitamin (Kodíček 2007). Dle Sharma (2018) rozumíme pod názvem „vitamin A“ všechny složky, které mají retinolovou aktivitu a zahrnují: retinol (all-*trans*-retinol, vitamin A, viz Obrázek č. 9), retinal (11-*cis*-retinal, aktivní forma vitamínu A, viz Obrázek č. 10), retinovou kyselinu, β -karoten a další karotenoidy s provitaminovou aktivitou. Za provitamin A lze považovat jakýkoli karotenoidní pigment obsahující ve své molekule alespoň jeden nesubstituovaný β -iononový kruh. Zbýlý konec molekuly může být cyklický i necyklický (Hencken 1992; Send & Sundholm 2007).

Běžná forma retinolu – all-*trans*-retinol obsahuje hydrouhlíkový řetězec s nezměněným β -iononovým kruhem na jednom konci a alkoholovou skupinou na druhém konci. Jeho dehydrogenační produkt 11-*cis*-retinal má zásadní význam v biochemii vidění (Kodíček 2007). Vitamin A plní řadu fyziologických funkcí, genovou transkripci, vidění, imunitní roli apod. (Marounek & Havlík 2020). Vitamin A se nalézá pouze v živočišné potravě; mezi jeho dobré zdroje patří játra, vejce, maso, mléko, mléčné výrobky, tučné ryby a rybí oleje (Sharma 2018). Z rostlinných zdrojů vitamínu A pak hovoříme hlavně o jeho prekurzorech – karotenoidech.

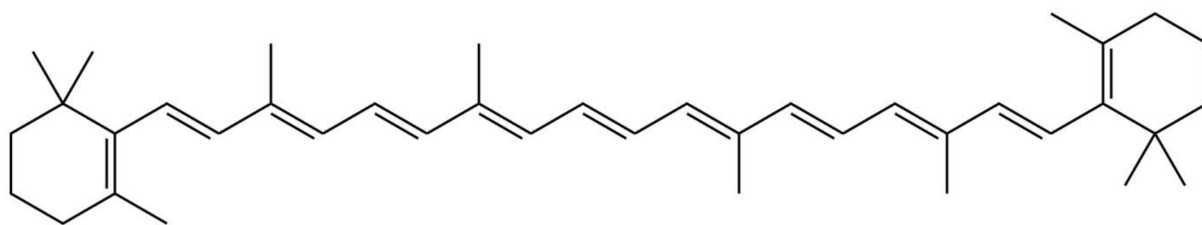


Obrázek č. 9: Chemická struktura:
vitamin A (all-*trans*-retinol)
(Wikimedia contributors)



Obrázek č. 10: Chemická struktura:
vitamin A (11-*cis*-retinal)
(Wikimedia contributors)

U většiny savců, ale i ptáků a ryb, jsou prekurzory vitamínu A transformovány na *all-trans*-retinol. Nejvyšší schopnost konverze na účinný vitamin A má β -karoten (Tang 2014). β -karoten (viz Obrázek č. 11) je nejznámějším a nejvýznamnějším prekurzorem vitamínu A (Morton 1957). Přeměna β -karotenu na vitamin A se uskutečňuje ve sliznici tenkého střeva. Při trávení vznikají z jedné molekuly β -karotenu (symetrickým štěpením slizničním enzymem 15,15'-dioxxygenázou) dvě molekuly retinalu. Z ostatních provitaminů A se štěpením vytváří pouze jedna molekula retinalu. Retinal je reverzibilně redukován retinol-dehydrogenázou na *all-trans*-retinol, který je biologicky aktivním apokarotenoidem živočišných tkání (Stenesh 1989; Velíšek & Hajšlová 2009; Sharma 2018). Na vznik 1 mg vitamínu A je potřeba 12 mg β -karotenu nebo dvojnásobek α -karotenu či γ -karotenu (Harrison 2005).



Obrázek č. 11: Chemická struktura: karotenoid β -karoten (karoten)

(Wikimedia Commons contributors)

Za prekurzory vitamínu A jsou v zásadě považovány karotenoidy α -karoten, β -karoten a β -kryptoxantin (Nicolle et al. 2003; Nabi et al. 2020). Xantofyly nejsou prekurzory vitamínu A u savců, ale u nižších zvířat (např. ptáků), a to z důvodu schopnosti těchto zvířat je reduktivně metabolizovat na β -karoten, který se pak převádí na aktivní vitamin A (Goodwin 1986).

Dietní karotenoidy podávané drůbeži jsou tedy možnými prekurzory vitamínu A bez (α -karoten, β -karoten) nebo s (β -kryptoxantin, citranaxantin, ethyl-ester kyseliny β -apo-8'-karotenové, zeaxantin a kantaxantin) pigmentační schopností (Hencken 1992). Vztah mezi aktivitou vitamínu A a účinností zbarvení karotenoidů však není přímočarý. Karotenoidy s vysokým obsahem aktivity vitamínu A mají obecně velmi nízkou pigmentační schopnost; v případě přeměny na vitamin A pak ztrácejí své pigmentační vlastnosti úplně (Hencken 1992; Hammershøj et al. 2010). Karotenoidy lutein, violaxantin a neoxantin nemají žádnou aktivitu vitamínu A. Xantofyl lutein vykazuje dobrou pigmentační a antioxidační kapacitu (Nys 2000).

Doporučený obsah vitamínu A by se měl v 1 kg krmné směsi pro drůbež pohybovat v rozmezí 9 – 13 tis. m. j. (Zelenka et al. 2007). V případě splnění požadavku na vitamin A u nosnic výživou, je přebytek β -karotenu uložen ve vaječném žloutku, který pak lze pokládat za dobrý zdroj tohoto provitaminu, resp. vitamínu A pro člověka (Hammershøj et al. 2010).

3.2.9 Protizánětlivá funkce karotenoidů

Záněť je biologická obranná reakce tkáně na řadu škodlivých podnětů, jako je poranění, poškození buněk nebo přítomnost patogenu (Ferrero-Miliani et al. 2007). Do poraněného místa pronikají leukocyty a prosakuje tam ve zvýšené míře krevní plazma (NZIP 2023). Rubin et al. (2012) ve své studii uvedli, že suplementace karotenoidů (lykopen, lutein, β -karoten) ve stravě zvyšuje plazmatickou koncentraci karotenoidů, a tak snižuje zánětlivou reakci organismu.

3.3 Metabolismus a efektivita ukládání karotenoidů u drůbeže

Karotenoidy, široce rozšířené pigmenty zodpovědné za svítivě červenou, oranžovou nebo žlutou barvu, sehrávají důležitou roli i u hmyzu, koryšů nebo ptáků (Marounek & Havlík 2020). Drůbež a ostatní ptáci, resp. organismy neschopné fotosyntézy, neumí syntetizovat karotenoidy *de novo*, a proto je musí získávat přímo z potravy (del Val et al. 2009; Englmaierová et al. 2019). U těchto živočichů jsou karotenoidy přítomné hlavně v povrchových tkáních (kůže, peří, zobáky), ale také ve žloutku nebo jako zrakové pigmenty (Vodrážka 1996). Charakteristickou vlastností ptáků je převládající akumulace xantofylů s téměř úplným vyloučením karotenů ve všech tkáních kromě oční sítnice (Brush 1981; Goodwin 1984; Nys 2000).

Karotenoidy přijaté z potravy jsou jako ostatní mikroživiny rozpustné v tukách vstřebávány v horních částech gastrointestinálního traktu, tj. v horní polovině tenkého střeva (Borel 2003). První fází procesu trávení je rozpuštění karotenoidů v tukové fázi potravy. Tato fáze je emulgována do lipidových kapiček v žaludku a dvanáctníku (lat. *duodenum*) (Borel et al. 1996; Tyssandier et al. 2003). Postupným procesem trávení se karotenoidy začleňují spolu s dalšími lipidy do tzv. směsných micel, nezbytných pro jejich absorpci enterocytem (Borel 2003). Směsné micely jsou směsí fosfolipidů, cholesterolu, produktů trávení lipidů a žlučových solí. Čím více lipidové mikroživiny je začleněno do micely, tím je vyšší její absorpční účinnost (tzn. biologická dostupnost) (Reboul 2013). V micelách uložené karotenoidy jsou absorbovány v duodenu a jejunu (lat. *jejunum* = lačník) pasivně prostou difúzí (Hollander & Ruble 1978) nebo s pomocí membránových přenašečů (Kiefer et al. 2002). Hodnoty absorpce xantofylů se velmi liší, především díky jejich rozmanitosti ve stravě (Reboul 2013).

Hlavním místem ukládání karotenoidů u drůbeže je tuková tkáň, vaječný žloutek, kůže a běháky. Účinek pigmentace karotenoidů je závislý na stravitelnosti, absorpci, přenosu, metabolismu, vylučování, ukládání v cílové tkáni a jejich barevném odstínu, který se do značné míry liší samotným zdrojem karotenoidů. Efektivita ukládání karotenoidů z krmiva do žloutku je velmi variabilní a odvíjí se také od jejich polarity (Nys 2000; Englmaierová et al. 2019).

Absorbce a přeměna oxykarotenoidů – kyslíkatých xantofylů u ptáků významně ovlivňuje jejich pigmentační účinnost (Nys 2000). Díky hydroxylové skupině na konci struktury jsou xantofyly výrazně polární, resp. hydrofilnější než hydrofobní karoteny (Chung et al. 2004). Například ve vztahu k β -karotenu je xantofyl lutein snadněji absorbován a efektivněji uložen (van het Hof et al. 1999). Efektivita ukládání je tedy mnohem vyšší u xantofylů obsahující alespoň jeden atom kyslíku v své molekule (Englmaierová et al. 2019). Na druhou stranu jsou xantofyly méně stabilní a snadněji podléhají oxidaci. Jejich ztrátám během skladování lze zamezit přidávkem jiných antioxidantů (např. vitamin E) (Zelenka et al. 2007). Nižší efektivita ukládání je u nepolárních uhlovodíkových karotenů. Jako příklad lze uvést β -karoten, u něhož byla zaznamenána efektivita ukládání pouze 0,5 % (Englmaierová et al. 2019).

Hlavním a nejrozšířenějším karotenoidem přítomným v drůbeží plazmě je xantofyl lutein. V séru různých ptačích druhů byly nalezeny také zeaxantin, β -kryptoxantin, astaxantin a kantaxantin (Negro & Garrido-Fernández 2000; McGraw et al. 2006). Lutein a zeaxantin jsou nosnicemi stejně dobře absorbovány a uloženy ve vaječném žloutku. Metabolismus astaxantinu u drůbeže kontrastuje s metabolismem zeaxantinu; zeaxantin se u drůbeže vstřebává 3× lépe než astaxantin (Schiedt et al. 1985; Jamroz et al. 2010). Nepřítomnost β -karotenu v krevní plazmě ptáků (i po jeho dodatečné suplementaci) byla potvrzena studií Jamroz et al. (2010).

Biologická dostupnost xantofylů může být zvýšena, když jsou v potravě přijímány společně s jinými lipidy (Nys 2000; Unlu et al. 2005). Hamilton (1992) uvedl, že nasycené mastné kyseliny s krátkým řetězcem a nenasycené mastné kyseliny s dlouhým řetězcem podporují absorpci luteinu. Ve studii Huyghebaert (1993) vyvolal 6% dietní přídavek tuku až trojnásobné zvýšení ukládání luteinu do tkáně kuřat v porovnání s kontrolní skupinou bez přidaného tuku. Suplementační efekt karotenoidů ze sušených rajčat (na úrovni 2,5 %, 5,0 % a 7,5 %) spolu s *n*-3 PUFA zajistil ve studii Panaite et al. (2019) zlepšení barevného skóre vaječných žloutků nosnic, a navíc významně snížil oxidaci přítomných žloutkových lipidů.

Ve vaječnicích dospělých nosnic bývá lokalizováno 50 % celkového tělesného zeaxantinu a až 80 % celkového tělesného kantaxantinu (Nys 2000). Dle Schiedt et al. (1985) se 20 % uloženého zeaxantinu vyloučí ve vaječném žloutku. Vaječný žloutek má velmi dobrou schopnost akumulovat karotenoidní pigmenty. U nosnic se depozice karotenoidů ve žloutku pohybuje od 14 % pro astaxantin, přes 25 % pro lutein a zeaxantin, až do 30 – 40 % pro kantaxantin (Hencken 1992). Samotná depozice xantofylů je u nosnic rychlá (48 hodin po požití), ale pro získání jednotné barvy celého žloutku je zapotřebí období přibližně asi 10 dnů (Marusich & Bauernfeind 1981).

3.4 Zdroje karotenoidů

Díky četným zdravotním přínosům, antioxidačním, protizánětlivým a imunomodulačním účinkům jsou karotenoidy v současné době předmětem velkého zájmu potravinářského a krmivářského průmyslu (Guerin et al. 2003; Rao & Rao 2007). Barviva neboli pigmenty, mezi které patří i zmiňované karotenoidy, jsou řazena mezi doplňkové látky krmných směsí. Jejich použití do krmiv pro zvířata v České republice závazně podléhá zákonu č. 209/2019 Sb., kterým se mění zákon č. 91/1996 Sb., o krmivech, ve znění pozdějších předpisů.

Ve výživě drůbeže mají karotenoidy velmi dobré uplatnění. Karotenoidy doplněné do krmných směsí pro drůbež zlepšují nejen produkční výkonnost a zdraví chovaných nosnic, ale také zvyšují oxidační stabilitu a kvalitu vyprodukovaných vajec a v neposlední řadě barvu vaječných žloutků (Langi et al. 2018). O imunomodulačních schopnostech karotenoidů jako antioxidantů svědčí snížená pigmentace v celém těle a vysoká míra vymizení karotenoidů z krevního řečiště zvířat během období imunitního stresu (Hamelin & Altemueller 2012).

Pigmenty, které účinně přispívají ke zbarvení žloutku, by měly ve své struktuře obsahovat minimálně jednu kyslíkovou skupinu. Kolísání barevné účinnosti závisí na složení rostlinného zdroje xantofylu a na jeho stabilitě a biologické dostupnosti (Nys 2000; Reboul 2013).

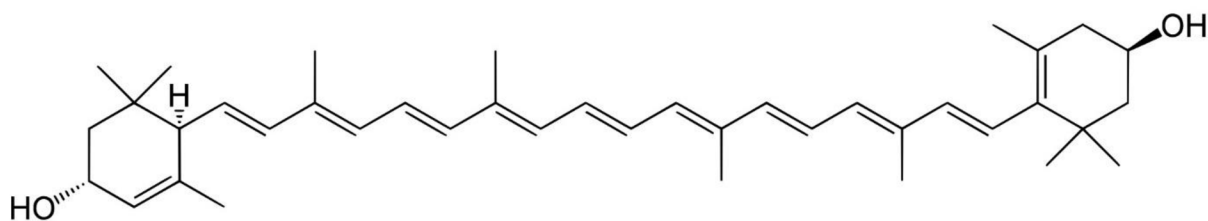
Podle původu dělíme karotenoidy na přírodní a syntetické.

3.4.1 Přírodní karotenoidy

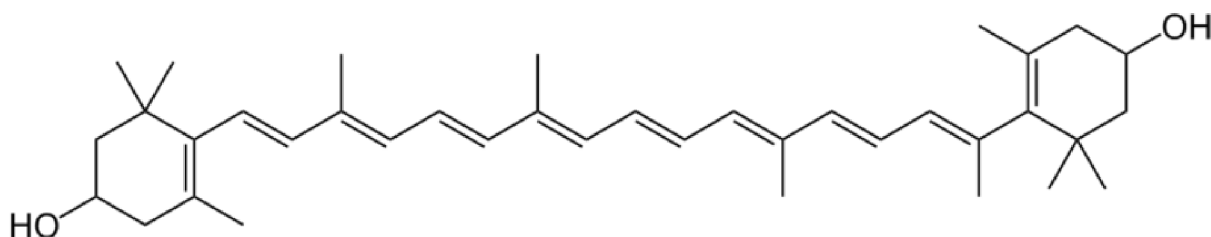
Zdrojem přírodních karotenoidů pro drůbež jsou nejčastěji jednotlivé komponenty nebo doplňkové látky krmných směsí. U nosnic přispívají ke zbarvení vaječného žloutku výhradně rostlinné xantofyly, tj. karotenoidy obsahující ve své molekule alespoň jeden atom kyslíku. Tyto karotenoidy jsou v přírodě běžně zodpovědné za žluté až červenofialové zbarvení.

Mezi hlavní a nejčastěji používané přírodní karotenoidy ve výživě nosnic chovaných v tradičních komerčních podmínkách patří xantofyly lutein (viz Obrázek č. 12) a zeaxantin (viz Obrázek č. 13). U těchto tzv. oxykarotenoidů byla zaznamenána efektivita ukládání z krmiva do vaječných žloutků na úrovni 25 % (Hencken 1992). Dalšími důležitými přírodními karotenoidy, se kterými se můžeme v současném moderním sektoru chovu drůbeže setkat, jsou xantofyly astaxantin, β -kryptoxantin, citranaxantin, kantaxantin, kapsantin a kapsorubin.

Lutein a zeaxantin mají téměř identické chemické vzorce; jediný rozdíl mezi nimi je v umístění dvojnás vazby v jednom z koncových šestičlenných cyklů (jedná se o izomery). Tento rozdíl poskytuje luteinu tři chirální centra, zatímco zeaxantin má pouze dvě.



Obrázek č. 12: Chemická struktura: karotenoid lutein (xantofyl)
(Wikimedia Commons contributors)



Obrázek č. 13: Chemická struktura: karotenoid zeaxantin (xantofyl)
(Wikimedia Commons contributors)

Karotenoidy lutein a zeaxantin jsou žlutooranžové rostlinné pigmenty přítomné v mnoha druzích barevného ovoce, tmavě zelené zeleniny, zejména té listové (např. kapusta, špenát), kukuřici, ale také v živočišných tkáních a ve vaječném žloutku (Ortiz et al. 2021).

Lutein a zeaxantin jsou dva hlavní karotenoidy nacházející se v makule (Sharma 2018). Makula (z lat. *macula lutea* = žlutá skvrna) je místo na oční sítnici, kde je největší hustota čípků, a tedy i nejostřejší vidění. Zvýšení příjmu luteinu a zeaxantinu ve stravě u lidí je spojeno se zlepšením zrakových funkcí (viz kapitola 3.9.1). Jejich denní příjem v množství 5 – 10 mg/den může chránit makulu a vnější segmenty sítnice před oxidačním stresem a snížit riziko věkem podmíněné makulární degenerace (Ma et al. 2016; Lawler et al. 2019; Wilson et al. 2021). Například lutein získaný z vajec obohacených o lutein poskytuje více biologicky dostupného luteinu pro člověka, než ostatní doplňky nebo špenát (Chung et al. 2004).

Možnými variantami, jak obarvit vaječný žloutek a zvýšit tak příjem zdraví prospěšných antioxidantů v něm přítomných, je použití některého z přírodních zdrojů vyjmenovaných karotenoidů, jakými jsou například: aksamitník vzpřímený (*Tagetes erecta*), tollice vojtěška (*Medicago sativa*), kopřiva dvoudomá (*Urtica dioica*), stévie sladká (*Stevia rebaudiana*), kukuřice setá (*Zea mays*), brukev sítinovitá (*Brassica juncea*), konopí seté (*Cannabis sativa*), bazalka pravá (*Ocimum basilicum*), tymián obecný (*Thymus vulgaris*), rakytník řešetlákový (*Hippophae rhamnoides*), mrkev obecná (*Daucus carota*), paprika setá (*Capsicum annuum*), lilek rajče (*Solanum lycopersicum*), zelená mikrořasa *Chlorella vulgaris* atd.

3.4.1.1 Aksamitník vzpřímený (*Tagetes erecta*)

Jedním z nejlepších zdrojů přírodních žlutých a oranžových karotenoidů je aksamitník vzpřímený (*Tagetes erecta*), v literatuře známý též jako lékařský, aztécký, mexický, africký („afrikán“) nebo velký měsíček. Aksamitník se pěstuje komerčně a jeho dehydratované okvětní lístky nebo extrakt z květů se významně používají ve výživě drůbeže nejen k barvení vaječných žloutků (Nys 2000). Hlavním karotenoidem přítomným v aksamitníku je lutein, zodpovědný za žluté zbarvení (Hamelin & Altemueller 2012). Extrakt z květů afrikánu ve formě Avizant[®] Yellow 20 HS je efektivním a finančně nenáročným zdrojem přírodních karotenoidů v krmných směsích pro slepice (Englmaierová et al. 2019). Ve studii od Skřivana et al. (2016) bylo zjištěno, že dávka afrikánu jako zdroje přírodních karotenoidů v množství 350 mg/kg zvýší obsah luteinu (o 230 %) a zeaxantinu (o 250 %) ve žloutku a tím zajistí zvýšení tmavosti barvy (8 až 9 stupeň dle DSM). Mimo to přídavek afrikánu zlepšil i stabilitu žloutkových lipidů. Efekt extraktu z květů afrikánu je vhodnou alternativou ke komerčně vyráběným syntetickým karotenoidům, avšak intenzita zbarvení žloutků se jim nevyrovná (Englmaierová et al. 2019). Příkladem dalšího obchodního zdroje přírodních karotenoidů pocházejících z aksamitníku vzpřímeného je ORO GLO[®] s obsahem 15 g/kg nebo 20 g/kg těchto xantofylových barviv.

3.4.1.2 Tolice vojtěška (*Medicago sativa*)

Dobrým zdrojem esenciálních mastných kyselin (zejména linolové kyseliny, *n*-6), vitaminů, minerálů a přírodních karotenoidů, který se odráží v mase a ve vejcích nosnic, je tolice vojtěška (*Medicago sativa*), mezinárodně známá také jako alfalfa (Grela et al. 2014; Hammershøj & Johansen 2016). Vojtěška je komerčně dostupné krmivo bohaté na živiny. Vzhledem k vysokému obsahu vlákniny (24,1 %) a relativně nízké hodnotě metabolizovatelné energie (5024 kJ/kg) se ve výživě drůbeže používá především dehydratovaná (sušená) vojtěška (Jiang et al. 2012; Englmaierová et al. 2019). Převládajícím xantofylem ve vojtěšce je lutein (45 – 75 %), následovaný zeaxantinem (4 – 6 %) a β -kryptoxantinem (1 – 7 %) (Nys 2000). Vojtěška má velice dobrý pigmentační účinek (Leeson & Caston 2004). Jako možný přírodní zdroj jmenovaných karotenoidů zvyšuje jejich koncentraci ve vaječných žloutcích (Karadas et al. 2007). Ve studii od Englmaierové et al. (2019) se dehydratovaná vojtěška v použitém množství 40 g/kg potvrdila jako velice dobrý zdroj karotenoidů (včetně cenného β -karotenu s provitaminovou aktivitou), které se ukládají ve vaječných žloutcích. Kromě toho bylo zjištěno, že vyšší obsah antioxidantních karotenoidů ve žloutcích vajec pocházejících od nosnic krmených přídavkem dehydratované vojtěšky v dietě snižuje náchylnost žloutkových lipidů

k oxidaci (Englmaierová et al. 2019). Tolice vojtěška navíc obsahuje i velké množství saponinů (2 – 3 %) s prokázanými hypocholesterolemickými, antikarcinogenními, protizánětlivými a antioxidačními účinky (Ponte et al. 2004).

3.4.1.3 Pastevní porost

Velice bohatým zdrojem přírodních karotenoidů je čerstvá zelená pastva. Pastevní porost složený z různých druhů bylin, trav a jetelovin se liší obsahem přítomných karotenoidů, mastných kyselin a aromatických sloučenin, což má za následek vejce s různou barvou, složením mastných kyselin a smyslovými vlastnostmi (Hammershøj & Johansen 2016). Zelená pastva a v ní obsažené xantofyly velmi dobře ovlivňují barvu vaječných žloutků (Guil-Guerrero et al. 2003). Nosnice s přístupem na pastvu navíc produkují vejce s vysokým obsahem PUFA řady *n*-3 a α -tokoferolu (Lopez-Bote et al. 1998; Hammershøj & Johansen 2016). Lyofilizovaná mladá tráva obsahuje převážně lutein (128 mg/kg sušiny), zeaxantin (115 mg/kg sušiny) a β -karoten (79 mg/kg sušiny). Rovněž je i dobrým zdrojem α -tokoferolu (vitamin E, 75 mg/kg sušiny), který se spolu s karotenoidy přítomnými v pastevním porostu podílí na snižování náchylnosti PUFA k oxidaci, a prodlužuje tak oxidační stabilitu žloutkových lipidů. Vejce (60g) nosnic, které mají přístup do pastevního výběhu, vykazují významně vyšší hodnoty koncentrací luteinu (0,48 mg), zeaxantinu (0,36 mg) a β -karotenu ve srovnání s vejci nosnic, které přístup do pastevního výběhu nemají (Skřivan & Englmaierová 2014). V případě pastevního porostu jako přírodního zdroje karotenoidů je ale nutné mít na paměti, že kvalita porostu a s ním související obsah karotenoidů se během roku výrazně mění (Englmaierová et al. 2019).

3.4.1.4 Kopřiva dvoudomá (*Urtica dioica*)

Hned z několika hledisek může být díky svým zvláštním vlastnostem alternativní volbou kopřiva dvoudomá (*Urtica dioica*). Tato rostlina se jeví jako nákladově efektivní zejména v našich regionech mírného pásma, kde by bylo možné ji i místně pěstovat (Loetscher et al. 2013). Kopřiva dvoudomá má vysoký obsah *n*-6 esenciální linolové kyseliny (29,6 – 40,7 %) a žlutých karotenoidních pigmentů (Guil-Guerrero et al. 2003; Hammershøj & Johansen 2016). Převládajícími karotenoidy v kopřivě jsou lutein (366 – 525 mg/kg), následovaný β -karotenem (100 – 111 mg/kg) a zeaxantinem (23 – 60 mg/kg) (Loetscher et al. 2013). Obsah karotenoidů v kopřivových listech se podobá složení karotenoidů v trávě nebo vojtěšce a s věkem rostlin se zvyšuje (Guil-Guerrero et al. 2003; Hammershøj & Johansen 2016). Ve studii Loetscher et al. (2013) vedl přídavek sušených a mletých kopřivových rostlin do krmných směsí pro nosnice ke zvýšení barvy vaječného žloutku. Experimentálně nejvyšší přídavek na úrovni

25 g/kg zvýšil barevné skóre žloutku na hodnotu 6 RYCF (Roche Yolk Color Fan). Kopřiva se běžně vyskytuje ve většině slepičích výběhů. Důvodem toho, že se jí slepice vyhýbají, je přítomnost žahavých chlupů – trichomů. Jejich výskyt se sníží až téměř úplně vytratí teprve po sklizni v procesu několikahodinového sušení (Hammershøj & Johansen 2016).

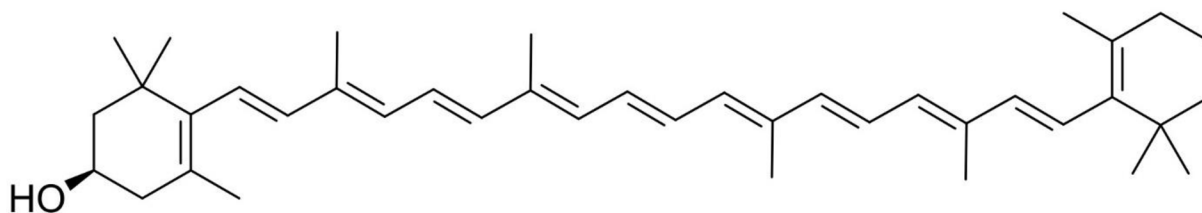
3.4.1.5 Stévie sladká (*Stevia rebaudiana*)

Dobrým zdrojem karotenoidů se při dlouhodobém podávání ukázala i stévie sladká (*Stevia rebaudiana*). Suplementace slepičích diet stévií (celkový obsah karotenoidů 55,8 µg/g) zvýšila obsah karotenoidů a parametr žlutosti (b*) vaječných žloutků (Pirgozliev et al. 2022).

Speciální alternativou přírodních zdrojů karotenoidů mohou být biofortifikované plodiny pěstované na orné půdě. Biofortifikace je nákladově velice efektivní proces, při kterém se zvyšuje koncentrace základních zdraví prospěšných živin v plodinách prostřednictvím agronomického zásahu nebo genetického výběru (tj. šlechtěním) rostlin (White & Broadley 2005; Bouis & Saltzman 2017). Například v reakci na nedostatek vitamínu A v lidské populaci v rozvojových zemích podpořil jeden z programů společnosti HarvestPlus proces přirozené biofortifikace kukuřice za účelem zvýšení hladiny provitaminu A (Saltzman et al. 2013).

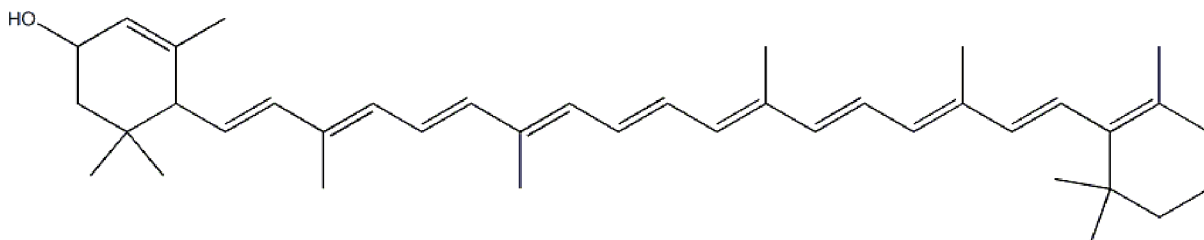
3.4.1.6 Kukuřice setá (*Zea mays*)

Kukuřice setá (*Zea mays*) je dobrým zdrojem karotenoidů; obsahuje 10 % karotenů a 90 % xantofylů (Nys 2000). Celková koncentrace xantofylů v kukuřici se pohybuje v rozmezí 20 – 48 mg/kg (Marusich & Bauernfeind 1981). Mezi hlavní karotenoidy kukuřice patří lutein, zeaxantin, β-kryptoxantin (viz Obrázek č. 14) a zeinoxantin (viz Obrázek č. 15). Možnou variantou, jak obarvit vaječné žloutky je použití speciálně biofortifikované kukuřice. Například ve studii Liu et al. (2012) zvýšila kukuřice biofortifikovaná o xantofyl β-kryptoxantin obsah tohoto karotenoidu a také finální barvu vaječných žloutků. Jedinečná bipolární povaha β-kryptoxantinu totiž umožňuje jeho snadné uložení do vaječného žloutku, čímž dochází ke zvýšení barvy, a navíc i cenné provitaminové aktivity (Liu et al. 2012).



Obrázek č. 14: Chemická struktura: karotenoid β-kryptoxantin (xantofyl)

(Wikimedia Commons contributors)



Obrázek č. 15: Chemická struktura: karotenoid zeinoxantin (xantofyl)
(Chemical Book)

3.4.1.7 Pšenice setá (*Triticum aestivum*)

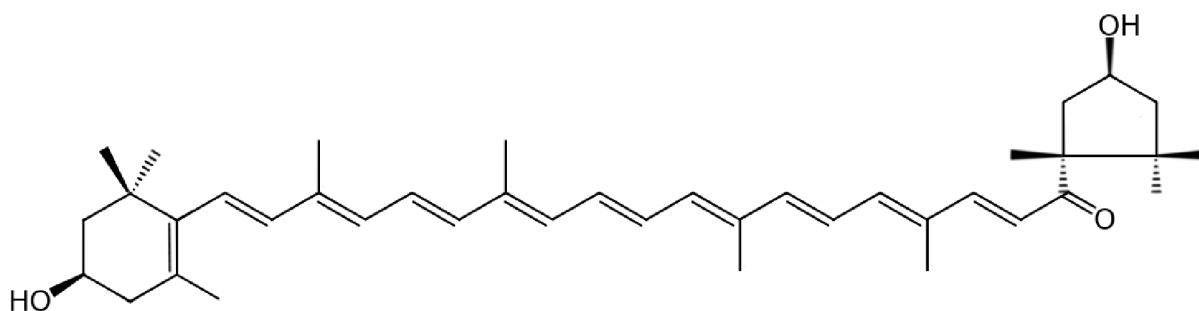
Pšenice setá (*Triticum aestivum*) jako jedna z nejrozšířenějších obilnin představuje více než 1/4 produkce polních potravinářských plodin (hned po kukuřici a rýži) a téměř 2/3 denního energetického příjmu lidské populace v několika rozvojových zemích (Wang et al. 2011). S tímto faktem se pojí skutečnost, že nutriční hodnota pšenice významně ovlivňuje lidské zdraví (Chatzav et al. 2010; Wang et al. 2011). Biofortifikace pšenice minerálními živinami je velmi úspěšná (Gunes et al. 2007) a na světě má zatím nejrozšířenější využití. V experimentální části této diplomové práce byla biofortifikovaná pšenice odrůdy PEXESO se zvýšenou koncentrací karotenoidů luteinu a zeaxantinu porovnávána s běžnou pšenicí odrůdy TERCIE v přítomnosti dvou zdrojů tuku s kontrastním zastoupením mastných kyselin v krmných směsích pro nosnice. Obě tyto odrůdy pšenice byly speciálně vyšlechtěny českou firmou Selgen, a.s.

3.4.1.8 Mrkev obecná (*Daucus carota*)

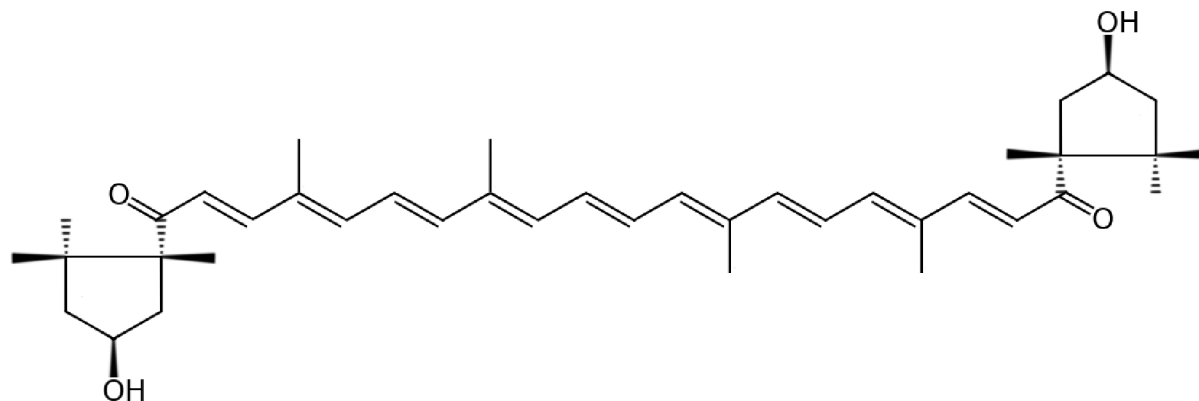
Mrkev obecná (*Daucus carota*) je kořenová zelenina bohatá na minerály, vlákninu, sacharidy, antioxidační flavonoidy, většinu esenciálních mikroživin a především β -karoten (Sharma et al. 2012). Nekvalitní a z tržní sítě vyřazené části mrkve mohou být díky své nízké ekonomické hodnotě použity jako zdroj karotenoidů v krmivu pro zvířata (Panaite et al. 2021). K významnému zvýšení obsahu karotenoidů a barvy vaječných žloutků vedl experiment Hammershøj et al. (2010) s barevnými odrůdami mrkve. Žluté a červené odrůdy mrkve obsahují hlavně červené karoteny α -karoten a β -karoten a žluté xantofyly lutein a zeaxantin. Fialové odrůdy mrkve obsahují navíc modrofialové antokyany. Krátkodobý doplněk barevné mrkve do diety nosnic zvýšil celkovou koncentraci karotenoidů ve vaječném žloutku na úroveň o 25 – 75 % výše než u nosnic, které mrkvi krmeny nebyly. Z jednotlivých karotenoidů se zvýšily hlavně lutein a β -karoten. Nejlepší účinek byl zaznamenán u fialové odrůdy mrkve, která měla nejvyšší koncentraci luteinu a β -karotenu. Nevýhodou β -karotenu bohužel ale je, že u drůbeže nepřispívá k pigmentaci tak, jako xantofyly (Goodwin 1986; Nys 2000).

3.4.1.9 Paprika setá (*Capsicum annuum*)

Paprika setá (*Capsicum annuum*) je bohatým zdrojem karotenoidů v rozmezí od 0,3 do 3,2 g/100 g sušiny (Arimboor et al. 2015). Paprikové prášky vyrobené z vybraných odrůd papriky obsahují převážně růžová a červená barviva kapsantin (viz Obrázek č. 16), kapsorubin (viz Obrázek č. 17) a oleoresin. Z komerčně vyráběných produktů se nabízí například KEM GLO™ s obsahem těchto xantofylových barviv na úrovni 5 g/kg. Aby byla zajištěna dobrá skladovatelnost, je potřeba tyto nestabilní paprikové karotenoidy chránit před oxidačním poškozením (Leiterman 2020). K požadovanému zbarvení vaječných žloutků by měla být papriková barviva používána společně s jinými zdroji žlutých barviv (např. ORO GLO®).



Obrázek č. 16: Chemická struktura: karotenoid kapsantin (xantofyl)
(Laboratoř optické spektroskopie)

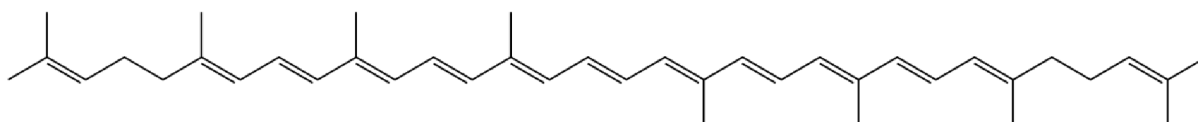


Obrázek č. 17: Chemická struktura: karotenoid kapsorubin (xantofyl)
(Laboratoř optické spektroskopie)

3.4.1.10 Lilek rajče (*Solanum lycopersicum*)

Mezi červená barviva rostlinného původu patří i karotenoid lykopen (viz Obrázek č. 18), zodpovědný za červenou barvu rajčat (*Solanum lycopersicum*). U červenoplodých odrůd rajčat tvoří lykopen až 90 % celkového obsahu karotenoidů (Gross 1991). Lykopen je velice silným antioxidantem; využívá se jako průmyslový antioxidant v tučných matricích (Englmaierová

et al. 2019; Marounek & Havlík 2020). Lykopen neobsahuje β -iononovou strukturu, a proto nemá aktivitu vitamínu A. K požadovanému dosažení oranžové barvy žloutků je nutné doplnit červený lykopen jiným zdrojem pigmentů žluté barvy (např. z aksamitníku). Účinnost přenosu lykopenu do žloutku ze stravy je 4 až 6 krát nižší než u luteinu (Karadas et al. 2007).



Obrázek č. 18: Chemická struktura: karotenoid lykopen (karoten)

(Wikimedia Commons contributors)

3.4.1.11 *Chlorella vulgaris*

Autotrofní zelená mikrořasa *Chlorella vulgaris* (z řec. *chloros* = zelený a lat. *ella* = malá) obsahuje vysokou koncentraci karotenoidů luteinu a zeaxantinu (Skřivanová et al. 2017). Díky významnému obsahu červených karotenoidů kantaxantinu (360 mg/kg) a astaxantinu (550 mg/kg) výrazně zvyšuje zbarvení vaječných žloutků (Gouveia et al. 1996). Ve studii Englmaierové et al. (2013) bylo potvrzeno, že sušená řasa *Chlorella vulgaris* je vhodným zdrojem karotenoidů, který až čtyřnásobně zvyšuje koncentraci luteinu a zeaxantinu ve žloutcích a také oxidační stabilitu žloutkových lipidů. Potenciálními zdroji karotenoidů se v moderní výživě drůbeže ukázaly být i mikrořasa *Nanochloropsis oculata* (Fredriksson et al. 2006), mořská zelená řasa, resp. sinice *Spirulina platensis* (Zahroojian et al. 2011), nebo na astaxantin bohatá červená kvasinka *Phaffia rhodozyma* (Elwan et al. 2019).

Pro dosažení přiměřené pigmentace vaječných žloutků se vyžaduje přítomnost alespoň 15 mg xantofylů na 1 kg krmné směsi (Zelenka et al. 2007).

Xantofyly přírodního původu si v nynější době získávají velkou oblibu u těch spotřebitelů živočišných produktů, kteří odmítají používání syntetických látek ve výživě hospodářských zvířat. V souladu s tímto trendem se rozšiřuje počet lidí, kteří se zajímají o produkci biologicky aktivních a zdraví prospěšných funkčních potravin. V současné době testované zdroje přírodních karotenoidů jsou však bohužel dražší než ty syntetické, a proto nejsou pro praktické aplikace ekonomicky proveditelné. Výjimkou může být volný chov slepic s přístupem na přirozenou pastvu. Ten však zvýší náklady, kterým se producent a v závěrečné fázi i konečný spotřebitel pochopitelně vyhýbá. Nejčastěji používaným přírodním zdrojem xantofylů luteinu a zeaxantinu do krmných směsí pro nosnice chované v obohacených klecích je extrakt z květů afrikánu (např. Avizant[®] Yellow 20 HS), který je i ekonomicky nejprijatelnější alternativou.

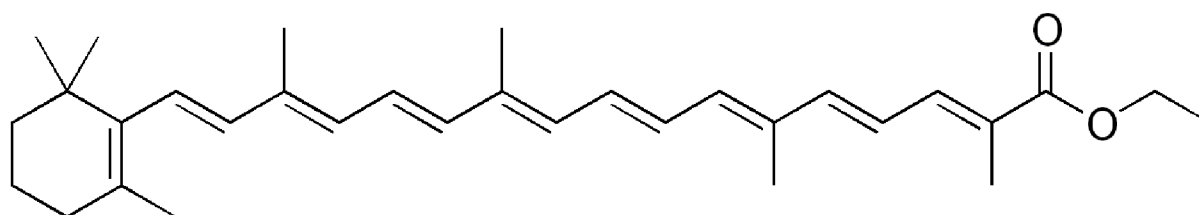
3.4.2 Syntetické karotenoidy

Pro dosažení tmavšího zbarvení vaječných žloutků volí výrobci cestu použití specifických krmných přísad se žlutými nebo červenými karotenoidy z umělých zdrojů (Ortiz et al. 2021). Syntetické karotenoidy jsou chemickou syntézou uměle vyráběná barviva. Mezi synteticky vyráběné karotenoidy často používané v intenzivních chovech drůbeže patří ethyl-ester kyseliny β -apo-8'-karotenové, citranaxantin a kantaxantin (Vincent et al. 2017). Tyto syntetické xantofyly jsou zodpovědné za žluté nebo červené zbarvení. Jejich nevýhodou je, že neposkytují zdravotní přínosy spojené s makulárními karotenoidy, tj. luteinem a zeaxantinem (Ortiz et al. 2021). Rovněž použití těchto syntetických karotenoidů do krmných směsí pro nosnice představuje pro producenty vajec značné náklady (Hernández-Velasco et al. 2014).

Podle barvy dělíme syntetické karotenoidy na žluté a červené.

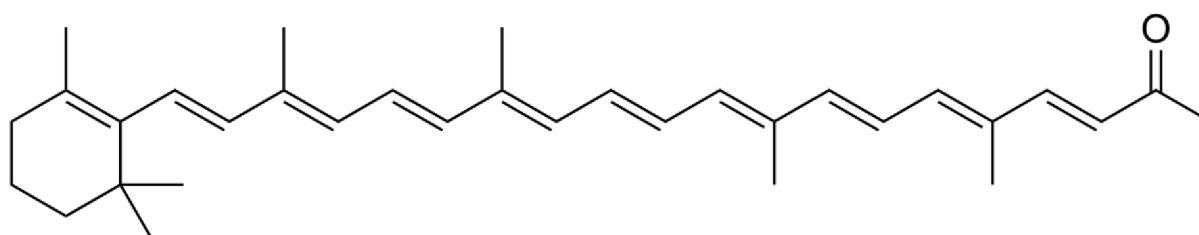
3.4.2.1 Žluté syntetické karotenoidy

Mezi žluté synteticky vyráběné karotenoidy patří β -apo-8' ethylester kyseliny karotenové, zkráceně apoester (viz Obrázek č. 19) a citranaxantin (viz Obrázek č. 20). Apoester byl poprvé nalezen a izolován z kukuřice; citranaxantin pak z citrusové kůry (Nys 2000).



Obrázek č. 19: Chemická struktura: β -apo-8' ethylester kyseliny karotenové (xantofyl)

(Wikipedia contributors)



Obrázek č. 20: Chemická struktura: karotenoid citranaxantin (xantofyl)

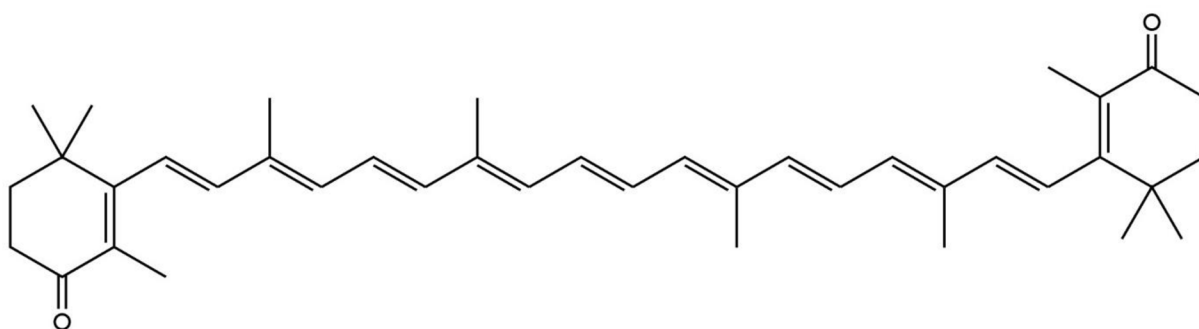
(Wikimedia Commons contributors)

Žlutě barvící β -apo-8' ethylester kyseliny karotenové je velice aktivním xantofylem s velkou kapacitou barvení, avšak nízkou provitaminovou aktivitou. Je součástí malé skupiny degradovaných karotenoidů, tzv. apokarotenoidů s méně než 40 atomy uhlíku v molekule.

V intenzivních chovech drůbeže se tento karotenoid využívá pod obchodním názvem Carophyll[®] Yellow nebo Lucantin[®] Yellow k barvení vaječných žloutků. Carophyll[®] Yellow 10% obsahuje 10 % ethylesteru kyseliny β -apo-8'-karotenové (Englmaierová et al. 2019). Rychlost depozice a výsledná barvicí kapacita žlutého xantofylu citranaxantinu je v porovnání s ostatními synteticky vyráběnými karotenoidy poměrně nízká (Marusich & Bauernfeind 1981).

3.4.2.2 Červené syntetické karotenoidy

Skupina červených synteticky vyráběných karotenoidů je reprezentována svým nejrozšířenějším zástupcem – kantaxantinem (viz Obrázek č. 21). V krystalické podobě byl kantaxantin poprvé izolován z jedlé červené houby *Cantharellus cinnabarinus* z čeledi liškovitých (*Cantharellaceae*) (Haxo 1950). Jeho historicky první syntéza v laboratoři pak proběhla z β -karotenu (Petracek & Zechmeister 1956). Kantaxantin je v přírodě široce rozšířeným xantofylem zodpovědným za červené zbarvení řady druhů hub, zelených řas, bakterií, koryšů, ryb apod. Přítomnost kantaxantinu v peří vodních druhů ptáků (např. plameňáků) je vysvětlována jeho vysokou koncentrací v různých druzích členovců – koryšů a určitých řas, jimiž se jmenovaní ptáci ve volné přírodě výhradně živí (Nys 2000).



Obrázek č. 21: Chemická struktura: karotenoid kantaxantin (xantofyl)

(Wikimedia Commons contributors)

Kantaxantin je velmi efektivní karotenoidní pigment vhodný pro získání žádaného žlutooranžového odstínu vaječného žloutku. Získání tohoto odstínu (> 10 RYCF) je možné až v případě, jestliže je červený kantaxantin smíchán s jiným zdrojem žlutého pigmentu (Nys 2000). Již Marusich & Bauernfeind (1981) uvedli, že přídavek kantaxantinu v množství 2 až 4 mg/kg k rostlinným žlutým xantofylům (10 – 20 mg/kg) zajistí dostatečné zbarvení žloutku (12- 15 RYCF). Dle Grashorn (2016) se téměř 37 % až 50 % přijatého kantaxantinu ukládá ve žloutku. V intenzivních chovech drůbeže se tento karotenoid využívá pod obchodním názvem Carophyll[®] Red nebo Lucantin[®] Red k barvení vaječných žloutků. Komerčně vyráběný Carophyll[®] Red 10% obsahuje 10 % kantaxantinu (Englmaierová et al. 2019).

Na úrovni Evropského společenství byl kantaxantin schválen a povolen Evropskou komisí, a to jako syntetické barvivo v krmivech pro zvířata za podmínek stanovených v Nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 1831/2003 ze dne 22. září 2003 o doplňkových látkách používaných ve výživě zvířat. Kantaxantin (sestavající především z *all-trans*- β -karoten-4,4'-dionu a malého množství dalších karotenoidů) je tak jedním z povolených syntetických karotenoidů. Použití tohoto barviva je omezeno na barvení štrasburských párků (v potravinářství) a jako přídavek do krmiv za účelem dosažení výraznějšího zbarvení masa lososů, pstruhů, kuřat a zbarvení vaječných žloutků ve vejcích pro přímou spotřebu nebo ve vejcích sloužících pro další potravinářské zpracování. Přídavek do krmiv je regulován směrnicí Komise 2003/7/ES ze dne 24. ledna 2003, kterou se mění podmínky pro povolení kantaxantinu v krmivech v souladu se směrnicí Rady 70/524/EHS ze dne 23. listopadu 1970 o doplňkových látkách v krmivech. Maximální povolený obsah kantaxantinu v krmivu pro nosnice je 8 mg/kg. Nosnice krmené doplňkem syntetického červeného kantaxantinu vykazují výrazněji zbarvený vaječný žloutek (European Commission 2002). Použití synteticky vyráběného kantaxantinu v potravinářství přesto v České republice povoleno není.

Kantaxantin byl několikrát posuzován Společným výborem odborníků FAO / WHO pro potravinářská aditiva (JECFA) a Stálým výborem pro potraviny (SCF); naposledy v roce 2000. Kantaxantin je jediný karotenoidní pigment, pro který bylo stanoveno přijatelné denní množství (ADI) 0,03 mg/kg tělesné hmotnosti/den. Na základě dostupných údajů je ochrana finálního spotřebitele (tj. konzumenta) zajištěna tzv bezpečnou koncentrací kantaxantinu, které odpovídá maximální možná dávka 8 mg kantaxantinu na 1 kg krmiva pro nosnice.

Množství synteticky vyráběných karotenoidů je v krmných směsích pro nosnice omezené. Důvodem je jejich prokázaný negativní účinek na lidské zdraví (Breithaupt 2007). Maximální obsah ethylesteru kyseliny β -apo-8'-karotenové a kantaxantinu v krmných směsích pro nosnice uvádí Evropský úřad pro bezpečnost potravin (EFSA). Množství použitého kantaxantinu by nemělo v krmných směsích překročit 8 mg/kg a bezpečná dávka apoesteru je pro nosnice taktéž 8 mg/kg (EFSA 2014; EFSA 2016). Příčinou zavedení těchto maximálních limitních množství je hromadění a tvorba krystalických usazenin v sítnici oka u lidí, kteří přijímají vysoké množství syntetických karotenoidů, především kantaxantinu, ve své stravě (Geoffrey & Felix 2008). Specifickou oční toxicitu související s depozicí tohoto pigmentu v oku zkoumalo i několik studií na makacích jávských (*Macaca fascicularis*), nejčastěji používaných laboratorních opicích (Buser et al. 1994; Goralczyk et al. 1997). Bylo také uvedeno, že k tvorbě krystalů může docházet i u osob s již existujícími očními komplikacemi, jako je například věkem podmíněná

makulární degenerace (EFSA 2010). Z tohoto důvodu je synteticky vyráběný kantaxantin v Evropské unii řazen k potenciálně nebezpečným látkám pro zdraví člověka.

Ve výživě drůbeže se synteticky vyráběné karotenoidy ethylester kyseliny β -apo-8'-karotenové a kantaxantin řadí mezi často používaná krmná aditiva. Jejich použití efektivně přispívá ke zvýšení pigmentace vaječných žloutků a zlepšuje oxidační stabilitu žloutkových lipidů, resp. trvanlivost (Skřivan et al. 2016) Vzhledem k nízké ceně a také nižším aplikačním dávkám zaručují tyto syntetické karotenoidy, na rozdíl od volného chovu nosnic s přístupem k pastevnímu porostu nebo jiných přírodních zdrojů karotenoidů, standardnost barvy vaječného žloutku, a to v průběhu celého roku (Skřivanová et al. 2017; Englmaierová et al. 2019).

Výpočet využití přírodních nebo syntetických karotenoidů z krmiva nosnic a jejich retence, resp. procenta uložení do vaječného žloutku je možné vypočítat z následující rovnice.

$$\text{Účinnost depozice karotenoidů} = \frac{\text{produkce karotenoidů ve vejcích (A)}}{\text{spotřeba karotenoidů krmivem (B)}} * 100 (\%)$$

A = hmotnost žloutku (g) × koncentrace karotenoidů ve žloutku ($\mu\text{g/g}$) × produkce vajec (%)

B = spotřeba krmiva (g/den/pták) × koncentrace karotenoidů v krmivu ($\mu\text{g/g}$)

(Karadas et al. 2007).

Použití syntetických karotenoidů není povoleno v ekologickém zemědělství (Skřivan et al. 2016). V některých zemích, např. ve Švédsku, jsou syntetické karotenoidy pro dané použití zakázané úplně (Roberts 2004), a proto lze očekávat, že časem dojde k širšímu zákazu jejich používání. V současné době existuje tendence nahrazovat syntetická krmná aditiva přírodními látkami získávanými z rostlin (Dufossé 2006; Skřivan et al. 2016). To je odůvodněno nízkou toxicitou přírodních látek, resp. přírodních karotenoidních barviv ve srovnání se špatnou biologickou rozložitelností a riziky rakoviny a kožních poruch souvisejících se syntetickými barvivy (Tsuda 2001). Je tedy na místě výše zmíněnou tendenci zefektivnit a upřednostňovat látky z přírodních zdrojů, které svou přítomností nezpůsobují nežádoucí vedlejší účinky, naopak ale přirozeně prodlužují trvanlivost živočišných produktů a mají široké spektrum pozitivních vlivů na zdraví člověka jako konečného konzumenta.

Tokoferoly mohou existovat v osmi stereoizomerických formách, protože CH₃ skupiny, které jsou připojené k C2, C4 a C8 na konci, jsou asymetrické. Přírodní α -tokoferol (vyskytující se např. v zeleninových olejích, olejích z pšeničných klíčků, celozrnných cereáliích, ořechách, semínkách, mase, vejcích atd.) je ve formě přírodní, zatímco syntetický α -tokoferol je stejná směs všech osmi možných stereoizomerů. Tato směs se nazývá *all-rac- α -tokoferol* a má pouze přibližně polovinu biologické aktivity přírodní formy α -tokoferolu (Sharma 2018).

Díky přeměně na tokoferoxylový radikál hraje vitamin E důležitou roli v prevenci a oddálení oxidace lipidů a mastných kyselin, řízené tvorbou kyslíkových radikálů (Meluzzi et al. 2000). V lipidovém prostředí v těle v buněčných membránách a lipoproteinech je vitamin E hlavním antioxidantem. Na základě své struktury a rozpustnosti v tucích hraje hlavní úlohu v udržování integrity, stability a funkce buněčných membrán (Sharma 2018). Průměrný obsah vitamínu E ve vaječných žloutcích představuje 2,3 mg/100 g vejce (Pirkwieser et al. 2022). S tímto obsahem vejce významně přispívají ke splnění odhadovaného denního příjmu 12 – 15 mg vitamínu E pro dospělé člověka (25 – 50 let) (Společnost pro výživu 2011).

Kromě uvedených nejdůležitějších vitaminů jsou vejce i hlavním zdrojem cholinu. Ten je koncentrován přednostně ve vaječném žloutku (680 mg/100 g ve žloutku, 1 mg/100 g v bílku) (Patterson et al. 2008). Konzumace dvou vajec denně pokrývá 10 – 30 % potřeby vitaminů pro člověka. Obsah vitaminů rozpustných v tucích ve vaječném žloutku je vysoce závislý na stravě nosnic (Réhault-Godbert et al. 2019). Výživou nosnic je možné obohatit vejce o lipofilní vitaminy (tj. A, D, E, K) nebo vitaminy rozpustné ve vodě (např. B1, B2, B5, B7, B9, B12). Obsah vitamínu A ve vejcích lze zvýšit 10× (přídavek 30 000 IU, resp. 750 μ g retinolu) oproti původní hodnotě; obsah vitamínu D3 15× (přídavek 2 500 – 15 000 IU, resp. 62,5 – 375 μ g D3) oproti původní hodnotě. Obsah vitamínu E ve vaječném žloutku je možné zvýšit 3 – 20× v závislosti na obsahu v základní stravě a případném přídavku dietního doplňku vitamínu E (Bouvarel et al. 2011). Vitamin E je jedním z nejdůležitějších vitaminů, protože zlepšuje funkčnost konzumních vajec a jejich důležitou nutriční hodnotu (Meluzzi et al. 2000).

Zlepšení nutriční hodnoty vajec může mít přímý pozitivní dopad na denní příjem živin a následně na lidské zdraví (Nys & Sauveur 2004). Vejce obohacená o vitaminy jsou aktivní jako prostředek, který může spotřebitelům poskytnout sloučeniny, které mohou být prospěšné zdraví a překonat nutriční nerovnováhu (Zang et al. 2011). Stejně jako mnoho jiných živin, hladiny vitaminů obsažené v krmivu nosnic přímo ovlivňují ukládání vitaminů ve vejcích (Naber & Squires 1993). Při mírném obohacení vajec vitaminy v souladu s doporučeními pro fortifikaci potravin by vejce mohla hrát důležitou roli jako funkční potravina (Zang et al. 2011).

3.6 Faktory ovlivňující obsah karotenoidů a vitaminů ve žloutku

Správně sestavená dieta pro nosnice s použitím přírodních nebo synteticky vyráběných karotenoidů by měla vést k dosažení požadované barvy vaječného žloutku. Ta je důležitým kritériem výběru potravin (tj. vajec) spotřebitelem. Při snaze dosáhnout určitého barevného stupně vaječného žloutku se v chovu a výživě nosnic setkáváme s celou řadou existujících potenciálních rizik. Základem všeho je zdraví chované drůbeže. Jen fyziologicky zdravé nosnice jsou schopny dobře vstřebávat a efektivně využívat živiny krmiva, včetně přijatých karotenoidů (Leiterman 2020). Schopnost nosnic účinně zhodnocovat krmivo a produkovat vejce s žádoucím odstínem vaječného žloutku ovlivňuje výčet těchto následujících rizik:

- ✓ stres (např. tepelný stres, chladový stres, hromadění, špatná manipulace s nosnicemi)
- ✓ mykotoxiny (např. aflatoxin, ochratoxin – snížení funkce orgánů, podráždění střevní tkáně, poškození jaterní tkáně, oslabení imunitní funkce, vyvážání živin)
- ✓ špatná trávicí funkce (např. narušení prostředí trávicího traktu v důsledku bakteriálních infekcí, mykotoxinů nebo stresu)
- ✓ přerozdělení živin (např. přeměna karotenoidů na vitamin A při jeho nedostatku)
- ✓ nemoci (např. bakteriální infekce – snížení konverze krmiva a ohrožení zdraví)
- ✓ špatná kvalita vody (např. vysoký obsah železa a/nebo síry – snížení konverze krmiva)
- ✓ špatná hygiena (např. vysoká zátěž patogenů ve vodovodním potrubí – ohrožení zdraví)
- ✓ špatné větrání (např. problémy s dýcháním, bronchitidou – ohrožení imunitní funkce)
- ✓ oslabená imunitní funkce (např. přerozdělení karotenoidů pro fyziologické potřeby nosnic, snížení ukládání karotenoidů do vaječného žloutku)
- ✓ osvětlení (např. přímé ovlivnění chování při krmení, příjmu, využití krmiva a produkci)
- ✓ abnormální příjem krmiva (např. extrémní nízký či extrémní vysoký denní příjem krmiva – narušení ukládání živin ve vejcích a barvy vaječného žloutku)

(Leiterman 2020).

Mykotoxiny, sekundární metabolity plísní (např. aflatoxin, ochratoxin), jsou jedním z rizikových faktorů, který kromě působení na životní funkce negativně ovlivňuje i obsah karotenoidů a vitaminů ve žloutku. Je dobře známo, že mykotoxiny výrazně snižují absorpci karotenoidních pigmentů. Navíc zvyšují podíl diesterové formy karotenoidů v játrech, a tím snižují její akumulaci v tkáních kuřat a kuřic. Zhoršená pigmentace kůže je pak charakteristická pro tzv. syndrom bledých ptáků (Hamilton 1992). Uvedené mykotoxiny jsou produkovány plísněmi z rodu *Aspergillus* a *Penicillium* a vyvolávají aflatoxikózu a ochratoxikózu drůbeže.

Vaječný žloutek je vysoce biologicky dostupným zdrojem lipofilních vitaminů (např. vitamin A, vitamin E) a karotenoidů. Obsahuje ale také významné množství cholesterolu, obvykle 180 – 240 mg, tj. 60 % denní potřeby člověka (Tůmová 2011; Aydin 2017). Více než 60 % z celkového cholesterolu je však tvořeno estery MUFA nebo PUFA, které se označují jako tzv. dobrý cholesterol (Zelenka et al. 2007). Novější epidemiologické studie poskytují důkazy o kontrole účinků cholesterolu na lidské zdraví, které by měly vést k lepšímu přijetí vajec v lidské stravě (Seuss-Baum 2007). Konzumace vajec významně neovlivňuje koncentraci cholesterolu v krvi, a proto není spojena se zvýšeným zdravotním rizikem (Pelletier et al. 1996; López Sobaler 2017; Kim & Campbell 2018). Mezi koncentrací cholesterolu ve žloutku a líhivostí oplodněných vajec byla potvrzena negativní korelace (Dikmen & Sahan 2007).

Ve výživě drůbeže existují mezi různými složkami a komponenty potravy významné interakce. Ty nejvýznamnější jsou interakce s tukem. Dietní tuk, resp. dietní doplňky tuků nebo olejů do stravy nosnic ovlivňují konverzi a absorpci karotenoidů, nebo zvyšují koncentraci lipofilních vitaminů ve vaječném žloutku. Například absorpce vitaminu E vyžaduje přítomnost tuku vždy a je ovlivňována přítomnou potravinovou maticí (Jeanes et al. 2004). Již ve studii Kang et al. (1998) bylo potvrzeno, že po přidání tuku (palmový olej) do krmiva nosnic je možné zpozorovat zvýšení obsahu tokotrienolu (forma vitaminu E s nejsilnější antioxidační aktivitou) a karotenu ve vejcích a jaterní tkáni způsobem závislým na dávce. Vliv a účinek dietních tuků (např. přídavek lněného oleje do stravy kohoutků) v potravě na absorpci a ukládání α -tokoferolu nejen ve vejcích byl potvrzen hned několika dalšími studii (Prévéraud et al. 2015; Marounek et al. 2019). Tak jako s vitaminem E interagují tuky i s karotenoidy. Například přídavek tuku (6 %) do krmné dávky kuřat vyvolal trojnásobné zvýšení depozice luteinu ve srovnání s kontrolní skupinou bez přidaného tuku (Nys 2000).

Efektivita ukládání karotenoidů z krmiva do vaječných žloutků již byla zmíněna. Je však velmi pravděpodobné, že se odvíjí i od jejich polarit (Englmaierová et al. 2019). Výsledkem odlišné polarit karotenoidů je rozdílná depozice β -karotenu a dalších karotenoidů. Polární (tzn. hydrofilní) xantofyly jsou spolu s dalšími lipidy snadněji začleněny do tzv. směsných micel, nezbytných pro jejich absorpci, a snadněji transportovány v krevním řečišti než nepolární (tzn. vysoce hydrofobní) karoteny (Borel 2003; Reboul 2013; Marounek et al. 2019).

Dostupnost karotenoidů a lipofilních vitaminů může být ovlivněna nasycením, resp. nenасыčením lipidů a mastných kyselin ve stravě. Na potřebě a náležitém obsahu dietních PUFA je například závislý lipofilní vitamin E. Strava bohatá na SFA snižuje absorpci vitaminu E, zatímco přítomnost PUFA ve stravě jeho vstřebávání neomezuje (Marounek et al. 2019).

U karotenoidů bylo zjištěno, že dietní tuky bohaté na SFA vedou k vyšší dostupnosti luteinu a zeaxantinu ve srovnání s tuky bohatými na MUFA nebo PUFA (Gleize et al. 2013). SFA s krátkým řetězcem a MUFA nebo PUFA s dlouhým řetězcem podporují absorpci luteinu (Hamilton 1992). Tuky bohaté na SFA mají pozitivní účinek na absorpci karotenoidů a výsledné zbarvení vaječného žloutku. Dietní zařazení tuku zvýší ukládání α -tokoferolu, retinolu, luteinu a zeaxantinu ve vejcích nosnic, které budou krmeny například stravou obsahující sušenou vojtěšku jako zdroj přírodních karotenoidů a lipofilních vitaminů (Marounek et al. 2019).

Přínosem této diplomové práce mohou být zjištěné údaje o vlivu použitého tuku (řepkový olej, vepřové sádlo) s kontrastním zastoupením mastných kyselin v potravě na dostupnost, využití a uložení karotenoidů u nosnic, protože těchto je v současné době poměrně málo.

3.7 Barevný tón žloutku a preference spotřebitelů

Vizuální vzhled, zejména barva a její sytost, je jednou z nejdůležitějších vlastností potravin a rozhoduje o přijetí nebo odmítnutí produktu spotřebitelem (Ofosu et al. 2010). Toto tvrzení platí i pro drůbeží produkty, ze kterých například barva vaječného žloutku hraje pro některé etnické a regionální spotřebitele stále zásadní roli (Hencken 1992; Williams 1992).

Barevný tón žloutku je odrazem koncentrace karotenoidních pigmentů ve stravě nosnic a lze jej libovolně upravovat (European Commission 2002; Zelenka et al. 2007). Vaječný žloutek se v organismu nosnice barví postupně, žádaného stupně dosáhne do 10 dnů (Kodeš et al. 2003). Požadované intenzity a barevné mohutnosti vaječných žloutků je možno docílit s použitím speciálního barevného vzorníku a tabulky, které určí typ, množství a případně poměr žlutých a červených karotenoidů v dietě nosnic. Pro zbarvení je mnohem důležitější samotný profil karotenoidů než jejich celkové množství ve žloutku (Zelenka et al. 2007; Englmaierová et al. 2013). Barevný tón žloutku určují hlavně přírodní, například v zelené pastvě obsažené karotenoidy, a ne synteticky vyráběná barviva (Skřivan & Englmaierová 2015).

Barvu vaječného žloutku je možné změřit objektivně například s použitím přístroje Minolta SpectraMagic™ NX, který vyjádří zbarvení v tzv. HunterLab Scale (L světlost, a* červenost, b* žlutost), za použití škály barev DSM YolkFan™ Color Scale (dříve Roche Yolk Color Fan – RYCF) nebo spektrofotometricky. Jednoduchá ale subjektivní metoda s využitím DSM YolkFan™ Color Scale hodnotí a vyjadřuje výsledky na kalibrované stupnici barev od 1 do 15 (od světle žluté po tmavě oranžovou). Tento způsob určování barevného skóre vaječného žloutku je nejekonomičtější, snadno dostupný a stal se preferovanou metodou ve většině částí světa (Kodeš et al. 2003; Hamelin & Altemueller 2012; Leiterman 2020).

U jiných produktů (produktů obsahující vejce) mající barevné skóre vyšší než 15 je škála barev DSM nedostačující. Za tímto účelem může ke stanovení barvy přispět rychlá metoda (testovací sada) iCheck[®] Carotene / Egg. Tato metoda založená na spektrofotometrii je schopná stanovit obsah karotenoidů (v mg/l) vyjádřený jako tzv. ekvivalenty β -karotenu (Hamelin & Altemueller 2012). Podstatou spektrofotometrie je absorpce viditelného záření (200 – 800 nm) zředěnými roztoky molekul (Klouda 2016). Vlnové délky barev karotenoidů používaných pro pigmentaci vaječných žloutků spadají do rozsahu 400 – 600 nm viditelného barevného spektra. Pro lidské oko mají tyto sloučeniny žlutou až červenou barvu (Cisneros 2021).

Většina spotřebitelů dává přednost sytě žlutým až oranžově zbarveným žloutkům; jejich běžný stupeň zbarvení se tak pohybuje mezi 9. až 12. stupněm DSM (RYCF) (Kodeš et al. 2003; Zelenka et al. 2007). V různých zemích Evropské unie se preference barvy vaječného žloutku výrazně liší. Země více na severu, v rámci Evropy, upřednostňují zpravidla velmi slabě zbarvené vaječné žloutky oproti zemím více na jihu, tj. zemím jižní a jihozápadní Evropy (měřeno stupnicí Roche Yolk Color Fan). Žloutky výrazné barvy a sytosti (11 – 14 RYCF) jsou charakteristické pro Německo, Belgie, Rakousko, Itálii, Španělsko a Portugalsko. Středně oranžová barva žloutků (10 – 12 RYCF) je preferována v jižní Anglii, severní Francii a Řecku. Se světle oranžovými až žlutě zbarvenými žloutky (9 – 11 RYCF) je možné se setkat ve Finsku, Švédsku, Dánsku, severní Anglii a Irsku. Preference nejsvětleji zbarveného žloutku byla zaznamenána v Holandsku (7 – 9 RYCF) (Hernandez et al. 2000). Barva vaječného žloutku je považována za velmi důležitou (Nys 2000). Z mnoha studií vyplývá, že pro spotřebitele je podstatné taky to, aby barva vaječného žloutku měla stálou barvu a výrazně se neměnila.

Spotřebitelé se často domnívají, že vejce z rodinných farem jsou chutnější, mají lepší strukturu a barvu než vejce pocházející z komerčních drůbežích farem. Ve studii Berkhoff et al. (2020) s celkovým počtem 197 dotazovaných osob bylo zjištěno, že barva žloutku bývá stále uváděna jako nejdůležitější atribut (Berkhoff et al. 2020). Zajímavé ale je, že ačkoli respondenti deklarovali, že preferují vejce z farem nebo alternativních produkčních systémů, stále se rozhodují pro nákup konvenčně produkovaných (tj. klecových) vajec kvůli jejich nižší ceně. Cena a velikost vajec tak bývají nejdůležitějšími nákupními faktory (Berkhoff et al. 2020).

Rozdílné preference spotřebitelů v rámci jednotlivých zemí byly zpozorovány i u dalších specifických vlastností vajec; například u velikosti vajec nebo barvy jejich skořápky (Berkhoff et al. 2020). Zatímco vejce s bílou skořápkou jsou preferována v Severní a Střední Americe, na Středním východě, v Indii, Japonsku, na Tchaj-wanu a na Filipínách, vejce s hnědou skořápkou jsou žádoucí ve velké části Latinské Ameriky, Evropy a Číny (Preisinger 2018).

3.8 Vliv karotenoidů na kvalitu vajec

Pojem jakost neboli kvalita bývá vysvětlován různě a někdy je mezi těmito výrazy dělán i rozdíl (Jůzl & Nedomová 2015). Pro účely zákona č. 110/1997 Sb. o potravinách a tabákových výrobcích a o změně a doplnění některých souvisejících zákonů se jakostí rozumí soubor charakteristických vlastností jednotlivých druhů, skupin a podskupin potravin a tabákových výrobků, jejichž limity jsou stanoveny tímto zákonem, prováděcím právním předpisem anebo přímo použitelným předpisem Evropské unie. Přes svou přesnost v kontextu se soudobou výrobou a uváděním potravin na trh se toto znění přece jenom trochu liší od představy spotřebitelů ohledně použitelné definice na jakostní výrobek. Jakost je soubor vlastností, které výrobek má mít, k naplnění funkcí, pro které je určen (Jůzl & Nedomová 2015). V návaznosti na to může být kvalita definována jako vlastnosti produktu, v tomto případě vlastnosti vajec, které konzistentně naplňují očekávání spotřebitele (Luning & Marcelis 2007).

Senzorická a nutriční kvalita vajec se v dnešní době stává pro spotřebitele stále větším problémem. Důležitým kritériem pro spotřebitele jsou při nákupu vajec kromě ceny také fyzikální vlastnosti, jako je velikost vajec, barva žloutku, ale také čerstvost (Panaite et al. 2021). Barva žloutku bývá většinou spotřebitelů nesprávně spojována s věkem a zdravotním stavem zvířat a s jakostí vajec a vaječných výrobků (Loetscher et al. 2013). V současné době roste poptávka po vejcích obohacených o živiny, jako jsou PUFA, vitaminy (např. vitamin D, vitamin E), minerální látky (např. selen, železo, zinek), antioxidační sloučeniny (např. karotenoidy), protože toto obohacení může zlepšit zdravotní stav a blaho spotřebitelů (Omri et al. 2019). V posledním desetiletí patří mezi nejpoužívanější sloučeniny pro obohacování vajec *n-3* PUFA a karotenoidy (Campos et al. 2019; Kljak et al. 2021). Nevýhodou obohacování vajec o *n-3* PUFA je zvýšená náchylnost k peroxidaci lipidů ve žloutku, čímž je ovlivněna jak nutriční, tak sensorická kvalita vajec a bezpečnost konzumentů (Panaite et al. 2021). Z tohoto důvodu se v současné době vejce obohacují i o antioxidační sloučeniny (např. vitamin E a karotenoidy), které snižují oxidaci mastných kyselin žloutkových lipidů a poskytují dobrý zdroj dietních antioxidantů pro člověka (Surai et al. 2006; Panaite et al. 2019).

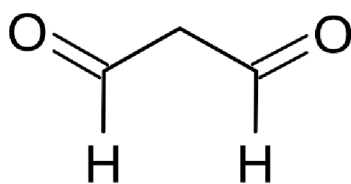
Slepičí vejce jsou jako vynikající zdroj vysoce kvalitních a plnohodnotných bílkovin, lipidů, vitaminů, minerálních látek a antioxidantů karotenoidů důležitou součástí stravy lidí, ve které by měly zaujímat své opodstatněné místo (Nimalaratne & Wu 2015). Je dobře známo, že barva žloutku a jeho složky (tzn. červenost a žlutost) jsou určeny celkovým obsahem karotenoidů ve žloutku a poměrem mezi žlutými karotenoidy (lutein a zeaxantin) a červenými karotenoidy (kantaxantin, astaxantin a kapsantin) v dietě nosnic (Panaite et al. 2021).

Vaječný žloutek obsahuje velké množství lipidů; téměř všechny vaječný tuk s vysokým podílem MUFA, PUFA a fosfolipidů je obsažen ve vaječném žloutku (Stupka et al. 2013). Nejvíce sledované mastné kyseliny přítomné ve vaječném žloutku patří do skupiny *n*-3 PUFA. Ty se do vajec začleňují například zkrmováním rybiho oleje, mořských řas, lněného semínka, slunečnice, řepky nebo jiných přísad (Fraeye et al. 2012). V lidské výživě zastávají *n*-3 PUFA klíčovou roli; podílí se na několika fyziologických procesech jako je regulace zánětu, změna genové exprese, modifikace struktury a funkce lipidového raftu (tj. specializované membránové mikrodomény), a prevence koronárního onemocnění, arytmií, srdečního selhání a dyslipidémie (Anderson & Ma 2009; Kones et al. 2018). Zvýšená koncentrace *n*-3 PUFA ve vejcích zvyšuje náchylnost a podporuje procesy oxidace těchto mastných kyselin (Panaite et al. 2021). Z tohoto důvodu bylo navrženo současné obohacování vajec o antioxidanty – karotenoidy (Surai et al. 2006). Důležité je zmínit, že i některé samotné sloučeniny přítomné ve vaječném žloutku a bílku (např. vaječné proteiny ovoalbumin, ovotransferin, ovomucin, lysozym, fosvitin nebo vaječné fosfolipidy) vykazují antioxidační aktivitu (Nimalaratne & Wu 2015).

Karotenoidy jako jedny z všudypřítomných přírodních pigmentů rozpustných v tucích hrají všestrannou biologickou roli. Moderní komerční sektor chovu drůbeže ohrožuje řada patogenních nemocí a patologických faktorů (Nabi et al. 2020). Karotenoidy a několik dalších přírodních sloučenin původem z rostlin se ukázaly jako vynikající terapeutický a zdraví podporující potenciál ke zvýšení produkční výkonnosti drůbeže, zmírnění oxidačního stresu a produkci kvalitních živočišných produktů, tj. masa a vajec (Saeed et al. 2018; Nabi et al. 2020). Ptáci a jiná oviparní zvířata využívají karotenoidy jako silné imunomodulační, protizánětlivé a antioxidační činidlo, které zachycuje a zhasí cytotoxické ROS, které tyto zvířata produkují během fyziologických tělních procesů (Krinsky 2001). Například oxidace lipidů může zvýšit produkci a hromadění volných radikálů nebo ROS přímo nebo snížením schopnosti buňky zlikvidovat ROS, a tím způsobit oxidační stres v buňkách (Cano-Gutiérrez et al. 2012). Přírodní karotenoidy obecně snižují oxidační stres u vylíhlých ptáků a prostřednictvím různých mechanismů účinků se podílejí na ochraně vajec před oxidačním poškozením (Stahl & Sies 2003). Tímto přirozeným způsobem je prodloužena trvanlivost vyprodukovaných vajec.

Ve studii Sun et al. (2015) hodnotící dopad přídatku karotenu lykopenu (40 mg/kg) na produkční výkon, biochemické parametry a antioxidační kapacitu brojlerových kuřat bylo mimo zvýšení tělesné hmotnosti kuřat zaznamenáno i významné zlepšení celkové antioxidační kapacity jater a snížení jaterního malondialdehydu (MDA). Malondialdehyd (viz Obrázek č. 23) je organická reaktivní sloučenina vznikající a narůstající při peroxidaci, tj. oxidační

degradaci lipidů, konkrétně PUFA, reaktivními kyslíkatými sloučeninami. Reaktivní kyslíkaté látky rozkládají polynenasycené mastné kyseliny lipidů, přičemž vzniká kromě jiných produktů i malondialdehyd (Pryor & Stanley 1975). Tato látka je jednou z mnoha reaktivních elektrofilních látek, které vytvářejí různé kovalentní proteinové addukty jako pokročilé konečné produkty lipoxidace (Farmer & Davoine 2007). V organismu se tvorba těchto aldehydů využívá jako znak pro měření úrovně oxidačního stresu (Del Rio et al. 2005). Oxidace lipidů je primárním mechanismem poklesu lipidů vaječného žloutku a jejím základním biomarkerem je zmiňovaný malondialdehyd (Goliomytis et al. 2014; Shahid et al. 2022). Nebezpečí malondialdehydu spočívá v jeho značné reaktivitě a potenciální mutagenitě (Hartman 1983).



Obrázek č. 23: Chemická struktura: malondialdehyd (MDA, propandial)

(Wikimedia Commons contributors)

Velice podobný suplementační účinek karotenoidů jako ve studii Sun et al. (2015), avšak pocházejících ze sušených rajčat (na úrovni 2,5 %; 5,0 % a 7,5 %) spolu s *n*-3 PUFA, vedl ve studii Panaite et al. (2019) k významně nižší oxidaci žloutkových lipidů. Navíc zlepšil i barevné skóre vaječných žloutků. Významně nižší obsah MDA ve žloutcích od nosnic krmených paprikou a mrkví jako zdrojem karotenoidů potvrzuje i studie Panaite et al. (2021).

Vejce obohacená o bioaktivní karotenoidy jsou spojována se snížením obsahu MDA ve vaječných žloutcích, a to kvůli úloze karotenoidů jako účinných přírodních antioxidantů (Sahin et al. 2008; Skřivan et al. 2016; Young & Lowe 2018). V různých přírodních zdrojích karotenoidů lze nalézt i jiné látky s významnou antioxidační aktivitou. Snížení obsahu MDA ve vejcích může potencovat, tj. zesilovat (z lat. *potens* = schopný) a lipidy vaječného žloutku před peroxidací chránit například i L-askorbová kyselina (Chávez-Mendoza et al. 2015). Synergismus mezi antioxidanty v rozpustnými v tucích, jako je α -tokoferol a karotenoidy, a antioxidanty rozpustnými ve vodě, jako jsou polyfenoly a vitamin C (L-askorbová kyselina), byl při prevenci oxidace lidského séra v *in vitro* podmínkách obecně potvrzen; chybí však studie *in vivo*, které by tyto výsledky skutečně potvrdily (Yeum et al. 2009; Panaite et al. 2021).

Příjem karotenoidů v lidské stravě je spojen s nižším výskytem kardiovaskulárních nemocí díky jejich mechanismům, jako je například schopnost zhaset volné radikály a zvyšovat odolnost lipoproteinů vůči induktorům oxidace (Ciccione et al. 2013; Maria et al. 2017).

3.9 Nutriční benefity vajec obohacených o karotenoidy

Vejsce jsou pro člověka důležitou potravinou s vysokou kvalitou a dobrým zdrojem základních živin. Živočišné produkty, včetně vajec, přispívají k celkovému příjmu lipidů, cholesterolu a SFA v lidské stravě. Z pohledu zdravotnických agentur a odborníků na výživu jsou vejce kvůli hladinám cholesterolu (asi 200 – 300 mg/100 g) a nasycených tuků (asi 3 g/100 g) považována za velmi kontroverzní potraviny (Li et al. 2013). Z těchto důvodů byla veřejnost již dříve varována před zvýšenou konzumací vajec v důsledku příjmu cholesterolu a možného spojení s kardiovaskulárními chorobami (Alagawany et al. 2018). Následné výzkumy však potvrdily, že ve srovnání s nasycenými a celkovými mastnými kyselinami má specifický typ dietního cholesterolu z vajec omezený vliv na krevní hladiny a kardiovaskulární poruchy (Djoussé & Gaziano 2008). Rostoucí a nepřiměřený úsudek z vysokých hladin cholesterolu snížil obecnou spotřebu vajec (Eilat-Adar et al. 2013). Na základě těchto skutečností bylo pro vejce průmysl zajímavé vyvinout takové produkty odvozené z vajec, resp. vejce s upraveným obsahem živin (tzv. designer eggs neboli obohacená vejce) prostřednictvím nových technik a nutričních manipulací, které pomáhají udržovat zdraví spotřebitelů (Alagawany et al. 2018).

Obohacená vejce, tj. vejce obohacená o cenné nutriční složky (např. karotenoidy) jsou považována za významné funkční potraviny. Pro funkční potraviny neexistuje oficiální či univerzálně přijatá definice. Jednu z všeobecně používaných definic uvádí Akademie výživy a specialistů na výživu (Academy of Nutrition and Dietetics) tímto způsobem: „Funkční potraviny jsou potraviny poskytující další zdravotní benefity, které mohou snižovat riziko onemocnění a/nebo podporovat dobré zdraví. Funkční potravina vypadá nebo může vypadat stejně jako konvenční potravina, která se konzumuje jako součást normální stravy, a kromě základních nutričních funkcí vykazuje fyziologické benefity a/nebo snižuje riziko chronických nemocí.“ (Sharma 2018). V České republice ani v Evropské unii přesto neexistuje žádný oficiální dokument, který by funkční potravinu definoval a uváděl pravidla a podmínky pro výrobu funkčních potravin. Existuje však řada předpisů (např. nařízení (ES) č. 1924/2006 o výživových a zdravotních tvrzeních při označování potravin, nařízení (ES) č. 258/1997 o nových potravinách a nových složkách potravin), které s potravinami tohoto druhu úzce souvisejí. Jedná se zejména o předpisy týkající se označování potravin, neboť každá funkční potravina obsahuje na obalu jedno nebo více zdravotních tvrzení, které informují spotřebitele o příznivých účincích potraviny nebo její složky na lidský organismus (Beránková 2009).

Alternativní obohacená vejce jsou k dispozici na celosvětových trzích pod různými obchodními názvy dle zeměpisné oblasti a výrobce (např. omega vejce) (Surai & Sparks 2001).

Krmením nosnic speciálně navrženým a upraveným krmivem je možné kromě změny složení mastných kyselin (např. *n*-3 PUFA) ve vejcích změnit i obsah karotenoidů ve vaječných žloutcích. Vzhledem k jejich rozpustnosti v tucích (tzv. liposolubilitě) se karotenoidy ukládají výhradně ve žloutku, který se tak stává výborným zdrojem karotenoidů v lidské stravě (Kralík et al. 2021). Mezi nejčastěji používané karotenoidy sloužící ve výživě nosnic k obohacování vajec patří lutein a zeaxantin. Ty se společně s α -karotenem, β -karotenem, β -kryptoxantinem a lykopenem řadí mezi šest základních karotenoidů, které dokáže lidský organismus z přijaté stravy aktivně využít (Jordán & Hemzalová 2001). Izomerické formy těchto karotenoidů bývají důležitým faktorem jejich biologické dostupnosti, aktivity přenosu a schopnosti ukládání v tekutinách a tkáních lidského těla (Britton et al. 2009; Nimalaratne & Wu 2015).

Při nedostatku antioxidačních vitaminů a rostlinných látek (tzv. fotochemikálií), mezi které řadíme i přírodní pigmenty karotenoidy, vznikají škody na buňkách, které dlouhodobě vedou ke vzniku rakoviny, kardiovaskulárních onemocnění a dalších chorob způsobených nejen volnými radikály (Jopp 2014). Karotenoidy mají velmi pozitivní vliv na imunitní systém člověka (Britton et al. 2009). Jejich hlavní příznivý účinek spočívá v antioxidačních, imunomodulačních a protizánětlivých schopnostech. Ačkoli se přírodní antioxidanty karotenoidy vzájemně podobají, každý z nich účinkuje specificky na určitou tkáň lidského těla (Jordán & Hemzalová 2001). Funkční vejce obohacená o karotenoidy, především lutein a zeaxantin, jsou vynikajícím zdrojem těchto složek pro člověka (Kralík et al. 2021).

Uvádí se, že mezi dobré zdroje karotenoidu luteinu pro člověka patří tmavě zelená zelenina a zejména pak zelená listová zelenina, jako je hlávková kapusta, špenát setý a hlávkové zelí (Mangels et al. 1993; Ortiz et al. 2021). Přesto však bylo prokázáno, že biologická dostupnost luteinu z vaječného žloutku obohacených vajec je daleko vyšší ve srovnání s rostlinnými zdroji. To dokázal Chung et al. (2004), z jehož studie vyplývá, že koncentrace luteinu v lidském séru je nejvyšší po konzumaci vajec ve srovnání s doplňky obsahující lutein a ve srovnání se špenátem. Funkční vejce jsou výborným transportérem luteinu z rostlin pro člověka (Skřivan & Englmaierová 2014; Skřivan & Englmaierová 2015; Englmaierová et al. 2019). Biologicky lepší dostupnost karotenoidů z obohacených vajec je díky jejich solubilizaci se žloutkovými lipidy, jež z vajec činí jedinečný a důležitý nosič bioaktivních karotenoidů. Například dietní přídatek 3 g extraktu z květů afrikánu do 1 kg krmiva pro nosnice vedl ke zvýšení obsahu luteinu v konzumních vejcích z 0,72 mg/100 g na 7,14 mg/100 g (Galović et al. 2020). Dle Chung et al. (2004) může ještě navíc obsah cholesterolu a složení mastných kyselin ve žloutku ovlivnit lepší využití a zvýšení obsahu luteinu v lidském séru.

Nutriční benefity vajec obohacených o přírodní karotenoidy a zdraví prospěšné vlastnosti karotenoidů byly nesčetněkrát zdokumentovány. Biologická dostupnost bioaktivních karotenoidů luteinu a zeaxantinu prostřednictvím konzumace jedinečných slepičích vajec je epidemiologicky korelována s nižším rizikem vzniku několika onemocnění, jejichž podrobnosti jsou krátce uvedeny v následujících kapitolách.

3.9.1 Věkem podmíněná makulární degenerace a šedý zákal

Žlutá skvrna – makula (*macula lutea*), je místo na oční sítnici, kde je největší hustota čípků (tj. fotoreceptorické buňky umožňující barevné vidění), a tedy i nejostřejší vidění. Z tohoto místa vede rovněž 130 milionů světelných tyčinek (tj. fotoreceptorické buňky umožňující černobílé vidění) optické informace přímo do mozku. Tyčinky a čípky obsahují pigmenty citlivé na světlo, které obsahují opsinové bílkoviny spojené s 11-*cis*-retinalem odvozeným z all-*trans*-retinolu (Sharma 2018). Makula, žlutá skvrna, koncentruje největší množství antioxidantů (např. vitamin C, vitamin E, karotenoidy) uložených v celém lidském těle, a sice proto, aby ochránilo sítnici oka před poškozením volnými radikály (Jopp 2014).

Pouze dva karotenoidy, a to lutein a zeaxantin, jsou selektivně akumulovány v sítnici lidského oka z krevní plazmy (Widomska & Subczynski 2014). Tyto karotenoidy za normálních podmínek se hromadí v makulární oblasti sítnice jsou souhrnně označovány jako makulární pigment oka (Landrum & Bone 2001; Zaheer 2017). Makulární pigment oka může chránit sítnici oka a redukovat riziko rozvoje věkem podmíněné makulární degenerace a katarakty neboli šedého zákalu (Ribaya-Mercado & Blumberg 2004; Zaheer 2017).

Věkem podmíněná makulární degenerace (VPMD) je velmi závažné onemocnění zrakového orgánu postihující především osoby vyššího věku. Při tomto onemocnění dochází k ukládání abnormální hmoty v makule, která leží mezi sítnicí a cévnatkou, což způsobuje postupnou ztrátu centrálního vidění a schopnosti vnímat jemné detaily (Sharma 2018). VPMD je stav, který vede ke ztrátě zraku ve středu zorného pole v důsledku poškození centrální části oční sítnice a místa nejostřejšího vidění, tj. žluté skvrny. Ve Spojených státech amerických a jiných vyspělých zemích je VPMD hlavní příčinou nevratné slepoty (Klein et al. 1997). VPMD je spojena s nízkou hladinou makulárního pigmentu v oční sítnici. Pro její léčbu není k dispozici žádný lék, ale existují doporučené dietní kroky, které mohou zpomalit nástup těchto onemocnění řadou mechanismů, včetně zhášení ROS, které jsou za taková onemocnění zodpovědné (Zaheer 2017). Nižší riziko vzniku a rozvoje VPMD bylo potvrzeno u těch jedinců, kteří konzumují potraviny bohaté na karotenoidy lutein a zeaxantin (Ma et al. 2012).

Lutein a zeaxantin se ukládají v oční sítnici, chrání ji před oxidačním poškozením a brání vzniku VPMD a šedého zákalu (Englmaierová et al. 2019). Katarakta (tj. šedý zákal) je výsledkem zvýšené neprůhlednosti čočky, která je často doprovázená ztrátou akomodace (Sharma 2018). Schopnost luteinu a zeaxantinu aktivně zachycovat singletový kyslík a volné radikály je považována za jeden z hlavních mechanismů jejich příznivých účinků proti oxidačnímu poškození oka způsobeného světlem (Krinsky et al. 2003). Konkrétně karotenoid lutein hraje v očích jak roli antioxidantu, tak i filtru škodlivého modrého světla. Tímto způsobem zabraňuje poškození fotoreceptorů v oku, které jsou důležité pro udržení dobrého centrálního vidění a zrakové ostrosti (Nilsson et al. 2003). Je dobře známo, že vystavení modrému světlu (UVB 280 – 315 nm) způsobuje degeneraci sítnice. Schopnost luteinu a zeaxantinu působit jako filtr, tzn. absorbovat škodlivé modré světlo a zabraňovat produkci volných radikálů v oku, které jsou zodpovědné za VPMD, je považována za pasivní antioxidační účinek karotenoidů (Hammond 1997; Krinsky et al. 2003). Tato důležitá funkce luteinu a zeaxantinu je pravděpodobně způsobena přítomností reaktivního kyslíku v jejich struktuře s vycytávací schopností (Fiedor & Burda 2014). Lutein hraje navíc důležitou roli v percepčním jevu, nazvaném Haidingerův snop, umožňující člověku spatřit a určit rovinu polarizovaného světla či směr rotace kruhově polarizovaného světla (Britton et al. 2009).

Dostatečný přísun karotenoidů luteinu a zeaxantinu v lidské stravě může pomoci zastavit nebo zpomalit zvýšení hustoty čočky lidského oka související s věkem a tím snížit riziko výskytu VPMD a šedého zákalu (Demmig-Adams & Adams 2013). Úroveň luteinu v lidské stravě nezbytná k prevenci VPMD nebyla jasně definována, ale doporučené hodnoty se pohybují v rozmezí od 10 do 20 mg denně (Landrum et al. 1997; Landrum et al. 1999). Zvýšení spotřeby vajec na šest vajec týdně nebo více může být účinnou metodou ke zvýšení optické hustoty (tj. množství) makulárního pigmentu, což je indikátor toho, že se karotenoidy z vaječného žloutku mohou hromadit v sítnici (Vishwanathan et al. 2009; Vishwanathan et al. 2010; Rong et al. 2013). Nejnovější výsledky výzkumu a současný stav úrovně poznání tento koncept silně podpořily tím, že slepičí vejce uznaly jako zdroj biologicky dostupného luteinu a zeaxantinu, které jsou dobré pro zdraví očí a správné fungování zraku (Nimalaratne et al. 2015). Denní konzumace vajec obohacených luteinem nebo zeaxantinem může případně zvýšit hladiny luteinu a zeaxantinu v krevním séru, které jsou srovnatelné s denní dávkou 5 mg dietního doplňku (Kelly et al. 2014). U lidí konzumující méně než 1 mg luteinu a zeaxantinu denně, poskytuje jedno vejce obohacené o lutein denně ochranu oka před oxidačním stresem a rozvojem makulární degenerace související s věkem (Skřivan et al. 2016).

3.9.2 Poškození kůže a rakovina kůže

Vzhledem k vlastnostem filtrace modrého světla v očích se zkoumá také role karotenoidů při udržování zdraví pokožky, nejsvrchnější vrstvy kůže. Palombo et al. (2007) ve své studii prokázali, že příjem luteinu (5 mg/den) po dobu 12 týdnů snížil peroxidaci kožních lipidů a zvýšil hydrataci, obsah lipidů a elasticitu pokožky. Karotenoidy, jako je lutein, zeaxantin a β -karoten, pomáhají chránit lidskou kůži před vysokou intenzitou slunečního a ultrafialového (UV) záření, které mohou vést k poškození kůže a případně být i příčinou rakoviny kůže (Britton et al. 2009). Lutein a zeaxantin mohou plnit také ochrannou funkci při kožních stavech přisuzovaných nadměrnému vystavení UV záření a rovněž oddálit nástup či zpomalit růst nádorů vyvolaných UVA a UVB zářením (Goodwin 1986; Blesso et al. 2013). Karotenoidy pomáhají chránit buňky před fotosenzitizací (tj. zvýšenou citlivostí kůže na sluneční záření) (Marounek & Havlík 2020), ale i fototoxicitou. Fototoxicita je kožní reakce na dlouhodobé vystavení slunečnímu záření v kombinaci s fotosenzitivní látkou (např. benzo(a)pyrenem).

3.9.3 KVO, oxidační stres, Alzheimerova choroba a rakovina

Slepičí vejce si v průběhu let získala špatnou pověst připisovanou vysokému obsahu cholesterolu ve žloutcích, což vedlo k vážnému poklesu jejich spotřeby (Eilat-Adar et al. 2013; Zaheer 2017). Na vejce je ale důležité se dívat i z jiného pohledu. Kromě zdroje vysoce kvalitních bílkovin a dalších živin zvyšuje lipidová matrice vaječného žloutku biologickou dostupnost cenných pigmentů, včetně luteinu a zeaxantinu, aniž by to mělo škodlivé účinky na metabolismus lipoproteinů nebo glukózy (Ballesteros et al. 2015; Blesso 2015). Kromě toho, že chrání zrak, údaje z klinického výzkumu také naznačují, že karotenoidy lutein a zeaxantin mohou přispívat k ochraně před kardiovaskulárními onemocněními (tj. KVO) (Maria et al. 2015), oxidačním stresem (Fiedor & Burda 2014), neurodegenerativními poruchami (Feart et al. 2015) a možná i před různými typy rakoviny (Mares-Perlman et al. 2002).

Dietní příjem potravin bohatých na karotenoidy je spojen s poklesem výskytu některých chronických chorob včetně kardiovaskulárních onemocnění, v jejichž prevenci mají hlavní vliv karotenoidy lutein a zeaxantin (Tapiero et al. 2004). Kardiovaskulární onemocnění jsou veškerá onemocnění srdce a cév. Příjem obohacených vajec může zlepšit stav sérových karotenoidů a zvýšit plazmatické vysokodenzitní lipoproteiny (tzv. HDL – lipoproteiny o vysoké hustotě) u dospělých osob s metabolickým syndromem (Blesso et al. 2013). Vaječný žloutek může představovat důležitý zdroj potravy pro zlepšení hladiny karotenoidů v plazmě u populace s vysokým rizikem kardiovaskulárních chorob a diabetu mellitu 2. typu (Shin et al. 2013).

Škodlivý účinek volných radikálů způsobujících potenciální biologické poškození se nazývá oxidační stres (Zaheer 2017). O úloze karotenoidů vaječného žloutku jako antioxidantů s ochrannými účinky proti oxidačnímu poškození pojednává Nimalaratne & Wu (2015). Molekulární mechanismy se podílejí na aktivitě luteinu a zeaxantinu zachycující singletový kyslík a volné radikály. Tyto karotenoidy jako takové mají příznivé účinky ve smyslu snížení nebo zpomalení světlem indukovaného oxidačního stresu u oční makuly a VPMD (Krinsky et al. 2003). Funkční přínosy luteinu a zeaxantinu jako antioxidantů byly prokázány například ve studii Gao et al. (2011), kde předinkubace epitelálních buněk lidské čočky s luteinem, zeaxantinem a α -tokoferolem dramaticky snížila hladiny H_2O_2 , MDA a poškození DNA. Oxidační stres může případně vyvolat poškození neuronů, modulovat intracelulární signalizaci a eventuálně vést k neurální smrti apoptózou (Calebrese et al. 2010). Apoptóza je jedním z hlavních typů programované buněčné smrti (Saikumar et al. 1999).

Experimentální důkazy hovoří o luteinu jako tzv. zesilovači antioxidantní obrany proti poškození neuronů během diabetické retinopatie, ischemie a Alzheimerovy choroby (Nataraj et al. 2015). Tyto vlastnosti luteinu mohou pravděpodobně způsobit pokles mitochondriální dysfunkce a apoptickou smrt, což ukazuje na důležitost luteinu při léčbě Alzheimerovy choroby (Zaheer 2017). Z novějších studií vyplývá, že vyšší koncentrace luteinu ve vztahu k plazmatickým lipidům může mírně snížit riziko demence a Alzheimerovy choroby u starších jedinců (Feart et al. 2015). Pacienti s Alzheimerovou chorobou vykazují výrazně méně makulárního pigmentu a horší vidění. Suplementace karotenoidů luteinu a zeaxantinu prospívá pacientům s Alzheimerovou chorobou, a to nejen z hlediska klinicky významného zlepšení zrakové funkce, ale i funkce kognitivní, resp. rozpoznávací (Nolan et al. 2014).

Rakovina nebo přesněji nádorové onemocnění je různorodá skupina chorob celosvětově zodpovědná za jednu z hlavních příčin nemoci, invalidity a úmrtnosti. Bioaktivní složky v různých potravinách nebo peptidech získaných z potravin poskytují zásadní spojení při udržování zdraví, podpoře a prevenci chronických onemocnění, jako je rakovina (Hernández-Ledesma & Hsich 2015). V současné době se objevují studie zabývající se protirakovinným účinkem karotenoidů přijatých v potravě (Milani et al. 2016; Wang et al. 2016; Yan et al. 2016), kde bioaktivní složky přítomné v potravinách mohou současně modulovat více než jeden potenciální buněčný mechanismus (Zaheer 2017). V souvislosti s příjmem luteinu a zeaxantinu zaznamenaly výzkumné studie pokles v míře rakoviny ústní dutiny a hltanu (18 %) a rakoviny hrtanu (17 %) (Leoncini et al. 2015). Na druhou stranu řada výzkumných studií ukazuje, že sérové karotenoidy, včetně luteinu a zeaxantinu, jsou nepřímo spojeny s rizikem rakoviny

prsu u žen (Yan et al. 2016), případně přinášejí nekonzistentní výsledky související s rizikem kolorektálního karcinomu (Okuyama et al. 2014; Lu et al. 2015). Riziko rakoviny plic z β -karotenu u kuřáků i bývalých kuřáků bylo prokázáno studií Tanvetyanon & Bepler (2008).

Ačkoli vědecké důkazy na podporu prospěšné úlohy karotenoidů ve vaječných žlutcích při prevenci nebo snižování VPMD, kardiovaskulárních onemocnění a neurodegenerace jsou značné, výsledky výzkumu o úloze vaječných karotenoidů na různé druhy rakoviny jsou neprůkazné nebo nekonzistentní a stojí za další prozkoumání. Obecně se předpokládá, že karotenoidy vaječného žloutku zvyšují antioxidační aktivitu a poskytují tak potenciální výhody při snižování rizika některých chronických chorob (Zaheer 2017).

3.9.4 Další významné účinky zdraví prospěšných karotenoidů

Epidemiologické studie ukazují souvislost mezi příjmem karotenoidů a jejich akumulací v tkáních s možným vlivem na snížení rizika výskytu některých chronických degenerativních onemocnění spojených s westernizací a západním stylem života (Marounek & Havlík 2020). Studie Johnson et al. (2013) ukazuje, že lutein je s 34 % nejvíce zastoupeným karotenoidem v dospělém mozku. V mozku dětí je tento podíl ještě vyšší a činí 59 % (Vishwanathan et al. 2014). Předmětem zkoumání je tedy i vliv luteinu na vývoj nervového systému u dětí a také na zachování kognitivních funkcí u starších osob (Kralik et al. 2021). Například Perrone et al. (2009) ve své studii zjistili, že lutein přítomný v novorozeneckém séru významně zvyšuje antioxidační aktivitu. Na druhou stranu studie Johnson et al. (2013) prokázala výrazné zlepšení plynulosti řeči u žen ve věku 60 – 80 let, které konzumovaly doplňky luteinu (12 g/den), DHA (800 mg/den) nebo jejich kombinaci po dobu 4 měsíců. Zde bylo také zjištěno, že paměť a rychlost učení, stejně jako efektivnější trend učení se významně zlepšily u skupiny žen s dietním doplňkem kombinujícím lutein a DHA. Mimo roli karotenoidů jako antioxidantů se v současné době také předpokládá, že hlavní efekt v metabolismu živočichů a člověka leží v ovlivňování buněčných signálů, cytokinů, expresi genů spojených s ovlivňováním civilizačních chorob, imunitní odpovědi a detoxikačních enzymů (Marounek & Havlík 2020).

Lidský organismus není schopen biosyntézy karotenoidů, a proto je odkázán na jejich příjem stravou (Britton et al. 2009). Strava bohatá na karotenoidy lutein a zeaxantin, pocházející z vaječných žloutků obohacených funkčních vajec, je epidemiologicky korelována s nižším rizikem vzniku několika onemocnění. Pravidelný přísun bioaktivních antioxidantů karotenoidů z přirozené stravy nebo formou dietních doplňků pomáhá při imunomodulaci, o čem svědčí vysoká míra mizení karotenoidů z krevního řečiště během období imunitního stresu.

Nové marketingové strategie by měly vyzdvihnout vejce jako výjimečný zdroj vysoce biologicky dostupného luteinu a zeaxantinu a zdůraznit jejich význam pro lidské zdraví. Mezitím by měli být spotřebitelé lépe informováni o vysoce kvalitních vlastnostech vajec, aby se napravila špatná pověst minulosti, která se zaměřovala na vysoký obsah nasycených tuků a cholesterolu ve slepičích vejcích (Zaheer 2017). Vědecky podložené studie přesvědčivě prokázaly, že konzumace jednoho vejce denně nezvýší hladinu cholesterolu v krvi u zdravých lidí (Seuss-Baum 2007; López Sobaler 2017; Kim & Campbell 2018), ale živiny z vajec zajistí zvýšení antioxidační ochrany proti řadě závažných chronických onemocnění (Zaheer 2017).

4 Metodika

Ve Výzkumném ústavu živočišné výroby, v.v.i. v Praze Uhřetěvesi proběhla řada pokusů s náhradou syntetických karotenoidů v krmných směsích drůbeže přírodními zdroji luteinu a zeaxantinu, včetně pokusu s nově vyšlechtěnou odrůdou pšenice PEXESO, jehož dílčí výsledky jsou uvedeny v této diplomové práci. Tento pokus probíhal na oddělení Fyziologie výživy a jakosti produkce Výzkumného ústavu živočišné výroby, v.v.i. v Praze Uhřetěvesi.

V krmných směsích pro nosnice byla srovnávána pšenice PEXESO se zvýšeným obsahem karotenoidů luteinu a zeaxantinu s pšenicí TERCIE (běžně pěstovaná odrůda pšenice). Oba tyto genotypy pšenice byly vyšlechtěny českou firmou Selgen, a.s. a poskytnuty zdarma k pokusům s drůbeží ve Výzkumném ústavu živočišné výroby, v.v.i. v Praze Uhřetěvesi.

Pšenice genotypu PEXESO je registrovaná odrůda alternativní jarní pšenice firmy Selgen, a.s. Jedná se o intenzivně odnožující odrůdu se středně dlouhým stéblem (90 – 92 cm) jakostní třídy A vhodnou pro intenzivní pěstování. Jedinečnou vlastností této odrůdy pšenice je vysoký obsah karotenoidů. Konkrétně luteinu obsahuje pšenice PEXESO 2× více než jakákoli jiná komerčně pěstovaná odrůda pšenice. Jakostně se tato odrůda hodí ke zpracování na výrobu pečiva a těstovin (žlutý nádech pečiva a těstovin) a ke krmení hospodářských zvířat.

Mezi základní jakostní ukazatele patří vysoká a stabilní objemová hmotnost (cca 820 g/l), vysoký objem pečiva po upečení – velmi vysoká hodnota Zeleného testu (63 ml), vysoký obsah dusíkatých látek (14,2 %), vysoká vaznost mouky, stabilní číslo poklesu a střední až vyšší HTS (hmotnost tisíce semen = 43 g). PPS (počet produktivních stébel na m²) se rovná hodnotě 613. Klíčovými vlastnostmi této odrůdy jsou stabilní výnos zrna ve všech oblastech pěstování (103 %), snášení nízkých teplot, vhodnost pro rané setí, velmi dobrý zdravotní stav a střední odolnost vůči poléhání. Tato odrůda pšenice je rovněž vhodnou obilní předplodinou.

Pšenice genotypu PEXESO je charakteristická svou odolností ke rzi pšeničné (*Puccinia triticina*) a rzi plevelové (*Puccinia striiformis*). Tato pšenice velmi odolává bráničnatce pšeničné (*Zymoseptoria tritici*), rzi pšeničné a plevelové, padlí travní pšenice (*Blumeria graminis*) v klasu, komplexu listových skvrnitostí a středně pak odolává padlí travní pšenice na listu. V zahraničí (Irsko, Anglie) má tato odrůda pšenice výborné výsledky. Charakteristika pšenice genotypu PEXESO byla převzata od Horčíčky et al. (2018) a Selgen a.s. (2022).

Odrůda pšenice PEXESO má zvýšenou koncentraci karotenoidů luteinu a zeaxantinu, a proto můžeme hypoteticky předpokládat vliv vyšší koncentrace luteinu a zeaxantinu v této odrůdě pšenice na užitkovost nosnic a kvalitu vyprodukovaných živočišných produktů – vajec.

Podrobné informace o vlastnostech pšenice odrůdy PEXESO přináší Tabulka č. 3.

Tabulka č. 3: Vlastnosti pšenice PEXESO (upraveno dle Selgen, a.s. 2022)

Kvalita zrna	
Jakost	A
Obsah N-látek (%)	14,2
Objemová hmotnost (g/l)	817
Sedimentační index – Zelenyho test (ml)	63
Číslo poklesu (pádové číslo)	327
Agronomická data	
Ranost	poloraná
Délka rostlin (cm)	89
Odolnost poléhání	8
Vhodnost k obilní předplodině	vhodná
Výsevek (MKS/ha)	3,5 – 4,5
Potřeba morforegulátoru	dle způsobu vedení
Odolnost chorobám	
Padlí travní (<i>Blumeria graminis</i>) – list	dobrá
Padlí travní (<i>Blumeria graminis</i>) – klas	vyšší
Braničnatka pšeničná (<i>Zymoseptoria tritici</i>) – list	dobrá
Braničnatka pšeničná (<i>Zymoseptoria tritici</i>) – klas	vyšší
Rez pšeničná (<i>Puccinia triticina</i>)	vyšší
Fusarium (<i>Fusarium</i> sp.) – klas	vyšší

Cílem experimentu této práce bylo zjistit vliv zvýšené koncentrace karotenoidů luteinu a zeaxantinu ve vybrané odrůdě pšenice PEXESO na užitkovost nosnic a kvalitu vajec, zahrnující jejich technologickou hodnotu, obsah karotenoidů a vitaminů ve žloutcích a oxidační stabilitu žloutku v miligramech malondialdehydu na kilogram vaječného žloutku.

4.1 Metodika experimentu

4.1.1 Nosnice, pšenice PEXESO v krmných směsích pro nosnice, ustájení

Do pokusu s pšenicí PEXESO bylo zařazeno 240 nosnic genotypu Lohmann Brown (Podnik pro výrobu vajec v Kosičkách, s.r.o., Kosičky, Česká republika) ve věku 42 týdnů. Lohmann Brown je genotyp nosnic hnědého odstínu peří, který byl speciálně pro produktivitu snášení vajec selektivně vyšlechtěn z linií plemen Rhode Island a White Rock. Tyto nosnice byly ustájeny v obohacených klecích a zařazeny do 4 skupin dle odrůdy pšenice (pšenice TERCIE a pšenice PEXESO se zvýšeným obsahem luteinu a zeaxantinu) a dle zdroje tuku (řepkový olej a vepřové sádlo) v krmné směsi (viz Tabulka č. 4). Důvodem zařazení obou tuků bylo, že z důvodu dosažení normované potřeby metabolizovatelné energie je nezbytné přidávat do krmných směsí pro drůbež tuk. Dnes je to převážně živočišný tuk, méně i rostlinné oleje. Zde byly použity dva kontrastní tuky s ohledem na zastoupení mastných kyselin. V každé skupině bylo 6 opakování (podskupin = klecí) po deseti nosnicích, tzn. že nosnice byly umístěny vždy po deseti kusech/klec a celkem tak do 6 klecí na skupinu. Ve všech krmných směsích v pokusu bylo 61 % pšenice jednoho nebo druhého genotypu. Pokus trval 10 týdnů.

Pro tento pokus byly sestaveny vlastní receptury a krmné směsi pro drůbež byly namíchány ve státním podniku Mezinárodní testování drůbeže, s. p. v Ústrašicích.

Tabulka č. 4: Schéma pokusu

Skupina	Počet nosnic	Odrůda pšenice	Zdroj tuku
1	60	TERCIE	Řepkový olej
2	60	TERCIE	Vepřové sádlo
3	60	PEXESO	Řepkový olej
4	60	PEXESO	Vepřové sádlo

Technologické a mikroklimatické podmínky ustájení odpovídaly technologickému postupu daného hybridu Lohmann Brown. Délka světelného dne byla 16 hodin (2.30 – 18.30) a nosnice byly krmeny *ad libitum*. Složení krmné směsi uvádí Tabulka č. 5.

Denně byl sledován zdravotní stav nosnic a počet uhynulých kusů. Snáška byla evidována denně, příjem krmiva týdně, všechna vejce byla vážena týdně, 2× během pokusu byla u všech vajec laboratorně stanovena jejich technologická hodnota, 1× byla odebrána vejce a vzorky

krmných směsí na chemické analýzy. Rozbory byly realizovány v laboratoři VÚŽV. Obsah některých analyticky stanovených živin, včetně karotenoidů, je uveden v Tabulce č. 6.

Tabulka č. 5: Složení krmné směsi

Komponenta (%)	1	2	3	4
Pšenice TERCIE	60,91	60,91	–	–
Pšenice PEXESO	–	–	60,91	60,91
Sójový extrahovaný šrot	24,80	24,80	24,80	24,80
Řepkový olej	3,00	–	3,00	–
Vepřové sádlo	–	3,00	–	3,00
Dihydrogenfosforečnan vápenatý	1,20	1,20	1,20	1,20
Chlorid sodný	0,19	0,19	0,19	0,19
Uhlíčitan sodný	0,26	0,26	0,26	0,26
Vápenec drcený	9,05	9,05	9,05	9,05
DL-Methionin	0,09	0,09	0,09	0,09
Vitamino-minerální doplněk	0,50	0,50	0,50	0,50

Tabulka č. 6: Obsah dusíkatých látek, metabolizovatelné energie a karotenoidů luteinu a zeaxantinu v jednotlivých krmných směsích

Krmná směs	I	II	III	IV
Odrůda pšenice	TERCIE		PEXESO	
Zdroj tuku	ŘO	VS	ŘO	VS
Dusíkaté látky (%)	15,81	15,95	15,80	15,66
Metabolizovatelná energie (MJ/kg)	10,96	10,69	10,83	10,56
Lutein (mg/kg)	0,39	0,33	0,69	0,76
Zeaxantin (mg/kg)	0,22	0,21	0,44	0,43

Obsah luteinu a zeaxantinu byl u pšenice odrůdy TERCIE 0,45 mg/kg a 0,22 mg/kg.

Obsah luteinu a zeaxantinu byl u pšenice odrůdy PEXESO 1,14 mg/kg a 0,79 mg/kg.

4.1.2 Technologická hodnota vajec

Vejsce pro stanovení technologické hodnoty vajec byla odebírána ve 28denním intervalu, a to veškerá snesená vejce. Vejce byla sbírána v 7.00. Ihned poté následovalo stanovení fyzikálních ukazatelů kvality vajec. Celkem bylo zanalyzováno 438 ks vajec. Rozbory byly realizovány v laboratoři VÚŽV. Hmotnost vajec a jejich komponent se zjišťovala na běžných elektronických laboratorních váhách. Kvalita bílku byla vyjádřena pomocí Haughových jednotek (HU) a indexu bílku. Haughovy jednotky byly spočítány dle vzorce (Raymond Haugh 1937) viz níže. Hodnoty Haughových jednotek, vyjadřující kvalitu bílku, a tedy i vejce na základě vztahu mezi výškou hustého bílku a hmotností celého vejce, se pohybují v rozmezí 20 – 100, kdy vyšší hodnoty znamenají vyšší kvalitu vajec. Čerstvá vejce nejvyšší jakosti mají HU 72 a vyšší, za dobrou až ještě přijatelnou kvalitu lze považovat HU v rozmezí 60 – 72. Barva žloutku byla stanovena pomocí škály barev DSM (DSM Nutritional Products, Basel, Switzerland) od 1 do 15 a pomocí přístroje Minolta SpectraMagic™ NX (Konica Minolta Sensing, Inc., Osaka, Japan) byla vyjádřena hodnotami a^* a b^* . Parametr a^* odpovídá červenosti (–100 = zelená, 100 = červená) a parametr b^* žlutosti (–100 = modrá, 100 = žlutá). Pevnost skořápky byla vyhodnocena přístrojem Instron 3360 (Instron, Canton, USA) a tloušťka skořápky (průměr ze tří hodnot – z ostrého a tupého konce a ekvatoriální roviny) byla po odstranění podskořápečných blan zjištěna pomocí mikrometru (Mitutoyo, Kawasaki, Japan).

$$HU = 100 \log (V - 1,7H^{0,37} + 7,6)$$

HU = Haughovy jednotky

V = výška vnějšího hustého (tuhého) bílku (mm)

H = hmotnost vejce (g)

4.1.3 Příjem karotenoidů a stanovení obsahu karotenoidů ve žloutku

Příjem karotenoidů, luteinu a zeaxantinu, byl vypočten na základě množství jednotlivých karotenoidů v krmné směsi a průměrné spotřeby krmiva na nosnici a den.

Vejsce pro stanovení karotenoidů ve žloutcích byla sbírána v 10. týdnu pokusu (3 vejce na vzorek, $n = 8$). Před samotnou analýzou byly vaječné žloutky lyofilizovány. Lyofilizace neboli desikace je metoda sušení vlhkých materiálů. Lyofilizované žloutky jsou žloutky sušené pod bodem mrazu tak, aby byly zachovány všechny přítomné živiny. Obsah karotenoidů luteinu a zeaxantinu v krmivu a ve žloutcích byl stanoven vysokoúčinnou kapalinovou chromatografií (HPLC – High-performance liquid chromatography) dle metody Froescheis et al. (2000).

Jeden gram homogenizovaného vzorku byl umístěn do plastové zkumavky spolu s 20 ml acetonu. Po mixování ve vortexu (2 minuty) se vzorek chladil v ledu po dobu 10 minut a odstředil se při 13000 g po dobu 10 minut při teplotě 4 °C. Supernatant byl přenesen do skleněné baňky a zbytek se extrahoval ještě jednou postupem popsáným výše. Spojené extrakty byly odpařeny do sucha při teplotě 50 °C s profouknutím N₂, zbytek se rozpustil ve 2 ml směsi ethanol-voda (1:1, v/v) a extrahoval se dvakrát s hexanem (4 a 2 ml). Každý krok extrakce se provedl mixováním ve vortexu po dobu 2 minut s následným odstředěním při 13000 g (10 minut, 4 °C). Po odpaření spojených organických fází do sucha při 50 °C a profouknutí N₂ byl zbytek rozpuštěn v 1 ml směsi hexan/dichlormethan (1:1, v/v). Alikvotní (tj. odpovídající) část 60 ml byla analyzována HPLC (VP series, Shimadzu, Kyoto, Japan). Byla použita kolona Kinetex C18 (100 x 4,6 mm, 2,6 μm, Phenomenex, Torrance, CA, USA). Gradientová eluce zahrnovala jako mobilní fázi A acetonitril:voda:ethylacetát (80:10:2) a jako mobilní fázi B acetonitril:voda:ethylacetát (88:0:15). Obsah karotenoidů, luteinu a zeaxantinu, byl vyjádřen v miligramech v kilogramu sušiny žloutku, v miligramech v kilogramu čerstvého žloutku a v miligramech ve vejci.

Retence neboli zadržení karotenoidů ve žloutku byla vypočtena ze vzorce:

$$R = \frac{A \times B \times C}{D}$$

R = retence (%)

A = produkce vaječné hmoty (g/nosnice/den)

B = podíl žloutku (%)

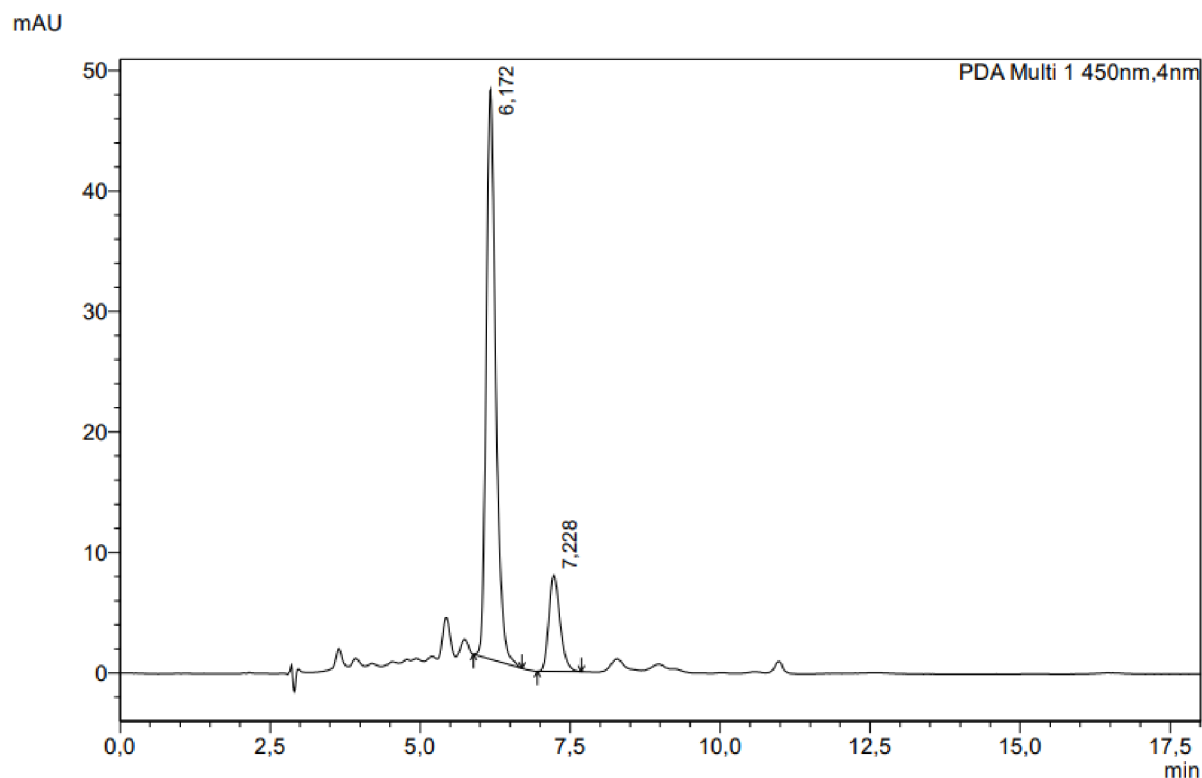
C = obsah karotenoidu v čerstvém žloutku (mg/g)

D = příjem karotenoidu (mg/nosnice/den)

4.1.4 Stanovení obsahu vitaminů ve žloutku

Vejce pro stanovení vitaminů ve žloutcích byla sbírána v 10. týdnu pokusu (3 vejce na vzorek, n = 8). Žloutky byly před samotnou analýzou lyofilizovány. Obsah retinolu a tokoferolů (α-tokoferol a γ-tokoferol) ve vaječném žloutku byl stanoven dle evropských norem EN 12823-1 (2000) a EN 12822-1 (2000) pomocí vysokoúčinné kapalinové chromatografie (HPLC, VP series, Shimadzu, Kyoto, Japan) vybavené detektorem diodového pole. Vzorky byly podrobeny alkalickému zmýdelnění 60% hydroxidem draselným (KOH) a následnou příslušnou extrakcí diethyletherem.

Vzorový příklad chromatogramu – záznamu z chromatografu, znázorňující přítomnost a koncentraci luteinu a zeaxantinu ve vzorku lyofilizovaného vaječného žloutku. Jednotlivé analyty se ve výsledném chromatogramu znázorňují ve formě tzv. chromatografických „Peaks“ (tj. píků, zón, elučních křivek) oddělených navzájem základní linií (viz Obrázek č. 24).



Obrázek č. 24: HPLC chromatogram karotenoidů luteinu (Peak 1: 6,172 min) a zeaxantinu (Peak 2: 7,228 min) z náhodného vzorku lyofilizovaného vaječného žloutku

Tabulka č. 7: Analytické informace z chromatogramu – Peak table (PDA Ch 1 450 nm)

Peak	RT*	Plocha	Výška	Koncentrace	Jednotka	Označení	Název
1	6,172	520791	47274	2,314	µg/ml	M	lutein
2	7,228	104003	7975	0,817	µg/ml	M	zeaxantin
Celkem	/	624794	55249	/	/	/	/

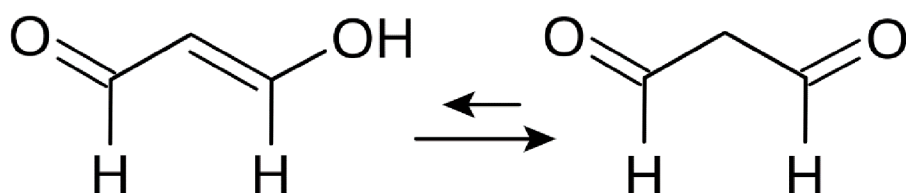
* RT = retenční čas

Uvedený chromatogram a jemu odpovídající Tabulka č. 7 vypovídají o přítomnosti karotenoidů luteinu a zeaxantinu v analyzovaném vzorku. V analyzovaném vzorku vaječného žloutku byla za pomoci kapalinové chromatografie stanovena koncentrace karotenoidů luteinu (2,314 µg/ml) a zeaxantinu (0,817 µg/ml). Retenční čas – celkový čas, který příslušný analyt stráví v separační koloně, představoval pro lutein 6,172 min a pro zeaxantin 7,228 min.

4.1.5 Stanovení oxidační stability lipidů žloutku

Peroxidace lipidů (tj. lipoperoxidace) ve žloutcích byla měřena u čerstvých vajec a vajec, která byla skladována po dobu 28 dní při teplotě 18 °C. Vejce byla opět odebrána v 10. týdnu pokusu (3 vejce na vzorek, n = 8). Pro samotné měření a stanovení koncentrace reaktivního malondialdehydu byla použita modifikovaná metoda Czauderna et al. (2011).

Půl gramu vzorku (tzn. vaječného žloutku) bylo zmýdelněno působením 5 ml 1 M KOH (hydroxid draselný) a 50 µl 0,02 M 2,6-di-*tert*-butyl-*p*-cresolu (BHT) v metanolu. Směs byla v plastové zkumavce umístěna na 1 hodinu do vodní lázně o teplotě 60 °C, kde byla kontinuálně míchána za temna. Poté se nechal výsledný roztok zchladnout a okyselil se koncentrovanou kyselinou chlorovodíkovou (HCl) přibližně na pH 2. Následně byl okyselený roztok hydrolyzátu 10 minut odstředován. K odebranému supernatantu (tj. tekutina nad sedimentem, 500 µl) byl přidán roztok 2,4-dinitrophenylhydrazinu (DNPH). Výsledná směs byla intenzivně míchána při teplotě 50 °C po dobu 1 hodiny ve tmě. Čirý roztok byl přenesen do vialky a pak 40 µl roztoku bylo nastříknuto do kolony za účelem chromatografické analýzy (HPLC). Byl použit vysokoúčinný kapalinový chromatograf (VP series, Shimadzu, Koyto, Japan) vybavený detektorem s diodovým polem. Kolona byla zvolena Phenomenex C18 (Synergi 2.5 µm, Hydro-RP, 100 Å, 100 mm x 3 mm). Vzorky byly analyzovány pomocí binárního gradientu acetonitrilu ve vodě. Solvent A se sestával z voda-acetonitril (95:5, v/v) a solvent B z acetonitrilu. Oxidační stabilita lipidů žloutku byla vyjádřena v miligramech malondialdehydu (MDA, viz Obrázek č. 25) na kilogram vaječného žloutku.



Obrázek č. 25: Chemická struktura: malondialdehyd (MDA, propandial, rovnovážná směs)
(Wikimedia Commons contributors)

4.1.6 Statistická analýza

Zjištěné výsledky byly zpracovány dvoufaktoriální analýzou variance (ANOVA) pomocí general linear modelu (GLM) programem SAS (SAS Institute 2003). Hlavními faktory byly odrůda pšenice a zdroj tuku v krmivu a interakce mezi těmito faktory. Pravděpodobnost menší než 0,5 byla považována za průkaznou. Výsledky v tabulkách jsou uvedeny jako průměry.

5 Výsledky

V experimentu, který proběhl na oddělení Fyziologie výživy a jakosti produkce VÚŽV, v.v.i. v Praze Uhřetěvesi, byl zjištěn vliv zvýšené koncentrace dietárních karotenoidů, luteinu a zeaxantinu, ve vybrané odrůdě pšenice PEXESO na užitkovost nosnic a kvalitu vajec. Kvalitu vajec představuje hlavně jejich technologická hodnota. Dále byl experimentálně stanoven obsah karotenoidů v lyofilizovaných žloutcích, obsah liposolubilních vitaminů a oxidační stabilita žloutku. Ta byla vyjádřena v miligramech malondialdehydu na kilogram vaječného žloutku.

Ve snášce nosnic a její intenzitě nebyly významné rozdíly mezi skupinami (viz Tabulka č. 8). Nevýznamné difference jsou označeny ve sloupcích Průkaznost (odrůda, tuk, odrůda*tuk) písmeny NS (nepřukazný). Vyšší hladina průkaznosti je označena nižším číslem. Jestliže je např. významnost 0,05, znamená to, že při opakování 100× by bylo 95 případů významně rozdílných a pouze 5 případů nevýznamných atd. Intenzita snášky nosnic, vyjádřená v procentech, byla nepatrně vyšší pouze u pšenice odrůdy PEXESO, a to v kombinaci s vepřovým sádlem (94,70 %) jako zdrojem tuku v krmné směsi. Produkce vaječné hmoty vyjádřená v gramech na nosnici a den byla ovlivněna tukem a interakcí odrůda*tuk, nikoliv však samotnou odrůdou pšenice (viz Tabulka č. 8).

Tabulka č. 8: Užitkovost nosnic

Skupina	I	II	III	IV			
Odrůda pšenice	TERCIE		PEXESO		Průkaznost		
Zdroj tuku	ŘO	VS	ŘO	VS	Odrůda	Tuk	Odrůda*tuk
Intenzita snášky (%)	93,48	93,93	93,77	94,70	NS	NS	NS
Vaječná hmota (g/nosnice/den)	58,00 ^b	58,15 ^{ab}	59,03 ^a	58,56 ^a	NS	<0,01	<0,05
Spotřeba krmiva ks/den (g)	115,7	114,7	111,6	111,2	<0,001	NS	NS
Spotřeba krmiva kg/kg vaječné hmoty	1,99	1,98	1,89	1,90	0,013	0,037	NS
Spotřeba krmiva/vejce (g)	124,1	122,4	119,1	117,6	<0,001	NS	NS

^{ab} číslo na stejném řádku označené jiným písmenem než předchozí, se průkazně liší; NS = nepřukazný

Hlavní výsledek v rámci ukazatelů užitkovosti ve prospěch pšenice PEXESO byl nižší denní příjem krmiva ($P < 0,001$) a nižší spotřeba krmné směsi na produkci 1 kg vaječné hmoty ($P = 0,013$). Průkazná interakce odrůdy a zdroje tuku v dietě byla zaznamenána pouze u produkce vaječné hmoty ($P < 0,05$), kdy nejvyšší produkci vykazovaly nosnice krmené směsí s odrůdou PEXESO a řepkovým olejem ($59,03^a$ g/nosnice/den) oproti nosnicím s TERCÍÍ a řepkovým olejem ($58,00^b$ g/nosnice/den). Nižší spotřeba krmné směsi na produkci samotného vejce byla rovněž zaznamenána u pšenice odrůdy PEXESO ($P < 0,001$), a to jak v kombinaci s řepkovým olejem (119,1 g), tak i vepřovým sádlem (117,6 g) v dietě (viz Tabulka č. 8).

Po zařazení pšenice odrůdy PEXESO do krmné směsi pro nosnice došlo k výraznému snížení hodnoty Haughových jednotek ($P < 0,001$) v porovnání s pšenicí odrůdy TERCIE ve zbylých skupinách (viz Tabulka č. 9). Významné snížení hodnoty HU bylo zaznamenáno v kombinaci s řepkovým olejem (HU $84,5^b$) i vepřovým sádlem (HU $82,1^c$) v dietě.

Tabulka č. 9: Fyzikální ukazatelé kvality vajec

Skupina	I	II	III	IV			
Odrůda pšenice	TERCIE		PEXESO		Průkaznost		
Zdroj tuku	ŘO	VS	ŘO	VS	Odrůda	Tuk	Odrůda*tuk
Hmotnost vejce (g)	62,0	61,9	62,9	61,9	<0,001	<0,001	<0,001
Podíl bílku (%)	64,1 ^a	63,4 ^b	63,5 ^b	63,6 ^b	NS	NS	0,043
Haughovy jednotky	86,6 ^a	88,3 ^a	84,5 ^b	82,1 ^c	<0,001	NS	0,003
Podíl žloutku (%)	25,8	26,4	26,0	26,1	NS	0,031	NS
Index žloutku (%)	45,5	45,9	45,3	45,5	NS	NS	NS
Barva žloutku – DSM	1,62	1,61	3,48	3,52	<0,001	NS	NS
a* (červenost)	-1,57 ^c	-1,59 ^c	-0,93 ^b	-0,80 ^a	<0,001	NS	0,030
b* (žlutost)	21,9 ^c	21,2 ^c	26,8 ^b	28,7 ^a	<0,001	NS	0,007
Podíl skořápky (%)	10,1	10,2	10,4	10,3	<0,001	NS	NS
Tloušťka skořápky (μm)	327	320	334	328	0,037	NS	NS
Pevnost skořápky (N)	45,9	45,3	48,5	47,5	<0,001	NS	NS

^{abc} číslo na stejném řádku označené jiným písmenem než předchozí, se průkazně liší; NS = neprůkazný

Pšenice odrůdy PEXESO, zařazená do našeho experimentu, kladně ovlivnila finální barvu vaječného žloutku dle stupnice barev DSM Yolk Colour Fan (PEXESO*ŘO 3,48 DSM, PEXESO*VS 3,52 DSM, viz Tabulka č. 9). Barva žloutku byla dále analyzována přístrojem Minolta SpectraMagic™ NX a s pomocí laboratorní stupnice CIE (Commission Internationale de l'Eclairage) Lab byla vyjádřena hodnotami a^* a b^* . Parametr a^* odpovídá červenosti a udává červenozeleňou hodnotu ($-100 =$ zelená, $100 =$ červená). Parametr b^* odpovídá žlutosti a udává žlutomodrou hodnotu ($-100 =$ modrá, $100 =$ žlutá). Parametry červenost (a^*) a žlutost (b^*) byly ovlivněny odrůdou ($P < 0,001$) a interakcí odrůda*tuk ($a^* P = 0,030$, $b^* P = 0,007$), nikoliv samotným zdrojem tuku (viz Tabulka č. 9). Pšenice odrůdy PEXESO v krmných směsích pro nosnice významně zvýšila parametr žlutosti (b^*) oproti krmným směsím s pšenicí odrůdy TERCIE, a to jak v kombinaci s vepřovým sádlem ($28,7^a$), tak i řepkovým olejem ($26,8^b$) jako zdrojem tuku v dietě.

Pšenice odrůdy PEXESO významně zvýšila hodnoty tloušťky ($P = 0,037$) i pevnosti vaječné skořápky ($P < 0,001$, viz Tabulka č. 9).

Příjem karotenoidů luteinu a zeaxantinu vypočten na základě množství jednotlivých karotenoidů v krmné směsi a průměrné spotřeby krmiva na nosnici a den (mg/nosnice/den), byl jednoznačně vyšší u skupin s pšenicí odrůdy PEXESO (viz Tabulka č. 10 a Tabulka č. 11).

Obsah karotenoidů luteinu ($P < 0,001$, viz Tabulka č. 10) a zeaxantinu ($P < 0,001$, viz Tabulka č. 11) byl výrazně vyšší u skupin s PEXESEM v krmné směsi oproti skupinám s TERCÍÍ. Na ukládání karotenoidů luteinu ($P = 0,001$, viz Tabulka č. 10) a zeaxantinu ($P = 0,001$, viz Tabulka č. 11) ve žloutku měl rovněž významný vliv zdroj tuku v krmivu. Výrazně vyšší hodnoty karotenoidů byly naměřeny v případě krmných směsí v kombinaci s vepřovým sádlem (lutein $6,04$ mg/kg DM a zeaxantin $4,25$ mg/kg DM). Na ukládání karotenoidů zde mělo pozitivní vliv právě vepřové sádlo vykazující převahu nasycených mastných kyselin oproti řepkovému oleji, který je zase bohatý na nenasycené mastné kyseliny.

Retence karotenoidů, resp. jejich skutečné množství zadržené ve vaječném žloutku, vypočtena dle uvedeného vzorce (viz kapitola 4.1.3) a vyjádřena v procentech, byla u obou karotenoidů ovlivněna odrůdou ($P < 0,001$) a tukem ($P < 0,001$). Rovněž interakce odrůda*tuk byla průkazná u zadržení karotenoidů luteinu ($P < 0,001$, viz Tabulka č. 10) a zeaxantinu ($P = 0,002$, viz Tabulka č. 11). Nejvyšší retence karotenoidu luteinu ve žloutku byly zaznamenána u pšenice PEXESO jak v kombinaci s řepkovým olejem ($55,6^a$ %), tak i vepřovým sádlem ($55,8^a$ %). Na druhou stranu retence karotenoidu zeaxantinu ve žloutku byla nejvyšší pouze u pšenice PEXESO s vepřovým sádlem ($69,4^a$ %) oproti ostatním skupinám.

Tabulka č. 10: Příjem luteinu, jeho obsah ve vejci a retence ve žloutku (%)

Skupina	I	II	III	IV			
Odrůda pšenice	TERCIE		PEXESO		Průkaznost		
Zdroj tuku	ŘO	VS	ŘO	VS	Odrůda	Tuk	Odrůda*tuk
Příjem luteinu (mg/nosnice/den)	0,045	0,038	0,077	0,084			
Lutein ve žloutku (mg/kg DM)	1,69	1,91	5,49	6,04	<0,001	0,001	NS
Lutein ve žloutku (mg/kg)	0,86	0,98	2,80	3,08	<0,001	0,001	NS
Lutein ve vejci (mg/vejce)	0,014	0,016	0,046	0,05	<0,001	0,013	NS
Retence luteinu ve žloutku	28,5 ^c	39,5 ^b	55,6 ^a	55,8 ^a	<0,001	<0,001	<0,001

^{abc} číslo na stejném řádku označené jiným písmenem než předchozí, se průkazně liší; NS = neprůkazný

Tabulka č. 11: Příjem zeaxantinu, jeho obsah ve vejci a retence ve žloutku (%)

Skupina	I	II	III	IV			
Odrůda pšenice	TERCIE		PEXESO		Průkaznost		
Zdroj tuku	ŘO	VS	ŘO	VS	Odrůda	Tuk	Odrůda*tuk
Příjem zeaxantinu (mg/nosnice/den)	0,026	0,024	0,049	0,048			
Zeaxantin ve žloutku (mg/kg DM)	0,94	1,53	3,98	4,25	<0,001	0,001	NS
Zeaxantin ve žloutku (mg/kg)	0,48	0,78	2,03	2,17	<0,001	0,001	NS
Zeaxantin ve vejci (mg/vejce)	0,008	0,013	0,034	0,035	<0,001	0,005	NS
Retence zeaxantinu ve žloutku (%)	28,2 ^d	49,6 ^c	63,1 ^b	69,4 ^a	<0,001	<0,001	0,002

^{abcd} číslo na stejném řádku označené jiným písmenem než předchozí, se průkazně liší; NS = neprůkazný

Koncentrace tokoferolů ve vaječném žloutku byla v našem experimentu ovlivněna odrůdou ($P < 0,001$) a tukem ($P < 0,001$). Významná interakce odrůdy a zdroje tuku v krmivu byla prokázána jak u α -tokoferolu ($P = 0,008$), tak i γ -tokoferolu ($P = 0,012$). U pšenice odrůdy PEXESO v kombinaci s řepkovým olejem došlo k významnému zvýšení hladiny α -tokoferolu ($174,1^a$ mg/kg DM) a γ -tokoferolu ($22,98^a$ mg/kg DM). Pšenice PEXESO neměla významný vliv na zvýšení obsahu retinolu ve vaječném žloutku (viz Tabulka č. 12).

Tabulka č. 12: Obsah vitaminů ve žloutku

Skupina	I	II	III	IV			
Odrůda pšenice	TERCIE		PEXESO		Průkaznost		
Zdroj tuku	ŘO	VS	ŘO	VS	Odrůda	Tuk	Odrůda*tuk
α -Tokoferol (mg/kg DM)	156,3 ^b	136,0 ^c	174,1 ^a	141,2 ^c	<0,001	<0,001	0,008
γ -Tokoferol (mg/kg DM)	17,54 ^b	10,13 ^c	22,98 ^a	8,31 ^c	<0,001	<0,001	0,012
Retinol (mg/kg DM)	9,21	8,61	9,19	9,00	NS	NS	NS

^{abc} číslo na stejném řádku označené jiným písmenem než předchozí, se průkazně liší; NS = neprůkazný
DM = dry matter, sušina

Pšenice odrůdy PEXESO, použitá v našem experimentu, výrazně snížila proces oxidace lipidů žloutků, resp. zvýšila oxidační stabilitu čerstvých vajec ($P < 0,001$) i vajec skladovaných ($P = 0,050$) po dobu 28 dní při teplotě 18 °C (viz Tabulka č. 13). Vejce nosnic krmených směsí s vepřovým sádlem rovněž vykazovala vyšší oxidační stabilitu, a to jak čerstvá ($P = 0,008$), tak i skladovaná ($P = 0,021$) při výše definovaných podmínkách.

Významná interakce odrůda*tuk byla v tomto experimentu zjištěna u obsahu reaktivního malondialdehydu v čerstvých vejcích ($P = 0,041$). U skupiny, jejíž krmná směs zahrnovala pšenici odrůdy TERCIE a řepkový olej jako zdroj tuku v dietě, byla zaznamenána zvýšená oxidace, resp. snížená oxidační stabilita lipidů u čerstvých žloutků ($0,448^a$ mg/kg) ve srovnání s ostatními skupinami (viz Tabulka č. 13).

Tabulka č. 13: Oxidační stabilita žloutku v hodnotách malondialdehydu (MDA v mg/kg)

Skupina	I	II	III	IV			
Odrůda pšenice	TERCIE		PEXESO		Průkaznost		
Zdroj tuku	ŘO	VS	ŘO	VS	Odrůda	Tuk	Odrůda*tuk
MDA (mg/kg) – čerstvá vejce	0,448 ^a	0,375 ^b	0,347 ^b	0,337 ^b	<0,001	0,008	0,041
MDA (mg/kg) – vejce po 28 dnech	0,458	0,416	0,425	0,363	0,050	0,021	NS

^{ab} číslo na stejném řádku označené jiným písmenem než předchozí, se průkazně liší; NS = neprůkazný

6 Diskuse

Cílem pokusu této diplomové práce bylo porovnat dvě vyšlechtěné odrůdy pšenice s rozdílným obsahem přírodních karotenoidů a dva zdroje tuku s kontrastním zastoupením mastných kyselin v krmných směsích pro nosnice se záměrem stanovit jejich vliv na užitkovost nosnic a kvalitu vyprodukovaných vajec, zejména pak zvýšení obsahu karotenoidů luteinu a zeaxantinu v lyofilizovaných vaječných žloutcích. Lipidy přítomné v matrici krmiva mají prokazatelný vliv na ukládání karotenoidů do vaječného žloutku. Hypotetickou otázkou však zůstávalo, jak odlišný profil mastných kyselin dvou použitých zdrojů tuku v dietě nosnic ovlivní zadržení a využití karotenoidů ze dvou odrůd pšenice a výslednou kvalitu vajec. Pozornost v rámci pokusu byla věnována i obsahu lipofilních vitaminů ve žloutku a jeho samotné oxidační stabilitě vyjádřené v hodnotách malondialdehydu na kilogram vaječného žloutku.

Registrovaná odrůda alternativní jarní pšenice genotypu PEXESO má především potravinářský význam. V zahraničí (Irsko, Anglie), kde je takto chápána, poskytuje výborné výsledky. Pšenice, jedna z celosvětově nejrozšířenějších obilnin, má velmi nízkou koncentraci tuku (1,5 – 3 %). Koncentrace tuku je spojena s koncentrací xantofylů, což jsou lipofilní látky představující spolu s karoteny jednu z nejrozšířenějších skupin přírodních pigmentů. Přestože se během procesu šlechtění a biofortifikace této odrůdy pšenice obsah karotenoidů 2,5 až 4× zvýšil, koncentrace xantofylů zůstala na poměrně nízké úrovni. Vliv zvýšené koncentrace přírodních karotenoidů luteinu (1,14 mg/kg) a zeaxantinu (0,79 mg/kg) v odrůdě pšenice PEXESO na kvalitu vajec byl hlavním předpokladem a hypotézou této diplomové práce.

Na základě námi provedeného experimentu s 240 nosnicemi genotypu Lohmann Brown ve věku 42 týdnů, ve kterém jsme porovnávali dvě odrůdy pšenice (TERCIE 60,91 % × PEXESO 60,91 %, viz Tabulka č. 5) s odpovídajícím přídatkem rostlinného oleje nebo živočišného tuku (řepkový olej 3,00 % × vepřové sádlo 3,00 %, viz Tabulka č. 5) v dietě, došlo po 10 týdnech pokusného krmení v případě zařazení pšenice PEXESO se zvýšeným obsahem přírodních karotenoidů do krmných směsí pro nosnice k několika významným výsledkům.

Základem výpočtu intenzity snášky (%) je přesná denní evidence počtu snesených vajec a počtu slepic, popř. krmných dnů (Stupka et al. 2013). Ve snášce a její intenzitě byly mezi jednotlivými skupinami našeho experimentu nevýznamné difference. Produkce vaječné hmoty byla ovlivněna tukem a interakcí odrůda*tuk. Nejvyšší produkci vykazovaly nosnice krmené směsí s odrůdou pšenice PEXESO a řepkovým olejem v dietě (59,03 g/nosnice/den). Významné difference, resp. hlavní výsledky v rámci ukazatelů užitkovosti nosnic ve prospěch pšenice

PEXESO byly zpozorovány u příjmu a konverze krmiva (tj. spotřeby na jednotku produkce). Oba tyto sledované ukazatele byly významně nižší než u ostatních skupin s běžnou pšenicí (viz Tabulka č. 8). Dietní přídavek karotenoidů působí antioxidačně, tzn. že zmírňuje oxidační stres a zlepšuje produkční výkonnost a zdraví drůbeže (Saeed et al. 2018; Nabi et al. 2020). Kromě toho mají karotenoidy protizánětlivý (Rubin et al. 2012) a imunomodulační (Hamelin & Altemueller 2012) účinek, což může ovlivnit i užítkovost chované drůbeže. Pozitivní vliv karotenoidů na užítkovost brojlerových kuřat lze nalézt například ve studii Fathi et al. (2022).

Haughovy jednotky (HU) vyjadřují jakost neboli kvalitu vejce na základě vztahu mezi výškou bílku a hmotností vejce. Při stárnutí vejce hodnoty HU klesají, a to v důsledku ztráty vlhkosti a rozpadu bílkovin uvnitř bílku (Pires et al. 2021). Bílkoviny tvoří v bílku až 92 % z celkové sušiny (Tůmová 2011). Po zařazení pšenice PEXESO do krmných směsí pro nosnice došlo v našem experimentu k výraznému snížení hodnoty HU v porovnání s ostatními skupinami (viz Tabulka č. 9). Toto snížení hodnoty HU bylo způsobeno pšenicí PEXESO.

Barva žloutku byla experimentálně stanovena pomocí škály barev DSM Yolk Colour Fan a pomocí přístroje Minolta SpectraMagic™ NX s využitím laboratorní stupnice CIE. Pšenice odrůdy PEXESO kladně ovlivnila finální barvu vaječného žloutku dle použité stupnice DSM (PEXESO × ŘO 3,48 DSM, PEXESO × VS 3,52 DSM, viz Tabulka č. 9), ale výsledná intenzita zbarvení byla i tak nižší, než je optimum preference střeoevropských spotřebitelů. Dietní doplňky některých tuků nebo olejů mohou ovlivnit konverzi karotenoidů. Ovlivnění barevného tónu žloutku odpovídajícím druhem tuku nebo interakcí odrůda*tuk mělo v našem experimentu nevýznamnou diferencí. Barva žloutku byla průkazně ovlivněna pšenicí genotypu PEXESO. Barva žloutku, stále uváděna jako jeden z nejdůležitějších znaků kvality vejce, se z hlediska jednotlivých preferencí v rámci různých zemí Evropské unie výrazně liší (Hernandez et al. 2000; Berkhoff et al. 2020). Střeoevropští spotřebitelé preferují zbarvení mezi 10. a 14. stupněm DSM (Galobart et al. 2004). Z tohoto důvodu se při použití pšenice odrůdy PEXESO v krmných směsích pro nosnice doporučuje ještě i jiný přídavek přírodního zdroje karotenoidů. Tím může být například efektivní a finančně nenáročný Avizant® Yellow 20 HS nebo jiná alternativa ve formě extraktu z květů afrikánu, případně přístup drůbeže na přirozenou pastvu. Podmínkou použití synteticky vyráběných karotenoidů (např. kantaxantinu) je dodržení maximálního povoleného množství v krmivech pro nosnice, které představuje 8 mg/kg.

Dalším možným zdrojům přírodních karotenoidů s potenciálním využitím ve výživě drůbeže se věnuje kapitola 3.4.1 Přírodní karotenoidy (viz výše). Společným organickým zdrojem obou dietních karotenoidů, luteinu a zeaxantinu, pro nosnice je zmíněný aksamitník.

Koncentrace luteinu a zeaxantinu jsou v komerčně vyráběných produktech na bázi aksamitníku mnohonásobně vyšší (Skřivan et al. 2016), než v námi použité biofortifikované pšenici genotypu PEXESO. Ideálním zdrojem přírodních karotenoidů je pastevní porost. Ve studii Skřivan & Englmaierová (2014) bylo zjištěno, že přístup nosnic na přirozenou pastvu spolu se sekvenčním zkrmováním pšenice zvýšil koncentraci karotenoidů ve žloutku a významně vyzdvihnul jeho barvené skóre na hodnotu 10,3 RYCF. Nosnice s přístupem na pastvu navíc produkují vejce s vysokým obsahem PUFA řady *n*-3 a α -tokoferolu (Lopez-Bote et al. 1998; Hammershøj & Johansen 2016). Vitamin E je důležitý nejen proto, že se vejce samotné stává jeho dobrým zdrojem, ale i z hlediska zlepšení funkčnosti a skladovatelnosti konzumních vajec. Kvalitní vejce je pak možné skladovat při nekolisavé teplotě od 5 °C do 18 °C až 28 dnů.

Kvalita skořápky má velký význam hlavně z hlediska ekonomiky produkce, protože 6 – 8 % vyprodukovaných vajec má defektní skořápku a tyto představují pro chovatele ztrátu. Pevnost vaječné skořápky, která je jednou z nejdůležitějších technologických vlastností vejce, byla v našem experimentu měřena přístrojem Instron 3360. Pšenice odrůdy PEXESO významně zvýšila hodnoty tloušťky i pevnosti vaječné skořápky (viz Tabulka č. 9). Na zvýšení tloušťky vaječné skořápky měla vliv například ve studii Skřivan et al. (2016) dieta doplněná extraktem z květů afrikánu v množství 550 mg/kg krmiva. Na druhou stranu doplněk sušené vojtěšky v množství 40 g/kg krmiva výrazně zhoršil užitkovost nosnic a negativně ovlivnil hodnoty tloušťky a pevnosti vaječné skořápky (Englmaierová et al. 2019). Hlavní minerální látkou, jejíž koncentrace přímo ovlivňuje kvalitu vaječných skořápek, je vápník (Scott et al. 1971). Nicméně kvalita tloušťky a pevnosti vaječných skořápek může souviset a být ovlivněna i vyššími koncentracemi fosforu (Hamilton & Sibbald 1977) a hořčíku (Kim et al. 2013) v dietě.

Koncentrace přírodních karotenoidů luteinu a zeaxantinu v lyofilizovaných žloutcích byla experimentálně stanovena za použití HPLC. Vyšší míra uložení luteinu (viz Tabulka č. 10) a zeaxantinu (viz Tabulka č. 11) ve vaječném žloutku byla způsobena výrazně vyšší dietní koncentrací těchto xantofylů v použité pšenici odrůdy PEXESO. Na ukládání luteinu a zeaxantinu ve žloutku měl rovněž významný vliv zdroj použitého tuku v krmivu. Výrazně vyšší hodnoty luteinu (6,04 mg/kg DM) a zeaxantinu (4,25 mg/kg DM) ve žloutku byly naměřeny po zkrmení směsi zahrnující pšenici PEXESO v kombinaci s vepřovým sádlem. Vyšší depozice karotenoidů ve vaječném žloutku byla podpořena také jejich vyšší retencí (viz Tabulka č. 10 a Tabulka č. 11). Vepřové sádlo, díky své převaze nasycených mastných kyselin, zajistilo v kombinaci s pšenicí odrůdy PEXESO nejvyšší zadržení karotenoidu zeaxantinu (69,4 %) ve vaječném žloutku. Na druhou stranu nejvyšší zadržení karotenoidu

luteinu ve vaječném žloutku bylo zaznamenáno u pšenice PEXESO, a to jak v kombinaci s řepkovým olejem (55,6 %), tak i vepřovým sádlem (55,8 %) v dietě. U skupin s řepkovým olejem byla retence karotenoidů luteinu a zeaxantinu ve vaječném žloutku nižší, a to pravděpodobně kvůli jejich nezbytné, avšak fyziologické spotřebě při ochraně snáze oxidovatelnějšího řepkového oleje. Lipidy mají pozitivní vliv na vstřebávání lipofilních karotenoidů. Dietní tuky bohaté na nasycené mastné kyseliny vedou k vyšší dostupnosti luteinu a zeaxantinu ve srovnání s tuky bohatými na mononenasyčené a polynenasycené mastné kyseliny (Gleize et al. 2013), což je v souladu se zjištěním tohoto experimentu. Nasycené mastné kyseliny se nachází především v tucích živočišného původu (např. vepřové sádlo). Vyskytovat se však mohou i v tropických rostlinných tucích, jako je kokosový a palmový olej. Například Conlon et al. (2012) ve své studii uvedli, že kokosový olej zvyšuje příjem karotenoidů z rajčat ve větší míře než olej ze světlice barvířské, tzv. světlicový olej. O účinku 6% přídavku tuku do krmné dávky kuřat na až trojnásobné zvýšení depozice karotenoidu luteinu ve srovnání s kontrolní skupinou bez přídavku tuku píše Nys (2000). Naproti tomu v experimentu Marounek et al. (2019) měla míra nasycenosti tuků v potravě nosnic na ukládání karotenoidů ve vaječných žloutcích statisticky nevýznamný nebo jen velmi malý vliv.

Obsah lipofilních vitaminů v lyofilizovaných žloutcích byl stanoven rovněž za použití HPLC. Koncentrace tokoferolů ve žloutku byla v našem experimentu kladně ovlivněna odrůdou, tukem a interakcí odrůda*tuk (viz Tabulka č. 12). Významná interakce pšenice odrůdy PEXESO a řepkového oleje jako zdroje tuku v dietě byla prokázána jak u α -tokoferolu ($P = 0,008$, 174,1 mg/kg DM), tak i γ -tokoferolu ($P = 0,012$, 22,98 mg/kg DM). Absorbce vitaminu E vyžaduje vždy přítomnost tuku (Jeanes et al. 2004). Na významném zvýšení koncentrace α -tokoferolu a γ -tokoferolu se s velkou pravděpodobností podílel řepkový olej, který je bohatým zdrojem těchto vitaminů. Dostupnost lipofilních vitaminů může být ovlivněna nenasyčeností lipidů v potravě. Prévéraud et al. (2015) ve své studii ukázali, že dieta obsahující lněný olej vedla u dospělých kohoutů k lepší biologické dostupnosti α -tokoferolu než dieta obsahující hydrogenovaný kokosový olej. Potřeba účinného antioxidantu vitaminu E závisí na obsahu PUFA v potravě. Více nasycená dieta nosnic ve studii Marounek et al. (2019) snižovala zjevnou absorpci vitaminu E, zatímco PUFA absorpci vitaminu E neomezovaly. Dle Villaverde et al. (2004) mohou však PUFA zvýšit degradaci vitaminu E v důsledku jeho reakce s peroxidy lipidů. Zvýšená koncentrace α -tokoferolu a γ -tokoferolu ve žloutku může souviset také s antioxidačními vlastnostmi karotenoidů, které chrání tyto lipofilní sloučeniny před oxidativní degradací v horních částech gastrointestinálního traktu (Mortensen et al. 2001). Naproti tomu

mohou karotenoidy soutěžit s tokoferoly o začlenění do směsných micel nebo vychytávání domnělými transportéry, a tím zhoršit jejich absorpci (Reboul et al. 2007). Významné zvýšení obsahu α -tokoferolu ve vaječných žloutcích zajistil například ve studii Skřivan & Englmaierová (2014) přístup slepic na zelenou pastvu. Ta je nepřírozanějším způsobem krmení zvířat.

Oxidační stabilita a s ní související skladovatelnost potravin živočišného původu, v našem případě slepičích vajec, je velice důležitou vlastností. Oxidační stabilita se měří chemickým stanovením oxidačních produktů, tj. látek vznikajících působením kyslíku na potraviny, resp. jejich složky. ROS vznikající při peroxidaci vedou ke tvorbě reaktivních oxysterolů a aldehydů, schopných modifikovat tuky, bílkoviny, cukry a nukleové kyseliny (Niedernhofer et al. 2003). Významným zástupcem produktů peroxidace lipidů je malondialdehyd (MDA). Pro stanovení koncentrace MDA ve vaječném žloutku čerstvě snesených a skladovaných vajec byla použita modifikovaná metoda Czauderna et al. (2011) s využitím HPLC. Nižší číslo znamená vyšší kvalitu. Čím je číslo vyšší, tím je vyšší i stupeň oxidace vaječného žloutku (viz Tabulka č. 13).

Pšenice odrůdy PEXESO výrazně zvýšila oxidační stabilitu vaječného žloutku čerstvých vajec i vajec skladovaných po dobu 28 dní při teplotě 18 °C. Na procesu snížení oxidace žloutkových lipidů se bezesporu podílely karotenoidy lutein a zeaxantin, protože tyto přírodní lipofilní pigmenty jsou zároveň i silnými antioxidanty. Lepší skladovatelnost vyprodukovaných vajec potvrzuje i fakt, že karotenoidy, vstřebané z krmiva společně s tuky, ukládají nosnice přednostně do vajec. Zvýšenou oxidační stabilitu vaječných žloutků vlivem přítomnosti luteinu, zeaxantinu a dalších významných přírodních antioxidantů v dietě nosnic prokázaly i studie s přidavkem zelené mikrořasy *Chlorella vulgaris* (Englmaierová et al. 2013), extraktu z květů afrikánu (Skřivan et al. 2016), sušené vojtěšky (Englmaierová et al. 2019), bazalky pravé (Kljak et al. 2021) nebo listů brusnice borůvky a ořešáku královského (Untea et al. 2020).

Velmi významná interakce odrůda*tuk byla v našem experimentu zjištěna u obsahu MDA v čerstvě snesených vejcích. U skupin, jejichž krmná směs zahrnovala běžnou pšenici odrůdy TERCIE a řepkový olej jako zdroj tuku v dietě, byla zaznamenána snížená oxidační stabilita lipidů žloutků čerstvých vajec (0,448 mg/kg) ve srovnání s ostatními skupinami (viz Tabulka č. 13). Snížená oxidační stabilita zde byla způsobena nižším obsahem přírodních karotenoidů luteinu a zeaxantinu a pravděpodobně také snadnější oxidací více nenasyceného řepkového oleje v porovnání s vepřovým sádlem, jež obsahuje vyšší podíl SFA. Na druhou stranu má řepkový olej vysoký obsah olejové kyseliny ($n-9$, 55 % z mastných kyselin), která je přínosná ve zdravotní prevenci, slušný obsah α -linolenové kyseliny ($n-3$, nejčastěji 8 – 13 % z mastných kyselin) a dobrý poměr mastných kyselin $n-6$: $n-3$ (Skřivan 2009).

7 Závěr

Shromážděním a pečlivým prostudováním velkého množství odborné literatury a řady publikací vycházejících z výsledků vědeckých výzkumů českých i zahraničních autorů byl splněn hlavní cíl této diplomové práce – vypracovat literární rešerši zaměřenou na využití přírodních karotenoidů ve výživě nosnic a jejich vliv na kvalitu vajec a zdraví člověka.

Produkce konzumních slepičích vajec prošla v předešlých letech velkými změnami. S tím souvisí i průměrná spotřeba vajec, která v posledních letech značně kolísá. V roce 2012 začala platit směrnice Rady 1999/74/ES, podle které byl zakázán chov nosnic v neobohacených klecových systémech. Od roku 2027 bude v České republice zakázáno chovat nosnice v obohacených klecích. Nejvhodnější náhradou klecí budou pravděpodobně voliérové chovy. Tento trend je aktuální zejména z toho důvodu, že veřejnost věnuje velkou pozornost zvyšování pohody (tj. welfare) zvířat a současně se domnívá, že alternativní systémy ustájení vedou i k produkci kvalitnějších vajec. Z výsledků studií Englmaierová et al. (2014) a Vlčková et al. (2018) však vyplývá, že vysokou kvalitu a bezpečnost, a to i s ohledem na příznivé podmínky z hlediska welfare daného systému chovu, mají především vejce z obohacených klecí.

Zvyšující se počet spotřebitelů a jejich ohlasů se netýká jen zájmu o optimální podmínky jednotlivých systémů chovů nosnic, jejich původ nebo kvalitu a jakost produktů živočišného původu obecně. Zvýšená tendence je zaznamenána i u odmítání používání syntetických aditivních látek ve výživě nosnic a jejich nahrazování látkami přírodními (např. karotenoidy). V souladu s tímto přesvědčením se rozšiřuje počet lidí, kteří se zajímají o produkci kvalitních, biologicky aktivních a zdravích prospěšných obohacených vajec, tj. funkčních potravin.

Kvalitu vajec lze vyjádřit různými způsoby, v pokusných podmínkách např. Haughovými jednotkami. Pro spotřebitele je ale nejdůležitějším znakem vnitřní kvality vejce jeho barevný tón, resp. barva žloutku a její sytost, která je odrazem koncentrace karotenoidních pigmentů v krmivu nosnic. Přírodní karotenoidy jsou potřebnou a někdy i nezbytnou součástí potravy lidí. Ve výživě drůbeže slouží karotenoidy ke zvýšení oxidační stability žloutkových lipidů a k zvýraznění barvy vaječného žloutku. Zvýšení oxidační stability a prodloužení trvanlivosti drůbežích produktů je v zájmu výrobců, prodejců i spotřebitelů. Na jejím zvýšení se přírodní karotenoidy podílejí prostřednictvím svého antioxidačního potenciálu s rozmanitým spektrem mechanismů účinků. U nosnic jsou karotenoidy především prostředkem k docílení optimální barvy vaječného žloutku tak, aby vyhovovala požadavkům spotřebitelů. Preference sytosti vaječného žloutku se dle požadavků spotřebitelů v jednotlivých zemích výrazně liší.

Přírodní karotenoidy vykazují mnoho zdraví prospěšných vlastností. Například jejich funkce aktivně se podílet na snížení zánětlivé reakce organismu může zlepšit zdravotní stav nosnic a ovlivnit jejich produkční výkonnost. Karotenoidy lutein a zeaxantin chrání oční sítnici před oxidačním poškozením a působí proti věkem podmíněné makulární degeneraci, která je hlavní příčinou slepoty. Lidem, kteří konzumují méně než 1 mg luteinu a zeaxantinu denně, může jedno vejce obohacené o lutein a zeaxantin denně poskytnout ochranu oka před oxidačním stresem a rozvojem makulární degenerace související s věkem (Skřivan et al. 2016).

Zvyšování obsahu přírodních karotenoidů v krmivu pro nosnice je velmi žádoucí, a to jak z hlediska podpory zdraví samotných chovaných zvířat, tak i výroby kvalitních a pro člověka zdraví přínosných živočišných produktů, v tomto případě vajec. V souvislosti s cíli literární rešerše této diplomové práce byly stanoveny i cíle pokusu a hypotéza práce. Vědecký pokus byl realizován ve Výzkumném ústavu živočišné výroby, v.v.i. v Praze Uhřetěvesi.

PEXESO, alternativní jarní odrůda pšenice se zvýšeným obsahem karotenoidů luteinu a zeaxantinu, zařazená do krmných směsí pro nosnice kladně ovlivnila užitkovost a některé ukazatele kvality vyprodukovaných vajec. To pravděpodobně souviselo s vyšším zadržováním biologicky aktivních lipofilních karotenoidů. Nicméně barvicí účinek pšenice byl nedostatečný a výsledná barva vaječného žloutku by k uspokojení požadavků spotřebitelů jednoznačně nevedla. Vepřové sádlo mělo v našem experimentu významný vliv na ukládání a retenci karotenoidů a společně s nimi také zvýšilo oxidační stabilitu čerstvě snesených i skladovaných vajec. Na druhou stranu řepkový olej významně zvýšil koncentraci žloutkových tokoferolů.

Hypoteticky předpokládaný vliv zvýšené koncentrace přírodních karotenoidů luteinu a zeaxantinu v biofortifikované pšenici odrůdy PEXESO na kvalitu vajec byl experimentálně prokázán. Rovněž lze potvrdit, že odlišný profil mastných kyselin dvou použitých zdrojů tuku v dietě nosnic rozdílně ovlivnil retenci a využití karotenoidů z jednotlivých odrůd pšenice a výslednou kvalitu vajec. Náhradou synteticky vyráběných karotenoidů mohou být karotenoidy z přírodních zdrojů. Těmi může být například speciálně vyšlechtěná pšenice odrůdy PEXESO. Tuto pšenici lze doporučit v kombinaci s řepkovým olejem jako zdrojem tuku v dietě a také s dodatečným přídavkem jiného zdroje přírodních karotenoidů (např. z aksamitníku vzpřímeného nebo z přirozené a kvalitní pastvy), který společně s touto pšenicí odrůdy PEXESO poskytne spotřebiteli kvalitní produkt. Hlavně, co se preferencí a optimálního zbarvení vaječného žloutku týče. Ve vztahu ke zdraví pak bude takovýto produkt, resp. funkční vejce, dobrým zdrojem antioxidantů, především karotenoidů a vitamínu E, a nenasycených mastných kyselin s příznivým poměrem $n-6 : n-3$ původem z řepkového oleje.

8 Seznam zkratk a symbolů použitých v textu

AA	arachidonová kyselina (<i>n</i> -6)
ADI	přijatelné denní množství (Acceptable Daily Intake)
ALA	α -linolenová kyselina (<i>n</i> -3)
a*	parametr červenosti, udává červenozelenou hodnotu
α	alfa, písmeno z řecké abecedy
BIO	certifikované označení pro produkty pocházející z ekologického zemědělství
b*	parametr žlutosti, udává žlutomodrou hodnotu
β	beta, písmeno z řecké abecedy
Ca	vápník
ČSÚ	Český statistický úřad
DHA	dokosaheptaenová kyselina (<i>n</i> -3)
DM	sušina (dry matter, např. mg/kg DM)
DNA	deoxyribonukleová kyselina
DSM	škála barev DSM YolkFan™ Color Scale pro hodnocení žloutku (dříve RYCF)
δ	delta, písmeno z řecké abecedy
EFSA	Evropský úřad pro bezpečnost potravin (European Food Safety Authority)
EPA	eikosapentaenová kyselina (<i>n</i> -3)
FAO	Organizace pro výživu a zemědělství (Food and Agriculture Organization)
GLA	γ -linolenová kyselina (<i>n</i> -6)
γ	gama, písmeno z řecké abecedy
HDL	lipoproteiny o vysoké hustotě, tzv. vysokodenzitní (high density lipoproteins)
HPLC	vysokoučinná kapalinová chromatografie (High performance liquid chromatog.)
HU	Haughovy jednotky (Haugh units)
JECFA	Společný výbor odborníků FAO / WHO pro potravinářská aditiva

KVO	kardiovaskulární onemocnění, tj. onemocnění srdce a cév
LA	linolová kyselina (<i>n</i> -6)
MDA	malondialdehyd
ME_N	metabolizovatelná energie upravená na dusíkovou rovnováhu (v kJ nebo MJ)
Mg	hořčík
MUFA	monoenoové / mononenasyčené mastné kyseliny (Monounsaturated Fatty Acid)
MZe	Ministerstvo zemědělství
<i>n</i>-3	omega-3 (ω -3) nenasycené mastné kyseliny
<i>n</i>-6	omega-6 (ω -6) nenasycené mastné kyseliny
<i>n</i>-9	omega-9 (ω -9) nenasycené mastné kyseliny
P	fosfor
PUFA	polyenoové / polynenasycené mastné kyseliny (Polyunsaturated Fatty Acid)
RNA	ribonukleová kyselina
RNS	reaktivní formy dusíku (Reactive Nitrogen Species)
ROS	reaktivní formy kyslíku (Reactive Oxygen Species)
RYCF	škála barev Roche Yolk Color Fan pro hodnocení žloutku (dnes DSM)
SCF	Stálý výbor pro potraviny (Standing Committee on Food)
SFA	nasycené mastné kyseliny (Saturated Fatty Acid)
TAG	triacylglyceroly, triglyceridy
UV	ultrafialové záření
UVA	ultrafialové dlouhovlnné záření
UVB	ultrafialové středněvlnné záření
VPMD	věkem podmíněná makulární degenerace
VÚŽV	Výzkumný ústav živočišné výroby, v.v.i.
WHO	Světová zdravotnická organizace (World Health Organization)

V seznamu zkratk a symbolů použitých v textu nejsou uvedeny zkratky a symboly všeobecně známé nebo používané jen ojediněle s vysvětlením v textu.

9 Literatura

- Abd El-Baky, H. H. and G. S. El-Baroty. The Potential Use of Microalgal Carotenoids as Dietary Supplements and Natural Preservative Ingredients. *Journal of Aquatic Food Product Technology* [online]. 2013, **22**(4), 392-406. ISSN 1049-8850. Dostupné z: doi:10.1080/10498850.2011.654381
- Alagawany, M., M. R. Farag, K. Dhama and A. Patra. Nutritional significance and health benefits of designer eggs. *World's Poultry Science Journal* [online]. 2018, **74**(2), 317-330. ISSN 0043-9339. Dostupné z: doi:10.1017/S0043933918000041
- Alves-Rodrigues, A. and A. Shao. The science behind lutein. *Toxicology Letters* [online]. 2004, **150**(1), 57-83. ISSN 03784274. Dostupné z: doi:10.1016/j.toxlet.2003.10.031
- Anderson, B. M. and D. W. Ma. Are all n-3 polyunsaturated fatty acids created equal?. *Lipids in Health and Disease* [online]. 2009, **8**(1). ISSN 1476-511X. Dostupné z: doi:10.1186/1476-511X-8-33
- Arain, M. A., Z. Mei, F. U. Hassan, M. Saeed, M. Alagawany, A. H. Shar and I. R. Rajput. Lycopene: a natural antioxidant for prevention of heat-induced oxidative stress in poultry. *World's Poultry Science Journal* [online]. 2018, **74**(1), 89-100. ISSN 0043-9339. Dostupné z: doi:10.1017/S0043933917001040
- Arimboor, R., R. B. Natarajan, K. R. Menon, L. P. Chandrasekhar and V. Moorkoth. Red pepper (*Capsicum annuum*) carotenoids as a source of natural food colors: analysis and stability—a review. *Journal of Food Science and Technology* [online]. 2015, **52**(3), 1258-1271. ISSN 0022-1155. Dostupné z: doi:10.1007/s13197-014-1260-7
- Aydin, R. Egg intake and serum low density lipoprotein cholesterol in humans. *World's Poultry Science Journal* [online]. 2017, **73**(4), 813-822. ISSN 0043-9339. Dostupné z: doi:10.1017/S0043933917000575
- Ballesteros, M., F. Valenzuela, A. Robles, E. Artalejo, D. Aguilar, C. Andersen, H. Valdez and M. Fernandez. One Egg per Day Improves Inflammation when Compared to an Oatmeal-Based Breakfast without Increasing Other Cardiometabolic Risk Factors in Diabetic Patients. *Nutrients* [online]. 2015, **7**(5), 3449-3463. ISSN 2072-6643. Dostupné z: doi:10.3390/nu7053449
- Barreiro, C. and J. Barredo. Carotenoids Production: A Healthy and Profitable Industry. In: BARREIRO, Carlos a José-Luis BARREDO, ed. *Microbial Carotenoids* [online]. New York, NY: Springer New York, 2018, 2018-08-15, s. 45-55. Methods in Molecular Biology. ISBN 978-1-4939-8741-2. Dostupné z: doi:10.1007/978-1-4939-8742-9_2
- Baucells, M. D., N. Crespo, A. C. Barroeta, S. López-Ferrer and M. A. Grashorn. Incorporation of different polyunsaturated fatty acids into eggs. *Poultry Science* [online]. 2000, **79**(1), 51-59. ISSN 00325791. Dostupné z: doi:10.1093/ps/79.1.51
- Beránková, J. Funkční potraviny a legislativa. *Informační centrum bezpečnosti potravin: Bezpečnost potravin* [online]. Ministerstvo zemědělství, 2009. Dostupné z: <https://bezpecnostpotravin.cz/funkcni-potraviny-a-legislativa/>

- Berkhoff, J., Ch. Alvarado-Gilis, J. P. Keim, J. A. Alcalde, E. Vargas-Bello-Pérez and M. Gandarillas. Consumer preferences and sensory characteristics of eggs from family farms. *Poultry Science* [online]. 2020, **99**(11), 6239-6246. ISSN 00325791. Dostupné z: doi:10.1016/j.psj.2020.06.064
- Blesso, Ch. N., C. J. Andersen, B. W. Bolling and M. L. Fernandez. Egg intake improves carotenoid status by increasing plasma HDL cholesterol in adults with metabolic syndrome. *Food Funct* [online]. 2013, **4**(2), 213-221. ISSN 2042-6496. Dostupné z: doi:10.1039/C2FO30154G
- Blesso, Ch. Egg Phospholipids and Cardiovascular Health. *Nutrients* [online]. 2015, **7**(4), 2731-2747. ISSN 2072-6643. Dostupné z: doi:10.3390/nu7042731
- Borel, P., P. Grolier, M. Armand, A. Partier, H. Lafont, D. Lairon and V. Azais-Braesco. Carotenoids in biological emulsions: solubility, surface-to-core distribution, and release from lipid droplets. *Journal of Lipid Research* [online]. 1996, **37**(2), 250-261. ISSN 00222275. Dostupné z: doi:10.1016/S0022-2275(20)37613-6
- Borel, P. Factors Affecting Intestinal Absorption of Highly Lipophilic Food Microconstituents (Fat-Soluble Vitamins, Carotenoids and Phytosterols). *Clinical Chemistry and Laboratory Medicine* [online]. 2003, **41**(8). ISSN 1434-6621. Dostupné z: doi:10.1515/CCLM.2003.15
- Bouis, H. E. and A. Saltzman. Improving nutrition through biofortification: A review of evidence from HarvestPlus, 2003 through 2016. *Global Food Security* [online]. 2017, **12**, 49-58. ISSN 22119124. Dostupné z: doi:10.1016/j.gfs.2017.01.009
- Bouvarel, I., Y. Nys and P. Lescoat. Hen nutrition for sustained egg quality. In: *Improving the Safety and Quality of Eggs and Egg Products* [online]. Elsevier, 2011, 2011, s. 261-299. ISBN 9781845697549. Dostupné z: doi:10.1533/9780857093912.3.261
- Bramley, P. M. The Biochemistry of the Carotenoids, Volume 1: Plants (Second Edition). *Biochemical Society Transactions* [online]. 1981, **9**(5), 484-485. ISSN 0300-5127. Dostupné z: doi:10.1042/bst0090484
- Breithaupt, D. E. Modern application of xanthophylls in animal feeding – a review. *Trends in Food Science & Technology* [online]. 2007, **18**(10), 501-506. ISSN 09242244. Dostupné z: doi:10.1016/j.tifs.2007.04.009
- Britton, G., H. Pfander and S. Liaaen-Jensen, ed. *Carotenoids* [online]. Basel: Birkhäuser Basel, 2009. ISBN 978-3-7643-7500-3. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-7643-7501-0
- Brush H. A. Carotenoids in wild and captive birds. J.C. Bauernfiend (Ed.), *Carotenoids as Colorants and Vitamin A Precursors*, Academic Press Inc., New York, NY (1981), pp. 539-562
- Buser S., Goralczyk R., Bausch J. and Schüep W., 1994. Canthaxanthin (RO 01 - 9915) in a long-term study with Cynomolgus monkeys (oral gavage); 3-year final report. Unpublished research report no. B-161'152 submitted to WHO by F. Hoffmann-La Roche & Co., Basel, Switzerland (as referred to by JECFA, 1995).

- Campos, J. R., P. Severino, C. S. Ferreira, A. Zielinska, A. Santini, S. B. Souto and E. B. Souto. Linseed Essential Oil – Source of Lipids as Active Ingredients for Pharmaceuticals and Nutraceuticals. *Current Medicinal Chemistry* [online]. 2019, **26**(24), 4537-4558. ISSN 09298673. Dostupné z: doi:10.2174/0929867325666181031105603
- Cano-Gutiérrez, G., S. Acevedo-Nava, A. Santamaría, M. Altamirano-Lozano, M. C. Cano-Rodríguez and T. I. Fortoul. Hepatic megalocytosis due to vanadium inhalation: participation of oxidative stress. *Toxicology and Industrial Health* [online]. 2012, **28**(4), 353-360. ISSN 0748-2337. Dostupné z: doi:10.1177/0748233711412424
- Ciccone, M. M., F. Cortese, M. Gesualdo, et al. Dietary Intake of Carotenoids and Their Antioxidant and Anti-Inflammatory Effects in Cardiovascular Care. *Mediators of Inflammation* [online]. 2013, **2013**, 1-11. ISSN 0962-9351. Dostupné z: doi:10.1155/2013/782137
- Cisneros, F. DSM egg yolk pigmentation guidelines. *DSM* [online]. 2021, 27. 05. 2021. Dostupné z: <https://www.dsm.com/anh/news/feed-talks/articles/eggyolk-pigmentation-guidelines.html>
- Conlon, L. E., R. D. King, N. E. Moran and J. W. Erdman. Coconut Oil Enhances Tomato Carotenoid Tissue Accumulation Compared to Safflower Oil in the Mongolian Gerbil (*Meriones unguiculatus*). *Journal of Agricultural and Food Chemistry* [online]. 2012, **60**(34), 8386-8394. ISSN 0021-8561. Dostupné z: doi:10.1021/jf301902k
- Czauderna, M., J. Kowalczyk and M. Marounek. The simple and sensitive measurement of malondialdehyde in selected specimens of biological origin and some feed by reversed phase high performance liquid chromatography. *Journal of Chromatography B* [online]. 2011, **879** (23), 2251-2258. ISSN 15700232. Dostupné z: doi:10.1016/j.jchromb.2011.06.008
- da Silva Filardi, R., O. M. Junqueira, A. C. de Laurentiz, E. M. Casartelli, E. A. Rodrigues and L. F. Araújo. Influence of Different Fat Sources on the Performance, Egg Quality, and Lipid Profile of Egg Yolks of Commercial Layers in the Second Laying Cycle. *Journal of Applied Poultry Research* [online]. 2005, **14**(2), 258-264. ISSN 10566171. Dostupné z: doi:10.1093/japr/14.2.258
- Del Rio, D., A. J. Stewart and N. Pellegrini. A review of recent studies on malondialdehyde as toxic molecule and biological marker of oxidative stress. *Nutrition, Metabolism and Cardiovascular Diseases* [online]. 2005, **15**(4), 316-328. ISSN 09394753. Dostupné z: doi:10.1016/j.numecd.2005.05.003
- del Val, E., J. C. Senar, J. Garrido-Fernández, M. Jarén, A. Borràs, J. Cabrera and J. J. Negro. The liver but not the skin is the site for conversion of a red carotenoid in a passerine bird. *Naturwissenschaften* [online]. 2009, **96**(7), 797-801. ISSN 0028-1042. Dostupné z: doi:10.1007/s00114-009-0534-9
- Demmig-Adams, B. and R. Adams. Eye Nutrition in Context: Mechanisms, Implementation, and Future Directions. *Nutrients* [online]. 2013, **5**(7), 2483-2501. ISSN 2072-6643. Dostupné z: doi:10.3390/nu5072483

- Dikmen, B. Y. and U. Sahan. Correlations between breeder age, egg cholesterol content, blood cholesterol level and hatchability of broiler breeders. *British Poultry Science* [online]. 2007, **48**(1), 98-103. ISSN 0007-1668. Dostupné z: doi:10.1080/00071660601161412
- Dixit, R., H. Mukhtar a D. R. Bickers. Studies on the Role of Reactive Oxygen Species in Mediating Lipid Peroxide Formation in Epidermal Microsomes of Rat Skin. *Journal of Investigative Dermatology* [online]. 1983, **81**(4), 369-375. ISSN 0022202X. Dostupné z: doi:10.1111/1523-1747.ep12519980
- Djoussé, L. and J. M. Gaziano. Egg consumption in relation to cardiovascular disease and mortality: the Physicians' Health Study. *The American Journal of Clinical Nutrition* [online]. 2008, **87**(4), 964-969. ISSN 00029165. Dostupné z: doi:10.1093/ajcn/87.4.964
- Douša, M. *Vlastnosti karotenoidů: Obecná charakteristika - chemická struktura, Extrakce a metody stanovení karotenoidů* [online]. 2009. Dostupné z: <http://hplc1.sweb.cz/>
- Drewnowski, A. The Nutrient Rich Foods Index helps to identify healthy, affordable foods. *The American Journal of Clinical Nutrition* [online]. 2010, **91**(4), 1095S-1101S. ISSN 0002-9165. Dostupné z: doi:10.3945/ajcn.2010.28450D
- Dufossé, L. (2006). Microbial Production of Food Grade Pigments. *Food Technology and Biotechnology*. 44. 313-321. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/228336966_Microbial_Production_of_Food_Grade_Pigments
- EFSA: Scientific Opinion on the re-evaluation of canthaxanthin (E 161 g) as a food additive. *EFSA Journal* [online]. 2010, **8**(10). ISSN 18314732. Dostupné z: doi:10.2903/j.efsa.2010.1852
- EFSA: Scientific opinion on the safety and efficacy of canthaxanthin as a feed additive for poultry and for ornamental birds and ornamental fish. *EFSA Journal* [online]. 2014, **12**(1). ISSN 18314732. Dostupné z: doi:10.2903/j.efsa.2014.3527
- EFSA: Safety and efficacy of ethyl ester of β -apo-8'-carotenoic acid as a feed additive for poultry for fattening and poultry for laying. *EFSA Journal* [online]. 2016, **14**(4). ISSN 18314732. Dostupné z: doi:10.2903/j.efsa.2016.4439
- Eilat-Adar, S., T. Sinai, Ch. Yosefy and Y. Henkin. Nutritional Recommendations for Cardiovascular Disease Prevention. *Nutrients* [online]. 2013, **5**(9), 3646-3683. ISSN 2072-6643. Dostupné z: doi:10.3390/nu5093646
- Elwan, H. A. M., S. S. Elnesr, Y. Abdallah, A. Hamdy and A. H. El-Bogdady. Red yeast (*Phaffia rhodozyma*) as a source of Astaxanthin and its impacts on productive performance and physiological responses of poultry. *World's Poultry Science Journal* [online]. 2019, **75**(2), 273-284. ISSN 0043-9339. Dostupné z: doi:10.1017/S0043933919000187
- EN 12823-1 (2000): Foodstuffs – Determination of Vitamin A by High Performance Liquid Chromatography–Part 1: Measurement of All-trans-Retinol and 13-cis-Retinol. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.

- EN 12822-1 (2000): Foodstuffs – Determination of Vitamin E by High Performance Liquid Chromatography – Measurement of α -, β -, γ - and δ -tocopherols. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- Englmaierová, M., M. Skřivan and I. Bubancová. A comparison of lutein, spray-dried Chlorella, and synthetic carotenoids effects on yolk colour, oxidative stability, and reproductive performance of laying hens. *Czech Journal of Animal Science* [online]. 2013, **58**(9), 412-419. ISSN 12121819. Dostupné z: doi:10.17221/6941-CJAS
- Englmaierová, M., E. Tůmová, V. Charvátová and M. Skřivan. Effects of laying hens housing system on laying performance, egg quality characteristics, and egg microbial contamination. *Czech Journal of Animal Science* [online]. 2014, **59**(8), 345-352. ISSN 12121819. Dostupné z: doi:10.17221/7585-CJAS
- Englmaierová, M., M. Skřivan and T. Vít. Alfalfa meal as a source of carotenoids in combination with ascorbic acid in the diet of laying hens. *Czech Journal of Animal Science* [online]. 2019, **64**(1), 17-25. ISSN 12121819. Dostupné z: doi:10.17221/116/2018-CJAS
- European Commission (EC), 2002. *Opinion of the Scientific Committee on Animal Nutrition on the use of canthaxanthin in feedingstuffs for salmon and trout, laying hens, and other poultry. Adopted on 17 April 2002, European Commission Health & Consumer Protection Directorate-General, Directorate C - Scientific Opinions, C2 - Management of scientific committees; scientific co-operation and networks.* [online]. 2002. Dostupné z: http://ec.europa.eu/food/fs/sc/scan/out81_en.pdf
- Farmer, E. E. and C. Davoine. Reactive electrophile species. *Current Opinion in Plant Biology* [online]. 2007, **10**(4), 380-386. ISSN 13695266. Dostupné z: doi:10.1016/j.pbi.2007.04.019
- Fathi, M., T. Tanha and S. Saeedyan. Influence of dietary lycopene on growth performance, antioxidant status, blood parameters and mortality in broiler chicken with cold-induced ascites. *Archives of Animal Nutrition* [online]. 2022, **76**(1), 50-60. ISSN 1745-039X. Dostupné z: doi:10.1080/1745039X.2022.2046451
- Feart, C., L. Letenneur, C. Helmer, et al. Plasma Carotenoids Are Inversely Associated With Dementia Risk in an Elderly French Cohort. *The Journals of Gerontology Series A: Biological Sciences and Medical Sciences* [online]. 2015, **71**(5), 683-688. ISSN 1079-5006. Dostupné z: doi:10.1093/gerona/glv135
- Ferrero-Miliani, L., O. H. Nielsen, P. S. Andersen and S. E. Girardin. Chronic inflammation: importance of NOD2 and NALP3 in interleukin-1 β generation. *Clinical and Experimental Immunology* [online]. 2007, **147**(2), 227-235. ISSN 0009-9104. Dostupné z: doi:10.1111/j.1365-2249.2006.03261.x
- Fiedor, J. and K. Burda. Potential Role of Carotenoids as Antioxidants in Human Health and Disease. *Nutrients* [online]. 2014, **6**(2), 466-488 [cit. 2023-03-15]. ISSN 2072-6643. Dostupné z: doi:10.3390/nu6020466

- Fraeye, I., Ch. Bruneel, Ch. Lemahieu, J. Buyse, K. Muylaert and I. Foubert. Dietary enrichment of eggs with omega-3 fatty acids: A review. *Food Research International* [online]. 2012, **48**(2), 961-969. ISSN 09639969. Dostupné z: doi:10.1016/j.foodres.2012.03.014
- Fredriksson, S., K. Elwinger and J. Pickova. Fatty acid and carotenoid composition of egg yolk as an effect of microalgae addition to feed formula for laying hens. *Food Chemistry* [online]. 2006, **99**(3), 530-537. ISSN 03088146. Dostupné z: doi:10.1016/j.foodchem.2005.08.018
- Froescheis, O., S. Moalli, H. Liechti and J. Bausch. Determination of lycopene in tissues and plasma of rats by normal-phase high-performance liquid chromatography with photometric detection. *Journal of Chromatography B: Biomedical Sciences and Applications* [online]. 2000, **739**(2), 291-299. ISSN 03784347. Dostupné z: doi:10.1016/S0378-4347(99)00562-9
- Galobart, J., R. Sala, X. Rincón-Carruyo, E. G. Manzanilla, B. Vilà and J. Gasa. Egg Yolk Color as Affected by Saponification of Different Natural Pigmenting Sources. *Journal of Applied Poultry Research* [online]. 2004, **13**(2), 328-334. ISSN 10566171. Dostupné z: doi:10.1093/japr/13.2.328
- Galović, O., P. Margeta, D. Hanžek, M. Grčević, Z. Kralik and G. Kralik. Enrichment of table eggs with lutein. *Poljoprivreda* [online]. 2020, **26**(1), 56-63. ISSN 18488080. Dostupné z: doi:10.18047/poljo.26.1.8
- Gao, S., Qin, T., Liu, Z., Caceres, M. A., Ronchi, C. F., Chen, C. Y. O., . . . Liu, Y. (2011). Lutein and zeaxanthin supplementation reduces H₂O₂- induced oxidative damage in human lens epithelial cells. *Molecular Vision*, 17, 3180–3190. Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3244479/>
- Geoffrey, B. A. and M. B. Felix. Canthaxanthin and the eye: a critical ocular toxicologic assessment. *Journal of Toxicology: Cutaneous and Ocular Toxicology* [online]. 2008, **10**(1-2), 115-155. ISSN 0731-3829. Dostupné z: doi:10.3109/15569529109057908
- Ginter, E. Antioxidanty v ľudskej výžive. *Vesmír* 77. 1998, , 434-437.
- Gleize, B., F. Tourniaire, L. Depezay, et al. Effect of type of TAG fatty acids on lutein and zeaxanthin bioavailability. *British Journal of Nutrition* [online]. 2013, **110**(1), 1-10. ISSN 0007-1145. Dostupné z: doi:10.1017/S0007114512004813
- Goliomytis, M., H. Orfanou, E. Petrou, M. A. Charismiadou, P. E. Simitzis and S. G. Deligeorgis. Effect of hesperidin dietary supplementation on hen performance, egg quality and yolk oxidative stability. *British Poultry Science* [online]. 2014, **55**(1), 98-104. ISSN 0007-1668. Dostupné z: doi:10.1080/00071668.2013.870328
- Goodwin, T. W. *The biochemistry of the carotenoids*. 2nd ed. New York: Chapman and Hall, 1984. ISBN 0412237709.
- Goodwin, T W. Metabolism, Nutrition, and Function of Carotenoids. *Annual Review of Nutrition* [online]. 1986, **6**(1), 273-297. ISSN 0199-9885. Dostupné z: doi:10.1146/annurev.nu.06.070186.001421

- Goralczyk R., Buser S., Bausch J., Bee W., Zilhke U. and Barker F. M., 1997. Occurrence of Birefringent Retinal Inclusions in Cynomolgus Monkeys After High Doses of canthaxanthin. *Investigative Ophthalmology and Visual Sciences* 38, 741-752. Dostupné z: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/9071228/>
- Gouveia, L., V. Veloso, A. Reis, H. Fernandes, J. Novais and J. Empis. *Chlorella vulgaris* used to colour egg yolk. *Journal of the Science of Food and Agriculture* [online]. 1996, **70**, 167-172. Dostupné z: doi:10.1002/(sici)1097-0010(199602)70:2<167::aid-jsfa472>3.0.co;2-2
- Grashorn, M. A. Feed additives for influencing chicken meat and egg yolk color. In: C. Reinhold and R. M. Schweiggert. *Handbook on natural pigments in food and beverages: Industrial applications for improving food color*. Duxford, UK: Woodhead Publishing is an imprint of Elsevier, 2016, s. 283-302. Woodhead Publishing in food science, technology, and nutrition, no. 295. ISBN 978-0-08-100371-8.
- Greenberg, E. R. Mortality Associated With Low Plasma Concentration of Beta Carotene and the Effect of Oral Supplementation. *JAMA: The Journal of the American Medical Association* [online]. 1996, **275**(9). ISSN 0098-7484. Dostupné z: doi:10.1001/jama.1996.03530330043027
- Grela, E. R., K. Ognik, A. Czech and J. Matras. Quality assessment of eggs from laying hens fed a mixture with lucerne protein concentrate. *Journal of Animal and Feed Sciences*[online]. 2014, **23**(3), 236-243. ISSN 1230-1388. Dostupné z: doi:10.22358/jafs/65686/2014
- Gross, J. *Pigments in Vegetables* [online]. Boston, MA: Springer US, 1991. ISBN 978-1-4613-5842-8. Dostupné z: doi:10.1007/978-1-4615-2033-7
- Guerin, M., M. E. Huntley and M. Olaizola. Haematococcus astaxanthin: applications for human health and nutrition. *Trends in Biotechnology* [online]. 2003, **21**(5), 210-216. ISSN 01677799. Dostupné z: doi:10.1016/S0167-7799(03)00078-7
- Guil-Guerrero, J. L., M. M. Reboloso-Fuentes and M. E. T. Isasa. Fatty acids and carotenoids from Stinging Nettle (*Urtica dioica* L.). *Journal of Food Composition and Analysis* [online]. 2003, **16**(2), 111-119. ISSN 08891575. Dostupné z: doi:10.1016/S0889-1575(02)00172-2
- Gunes, A., A. Inal, M. S. Adak, M. Alpaslan, E. G. Bagci, T. Erol and D. J. Pilbeam. Mineral nutrition of wheat, chickpea and lentil as affected by mixed cropping and soil moisture. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* [online]. 2007, **78**(1), 83-96. ISSN 1385-1314. Dostupné z: doi:10.1007/s10705-006-9075-1
- Halliwell, B. Biochemistry of oxidative stress. *Biochemical Society Transactions* [online]. 2007, **35**(5), 1147-1150. ISSN 0300-5127. Dostupné z: doi:10.1042/BST0351147
- Hamelin, C. and U. Altemueller. The effect of carotenoids on yolk and skin pigmentation: DSM Nutritional Products Europe. *POULTRY WORLD* [online]. 2012, 13. 08. 2012. Dostupné z: <https://www.poultryworld.net/poultry/the-effect-of-carotenoids-on-yolk-and-skin-pigmentation/>

- Hamilton, P. B. The Use of High-Performance Liquid Chromatography for Studying Pigmentation. *Poultry Science* [online]. 1992, **71**(4), 718-732. ISSN 00325791. Dostupné z: doi:10.3382/ps.0710718
- Hamilton, R. M. G. and I. R. Sibbald. The Effects of Dietary Phosphorus on Productive Performance and Egg Quality of Ten Strains of White Leghorns. *Poultry Science* [online]. 1977, **56**(4), 1221-1228. ISSN 00325791. Dostupné z: doi:10.3382/ps.0561221
- Hammershøj, M., U. Kidmose and S. Steinfeldt. Deposition of carotenoids in egg yolk by short-term supplement of coloured carrot (*Daucus carota*) varieties as forage material for egg-laying hens. *Journal of the Science of Food and Agriculture* [online]. 2010, **90**(7), 1163-1171. ISSN 00225142. Dostupné z: doi:10.1002/jsfa.3937
- Hammershøj, M. and N. F. Johansen. Review: The effect of grass and herbs in organic egg production on egg fatty acid composition, egg yolk colour and sensory properties. *Livestock Science* [online]. 2016, **194**, 37-43. ISSN 18711413. Dostupné z: doi:10.1016/j.livsci.2016.11.001
- Hammond, B. R., B. R. Wooten and D. M. Snodderly. Density of the Human Crystalline Lens is Related to the Macular Pigment Carotenoids, Lutein and Zeaxanthin. *Optometry and Vision Science* [online]. 1997, **74**(7), 499-504. ISSN 1040-5488. Dostupné z: doi:10.1097/00006324-199707000-00017
- Harrison, E. H. Mechanisms of digestion and absorption of dietary vitamin A. *Annual Review of Nutrition* [online]. 2005, **25**(1), 87-103. ISSN 0199-9885. Dostupné z: doi:10.1146/annurev.nutr.25.050304.092614
- Haxo, F. Carotenoids of the Mushroom *Cantharellus cinnabarinus*. *Botanical Gazette* [online]. 1950, **112**(2), 228-232. ISSN 0006-8071. Dostupné z: doi:10.1086/335653
- Hencken, H. Chemical and Physiological Behavior of Feed Carotenoids and Their Effects on Pigmentation. *Poultry Science* [online]. 1992, **71**(4), 711-717. ISSN 00325791. Dostupné z: doi:10.3382/ps.0710711
- Hernandez, J. M., A. J. Blanch and F. H. L. Roche. *Perceptions of egg quality in Europe* [online]. International Poultry Production 8, 2000, , 7-11.
- Hernández-Velasco, X., H. D. Chapman, C. M. Owens, et al. Absorption and deposition of xanthophylls in broilers challenged with three dosages of *Eimeria acervulina* oocysts. *British Poultry Science* [online]. 2014, **55**(2), 167-173. ISSN 0007-1668. Dostupné z: doi:10.1080/00071668.2013.879095
- HErnández-Ledesma, B. and Ch. Hsieh. Chemopreventive role of food-derived proteins and peptides: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* [online]. 2015, **57**(11), 2358-2376. ISSN 1040-8398. Dostupné z: doi:10.1080/10408398.2015.1057632
- Hlúbik, P. and L. Opltová. *Vitaminy*. Praha: Grada Publishing, 2004. ISBN 80-247-0373-4.
- Hollander, D. and P. E. Ruble. Beta-carotene intestinal absorption: bile, fatty acid, pH, and flow rate effects on transport. *American Journal of Physiology-Endocrinology and Metabolism*. 1978, **235**(6). ISSN 0193-1849. Dostupné z: doi:10.1152/ajpendo.1978.235.6.E686

- Horčíčka, P., O. Veškra, I. Bížová, et al. *Rádce pěstitele jarní pšenice*. České Budějovice: Kurent, [2018]. ISBN 978-80-87111-73-4.
- Huyghebaert, G. *The Utilisation of Oxy-Carotenoids for Egg Yolk Pigmentation*. RUG. Faculteit Landbouwkundige en Toegepaste Biologische Wetenschappen, 1993.
- Changxing, L., M. Chenling, M. Alagawany, et al. Health benefits and potential applications of anthocyanins in poultry feed industry. *World's Poultry Science Journal* [online]. 2018, **74**(2), 251-264. ISSN 0043-9339. Dostupné z: doi:10.1017/S0043933918000053
- Chatterjee, I. B. Evolution and the Biosynthesis of Ascorbic Acid. *Science* [online]. 1973, **182**(4118), 1271-1272. ISSN 0036-8075. Dostupné z: doi:10.1126/science.182.4118.1271
- Chatzav, M., Z. Peleg, L. Ozturk, A. Yazici, T. Fahima, I. Cakmak and Y. Saranga. Genetic diversity for grain nutrients in wild emmer wheat: potential for wheat improvement. *Annals of Botany* [online]. 2010, **105**(7), 1211-1220. ISSN 1095-8290. Dostupné z: doi:10.1093/aob/mcq024
- Chávez-Mendoza, C., E. Sanchez, E. Muñoz-Marquez, J. Sida-Arreola and M. Flores-Cordova. Bioactive Compounds and Antioxidant Activity in Different Grafted Varieties of Bell Pepper. *Antioxidants* [online]. 2015, **4**(2), 427-446. ISSN 2076-3921. Dostupné z: doi:10.3390/antiox4020427
- Christensen, C. M. Effects of Color on Aroma, Flavor and Texture Judgments of Foods. *Journal of Food Science* [online]. 1983, **48**(3), 787-790. ISSN 0022-1147. Dostupné z: doi:10.1111/j.1365-2621.1983.tb14899.x
- Chung, H., H. M. Rasmussen and E. J. Johnson. Lutein Bioavailability Is Higher from Lutein-Enriched Eggs than from Supplements and Spinach in Men. *The Journal of Nutrition* [online]. 2004, **134**(8), 1887-1893. ISSN 0022-3166. Dostupné z: doi:10.1093/jn/134.8.1887
- Jamroz, D., K. Jakobsen, T. Wertelecki and S. K. Jensen. Utilization of Dietary β -Carotene and Retinol Acetate by Goslings and Young Geese. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section A — Animal Science* [online]. 2010, **52**(3), 150-158. ISSN 0906-4702. Dostupné z: doi:10.1080/090647002320229392
- Jeanes, Y. M., W. L. Hall, S. Ellard, E. Lee and J. K. Lodge. The absorption of vitamin E is influenced by the amount of fat in a meal and the food matrix. *British Journal of Nutrition* [online]. 2004, **92**(4), 575-579. ISSN 0007-1145. Dostupné z: doi:10.1079/BJN20041249
- Jelínek, J. and V. Zicháček. *Biologie pro gymnázia: (teoretická a praktická část)*. 4. rozš. vyd. Olomouc: Nakladatelství Olomouc, 2000. ISBN 80-7182-107-1.
- Jiang, J. F., X. M. Song, X. Huang, J. L. Wu, W. D. Zhou, H. C. Zheng and Y. Q. Jiang. Effects of alfalfa meal on carcass quality and fat metabolism of Muscovy ducks. *British Poultry Science* [online]. 2012, **53**(5), 681-688. ISSN 0007-1668. Dostupné z: doi:10.1080/00071668.2012.731493

- Johnson, E. J., R. Vishwanathan, M. A. Johnson, et al. Relationship between Serum and Brain Carotenoids, α -Tocopherol, and Retinol Concentrations and Cognitive Performance in the Oldest Old from the Georgia Centenarian Study. *Journal of Aging Research* [online]. 2013, **2013**, 1-13. ISSN 2090-2204. Dostupné z: doi:10.1155/2013/951786
- Johnson, E. J., K. McDonald, S. M. Caldarella, H. Chung, A. M. Troen and D. M. Snodderly. Cognitive findings of an exploratory trial of docosahexaenoic acid and lutein supplementation in older women. *Nutritional Neuroscience* [online]. 2013, **11**(2), 75-83. ISSN 1028-415X. Dostupné z: doi:10.1179/147683008X301450
- Jopp, A. *Vitaminy a stopové prvky pro zdraví: optimalizace látkové výměny : význam pro imunitní a nervový systém : osobní program minerálních látek*. Praha: Eminent, 2014. ISBN 978-80-7281-489-3.
- Jordán, V. and M. Hemzalová. *Antioxidanty: zázračné zbraně : vitaminy, minerály, stopové prvky, aminokyseliny a jejich využití pro zdravý život*. Brno: Jota, 2001. Jak na to (Jota). ISBN 80-7217-156-9.
- Jůzl, M. and Š. Nedomová. *Jakost živočišných produktů: (skriptum)*. Brno: Mendelova univerzita v Brně, 2015. ISBN 978-80-7509-205-2.
- Kang, K. R., G. Cherian and J. S. Sim. Tocopherols, Retinol and Carotenes in Chicken Egg and Tissues as Influenced by Dietary Palm Oil. *Journal of Food Science* [online]. 1998, **63**(4), 592-596. ISSN 00221147. Dostupné z: doi:10.1111/j.1365-2621.1998.tb15792.x
- Karadas, F., E. Grammenidis, P. F. Surai, T. Acamovic and N. H. C. Sparks. Effects of carotenoids from lucerne, marigold and tomato on egg yolk pigmentation and carotenoid composition. *British Poultry Science* [online]. 2007, **47**(5), 561-566. ISSN 0007-1668. Dostupné z: doi:10.1080/00071660600962976
- Kelly, E. R., J. Plat, G. R. M. M. Haenen, A. Kijlstra, T. T. J. M. Berendschot and R. K. Hills. The Effect of Modified Eggs and an Egg-Yolk Based Beverage on Serum Lutein and Zeaxanthin Concentrations and Macular Pigment Optical Density: Results from a Randomized Trial. *PLoS ONE* [online]. 2014, **9**(3). ISSN 1932-6203. Dostupné z: doi:10.1371/journal.pone.0092659
- Kiefer, C., E. Sumser, M. F. Wernet and J. V. Lintig. A class B scavenger receptor mediates the cellular uptake of carotenoids in *Drosophila*. *Proceedings of the National Academy of Sciences* [online]. 2002, **99**(16), 10581-10586. ISSN 0027-8424. Dostupné z: doi:10.1073/pnas.162182899
- Kim, Ch. H., I. K. Paik and D. Y. Kil. Effects of Increasing Supplementation of Magnesium in Diets on Productive Performance and Eggshell Quality of Aged Laying Hens. *Biological Trace Element Research* [online]. 2013, **151**(1), 38-42. ISSN 0163-4984. Dostupné z: doi:10.1007/s12011-012-9537-z
- Kim, J. and W. Campbell. Dietary Cholesterol Contained in Whole Eggs Is Not Well Absorbed and Does Not Acutely Affect Plasma Total Cholesterol Concentration in Men and Women: Results from 2 Randomized Controlled Crossover Studies. *Nutrients* [online]. 2018, **10**(9). ISSN 2072-6643. Dostupné z: doi:10.3390/nu10091272

- Klassen, J. L. and F. Rodriguez-Valera. Phylogenetic and Evolutionary Patterns in Microbial Carotenoid Biosynthesis Are Revealed by Comparative Genomics. *PLoS ONE* [online]. 2010, **5**(6). ISSN 1932-6203. Dostupné z: doi:10.1371/journal.pone.0011257
- Klein, R., B. E. K. Klein, S. C. Jensen and S. M. Meuer. The Five-year Incidence and Progression of Age-related Maculopathy. *Ophthalmology* [online]. 1997, **104**(1), 7-21. ISSN 01616420. Dostupné z: doi:10.1016/S0161-6420(97)30368-6
- Kljak, K., K. Carović-Stanko, I. Kos, Z. Janječić, G. Kiš, M. Duvnjak, T. Safner and D. Bedeković. Plant Carotenoids as Pigment Sources in Laying Hen Diets: Effect on Yolk Color, Carotenoid Content, Oxidative Stability and Sensory Properties of Eggs. *Foods* [online]. 2021, **10**(4). ISSN 2304-8158. Dostupné z: doi:10.3390/foods10040721
- Klouda, P. *Moderní analytické metody*. Třetí, upravené vydání. Ostrava: Pavel Klouda - nakladatelství Pavko, 2016. ISBN 978-80-86369-22-8.
- Kodeš, A. and J. Výmola. *Základy moderní výživy drůbeže*. Praha: Česká zemědělská univerzita, 2003. ISBN 80-213-1077-4.
- Kodiček, M. *Isoprenoidy*. From *Biochemické pojmy : výkladový slovník* [online]. Praha: VŠCHT Praha, 2007. Available from www: <http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid_es-002/ebook.html?p=isoprenoidy>
- Kones, R., S. Howell and U. Rumana. N-3 Polyunsaturated Fatty Acids and Cardiovascular Disease: Principles, Practices, Pitfalls, and Promises - A Contemporary Review. *Medical Principles and Practice* [online]. 2018, **26**(6), 497-508. ISSN 1011-7571. Dostupné z: doi:10.1159/000485837
- Kralik, Z., G. Kralik, M. Grčević, D. Hanžek and E. Biazik. Designer Eggs with an Increased Content of Omega-3 fatty Acids and Pigments — Production and Health Benefits of their Consumption. *Poljoprivreda* [online]. 2021, **27**(2), 67-74. ISSN 13307142. Dostupné z: doi:10.18047/poljo.27.2.9
- Krinsky, N. I. Carotenoids as antioxidants. *Nutrition* [online]. 2001, **17**(10), 815-817. ISSN 08999007. Dostupné z: doi:10.1016/S0899-9007(01)00651-7
- Krinsky, N. I., J. T. Landrum and R. A. Bone. Biologic mechanisms of the protective role of lutein and zeaxanthin in the eye. *Annual Review of Nutrition* [online]. 2003, **23**(1), 171-201. ISSN 0199-9885. Dostupné z: doi:10.1146/annurev.nutr.23.011702.073307
- Landrum, J. T., R. A. Bone, H. Joa, M. D. Kilburn, L. L. Moore and K. E. Sprague. A One Year Study of the Macular Pigment: The Effect of 140 Days of a Lutein Supplement. *Experimental Eye Research* [online]. 1997, **65**(1), 57-62. ISSN 00144835. Dostupné z: doi:10.1006/exer.1997.0309
- Landrum, J. T., R. A. Bone, Y. Chen, Ch. Herrero, C. M. Llerena and E. Twarowska. Carotenoids in the human retina. *Pure and Applied Chemistry* [online]. 1999, **71**(12), 2237-2244. ISSN 1365-3075. Dostupné z: doi:10.1351/pac199971122237

- Landrum, J. T. and R. A. Bone. Lutein, Zeaxanthin, and the Macular Pigment. *Archives of Biochemistry and Biophysics* [online]. 2001, **385**(1), 28-40. ISSN 00039861. Dostupné z: doi:10.1006/abbi.2000.2171
- Langi, P., S. Kiokias, T. Varzakas and Ch. Proestos. Carotenoids: From Plants to Food and Feed Industries. In: BARREIRO, Carlos a José-Luis BARREDO, ed. *Microbial Carotenoids* [online]. New York, NY: Springer New York, 2018, 2018-08-15, s. 57-71. Methods in Molecular Biology. ISBN 978-1-4939-8741-2. Dostupné z: doi:10.1007/978-1-4939-8742-9_3
- Lawler, T., Y. Liu, K. Christensen, T. S. Vajaranant and J. Mares. Dietary Antioxidants, Macular Pigment, and Glaucomatous Neurodegeneration: A Review of the Evidence. *Nutrients* [online]. 2019, **11**(5). ISSN 2072-6643. Dostupné z: doi:10.3390/nu11051002
- Leeson, S. and L. Caston. Enrichment of Eggs with Lutein. *Poultry Science* [online]. 2004, **83**(10), 1709-1712. ISSN 00325791. Dostupné z: doi:10.1093/ps/83.10.1709
- Leeson, S. and J. D. Summers. *Commercial Poultry Nutrition, Third Edition* [online]. 3rd ed. Nottingham, England: Nottingham University Press, 2005, s. 57-65. ISBN 978-1-904761-78-5. Dostupné z: https://www.agropustaka.id/wp-content/uploads/2020/04/agropustaka.id_buku_Commercial-Poultry-Nutrition-3rd-Edition-by-S.-Leeson-J.-D.-Summers.pdf
- Lehmann, M., E. Vamvaka, A. Torrado, et al. Introduction of the Carotenoid Biosynthesis α -Branch Into *Synechocystis* sp. PCC 6803 for Lutein Production. *Frontiers in Plant Science* [online]. 2021, **12**. ISSN 1664-462X. Dostupné z: doi:10.3389/fpls.2021.699424
- Leiterman, D. Egg yolk color and how to manage it. *CRYSTAL CREEK* [online]. 2020, April 2020. Dostupné z: <https://crystalcreeknatural.com/egg-yolk-color-and-how-to-manage-it/>
- Leoncini, E., V. Edefonti, M. Hashibe, et al. Carotenoid intake and head and neck cancer: a pooled analysis in the International Head and Neck Cancer Epidemiology Consortium. *European Journal of Epidemiology* [online]. 2015, **31**(4), 369-383. ISSN 0393-2990. Dostupné z: doi:10.1007/s10654-015-0036-3
- Li, Y., Ch. Zhou, X. Zhou and L. Li. Egg consumption and risk of cardiovascular diseases and diabetes: A meta-analysis. *Atherosclerosis* [online]. 2013, **229**(2), 524-530. ISSN 00219150. Dostupné z: doi:10.1016/j.atherosclerosis.2013.04.003
- Liu, Y. Q., C. R. Davis, S. T. Schmaelzle, T. Rocheford, M. E. Cook and S. A. Tanumihardjo. β -Cryptoxanthin biofortified maize (*Zea mays*) increases β -cryptoxanthin concentration and enhances the color of chicken egg yolk. *Poultry Science* [online]. 2012, **91**(2), 432-438. ISSN 00325791. Dostupné z: doi:10.3382/ps.2011-01719
- Loetscher, Y., M. Kreuzer and R. E. Messikommer. Utility of nettle (*Urtica dioica*) in layer diets as a natural yellow colorant for egg yolk. *Animal Feed Science and Technology* [online]. 2013, **186**(3-4), 158-168. ISSN 03778401. Dostupné z: doi:10.1016/j.anifeedsci.2013.10.006

- Lopez-Bote, C. J., R. Sanz Arias, A. I. Rey, A. Castaño, B. Isabel and J. Thos. Effect of free-range feeding on n-3 fatty acid and α -tocopherol content and oxidative stability of eggs. *Animal Feed Science and Technology* [online]. 1998, **72**(1-2), 33-40. ISSN 03778401. Dostupné z: doi:10.1016/S0377-8401(97)00180-6
- López Sobaler, A. M. Papel del huevo en la dieta de deportistas y personas físicamente activas. *Nutrición Hospitalaria* [online]. 2017, **34**(4). ISSN 1699-5198. Dostupné z: doi:10.20960/nh.1568
- Lu, M., Y. Fang, Y. Chen, W. Luo, Z. Pan, X. Zhong and C. Zhang. Higher intake of carotenoid is associated with a lower risk of colorectal cancer in Chinese adults: a case-control study. *European Journal of Nutrition* [online]. 2015, **54**(4), 619-628. ISSN 1436-6207. Dostupné z: doi:10.1007/s00394-014-0743-7
- Luning, P. A. and W. J. Marcelis. A conceptual model of food quality management functions based on a techno-managerial approach. *Trends in Food Science & Technology* [online]. 2007, **18**(3), 159-166. ISSN 09242244. Dostupné z: doi:10.1016/j.tifs.2006.10.021
- Ma, L. and X. Lin. Effects of lutein and zeaxanthin on aspects of eye health. *Journal of the Science of Food and Agriculture* [online]. 2010, **90**(1), 2-12. ISSN 00225142. Dostupné z: doi:10.1002/jsfa.3785
- Ma, L., H. Dou, Y. Wu, Y. Huang, Y. Huang, X. Xu, Z. Zou and X. Lin. Lutein and zeaxanthin intake and the risk of age-related macular degeneration: a systematic review and meta-analysis. *British Journal of Nutrition* [online]. 2012, **107**(3), 350-359. ISSN 0007-1145. Dostupné z: doi:10.1017/S0007114511004260
- Ma, L., R. Liu, J. Du, T. Liu, S. Wu and X. Liu. Lutein, Zeaxanthin and Meso-zeaxanthin Supplementation Associated with Macular Pigment Optical Density. *Nutrients* [online]. 2016, **8**(7). ISSN 2072-6643. Dostupné z: doi:10.3390/nu8070426
- Mangels, A. R., J. M. Holden, G. R. Beecher, M. R. Forman and E. Lanza. Carotenoid content of fruits and vegetables: An evaluation of analytic data. *Journal of the American Dietetic Association* [online]. 1993, **93**(3), 284-296. ISSN 00028223. Dostupné z: doi:10.1016/0002-8223(93)91553-3
- Marckmann, P. and M. Grønbaek. Fish consumption and coronary heart disease mortality. A systematic review of prospective cohort studies. *European Journal of Clinical Nutrition* [online]. 1999, **53**(8), 585-590. ISSN 0954-3007. Dostupné z: doi:10.1038/sj.ejcn.1600832
- Mares-Perlman, J. A., A. E. Millen, T. L. Ficek and S. E. Hankinson. The Body of Evidence to Support a Protective Role for Lutein and Zeaxanthin in Delaying Chronic Disease. Overview. *The Journal of Nutrition* [online]. 2002, **132**(3), 518S-524S. ISSN 00223166. Dostupné z: doi:10.1093/jn/132.3.518S
- Maria, A. G., R. Graziano and D. Nicolantonio. Carotenoids: potential allies of cardiovascular health?. *Food & Nutrition Research* [online]. 2015, **59**(1). ISSN 1654-6628. Dostupné z: doi:10.3402/fnr.v59.26762

- Maria, A. G., R. Graziano and D. Nicolantonio. Carotenoids: potential allies of cardiovascular health?. *Food & Nutrition Research* [online]. 2017, **59**(1). ISSN 1654-6628. Dostupné z: doi:10.3402/fnr.v59.26762
- Marounek, M., M. Skřivan and M. Englmaierová. Effect of dietary fat on the content of vitamins and carotenoids in egg yolks. *European Poultry Science* [online]. 2019, **83**. Dostupné z: doi:10.1399/eps.2019.265
- Marounek, M. and J. Havlík. *Živiny a živinové potřeby člověka: učebnice pro studenty ČZU v Praze*. 3. vydání. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2020. ISBN 978-80-213-3018-4.
- Martínez-Cámara, S., A. Ibañez, S. Rubio, C. Barreiro and J. Barredo. Main Carotenoids Produced by Microorganisms. *Encyclopedia* [online]. 2021, **1**(4), 1223-1245. ISSN 2673-8392. Dostupné z: doi:10.3390/encyclopedia1040093
- Marusich, W. L and J. C. Bauernfeind, 1981: Oxycarotenoids in poultry feeds. In carotenoids as colorants and vitamin A precursors. BAUERNFEIND J.C, ed., 320-462.
- Masák, J., J. Pelechová and J. Plachý. *Speciální mikrobiální technologie*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 1992. ISBN 80-7080-142-5.
- Masinovskij, Z. and B. Věchet. *Evoluční aspekty fotobiologie*. Praha: Academia, 1986.
- Mcgraw, K. J., P. M. Nolan and O. L. Crino. Carotenoid accumulation strategies for becoming a colourful House Finch: analyses of plasma and liver pigments in wild moulting birds. *Functional Ecology* [online]. 2006, **20**(4), 678-688. ISSN 0269-8463. Dostupné z: doi:10.1111/j.1365-2435.2006.01121.x
- Meluzzi, A., F. Sirri, G. Manfreda, N. Tallarico and A. Franchini. Effects of dietary vitamin E on the quality of table eggs enriched with n-3 long-chain fatty acids. *Poultry Science* [online]. 2000, **79**(4), 539-545. ISSN 00325791. Dostupné z: doi:10.1093/ps/79.4.539
- Milani, A., M. Basirnejad, S. Shahbazi and A. Bolhassani. Carotenoids: biochemistry, pharmacology and treatment. *British Journal of Pharmacology* [online]. 2016, **174**(11), 1290-1324. ISSN 00071188. Dostupné z: doi:10.1111/bph.13625
- Miller, N. J., J. Sampson, L. P. Candeias, P. M. Bramley and C. A. Rice-Evans. Antioxidant activities of carotenes and xanthophylls. *FEBS Letters* [online]. 1996, **384**(3), 240-242. ISSN 00145793. Dostupné z: doi:10.1016/0014-5793(96)00323-7
- Ministerstvo zemědělství: Ústav zemědělské ekonomiky a informací. *Zpráva o stavu zemědělství ČR za rok 2020: "Zelená zpráva"*. Praha, 2022. Dostupné také z: <https://eagri.cz/public/web/mze/zemedelstvi/publikace-a-dokumenty/zelene-zpravy/zelena-zprava-2020.html>
- Mortensen, A., L. H. Skibsted and T. G. Truscott. The Interaction of Dietary Carotenoids with Radical Species. *Archives of Biochemistry and Biophysics* [online]. 2001, **385**(1), 13-19. ISSN 00039861. Dostupné z: doi:10.1006/abbi.2000.2172
- Morton, R. A. Vitamin A. *Nature* [online]. 1957, **180**(4584), 452-452. ISSN 0028-0836. Dostupné z: doi:10.1038/180452a0

- Naber, E. C. and M. W. Squires. Vitamin Profiles of Eggs as Indicators of Nutritional Status in the Laying Hen: Diet to Egg Transfer and Commercial Flock Survey. *Poultry Science* [online]. 1993, **72**(6), 1046-1053. ISSN 00325791. Dostupné z: doi:10.3382/ps.0721046
- Nabi, F., M. A. Arain, N. Rajput, et al. Health benefits of carotenoids and potential application in poultry industry: A review. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition* [online]. 2020, **104**(6), 1809-1818. ISSN 0931-2439. Dostupné z: doi:10.1111/jpn.13375
- Nataraj, J., T. Manivasagam, A. J. Thenmozhi and M. M. Essa. Lutein protects dopaminergic neurons against MPTP-induced apoptotic death and motor dysfunction by ameliorating mitochondrial disruption and oxidative stress. *Nutritional Neuroscience* [online]. 2015, **19**(6), 237-246. ISSN 1028-415X. Dostupné z: doi:10.1179/1476830515Y.0000000010
- Národní zdravotnický informační portál [online]. Praha: Ministerstvo zdravotnictví ČR a Ústav zdravotnických informací a statistiky ČR, 2023. Dostupné z: <https://www.nzip.cz>. ISSN 2695-0340.
- Negro, J. J. and J. Garrido-Fernández. Astaxanthin is the major carotenoid in tissues of white storks (*Ciconia ciconia*) feeding on introduced crayfish (*Procambarus clarkii*). *Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Biochemistry and Molecular Biology* [online]. 2000, **126**(3), 347-352. ISSN 10964959. Dostupné z: doi:10.1016/S0305-0491(00)00180-2
- Nicolle, C., N. Cardinault, O. Aprikian, et al. Effect of carrot intake on cholesterol metabolism and on antioxidant status in cholesterol-fed rat. *European Journal of Nutrition* [online]. 2003, **42**(5), 254-261. ISSN 1436-6207. Dostupné z: doi:10.1007/s00394-003-0419-1
- Niedernhofer, L. J., J. S. Daniels, C. A. Rouzer, R. E. Greene and L. J. Marnett. Malondialdehyde, a Product of Lipid Peroxidation, Is Mutagenic in Human Cells. *Journal of Biological Chemistry* [online]. 2003, **278**(33), 31426-31433. ISSN 00219258. Dostupné z: doi:10.1074/jbc.M212549200
- Nilsson, S. E. G., S. P. Sundelin, U. Wihlmark and U. T. Brunk. Aging of cultured retinal pigment epithelial cells: oxidative reactions, lipofuscin formation and blue light damage. *Documenta Ophthalmologica* [online]. 2003, **106**(1), 13-16. ISSN 00124486. Dostupné z: doi:10.1023/A:1022419606629
- Nimalaratne, Ch. and J. Wu. Hen Egg as an Antioxidant Food Commodity: A Review. *Nutrients* [online]. 2015, **7**(10), 8274-8293. ISSN 2072-6643. Dostupné z: doi:10.3390/nu7105394
- Nimalaratne, Ch., P. Savard, S. F. Gauthier, A. Schieber and J. Wu. Bioaccessibility and Digestive Stability of Carotenoids in Cooked Eggs Studied Using a Dynamic in Vitro Gastrointestinal Model. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* [online]. 2015, **63**(11), 2956-2962. ISSN 0021-8561. Dostupné z: doi:10.1021/jf505615w
- Nolan, J. M., E. Loskutova, A. N. Howard, et al. Macular Pigment, Visual Function, and Macular Disease among Subjects with Alzheimer's Disease: An Exploratory Study. *Journal of Alzheimer's Disease* [online]. 2014, **42**(4), 1191-1202. ISSN 18758908. Dostupné z: doi:10.3233/JAD-140507

- Novák, J. and M. Skalický. *Botanika: cytologie, histologie, organologie a systematika*. Čtvrté vydání. Praha: Powerprint, 2017. ISBN 978-80-7568-036-5.
- Nyberg, J. *Analysis of fatty acids in egg yolks of various production systems* [online]. Uppsala, 2017. Dostupné z: <https://www.semanticscholar.org/paper/Analysis-of-fatty-acids-in-egg-yolks-of-various-Nyberg/e18dc11a3ceb6f2a0438b8d9487c637a8916c9ea#citing-papers>
- Nys, Y. *Dietary carotenoids and egg yolk coloration - A review* [online]. Verlag Eugen Ulmer Gmh Co, Stuttgart: Archiv fur Geflugelkunde 64(2):45-54, March 2000. ISSN 0003-9098. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/279647522_Dietary_carotenoids_and_egg_yolk_coloration_-_A_review
- Nys, Y. Y. and B. Sauveur. Valeur nutritionnelle des oeufs. *Productions Animales*, 2004, 17 (5), pp.385-393.
- O'byrne, S. M. and W. S. Blaner. Retinol and retinyl esters: biochemistry and physiology. *Journal of Lipid Research* [online]. 2013, **54**(7), 1731-1743. ISSN 00222275. Dostupné z: doi:10.1194/jlr.R037648
- Ofosu, I. W., E. Appiah-Nkansah, L. Owusu, F. B. Apea-Bah, I. Oduro and W. O. Ellis. Formulation of annatto feed concentrate for layers and the evaluation of egg yolk color preference of consumerS. *Journal of Food Biochemistry* [online]. 2010, **34**(1), 66-77. ISSN 01458884. Dostupné z: doi:10.1111/j.1745-4514.2009.00264.x
- Okuyama, Y., K. Ozasa, K. Oki, H. Nishino, S. Fujimoto and Y. Watanabe. Inverse associations between serum concentrations of zeaxanthin and other carotenoids and colorectal neoplasm in Japanese. *International Journal of Clinical Oncology* [online]. 2014, **19**(1), 87-97. ISSN 1341-9625. Dostupné z: doi:10.1007/s10147-013-0520-2
- Oliveira, D. D., N. C. Baião, S. V. Cançado, R. Grimaldi, M. R. Souza, L. J. C. Lara and A. M. Q. Lana. Effects of lipid sources in the diet of laying hens on the fatty acid profiles of egg yolks. *Poultry Science* [online]. 2010, **89**(11), 2484-2490. ISSN 00325791. Dostupné z: doi:10.3382/ps.2009-00522
- Olson, J. A. and N. I. Krinsky. Introduction: the colorful, fascinating world of the carotenoids. *The FASEB Journal* [online]. 1995, **9**(15), 1547-1550. ISSN 0892-6638. Dostupné z: doi:10.1096/fasebj.9.15.8529833
- Omidi M., Rahimi S., Karimi Torshizi M. A. Modification of egg yolk fatty acids profile by using different oil sources. *Vet Res Forum*. 2015 Spring;6(2):137-41. Epub 2015 Jun 15. PMID: 26261709; PMCID: PMC4522527.
- Omri, B., R. Chalghoumi, L. Izzo, A. Ritieni, M. Lucarini, A. Durazzo, H. Abdouli and A. Santini. Effect of Dietary Incorporation of Linseed Alone or Together with Tomato-Red Pepper Mix on Laying Hens' Egg Yolk Fatty Acids Profile and Health Lipid Indexes. *Nutrients* [online]. 2019, **11**(4). ISSN 2072-6643. Dostupné z: doi:10.3390/nu11040813
- Ortiz, D., T. Lawson, R. Jarrett, et al. Biofortified orange corn increases xanthophyll density and yolk pigmentation in egg yolks from laying hens. *Poultry Science* [online]. 2021, **100**(7). ISSN 00325791. Dostupné z: doi:10.1016/j.psj.2021.101117

- Palombo, P., G. Fabrizi, V. Ruocco, E. Ruocco, J. Fluhr, R. Roberts and P. Morganti. Beneficial Long-Term Effects of Combined Oral/Topical Antioxidant Treatment with the Carotenoids Lutein and Zeaxanthin on Human Skin: A Double-Blind, Placebo-Controlled Study. *Skin Pharmacology and Physiology* [online]. 2007, **20**(4), 199-210. ISSN 1660-5527. Dostupné z: doi:10.1159/000101807
- Panaite, T. D., V. Nour, P. A. Vlaicu, M. Ropota, A. R. Corbu and M. Saracila. Flaxseed and dried tomato waste used together in laying hens diet. *Archives of Animal Nutrition* [online]. 2019, **73**(3), 222-238. ISSN 1745-039X. Dostupné z: doi:10.1080/1745039X.2019.1586500
- Panaite, T. D., V. Nour, M. Saracila, R. P. Turcu, A. E. Untea and P. A. Vlaicu. Effects of Linseed Meal and Carotenoids from Different Sources on Egg Characteristics, Yolk Fatty Acid and Carotenoid Profile and Lipid Peroxidation. *Foods* [online]. 2021, **10**(6). ISSN 2304-8158. Dostupné z: doi:10.3390/foods10061246
- Patterson, K. Y.; Bhagwat, S. A.; Williams, J. R.; Howe, J. C.; Holden, J. M. USDA Database for the Choline Content of Common Foods, Release 2; Nutrient Data Laboratory: Beltsville, MD, USA, 2008. Dostupné z: <https://www.ars.usda.gov/ARUserFiles/80-400525/data/choline/choln02.pdf>
- Pavlová, L. *Fotomorfogeneze*. Praha: Karolinum, 1996. ISBN 80-7184-148-x.
- Pánek, J., J. Pokorný and J. Dostálová. *Základy výživy a výživová politika*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2002. ISBN 80-7080-468-8.
- Pelletier, X., P. Thouvenot, S. Belbraouet, J. A. Chayvialle, B. Hanesse, D. Mayeux and G. Debry. Effect of Egg Consumption in Healthy Volunteers: Influence of Yolk, White or Whole-Egg on Gastric Emptying and on Glycemic and Hormonal Responses. *Annals of Nutrition and Metabolism* [online]. 1996, **40**(2), 109-115. ISSN 1421-9697. Dostupné z: doi:10.1159/000177903
- Perrone, S., M. Longini, B. Marzocchi, et al. Effects of Lutein on Oxidative Stress in the Term Newborn: A Pilot Study. *Neonatology* [online]. 2009, **97**(1), 36-40. ISSN 1661-7800. Dostupné z: doi:10.1159/000227291
- Petracek, F. J. and L. Zechmeister. Reaction of β -Carotene with N-Bromosuccinimide: The Formation and Conversions of Some Polyene Ketones. *Journal of the American Chemical Society* [online]. 1956, **78**(7), 1427-1434. ISSN 0002-7863. Dostupné z: doi:10.1021/ja01588a044
- Pires, P. G. da S., C. Bavaresco, B. S. Prato, M. L. Wirth and P. de O. Moraes. The relationship between egg quality and hen housing systems - A systematic review. *Livestock Science* [online]. 2021, **250**. ISSN 18711413. Dostupné z: doi:10.1016/j.livsci.2021.104597
- Pirgozliev, V. Radoslavov, I. M. Whiting, K. Kljak, S. Ch. Mansbridge, A. G. Atanasov, S. P. Rose and S. B. Enchev. Stevia (*Stevia rebaudiana*) Improves Carotenoid Content in Eggs When Fed to Laying Hens. *Foods* [online]. 2022, **11**(10). ISSN 2304-8158. Dostupné z: doi:10.3390/foods11101418

- Ponte, P. I. P., L. M. A. Ferreira, M. A. C. Soares, M. A. N. M. Aguiar, J. P. C. Lemos, I. Mendes and C. M. G. A. Fontes. Use of Cellulases and Xylanases to Supplement Diets Containing Alfalfa for Broiler Chicks: Effects on Bird Performance and Skin Color. *Journal of Applied Poultry Research* [online]. 2004, **13**(3), 412-420. ISSN 10566171. Dostupné z: doi:10.1093/japr/13.3.412
- Preisinger, R. Innovative layer genetics to handle global challenges in egg production. *British Poultry Science* [online]. 2018, **59**(1), 1-6. ISSN 0007-1668. Dostupné z: doi:10.1080/00071668.2018.1401828
- Prévéraud, D. P., E. Devillard and P. Borel. Dietary fat modulates dl- α -tocopheryl acetate (vitamin E) bioavailability in adult cockerels. *British Poultry Science* [online]. 2015, **56**(1), 94-102. ISSN 0007-1668. Dostupné z: doi:10.1080/00071668.2014.982074
- Procházka, S. *Fyziologie rostlin*. Praha: Academia, 1998. ISBN 80-200-0586-2.
- Procházková, D., I. Boušová and N. Wilhelmová. Antioxidant and prooxidant properties of flavonoids. *Fitoterapia* [online]. 2011, **82**(4), 513-523. ISSN 0367326X. Dostupné z: doi:10.1016/j.fitote.2011.01.018
- Pryor, W. A. and J. P. Stanley. Suggested mechanism for the production of malonaldehyde during the autoxidation of polyunsaturated fatty acids. Nonenzymic production of prostaglandin endoperoxides during autoxidation. *The Journal of Organic Chemistry* [online]. 1975, **40**(24), 3615-3617. ISSN 0022-3263. Dostupné z: doi:10.1021/jo00912a038
- Rao, A. and L. Rao. Carotenoids and human health. *Pharmacological Research* [online]. 2007, **55**(3), 207-216. ISSN 10436618. Dostupné z: doi:10.1016/j.phrs.2007.01.012
- Ravindran, V., P. Tancharoenrat, F. Zaefarian and G. Ravindran. Fats in poultry nutrition: Digestive physiology and factors influencing their utilisation. *Animal Feed Science and Technology* [online]. 2016, **213**, 1-21. ISSN 03778401. Dostupné z: doi:10.1016/j.anifeedsci.2016.01.012
- Reboul, E., S. Thap, E. Perrot, M. J. Amiot, D. Lairon and P. Borel. Effect of the main dietary antioxidants (carotenoids, γ -tocopherol, polyphenols, and vitamin C) on α -tocopherol absorption. *European Journal of Clinical Nutrition* [online]. 2007, **61**(10), 1167-1173. ISSN 0954-3007. Dostupné z: doi:10.1038/sj.ejcn.1602635
- Reboul, E. Absorption of Vitamin A and Carotenoids by the Enterocyte: Focus on Transport Proteins. *Nutrients* [online]. 2013, **5**(9), 3563-3581. ISSN 2072-6643. Dostupné z: doi:10.3390/nu5093563
- Réhault-Godbert, S., N. Guyot and Y. Nys. The Golden Egg: Nutritional Value, Bioactivities, and Emerging Benefits for Human Health. *Nutrients* [online]. 2019, **11**(3). ISSN 2072-6643. Dostupné z: doi:10.3390/nu11030684
- Ribaya-Mercado, J. D. and J. B. Blumberg. Lutein and Zeaxanthin and Their Potential Roles in Disease Prevention. *Journal of the American College of Nutrition* [online]. 2004, **23**, 567S-587S. ISSN 0731-5724. Dostupné z: doi:10.1080/07315724.2004.10719427

- Roberts, J. R. Factors Affecting Egg Internal Quality and Egg Shell Quality in Laying Hens. *The Journal of Poultry Science* [online]. 2004, **41**(3), 161-177. ISSN 1346-7395. Dostupné z: doi:10.2141/jpsa.41.161
- Rong, Y., L. Chen, T. Zhu, et al. Egg consumption and risk of coronary heart disease and stroke: dose-response meta-analysis of prospective cohort studies. *BMJ* [online]. 2013, **346**(jan07 2), e8539-e8539. ISSN 1756-1833. Dostupné z: doi:10.1136/bmj.e8539
- Rubin, L. P., G. M. Chan, B. M. Barrett-Reis, et al. Effect of carotenoid supplementation on plasma carotenoids, inflammation and visual development in preterm infants. *Journal of Perinatology* [online]. 2012, **32**(6), 418-424. ISSN 0743-8346. Dostupné z: doi:10.1038/jp.2011.87
- Saeed, M., D. Babazadeh, M. A. Arain, et al. The use of chicoric acid from *Echinacea purpurea* as a feed additive in poultry nutrition. *World's Poultry Science Journal* [online]. 2018, **74**(1), 69-78. ISSN 0043-9339. Dostupné z: doi:10.1017/S0043933917001027
- Sahin, N., F. Akdemir, C. Orhan, O. Kucuk, A. Hayirli and K. Sahin. Lycopene-enriched quail egg as functional food for humans. *Food Research International* [online]. 2008, **41**(3), 295-300. ISSN 09639969. Dostupné z: doi:10.1016/j.foodres.2007.12.006
- Sahin, K., Orhan, C., Tuzcu, M., and Sahin, N. (2013). The Effects of lycopene on the meat lycopene levels, antioxidant enzymes and Nrf2 pathway in broiler chickens. Paper presented at the 2nd international poultry meat congress.
- Saikumar, P., Z. Dong, V. Mikhailov, M. Denton, J. M. Weinberg and M. A. Venkatachalam. Apoptosis: definition, mechanisms, and relevance to disease. *The American Journal of Medicine* [online]. 1999, **107**(5), 489-506. ISSN 00029343. Dostupné z: doi:10.1016/S0002-9343(99)00259-4
- Saltzman, A., E. Birol, H. E. Bouis, E. Boy, F. F. de Moura, Y. Islam and W. H. Pfeiffer. Biofortification: Progress toward a more nourishing future. *Global Food Security* [online]. 2013, **2**(1), 9-17. ISSN 22119124. Dostupné z: doi:10.1016/j.gfs.2012.12.003
- Scott, M. L., S. J. Hull and P. A. Mullenhoff. The Calcium Requirements of Laying Hens and Effects of Dietary Oyster Shell Upon Egg Shell Quality. *Poultry Science* [online]. 1971, **50**(4), 1055-1063. ISSN 00325791. Dostupné z: doi:10.3382/ps.0501055
- Selgen a.s. Pšenice jarní, Pexeso: Vlastnosti. *Selgen* [online]. 2022. Dostupné z: <https://selgen.cz/psenice-jarni/pexeso/>
- Send, R. and D. Sundholm. The Role of the β -Ionone Ring in the Photochemical Reaction of Rhodopsin. *The Journal of Physical Chemistry A* [online]. 2007, **111**(1), 27-33. ISSN 1089-5639. Dostupné z: doi:10.1021/jp065510f
- Seuss-Baum, I. Nutritional Evaluation of Egg Compounds. Huopalahti, R., R. López-Fandiño, M. Anton and R. Schade, ed. *Bioactive Egg Compounds* [online]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2007, 2007, s. 117-144. ISBN 978-3-540-37883-9. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-540-37885-3_18

- Severinghaus, E. L. Vitamin A . T. Moore. Elsevier, Amsterdam, 1957. *Science* [online]. 1958, **127**(3304), 968-969. ISSN 0036-8075. Dostupné z: doi:10.1126/science.127.3304.968.b
- Shahid, M. S., S. Zhou, W. Nie, L. Wang, H. Lv and J. Yuan. Phytogetic Antioxidants Prolong n-3 Fatty Acid-Enriched Eggs' Shelf Life by Activating the Nrf-2 Pathway through Phosphorylation of MAPK. *Foods* [online]. 2022, **11**(20). ISSN 2304-8158. Dostupné z: doi:10.3390/foods11203158
- Sharma, K. D., S. Karki, N. S. Thakur and S. Attri. Chemical composition, functional properties and processing of carrot—a review. *Journal of Food Science and Technology* [online]. 2012, **49**(1), 22-32. ISSN 0022-1155. Dostupné z: doi:10.1007/s13197-011-0310-7
- Sharma, S. *Klinická výživa a dietologie: v kostce*. Přeložil Hana POSPÍŠILOVÁ. Praha: Grada Publishing, 2018. Sestra (Grada). ISBN 978-80-271-0228-0.
- Shin, J., P. Xun, Y. Nakamura and K. He. Egg consumption in relation to risk of cardiovascular disease and diabetes: a systematic review and meta-analysis,. *The American Journal of Clinical Nutrition* [online]. 2013, **98**(1), 146-159. ISSN 00029165. Dostupné z: doi:10.3945/ajcn.112.051318
- Schiedt, K., F. J. Leuenberger, M. Vecchi and E. Glinz. Absorption, retention and metabolic transformations of carotenoids in rainbow trout, salmon and chicken. *Pure and Applied Chemistry* [online]. 1985, **57**(5), 685-692. ISSN 1365-3075. Dostupné z: doi:10.1351/pac198557050685
- Singh, A., S. Ahmad and A. Ahmad. Green extraction methods and environmental applications of carotenoids-a review. *RSC Advances* [online]. 2015, **5**(77), 62358-62393. ISSN 2046-2069. Dostupné z: doi:10.1039/C5RA10243J
- Skřivan, M. and M. Englmaierová. The deposition of carotenoids and α -tocopherol in hen eggs produced under a combination of sequential feeding and grazing. *Animal Feed Science and Technology* [online]. 2014, **190**, 79-86. ISSN 03778401. Dostupné z: doi:10.1016/j.anifeedsci.2014.01.009
- Skřivan, M. and M. Englmaierová. *Chov slepic na pastvě zvyšuje obsah vitamínů a karotenoidů ve vejcích: metodika*. Praha Uhřetěves: Výzkumný ústav živočišné výroby, 2015. ISBN 978-80-7403-138-0.
- Skřivan, M., M. Englmaierová, E. Skřivanová and I. Bubancová. Increase in lutein and zeaxanthin content in the eggs of hens fed marigold flower extract. *Czech Journal of Animal Science* [online]. 2016, **60**(3), 87-96. ISSN 12121819. Dostupné z: doi:10.17221/8073-CJAS
- Skřivan, M., M. Marounek, M. Englmaierová and E. Skřivanová. Effect of increasing doses of marigold (*Tagetes erecta*/i) flower extract on eggs carotenoids content, colour and oxidative stability. *Journal of Animal and Feed Sciences* [online]. 2016, **25**(1), 58-64. ISSN 1230-1388. Dostupné z: doi:10.22358/jafs/65588/2016
- Skřivanová, E. Vybrané zásady chovu a výživy drůbeže In: Ledvinka, Z. *Chov drůbeže I*. V Praze: Česká zemědělská univerzita, 2011. ISBN 978-80-213-2174-8.

- Skřivanová, V., M. Englmaierová, M. Bendová and M. Skřivan. Effect of the source and level of carotenoids in diets on their retention in eggs. *Czech Journal of Animal Science* [online]. 2017, **62**(8), 323-330. ISSN 12121819. Dostupné z: doi:10.17221/17/2017-CJAS
- Společnost pro výživu. *Referenční hodnoty pro příjem živin*. V ČR 1. vyd. Praha: Společnost pro výživu, 2011. ISBN 978-80-254-6987-3.
- Staggs, C. G., W. M. Sealey, B. J. McCabe, A. M. Teague and D. M. Mock. Determination of the biotin content of select foods using accurate and sensitive HPLC/avidin binding. *Journal of Food Composition and Analysis* [online]. 2004, **17**(6), 767-776. ISSN 08891575. Dostupné z: doi:10.1016/j.jfca.2003.09.015
- Stahl, W. and H. Sies. Antioxidant activity of carotenoids. *Molecular Aspects of Medicine* [online]. 2003, **24**(6), 345-351. ISSN 00982997. Dostupné z: doi:10.1016/S0098-2997(03)00030-X
- Stenesh, J. *Dictionary of biochemistry and molecular biology*. 2nd ed. New York: Wiley, c1989. ISBN 0471840890.
- Staněk, E. *Příručka pro ošetřovatele drůbeže*. Praha: Státní zemědělské nakladatelství, 1963. Živočišná výroba (Státní zemědělské nakladatelství).
- Stupka, R. *Chov zvířat*. 2. vyd. Praha: Powerprint, 2013. ISBN 978-80-87415-66-5.
- Sun, B., C. Chen, W. Wang, et al. Effects of lycopene supplementation in both maternal and offspring diets on growth performance, antioxidant capacity and biochemical parameters in chicks. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition* [online]. 2015, **99**(1), 42-49. ISSN 09312439. Dostupné z: doi:10.1111/jpn.12196
- Surai, P. F and N. H. C Sparks. Designer eggs: from improvement of egg composition to functional food. *Trends in Food Science & Technology* [online]. 2001, **12**(1), 7-16. ISSN 09242244. Dostupné z: doi:10.1016/S0924-2244(01)00048-6
- Surai, P. F.; Simons, P. C. M.; Dvorska, J. E.; Aradas, F.; Sparks, N. H. C. Antioxidant-enriched eggs: Opportunities and limitations. In *The Amazing Egg: Nature's Perfect Functional Food for Health Promotion*; Sim, J. S., Sunwoo, H.H., Eds.; University of Alberta: Edmonton, AB, Canada, 2006; pp. 68-93.
- Šesták, Z., ed. *Photosynthesis during leaf development* [online]. Dordrecht: Springer Netherlands, 1985. Tasks for vegetation science. ISBN 978-94-010-8941-8. Dostupné z: doi:10.1007/978-94-009-5530-1
- Tang, G. Vitamin A Value of Plant Food Provitamin A - Evaluated by the Stable Isotope Technologies. *International Journal for Vitamin and Nutrition Research* [online]. 2014, **84**(Supplement 1), 25-29. ISSN 0300-9831. Dostupné z: doi:10.1024/0300-9831/a000183
- Tanvetyanon, T. and G. Bepler. Beta-carotene in multivitamins and the possible risk of lung cancer among smokers versus former smokers. *Cancer* [online]. 2008, **113**(1), 150-157. ISSN 0008543X. Dostupné z: doi:10.1002/cncr.23527

- Tapiero, H., D. M. Townsend and K. D. Tew. The role of carotenoids in the prevention of human pathologies. *Biomedicine & Pharmacotherapy* [online]. 2004, **58**(2), 100-110. ISSN 07533322. Dostupné z: doi:10.1016/j.biopha.2003.12.006
- Tsuda, S. DNA Damage Induced by Red Food Dyes Orally Administered to Pregnant and Male Mice. *Toxicological Sciences* [online]. 2001, **61**(1), 92-99. ISSN 10960929. Dostupné z: doi:10.1093/toxsci/61.1.92
- Tůmová, E. Vejce a snáška drůbeže In: Ledvinka, Z. *Chov drůbeže I*. V Praze: Česká zemědělská univerzita, 2011. ISBN 978-80-213-2174-8.
- Tůmová, E., M. Englmaierová, D. Chodová and M. Lichovníková. *Chov drůbeže II*. V Praze: Česká zemědělská univerzita, 2019. ISBN 978-80-213-2937-9.
- Tyssandier, V., E. Reboul, J. Dumas, C. Bouteloup-Demange, M. Armand, J. Marcand, M. Sallas and P. Borel. Processing of vegetable-borne carotenoids in the human stomach and duodenum. *American Journal of Physiology-Gastrointestinal and Liver Physiology*. 2003, **284**(6), G913-G923. ISSN 0193-1857. Dostupné z: doi:10.1152/ajpgi.00410.2002
- Unlu, N. Z., T. Bohn, S. K. Clinton and S. J. Schwartz. Carotenoid Absorption from Salad and Salsa by Humans Is Enhanced by the Addition of Avocado or Avocado Oil. *The Journal of Nutrition* [online]. 2005, **135**(3), 431-436. ISSN 0022-3166. Dostupné z: doi:10.1093/jn/135.3.43
- Untea, A. E., I. Varzaru, T. D. Panaite, T. Gavris, A. Lupu and M. Ropota. The Effects of Dietary Inclusion of Bilberry and Walnut Leaves in Laying Hens' Diets on the Antioxidant Properties of Eggs. *Animals* [online]. 2020, **10**(2). ISSN 2076-2615. Dostupné z: doi:10.3390/ani10020191
- Van Elswyk, M. E. Comparison of n-3 fatty acid sources in laying hen rations for improvement of whole egg nutritional quality: a review. *British Journal of Nutrition* [online]. 1997, **78**(1), S61-S69. ISSN 0007-1145. Dostupné z: doi:10.1079/BJN19970135
- van het Hof, K. H., I. A. Brouwer, C. E. West, et al. Bioavailability of lutein from vegetables is 5 times higher than that of β -carotene. *The American Journal of Clinical Nutrition* [online]. 1999, **70**(2), 261-268. ISSN 0002-9165. Dostupné z: doi:10.1093/ajcn.70.2.261
- Velíšek, J. *Chemie potravin*. Tábor: OSSIS, 1999. ISBN 8090239153.
- Velíšek, J. *Chemie potravin*. Vyd. 2. upr. Tábor: OSSIS, 2002. ISBN 80-86659-02-x.
- Velíšek, J. and K. Cejpek. *Biosynthesis of food components*. Tábor: OSSIS, 2008. ISBN 978-80-86659-12-1.
- Velíšek, J. and J. Hajšlová. *Chemie potravin*. Rozš. a přeprac. 3. vyd. Tábor: OSSIS, 2009. ISBN 978-80-86659-16-9.
- Verhoef-Verhallen, E. *Slepice*. Dobřejovice: Rebo Productions, 2005. Příručka začínajícího chovatele. ISBN 80-7234-404-8.

- Villaverde, C., L. Cortinas, A. C. Barroeta, S. M. Martin-Orue and M. D. Baucells. Relationship between dietary unsaturation and vitamin E in poultry. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition* [online]. 2004, **88**(3-4), 143-149. ISSN 0931-2439. Dostupné z: doi:10.1111/j.1439-0396.2003.00471.x
- Vincent, U., F. Serano and Ch. V. Holst. Development and validation of a multi-analyte method for the regulatory control of carotenoids used as feed additives in fish and poultry feed. *Food Additives & Contaminants: Part A* [online]. 2017, **34**(8), 1285-1297. ISSN 1944-0049. Dostupné z: doi:10.1080/19440049.2017.1315651
- Vishwanathan, R., E. F. Goodrow-Kotyła, B. R. Wooten, T. A. Wilson and R. J. Nicolosi. Consumption of 2 and 4 egg yolks/d for 5 wk increases macular pigment concentrations in older adults with low macular pigment taking cholesterol-lowering statins. *The American Journal of Clinical Nutrition* [online]. 2009, **90**(5), 1272-1279. ISSN 00029165. Dostupné z: doi:10.3945/ajcn.2009.28013
- Vishwanathan, R., C. M. Gendron, E. F. Goodrow-Kotyła, T. A. Wilson and R. J. Nicolosi. Increased consumption of dietary cholesterol, lutein, and zeaxanthin as egg yolks does not decrease serum concentrations and lipoprotein distribution of other carotenoids, retinol, and tocopherols. *Nutrition Research* [online]. 2010, **30**(11), 747-755. ISSN 02715317. Dostupné z: doi:10.1016/j.nutres.2010.10.007
- Vishwanathan, R., M. J. Kuchan, S. Sen and E. J. Johnson. Lutein and Preterm Infants With Decreased Concentrations of Brain Carotenoids. *Journal of Pediatric Gastroenterology & Nutrition* [online]. 2014, **59**(5), 659-665. ISSN 0277-2116. Dostupné z: doi:10.1097/MPG.0000000000000389
- Vlčková, J., E. Tůmová, M. Ketta, M. Englmaierová and D. Chodová. Effect of housing system and age of laying hens on eggshell quality, microbial contamination, and penetration of microorganisms into eggs. *Czech Journal of Animal Science* [online]. 2018, **63**(2), 51-60. ISSN 12121819. Dostupné z: doi:10.17221/77/2017-CJAS
- Vodrážka, Z. *Biochemie*. 2. oprav. vyd. Praha: Academia, 1996. ISBN 80-200-0600-1.
- Wang, S., L. Yin, H. Tanaka, K. Tanaka and H. Tsujimoto. Wheat-Aegilops chromosome addition lines showing high iron and zinc contents in grains. *Breeding Science* [online]. 2011, **61**(2), 189-195. ISSN 1344-7610. Dostupné z: doi:10.1270/jsbbs.61.189
- Wang, T., H. Cai, S. Sasazuki, et al. Fruit and vegetable consumption, Helicobacter pylori antibodies, and gastric cancer risk: A pooled analysis of prospective studies in China, Japan, and Korea. *International Journal of Cancer* [online]. 2016, **140**(3), 591-599. ISSN 00207136. Dostupné z: doi:10.1002/ijc.30477
- White, P. and M. Broadley. Biofortifying crops with essential mineral elements. *Trends in Plant Science* [online]. 2005, **10**(12), 586-593. ISSN 13601385. Dostupné z: doi:10.1016/j.tplants.2005.10.001
- Widomska, J. and W. K. Subczynski. Why has Nature Chosen Lutein and Zeaxanthin to Protect the Retina?. *Journal of Clinical & Experimental Ophthalmology* [online]. 2014, **05**(01). ISSN 21559570. Dostupné z: doi:10.4172/2155-9570.1000326

- Williams, W. D. Origin and Impact of Color on Consumer Preference for Food. *Poultry Science* [online]. 1992, **71**(4), 744-746 [cit. 2023-02-16]. ISSN 00325791. Dostupné z: doi:10.3382/ps.0710744
- Wilson, L. M., S. Tharmarajah, Y. Jia, R. D. Semba, D. A. Schaumberg and K. A. Robinson. The Effect of Lutein/Zeaxanthin Intake on Human Macular Pigment Optical Density: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Advances in Nutrition* [online]. 2021, **12**(6), 2244-2254. ISSN 21618313. Dostupné z: doi:10.1093/advances/nmab071
- Yan, B., M. Lu, L. Wang, X. Mo, W. Luo, Y. Du and C. Zhang. Specific serum carotenoids are inversely associated with breast cancer risk among Chinese women: a case-control study. *British Journal of Nutrition* [online]. 2016, **115**(1), 129-137. ISSN 0007-1145. Dostupné z: doi:10.1017/S000711451500416X
- Yeum, K., G. Beretta, N. I. Krinsky, R. M. Russell and G. Aldini. Synergistic interactions of antioxidant nutrients in a biological model system. *Nutrition* [online]. 2009, **25**(7-8), 839-846. ISSN 08999007. Dostupné z: doi:10.1016/j.nut.2009.01.011
- Young, A. and G. Lowe. Carotenoids—Antioxidant Properties. *Antioxidants* [online]. 2018, **7**(2). ISSN 2076-3921. Dostupné z: doi:10.3390/antiox7020028
- Zaheer, K. Hen egg carotenoids (lutein and zeaxanthin) and nutritional impacts on human health: a review. *CyTA - Journal of Food* [online]. 2017, **15**(3), 474-487. ISSN 1947-6337. Dostupné z: doi:10.1080/19476337.2016.1266033
- Zahroojian, N., H. Moravej and M. Shivazad. Comparison of marine algae (*Spirulina platensis*) and synthetic pigment in enhancing egg yolk colour of laying hens. *British Poultry Science* [online]. 2011, **52**(5), 584-588. ISSN 0007-1668. Dostupné z: doi:10.1080/00071668.2011.610779
- Zang, H., K. Zhang, X. Ding, S. Bai, J. M. Hernández and B. Yao. Effects of different dietary vitamin combinations on the egg quality and vitamin deposition in the whole egg of laying hens. *Revista Brasileira de Ciência Avícola* [online]. 2011, **13**(3), 189-196. ISSN 1516-635X. Dostupné z: doi:10.1590/S1516-635X2011000300005
- Zelenka, J., J. Heger and L. Zeman. *Doporučený obsah živin v krmných směsích a výživná hodnota krmiv pro drůbež: Recommended nutrient content in poultry diets and nutritive value of feeds for poultry*. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2007. ISBN 978-80-7375-091-6.

10 Obrázky

Obrázek č. 1: Chemická struktura: nasycená mastná stearová kyselina

Prispěvatelé Wikipedie, *Kyselina stearová* [online], Wikipedie: Otevřená encyklopedie, c2022, Datum poslední revize 19. 04. 2022, 21:22 UTC, <https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Kyselina_stearov%C3%A1&oldid=21177122>

Obrázek č. 2: Chemická struktura: mononenasycená mastná olejová kyselina (*n*-9)

Prispěvatelé Wikipedie, *Kyselina olejová* [online], Wikipedie: Otevřená encyklopedie, c2022, Datum poslední revize 6. 11. 2022, 15:55 UTC, <https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Kyselina_olejov%C3%A1&oldid=21845460>

Obrázek č. 3: Chemická struktura: polynenasycená mastná α -linolenová kyselina (*n*-3)

Prispěvatelé Wikipedie, *Omega-3 nenasycené mastné kyseliny* [online], Wikipedie: Otevřená encyklopedie, c2020, Datum poslední revize 29. 02. 2020, 15:02 UTC, <https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Omega-3_nenasycen%C3%A9_mastn%C3%A9_kyseliny&oldid=18202219>

Obrázek č. 4: Chemická struktura: polynenasycená mastná linolová kyselina (*n*-6)

Prispěvatelé Wikipedie, *Kyselina linolová* [online], Wikipedie: Otevřená encyklopedie, c2020, Datum poslední revize 4. 07. 2020, 15:31 UTC, <https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Kyselina_linolov%C3%A1&oldid=18783401>

Obrázek č. 5: Chemická struktura: polynenasycená mastná arachidonová kyselina (*n*-6)

Wikimedia Commons contributors, 'File:AAnumbering.png', *Wikimedia Commons, the free media repository*, 12 September 2020, 17:19 UTC, <<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:AAnumbering.png&oldid=456741446>>

Obrázek č. 6: Chemická struktura: polynenasycená mastná eikosapentaenová kyselina (*n*-3)

Wikipedia contributors, 'Eicosapentaenoic acid', *Wikipedia, The Free Encyclopedia*, 25 March 2023, 02:02 UTC, <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Eicosapentaenoic_acid&oldid=1146467643>

Obrázek č. 7: Chemická struktura: polynenasycená mastná dokosahexaenová kyselina (*n*-3)

Wikipedia contributors, 'Docosahexaenoic acid', *Wikipedia, The Free Encyclopedia*, 12 March 2023, 18:44 UTC, <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Docosahexaenoic_acid&oldid=1144259664>

Obrázek č. 8: Chemická struktura: isopentenylypyrofosfát

Wikipedia contributors, 'Isopentenyl pyrophosphate', *Wikipedia, The Free Encyclopedia*, 20 June 2022, 23:15 UTC, <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Isopentenyl_pyrophosphate&oldid=1094132593>

Obrázek č. 9: Chemická struktura: vitamin A (all-*trans*-retinol)

Wikimedia Commons contributors, 'File:All-trans-Retinol2.svg', *Wikimedia Commons, the free media repository*, 12 October 2020, 12:21 UTC, <<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:All-trans-Retinol2.svg&oldid=487718446>>

Obrázek č. 10: Chemická struktura: vitamin A (11-*cis*-retinal)

Přispěvatelé Wikipedie, 'Vitamín A', *Wikipedie: Otevřená encyklopedie*, 30. 12. 2022, 18:37 UTC, <https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Vitam%C3%ADn_A&oldid=22280685>

Obrázek č. 11: Chemická struktura: karotenoid β -karoten (karoten)

Přispěvatelé Wikipedie, *Betakaroten* [online], *Wikipedie: Otevřená encyklopedie*, c2020, Datum poslední revize 23. 10. 2020, 08:33 UTC, <<https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Betakaroten&oldid=19098560>>

Obrázek č. 12: Chemická struktura: karotenoid lutein (xantofyl)

Přispěvatelé Wikipedie, *Lutein* [online], *Wikipedie: Otevřená encyklopedie*, c2020, Datum poslední revize 19. 11. 2020, 19:57 UTC, <<https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Lutein&oldid=19178977>>

Obrázek č. 13: Chemická struktura: karotenoid zeaxantin (xantofyl)

Přispěvatelé Wikipedie, *Zeaxantin* [online], *Wikipedie: Otevřená encyklopedie*, c2019, Datum poslední revize 20. 10. 2019, 11:56 UTC, <<https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Zeaxantin&oldid=17744242>>

Obrázek č. 14: Chemická struktura: karotenoid β -kryptoxantin (xantofyl)

Prispěvatelé Wikipedie, *Kryptoxantin* [online], Wikipedie: Otevřená encyklopedie, c2019, Datum poslední revize 22. 09. 2019, 17:31 UTC, <<https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Kryptoxantin&oldid=17664890>>

Obrázek č. 15: Chemická struktura: karotenoid zeinoxantin (xantofyl)

https://www.chemicalbook.com/ChemicalProductProperty_EN_CB01415872.htm

Obrázek č. 16: Chemická struktura: karotenoid kapsantin (xantofyl)

Laboratoř optické spektroskopie, Karotenoidy (skoro) od A do Z: Kapsantin. Jihočeská univerzita. Přírodovědecká fakulta. Ústav fyziky. 2023. Dostupné z: www.polivkalab.cz/for_public/cz_karotenoidy_od_a_do_z.html

Obrázek č. 17: Chemická struktura: karotenoid kapsorubin (xantofyl)

Laboratoř optické spektroskopie, Karotenoidy (skoro) od A do Z: Kapsorubin. Jihočeská univerzita. Přírodovědecká fakulta. Ústav fyziky. 2023. Dostupné z: www.polivkalab.cz/for_public/cz_karotenoidy_od_a_do_z.html

Obrázek č. 18: Chemická struktura: karotenoid lykopen (karoten)

Prispěvatelé Wikipedie, *Lykopen* [online], Wikipedie: Otevřená encyklopedie, c2019, Datum poslední revize 28. 11. 2019, 22:33 UTC, <<https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Lykopen&oldid=17894564>>

Obrázek č. 19: Chemická struktura: β -apo-8'ethylester kyseliny karotenové (xantofyl)

Wikipedia contributors, 'Food orange 7', *Wikipedia, The Free Encyclopedia*, 29 January 2021, 15:13 UTC, <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Food_orange_7&oldid=1003554079>

Obrázek č. 20: Chemická struktura: karotenoid citranaxantin (xantofyl)

Wikipedia contributors, 'Citranaxanthin', *Wikipedia, The Free Encyclopedia*, 26 April 2020, 13:07 UTC, <<https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Citranaxanthin&oldid=953252808>>

Obrázek č. 21: Chemická struktura: karotenoid kantaxantin (xantofyl)

Prispěvatelé Wikipedie, *Kantaxantin* [online], Wikipedie: Otevřená encyklopedie, c2020, Datum poslední revize 14. 09. 2020, 07:40 UTC, <<https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Kantaxantin&oldid=18995342>>

Obrázek č. 22: Chemická struktura: vitamin E (α -tokoferol)

Wikibooks contributors, 'Structural Biochemistry/Chemistry of important organic molecules in Biochemistry/Vitamin E', *Wikibooks, The Free Textbook Project*, 9 September 2016, 21:33 UTC,

<https://en.wikibooks.org/w/index.php?title=Structural_Biochemistry/Chemistry_of_important_organic_molecules_in_Biochemistry/Vitamin_E&oldid=3117400>

Obrázek č. 23: Chemická struktura: malondialdehyd (MDA, propandial)

Příspěvatelé Wikipedie, *Malondialdehyd* [online], Wikipedie: Otevřená encyklopedie, c2020, Datum poslední revize 8. 09. 2020, 07:34 UTC, <<https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Malondialdehyd&oldid=18980356>>

Obrázek č. 24: HPLC chromatogram karotenoidů luteinu (Peak 1: 6,172 min) a zeaxantinu (Peak 2: 7,228 min) z náhodného vzorku lyofilizovaného vaječného žloutku

Obrázek č. 25: Chemická struktura: malondialdehyd (MDA, propandial, rovnovážná směs)

Příspěvatelé Wikipedie, *Malondialdehyd* [online], Wikipedie: Otevřená encyklopedie, c2020, Datum poslední revize 8. 09. 2020, 07:34 UTC, <<https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Malondialdehyd&oldid=18980356>>