

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů

Katedra chemie



**Fakulta agrobiologie,
potravinových a přírodních zdrojů**

**Vliv technologického zpracování zrna pšenice na obsah
nutričně žádoucích látek**

Diplomová práce

Bc. Hana Kosová

Výživa a potraviny

Ing. Luboš Paznocht, Ph.D.

© 2023 ČZU v Praze

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci "Vliv technologického zpracování zrna pšenice na obsah nutričně žádoucích látek" jsem vypracovala 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 autorka uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušila autorská práva třetích osob.

V Praze dne 14. 4. 2023

Poděkování

Ráda bych touto cestou poděkovala Ing. Luboši Paznochtovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady, připomínky a především za vstřícný přístup a věnovaný čas.

Vliv technologického zpracování pšeničného zrna na obsah nutričně žádoucích látek

Souhrn

Pšenice je pro velkou část populace základní potravinou. Díky svému složení je významným zdrojem nutričně žádoucích látek jako jsou vitaminy, minerální látky či fytonutrienty, mezi které patří například anthokyaniny, flavonoidy či karotenoidy. Karotenoidy jsou v tucích rozpustné látky zodpovědné za žluté, oranžové a červené zbarvení širokého spektra plodů. Jsou náchylné k degradaci a izomeraci v důsledku skladování a technologického zpracování.

Pro experiment bylo použito deset genotypů pšenice seté pěti různých barev zrna (tradiční - tzv. červené, s modrým aleuronem, s modrým aleuronem a purpurovým perikarpem - tzv. černé, s purpurovým perikarpem a se žlutým endospermem), z nichž byly připravovány vločky dvěma odlišnými technologickými procesy. Prvním způsobem bylo povaření zrna následované vločkováním a druhý způsob zahrnoval máčení zrna namísto povaření.

Pomocí HPLC-DAD byly výchozí pšeničné zrno, meziprodukty technologického zpracování a finální produkty analyzovány na obsah karotenoidů. Nejvyšším obsahem karotenoidů se vyznačovaly žluté a purpurově zbarvené pšenice (2,72 a 2,00 $\mu\text{g/g}$), naopak nejnižší obsah byl zjištěn u modrých pšenic (1,62 $\mu\text{g/g}$). U tradičních červených a černých pšenice byl obsah karotenoidů podobný (1,85 $\mu\text{g/g}$, resp. 1,95 $\mu\text{g/g}$). Dominantním karotenoidem v syrovém zrnu všech genotypů byl lutein, jehož průměrné zastoupení dosahovalo 67 % celkového obsahu karotenoidů. V průběhu procesu výroby vloček povařením bylo degradováno průměrně 29 % celkového obsahu karotenoidů, tj. bylo zachováno 71 % karotenoidů. Naproti tomu při výrobě vloček zahrnující máčení zrna došlo k úbytku o 19 %, tedy o 10 % méně než při povaření.

Klíčová slova: antioxidanty, karotenoidy, lutein, obiloviny, potraviny

The effect of technological processing of wheat grain on content of nutritional substances

Summary

Wheat is a staple food for a large part of the population. Thanks to its composition, it is an important source of nutritionally desirable substances such as vitamins, minerals and phytonutrients, including anthocyanins, flavonoids and carotenoids. Carotenoids are fat-soluble substances responsible for yellow, orange and red colours of a wide range of fruits. They are prone to degradation and isomerization due to storage and technological processing.

Ten genotypes of wheat with five different grain colours (traditional - so-called red, with blue aleurone, with blue aleurone and purple pericarp - so-called black, with purple pericarp and with yellow endosperm), were used for the experiment, from which flakes were prepared by two different technological processes. The first method involved boiling the grain followed by flaking, and the second process involved soaking the grain instead of boiling it.

Using HPLC-DAD, the initial wheat grain, intermediate products of technological processing and final products were analyzed for carotenoid content. The highest carotenoid content was found in yellow- and purple-colored wheat (2,72 a 2,00 $\mu\text{g/g}$), whereas the lowest content was found in blue wheat (1,62 $\mu\text{g/g}$). Traditional red and black wheats had similar carotenoid content (1,85 $\mu\text{g/g}$, resp. 1,95 $\mu\text{g/g}$). Lutein was the dominant carotenoid in the raw grain of all genotypes, with an average of 67 %. On average, 29 % of the total carotenoid content was degraded during the flake production process by cooking, i.e. 71 % of the carotenoids were preserved. In contrast, the flake production involving soaking the grain resulted in a loss of 19 %, i.e. 10 % less than cooking.

Keywords: antioxidants, carotenoids, lutein, cereals, foodstuffs

Obsah

1	Úvod	8
2	Vědecká hypotéza a cíle práce	9
3	Literární rešerše	10
3.1	<i>Triticum</i> sp.	10
3.1.1	Anatomická stavba zrna	11
3.1.2	Chemické složení zrna	12
3.1.2.1	Sacharidy	12
3.1.2.2	Bílkoviny	13
3.1.2.3	Lipidy	14
3.1.2.4	Vitamíny a minerální látky	14
3.1.2.5	Fytonutrienty	14
3.1.3	Pšenice s barevným zrnem	15
3.2	Karotenoidy	18
3.2.1	Xanthofyly	19
3.2.2	Karoteny	20
3.2.3	Biosyntéza karotenoidů	20
3.2.4	Karotenoidy v rostlinách	22
3.2.5	Karotenoidy ve výživě člověka	23
3.2.6	Stabilita karotenoidů při zpracování	24
4	Metodika	26
4.1	Rostlinný materiál	26
4.2	Technologická úprava zrn před analýzou	26
4.2.1	Příprava vloček zahrnující povaření	26
4.2.2	Příprava vloček zahrnující máčení	27
4.3	Analýza	27
4.3.1	Chemikálie	27
4.3.2	Přístrojové vybavení	27
4.3.3	Extrakce vzorku	28
4.3.4	Stanovení obsahu sušiny	28
4.3.5	Chromatografická separace HPLC-DAD	28
4.3.6	Identifikace a kvantifikace	29
4.4	Statistická analýza	29
5	Výsledky a diskuse	30
5.1	Vliv genotypu na obsah a spektrum karotenoidů v syrovém zrně	30
5.2	Vliv technologického zpracování na obsah a složení karotenoidů	35

5.2.1	Příprava vloček zahrnující povaření	35
5.2.2	Příprava vloček zahrnující máčení.....	36
5.3	Srovnání s dalšími technologickými procesy	42
5.3.1	Extruze	42
5.3.2	Pufování.....	42
5.3.3	Pečení.....	43
6	Závěr	44
7	Literatura.....	45
8	Seznam použitých zkratk a symbolů	53
9	Seznam tabulek	54
10	Seznam obrázků	55
11	Samostatné přílohy	I

1 Úvod

Jednou z nejrozšířenějších a nejkonzumovanějších obilnin na světě je pšenice, jež je dobrým zdrojem nejen sacharidů a bílkovin, ale i vitaminů, minerálních látek a fytonutrientů. S rostoucí propagací zdravého životního stylu vedoucí k většímu zájmu o stravu a zdravější alternativy tradičních potravin se pozornost ubírá směrem k původním odrudám pšenice jako jednozrnka, dvouzrnka, špalda, ale i ke šlechtění nových odrůd s barevným zrnem. Ty mohou oproti tradičně pěstovaným odrudám pšenice obsahovat více biologicky aktivních látek, zejména anthokyanů a karotenoidů, které ovlivňují barvu obilí. Karotenoidy jsou zároveň charakteristické vysokou antioxidační aktivitou a aktivitou provitaminu A, díky které mohou mít pozitivní vliv na zdraví konzumentů a mohou pomoci předcházet řadě onemocnění. I přes relativně nízký obsah karotenoidů oproti ovoci a zelenině může být pšenice se zvýšeným obsahem karotenoidů dobrým zdrojem těchto látek zejména v rozvojových zemích, kde jsou lidé ohroženi nedostatečnou rozmanitostí stravy. Obsah biologicky aktivních látek v pšenici je ovlivňován technologickým zpracováním, které může výrazně snížit jejich obsah či aktivitu. Z tohoto důvodu je nutné se zaměřit i na samotný proces zpracování s cílem zachování co největšího množství zdraví prospěšných látek.

2 Vědecká hypotéza a cíle práce

Cíle:

- 1) Zpracovat literární rešerši s tématem nutričního významu sekundárních metabolitů pšeničného zrna
- 2) Metodou HPLC-DAD stanovit obsah karotenoidů v zrně různých genotypů pšenice a vyhodnotit vliv výroby pšeničných vloček na uvedená přírodní barviva

Hypotézy:

- 1) Technologické zpracování pšeničných zrn na vločky je z pohledu degradace obsažených karotenoidů šetrnější oproti pečení, extruzi a pufování
- 2) Výroba vloček zahrnující krok namáčení způsobuje nižší degradaci karotenoidů oproti výrobě, kdy je zrno povařeno

3 Literární rešerše

Pro převážnou část populace jsou obilniny nejdůležitější základní potravinou. Jsou velmi dobře skladovatelné a přepravovatelné, nepodléhají sezónním výkyvům nabídky a poptávky a jako potravina jsou poměrně levné. Oblíbenosti obilnin přispívá i nízké riziko kontaminace cizorodými látkami z ovzduší nebo rezidui pesticidů (Gajdošová et Šturdík 2004).

Pšenice je spolu s rýží a kukuřicí jednou z nejkonzumovanějších obilovin na světě. Mezi největší producenty patří Čína, jež se na celkovém objemu produkce podílí téměř třetinově (Archana 2019), dále Indie, Rusko, USA a Kanada. (Moshawih et al. 2022). V zemích mírného pásma je pšenice dominantní plodinou využívanou pro lidskou výživu a jako krmivo pro hospodářská zvířata. Velkému rozšíření vděčí nejen své adaptibilitě a výnosovosti, ale zejména obsahu lepkových bílkovin, který umožňuje širokou škálu využití těsta na chléb, těstoviny a další potravinářské produkty (Shewry 2009). Díky vysokému obsahu sacharidů je pšenice považována především za zdroj energie. Obsahuje však významné množství dalších nutričně žádoucích látek včetně bílkovin, vlákniny, vitaminů, minerálních látek a fytonutrientů, které zlepšují její nutriční hodnoty (Shewry et Hay 2015; Moshawih et al. 2022). Jednou z významných skupin nutrientů obsažených v pšenici jsou karotenoidy, což jsou v tučích rozpustné bioaktivní složky odpovědné za žluté, oranžové a červené zbarvení zejména různých druhů plodů (Hussain et al. 2015).

3.1 *Triticum* sp.

Pšenice (*Triticum* sp.) patří do rostlin čeledi lipnicovitých (*Poaceae*). Je jednoletou trávou tvořící osamocená nebo trsovitá stébla o výšce až 130 cm, jejímž plodem jsou obilky s výraznou podélnou rýhou (Moshawih et al. 2022).

Pěstování pšenice bylo započato před více než 10 000 lety při neolitické revoluci, která vedla k přechodu od lovu a sběru potravy k usedlému způsobu života a rozvoji zemědělství (Shewry 2009). Prvními kultivovanými formami byly pšenice jednozrnka (*Triticum monococcum*) a pšenice dvouzrnka (*Triticum dicoccum*) pěstované v oblasti úrodného půlměsíce (Heun et al. 1997; Dubcovsky et Dvorak 2007; Velimirovic et al. 2021). V průběhu času se procesem přirozené hybridizace a antropogenního výběru vyvinuly nové formy pšenice s lepšími vlastnostmi jako snazší sklizeň, větší odolnost a vyšší výnosovost. Mezi tyto nové formy patří tetraploidní pšenice tvrdá (*Triticum durum*) a hexaploidní pšenice setá (*Triticum aestivum*) (Velimirovic et al. 2021).

V současné době je nejrozšířenějším a nejvíce pěstovaným druhem pšenice právě pšenice setá, jinak nazývaná také běžná nebo chlebová pšenice, která představuje asi 95 % světové produkce pšenice. Druhým nejrozšířenějším druhem zaujímajícím necelých 5 % produkce je pšenice tvrdá, která je přizpůsobena teplým a suchým podmínkám a je nejčastěji pěstována v oblasti Středozemního moře (Shewry 2009). Je využívána zejména k výrobě těstovin, a proto je označována i jako těstovinová pšenice. Ostatní druhy pšenice se pěstují pouze na malých plochách buď z kulturních důvodů, nebo pro rostoucí trh se zdravou výživou. Mezi tyto druhy s menším objemem produkce patří jednozrnka, dvouzrnka, špalda (*Triticum*

aestivum var. *spelta*) a pšenice s barevným zrnem (Shewry et Hey 2015; Martín-Gómez et al. 2019).

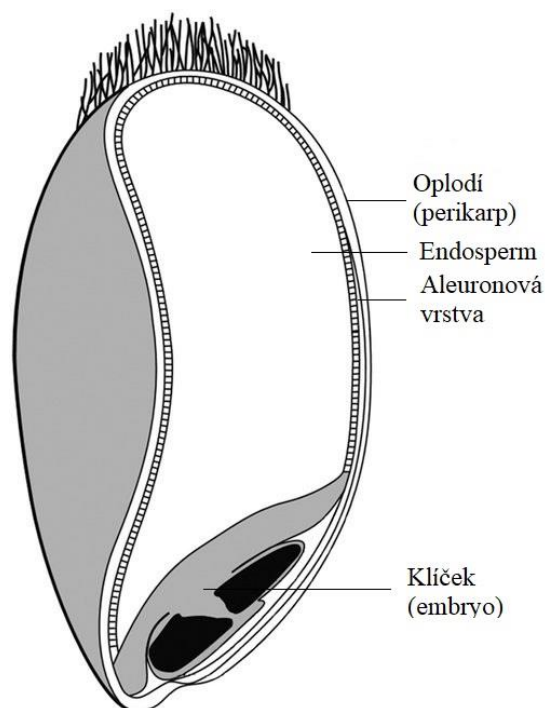
3.1.1 Anatomická stavba zrna

Pšeničné zrna má obecně oválný tvar, nicméně některé odrůdy mohou mít kulovité či podlouhlé, úzké nebo zploštělé tvary. Zrna je obvykle dlouhé 5-9 mm a váží 35-50 mg (Šramková et al. 2009). Obilné zrna je tvořeno třemi hlavními částmi, kterými jsou obalové vrstvy (zaujímá 14-16 % hmotnosti zrna), endosperm (81-84 %) a klíček neboli zárodek (2-3 %) (Zhu et Sang, 2017). Anatomická stavba pšeničného zrna je znázorněna na obrázku 1.

Obalové vrstvy, v mlýnské technologii označované také jako otruby, se skládají z několika vrstev a ochraňují obilku před vnějšími vlivy. Jsou tvořeny nerozpustnými polysacharidy, které zrna zajišťují mechanickou pevnost a odolnost. Více než polovina otrub je tvořena vláknitými složkami, zejména celulosou a pentosany, které jsou pevně vázány na proteiny. Dvě vnější vrstvy zrna, oplodí a osemení, jsou tvořeny pouze mrtvými prázdnými buňkami (Šramková et al. 2009). Obalové vrstvy mohou sloužit jako zdroj vlákniny, čehož je využíváno pro zlepšení nutričních hodnot výrobků. Otruby jsou bohaté na vitaminy skupiny B a minerální látky (Kadlec et al. 2012; Stevenson et al. 2012).

Endosperm je obklopen srostlým perikarpem a obalem semen. Nejsvrchnější vrstvou endospermu je aleuronová vrstva, která se skládá z jedné vrstvy buněk krychlového tvaru. Aleuronová vrstva obsahuje značné množství bílkovin a enzymů, které hrají zásadní roli v procesu klíčení. Vnitřní endosperm, tedy endosperm bez aleuronové vrstvy, je označován jako moučný (škrobový) endosperm a obsahuje zásobní látky pro klíčící rostlinu a je tvořen převážně škrobem. Kromě sacharidů obsahuje moučný endosperm lipidy (1,5 %) a bílkoviny (13 %) (Šramková et al. 2009; Kadlec et al. 2012).

Klíček ležící na jednom konci zrna je nositelem genetických informací, a zároveň vlastním zárodkem nové rostliny (Kadlec et al. 2012). Z hlediska výživy je dobrým zdrojem některých žádoucích látek, avšak kvůli vysokému obsahu tuku (8-13 %) není za přístupu vzduchu stabilní, a proto je při mlýnském zpracování od dalších složek zrna oddělován, čímž je prodlužována trvanlivost mouky a eliminováno riziko žluknutí a získání pachutí (Šramková et al. 2009; Moshawih et al. 2022).



Obrázek 1 Anatomická stavba pšeničného zrna (Iji et al. 2019, upraveno).

3.1.2 Chemické složení zrna

Chemické složení zralých zrn je ovlivněno odrůdou a podmínkami pěstování, přesto se však liší pouze v malém rozmezí. S celkovým obsahem okolo 80 % sušiny zrna převažují ve složení sacharidy, zejména škrob (58 %) a neškrobové polysacharidy (13 %), dále bílkoviny (11 %), lipidy (2 %) a minerální látky (2 %). Vitaminy a fytonutrienty se v pšeničném zrně vyskytují v nižším množství, i přesto se však jedná o velmi důležitou složku, a to díky jejich vlivu na lidské zdraví (Wieser et al. 2020). Chemické složení zrna shrnuje tabulka 1.

3.1.2.1 Sacharidy

Pšeničná zrna obsahují jen nepatrné množství monosacharidů, které se nachází především v klíčku (Kadlec et al. 2012; Wieser et al. 2020). Glukosa a fruktosa se v zrně nachází v množství menším než 0,1 % sušiny (Shewry et Hey 2015), z disacharidů je obsažena sacharosa (0,5-1,6 %), maltosa (0,1-0,2 %) a nakonec 0,2-0,7 % trisacharidové rafinosy. Převládajícími oligosacharidy pšenice jsou s obsahem 0,8-1,9 % sušiny fruktany (Adersson et al. 2013). Jakožto součást FODMAPs (fermentovatelné oligosacharidy, disacharidy, monosacharidy a polyoly) jsou fruktany metabolizovány mikrobiomem v tlustém střevě, čímž působí jako prebiotika a mohou mít pozitivní vliv na lidské zdraví (Wieser et al. 2020).

Z technologického hlediska jsou spolu s bílkovinami nejvýznamnější složkou pšeničného zrna polysacharidy. Základní stavební složkou škrobu je D-glukosa, která nadále tvoří dvě frakce - amylosu a amylopektin v hmotnostním poměru asi 1:3. Amylosa se skládá

z glukopyranosových jednotek spojených lineární $\alpha(1-4)$ vazbou, zatímco amylopektin je kromě $\alpha(1-4)$ vazby tvořen i $\alpha(1-6)$ vazbou, díky níž má amylopektin rozvětvenou strukturu (Shewry et Hey 2015).

Rezistentním škrobem se nazývá podíl škrobu, který není stráven v gastrointestinálním traktu, což snižuje jeho energetickou hodnotu na 8 kJ/g oproti 15 kJ/g rychle stravitelného škrobu. Obsah rezistentního škrobu v potravinách je velmi variabilní, u obilovin však obecně tvoří asi 3 % sušiny zrna. Odolnost škrobu vůči trávení je ovlivněna mnoha vlastnostmi škrobových zrn, včetně tvaru a velikosti škrobového zrna, dále obsahem amylosy, lipidů, proteinů a fosfátů (Shewry et Hey 2015). Podobně jako neškrobové polysacharidy je i rezistentní škrob součástí vlákniny, neboť je fermentován mikrobiomem tlustého střeva na mastné kyseliny s krátkým řetězcem, které dále slouží jako zdroj energie pro buňky epitelu a podporují tak normální funkci tlustého střeva. Kromě podpory funkce tlustého střeva zlepšuje konzumace rezistentního škrobu citlivost na inzulin a snižuje oxidační stres v tlustém střevě (Wieser et al. 2020).

Další polysacharidy obsažené v pšeničném zrně, jako jsou arabinoxylany (5,5-7,4 % sušiny), celulóza (1,7-3 %) a β -glukany (0,5-1 %), patří do skupiny zvané neškrobové polysacharidy. Protože lidské enzymy v gastrointestinálním traktu nejsou schopny štěpit převládající β -glykosidické vazby monosacharidových jednotek, řadí se tyto polysacharidy do vlákniny (Wieser et al. 2020).

3.1.2.2 Bílkoviny

Obsah a složení bílkovin v pšeničném zrně závisí především na genetických faktorech, dále pak na environmentálních podmínkách, zejména na hnojení dusíkatými hnojivy, úrodnosti půdy, srážkách a teplotách. Obecně se však pohybuje v rozmezí 10-15 % sušiny. Bílkoviny nejsou v zrně distribuovány rovnoměrně. Nejméně bílkovin se nachází v oplodí a obalových (obsahují shodně okolo 5 % celkových bílkovin) a naopak nejvíce se nachází v aleuronové vrstvě (zhruba 23 %) a klíčku (34 %). V důsledku tohoto rozložení bílkovin v částech zrna se liší jejich obsah v pšeničných moukách. V celozrnných moukách je obecně asi o 2 % vyšší než u mouky bílé (Shewry et Hay 2015; Wieser et al. 2020).

Proteinová frakce pšenice se skládá z více než 100 jednotlivých proteinů, které lze dělit dle funkcí např. na proteiny zásobní, metabolické, obranné anebo jiné se specifickými funkcemi. Základními zásobními proteiny jsou lepkové proteiny, které představují okolo 80 % celkové bílkoviny zrna (Wieser et al. 2020). Lze je rozdělit do dvou skupin - gliadiny a gluteniny. Po smíchání s vodou tvoří lepkové proteiny souvislou síť, která poskytuje soudržnost a viskoelasticitu, jež umožňuje zpracování těsta na chléb, těstoviny a další potraviny (de Punder et Pruimboom 2013). Metabolické proteiny zahrnují enzymy, např. škrob štěpící hydrolasy (amylasy), dále peptidasy, lipasy, oxidoreduktasy a další enzymy. Do skupiny ochranných proteinů patří zejména inhibitory enzymů. Nutriční hodnota pšeničných proteinů je dána relativním obsahem esenciálních aminokyselin valinu, leucinu,

isoleucinu, methioninu, threoninu, tryptofanu, fenylalaninu a lysinu. Právě lysin je limitní aminokyselinou¹ v pšeničném zru (Wieser et al. 2020).

3.1.2.3 Lipidy

Lipidy tvoří asi 2 % sušiny pšeničné mouky a asi 8-15 % klíčku, 6 % otrub a 1-2 % škrobového endospermu. Lze je dělit na nepolární lipidy, které zastupují až 85 % všech lipidů v sušině (acylglyceroly a volné mastné kyseliny) a polární lipidy (fosfolipidy a glykolipidy) tvořící minoritní část lipidů v sušině (maximálně 17 %) (Geng et al. 2015; Moshawih et al. 2022). Hlavní složku nepolárních lipidů představují triacylglyceroly (okolo 40 % všech lipidů) a volné mastné kyseliny (15 %). Mono- a diacylglyceroly (1-4 %) a sterolové lipidy (< 1 %) mají velmi nízké zastoupení (Wieser et al. 2020).

Ačkoli jsou lipidy minoritní složkou pšeničné mouky, mají významný vliv na funkčnost kvásku a těsta interakcí s lepkovými proteiny a škrobem a stabilizací plynových kapes při výrobě chleba (González-Thuillier et al. 2015).

Z nutričního hlediska obsahuje pšenice vysoký podíl nenasycených mastných kyselin, konkrétně olejové (14 %), linolové (60 %) a linolenové kyseliny (4 %). Díky obsahu těchto mastných kyselin má pšenice příznivý poměr nenasycených a nasycených mastných kyselin 78 : 22 (Wieser et al. 2020).

3.1.2.4 Vitaminy a minerální látky

Pšeničná zrna jsou dobrým zdrojem vitamínu E (1400 µg/100 g) a vitaminů skupiny B, zejména niacinu (B3; 5100 µg/100 g), pantotenové kyseliny (B5; 1200 µg/100 g) a thiaminu (B1; 445 µg/100 g) (Kadlec et al. 2012; Wieser et al. 2020). Vitaminy se v pšeničném zru vyskytují zejména v obalových vrstvách a klíčku, zatímco v endospermu se jich nachází podstatně méně, proto má celozrnná mouka podstatně vyšší obsah vitaminů oproti mouce bílé. Hlavními minerálními látkami obsaženými v pšenicí jsou draslík, fosfor, hořčík, vápník, zinek a v nižším množství železo (Wieser et al. 2020).

3.1.2.5 Fytonutrienty

Fytonutrienty jsou definovány jako nevýživné bioaktivní rostlinné složky obsažené v obilných zrnech, ovoci, zelenině a dalších potravinách rostlinného původu, které jsou spojovány se snížením rizik vzniku chronických onemocnění (Zhu et Sang 2017; Wieser et al. 2020).

Pšeničná zrna jsou bohatým zdrojem fytonutrientů s mnoha pozitivními přínosy. Obsahují dvě hlavní skupiny fytonutrientů pocházející z různých biosyntetických drah. První skupinou jsou fenoly, které obsahují alespoň jedno aromatické jádro nesoucí alespoň jednu hydroxylovou skupinu. Tvoří největší a nejsložitější skupinu sekundárních metabolitů přítomných v obilném

¹ Limitující aminokyselina je taková, která se v bílkovině vyskytuje v nejmenším množství vzhledem k potřebě lidského těla.

zrnu. Zahrnují strukturně různorodé skupiny jako fenolové kyseliny (např. skořicová kyselina, deriváty benzoové kyseliny), flavonoidy (např. anthokyaniny) a lignany. Druhou skupinou fytonutrientů jsou tetraterpenoidy. Zahrnují např. steroly, tokoferoly a tokotrienoly, ale také karotenoidy (Shewry et Hey 2015; Wieser et al. 2020). Bioaktivní složky nejsou v zrně rovnoměrně distribuovány, vyšší koncentrace fytonutrientů se nachází v klíčkách a otrubách (Luthria et al. 2015).

Tabulka 1 Obsah mikronutrientů v pšenici (Moshawih et al. 2022, upraveno).

Nutrient	Hodnota na 100 g	Jednotky
Energie	340	kcal
Voda	10,74	g
Bílkoviny	13,21	g
Tuky	2,50	g
Sacharidy	71,97	g
Cukry	0,41	g
Vápník	34	mg
Železo	3,60	mg
Hořčík	137	mg
Fosfor	357	mg
Draslík	363	mg
Sodík	2	mg
Zinek	2,60	mg

3.1.3 Pšenice s barevným zrnem

Obilná zrna kromě karotenoidů obsahují mnoho dalších fytonutrientů, z nichž některé výrazně ovlivňují barvu zrna. Tradiční americké a evropské odrůdy jsou červené či bílé barvy. Intenzita červené barvy je závislá na počtu dominantních alel umístěných na dlouhých ramenech chromozomů, zatímco bílé zbarvení je dáno kombinací tří recesivních alel. Mezi skupiny látek zbarvující pšeničné zrna do červené barvy patří například flavonoidy, flavonoly či flobafeny a nachází se zejména ve vnější vrstvě zrna (Himi et al. 2011; Lachman et al. 2017).

Jednou z největších a nejdůležitějších skupin ve vodě rozpustných pigmentů jsou anthokyaniny. V rostlinách se nachází v buněčných vakuolách a jsou zodpovědné za oranžovou, červenou, fialovou či modrou pigmentaci. V pšeničném zrně jsou akumulovány ve vrstvě aleuronu nebo perikarpu a zrna je díky nim zbarvována do modré či fialové barvy (Horbowicz et al. 2008). Barevná pšenice existuje ve třech barvách, tj. v černé, modré a purpurové v závislosti na typu

a umístění anthokyanů ve vrstvách zrna. Purpurová pšenice obsahuje anthokyaniny v perikarpu, modrá pšenice v aleuronové vrstvě a černá pšenice je kombinací anthokyanů v perikarpu a aleuronové vrstvě (Garg et al. 2016; Lin et al. 2017). Karotenoidy, zodpovídající za žlutou barvu zrna, se nachází v endospermu (Lachman et al. 2017). Protože se u pšeníc s barevným zrnem fytonutrienty nacházejí v aleuronové vrstvě, jsou vzhledem k využití nutričního potenciálu doporučovány celozrnné výrobky (Burešová et al. 2019).

Jantarově zbarvený endosperm pšenice tvrdé (*Triticum durum*) má svou barvu díky obsahu žlutých pigmentů luteinu a zeaxanthinu, díky čemuž mají těstoviny vyrobené z pšenice tvrdé zlatavou barvu. Z tohoto důvodu je koncentrace karotenoidů kvalitativním znakem pšenice tvrdé. Obecně nejhojnějším karotenoidem v pšeničných zrnech je lutein následovaný zeaxanthinem, antheraxanthinem, α -karotenem a β -karotenem. V pšeničných zrnech může být přítomno široké spektrum karotenoidů, včetně β -kryptoxanthinu nebo flavoxanthinu (Lachman et al. 2017). Karotenoidy jsou přítomny i v modře či purpurově zbarvené pšenici, kde je jejich obsah srovnatelný s obsahy karotenoidů v pšenici s červeným zrnem (Siebenhandl et al. 2007).

Ve srovnání s běžnou pšenicí byl v barevných pšenicích zaznamenán o zhruba 12-18 % vyšší obsah bílkovin (Tian et al. 2018). Kromě karotenoidů jakožto provitaminů A je barevná pšenice bohatým zdrojem vitaminů skupiny B a vitaminů E, D a K (Balyan et al. 2013). Obsah mikronutrientů se může lišit v závislosti na barevné variantě. Celkový obsah mikroživin nemusí být vždy vyšší než v pšenici obecné, neboť se odvíjí od podmínek pěstování a hnojení (Saini et al. 2021). Porovnání výživových údajů různých typů pšeníc je zobrazeno v tabulce 2.

Tabulka 2 Porovnání obsahu nutrientů v sušině v různých typech pšenice (Saini et al. 2021; upraveno).

	Fialová	Modrá	Černá	Běžná
Vláknina [%]	9,8-15,1	12,7-13,5	13-13,3	12,5-15,7
Tuky [%]	1,21	1,2	1,7	1,5
Škrob [%]	48,7-59,9	12,3-15	-	58,9
Sodík [mg/100 g]	-	3,0	2,1	0,8-2,7
Hořčík [mg/100 g]	-	43	45	32-116
Vápník [mg/100 g]	42	31	18,4	27-34,5
Železo [mg/100 g]	3,7-4,6	3,8-4,6	3,9-8	2,6-3,6
Zinek [mg/100 g]	2,5-4,2	3,3-4,0	2,8-8,0	1,6-4,1

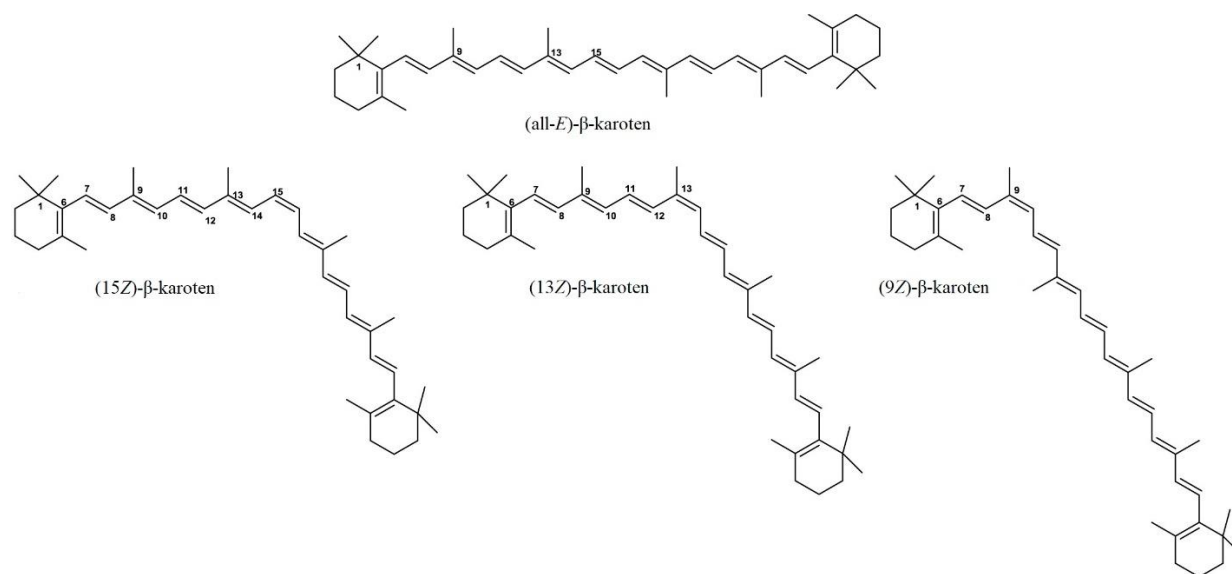
Barevná pšenice, jež je bohatým zdrojem vlákniny a fytonutrientů, je díky jejich vlastnostem široce využívána jako jedinečná složka pro výrobu potravinářských produktů s přidanou hodnotou (Saini et al. 2021; Garg et al. 2022). Byly prokázány přínosy konzumace pšenice s barevným zrnem při prevenci a v boji proti různým chronickým onemocněním, přičemž většina zdravotních benefitů je spojena s antioxidačními vlastnostmi látek obsažených v pšenicích (Lachman et al. 2017; Garg et al. 2022). Terapeutický účinek byl kromě jiného zaznamenán proti ateroskleróze, hypoglykémii a oxidativnímu poškození jater (Ficco et al. 2014).

3.2 Karotenoidy

Karotenoidy jsou přirozeně se vyskytující, v tucích rozpustná barviva žluté, oranžové či červené barvy. Nacházejí se v rostlinách, houbách, řasách nebo bakteriích, ve větším množství jsou obsaženy v ovoci žluté či oranžové barvy a v listové zelenině. V přírodě jich existuje více než 650 různých typů, z čehož zhruba 40 z nich vykazuje aktivitu provitaminu A (Maiani et al. 2009; Eggersdorfer et Wyss, 2018; Ribeiro et al. 2018).

Z chemického hlediska se jedná o sloučeniny patřící do skupiny tetraterpenoidů skládajících se z osmi isoprenoidních (2-methyl-buta-1,3-dienových) jednotek. Kostrou je tedy uhlovodíkový řetězec C₄₀ s konjugovanými dvojnými a jednoduchými vazbami. Karotenoidy však mohou mít i 30 nebo 50 uhlíků, jsou-li meziprodukty metabolismu určitých typů bakterií (Ribeiro et al. 2018).

V důsledku rotace kolem každé jednotlivé dvojné vazby se mohou karotenoidy vyskytovat v *cis* (*Z*) a *trans* (*E*) konfiguracích, přičemž se tyto izomery mohou lišit svými chemickými vlastnostmi. *All-trans* forma je v přírodě stabilnější a tedy nejrozšířenější, zatímco *cis* forma je méně termodynamicky stabilní než *trans*, převážně kvůli sterickému efektu² mezi sousedními vodíky a methylovými skupinami (Ribeiro et al. 2018). *Trans* izomery mají lineární systém konjugovaných dvojných vazeb, zatímco *cis* izomery nejsou lineární molekuly, a proto jsou více rozpustné než *trans* izomery a mohou být snadněji transportovány a absorbovány buňkami (Burri 2013). Různé formy izomerů β-karotenu zobrazuje obrázek 2.



Obrázek 2 Izomery β-karotenu (Ribeiro et al. 2018; upraveno).

² Sterický efekt lze považovat za překážku, jež zabraňuje dvěma molekulám v jejich vzájemné interakci

Důležitou vlastností karotenoidů je rozsáhlá delokalizace π -elektronů, což jim umožňuje absorpci viditelného světla a propůjčuje pigmentový charakter (Nagao 2004). Daný systém bohatý na elektrony však činí tyto sloučeniny značně nestabilními vůči oxidaci (Ribeiro et al. 2018).

Obecně se karotenoidy dělí dle funkčních skupin do dvou tříd:

- 1) Xanthofyly - mají molekuly obsahující kyslík (např. lutein a zeaxanthin);
- 2) Karoteny - bezkyslíkaté tetraterpenoidní molekuly bez funkčních skupin (např. α -karoten a lykopen) (Amorim-Carrilho et al. 2014; Hussain et al. 2015).

Karotenoidy, kterým byla uhlíková kostra zkrácena odstraněním fragmentů z jednoho nebo obou konců, a mají méně než 40 atomů uhlíků, se nazývají apokarotenoidy. Významnými zástupci této skupiny jsou například β -citraurin, bixin ze semen annatto a krocetin vyskytující se v šafránu (Velíšek et Hajšlová 2009; Rodriguez-Amaya 2016).

3.2.1 Xanthofyly

Xanthofyly jsou základními karotenoidy rostlin a primárně vznikají jako produkty oxidace karotenů. Xanthofyly odvozené od acyklických karotenů se v potravinách vyskytují pouze v malém množství, naopak mnohem běžnější jsou monohydroxysubstituované deriváty alicyklických karotenů nazývané kryptoxanthiny. Malá množství α -kryptoxanthinu a β -kryptoxanthinu, jež jsou odvozeny od α -karotenu, resp. β -karotenu, obsahuje většina rostlinných pletiv a představují prekurzory xanthofylů obsahujících dvě hydroxylové skupiny v molekule (Velíšek et Hajšlová 2009).

Lutein a jeho stereoizomer zeaxanthin se od ostatních karotenoidů odlišují přítomností dvou hydroxylových skupin na obou koncích molekuly, což způsobuje jejich zvýšenou chemickou reaktivitu se singletovým kyslíkem. Lutein se nejčastěji vyskytuje v zelené či listové zelenině. Dobrým zdrojem zeaxanthinu je zejména kukuřice, paprika či brambor. Konzumace luteinu a zeaxanthinu přispívá správné funkci očí, pomáhá předcházet kardiovaskulárním onemocněním a chrání pokožku před poškozením způsobeným UV zářením (Tudor et Pintea 2020; Mitra et al. 2021).

β -kryptoxanthin je jedním z prekurzorů vitamínu A. Nejvýznamnějšími zdroji jsou zejména citrusové plody nebo kukuřice (Amorim-Carrilho et al. 2014; Carazo et al. 2021) a je hlavním pigmentem mnoha druhů ovoce s oranžovou dužninou, např. broskve, nektarinky nebo papáji (Burri et al. 2016). Dalšími významnými zástupci skupiny xanthofylů jsou kapsanthin, astaxanthin nebo fukoxanthin (Aziz et al. 2019). Kapsanthin je hlavním karotenoidem papriky a je silným antioxidantem s protizánětlivými a antidiabetickými účinky (Kennedy et al. 2021). Astaxanthin se nachází zejména v potravinách živočišného původu, jako je losos či korýši (Amorim-Carrilho et al. 2014). Je syntetizovaný řadou bakterií, řas či kvasinek a vykazuje protirakovinné a protizánětlivé účinky (Davinelli et al. 2018). Fukoxanthin je považován za nejhojnější přírodní karotenoid, neboť tvoří přibližně 10 % z celkového množství přírodních karotenoidů. Vyskytuje se převážně v mořských řasách, kde je klíčový pro průběh fotosyntézy. Vykazuje silný antioxidační účinek, působí protizánětlivě a má důležitou roli v prevenci nádorových onemocnění a obezity (Liu et al. 2020).

3.2.2 Karoteny

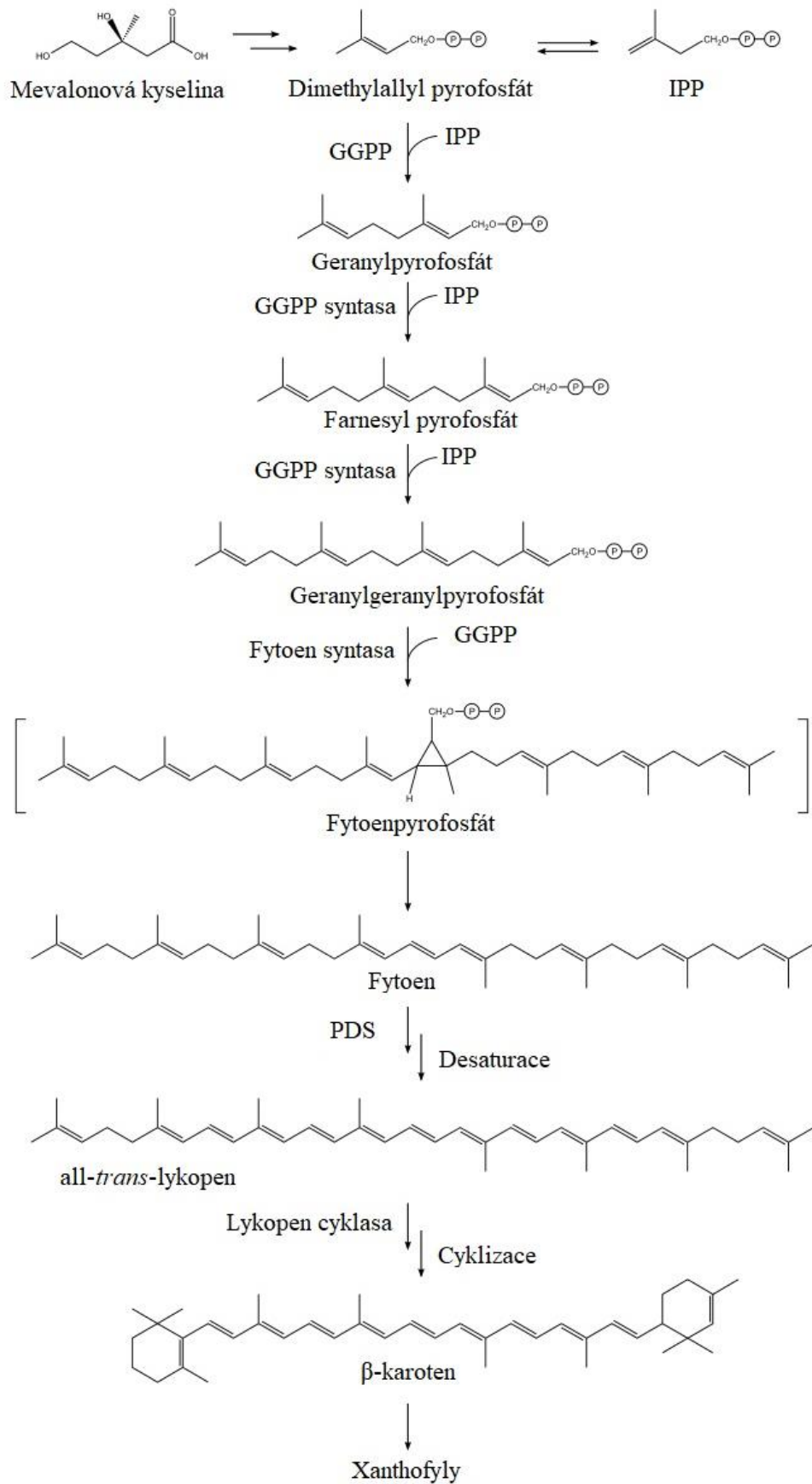
Základním typem karotenů je acyklický polynenasycený uhlovodík fytoen. Izomerací z něj vzniká *trans*-izomer fytofluenu, jehož oxidací pak vznikají postupně ζ -karoten, neurosporen a lykopen (Velíšek et Hajšlová 2009). Téměř všechny ostatní karotenoidy lze poté získat právě z lykopenu. Lykopen může být cykлизován na jednom nebo obou koncích za vzniku α - či β -karotenu, které mohou být dále oxidovány za vzniku xanthofylů, jako je kryptoxanthin, zeaxanthin nebo lutein (Burri 2013).

Jedním z nejvýznamnějších karotenů je acyklický lykopen. Není příliš rozšířen, avšak pokud se v ovoci či plodové zelenině nachází, je obvykle převládajícím pigmentem. Zdroji lykopenu v potravě jsou zejména rajče a paprika, z tropických rostlin pak meloun, papája či grapefruit (Rodriguez-Amaya 2016). Lykopen může neutralizovat reaktivní látky, jako je peroxid vodíku, hydroxyradikály a oxid dusičitý, a zároveň je pro rostliny fotoprotektantem, jelikož absorbuje světlo během fotosyntézy (Khan et al. 2021). Lykopen zlepšuje funkci endotelu a snižuje výskyt ischemické choroby srdeční (Jacques et al. 2013).

Bicyklický β -karoten je nejrozšířenějším ze všech potravinářských karotenoidů a nachází se ve velkém množství potravin jako hlavní nebo vedlejší pigment. Hlavním karotenoidem je například v meruňce, mrkvi, batátu nebo melounu (Bohn et al. 2019). Dobrým zdrojem je také špenát, paprika, dýně nebo zelené fazolky (Carazo et al. 2021). Důležitost β -karotenu ve výživě spočívá v jeho provitaminové aktivitě. Konzumace β -karotenu pomáhá udržovat normální funkci zraku, posiluje růst a diferenciaci tkání a snižuje riziko vzniku chronických onemocnění (Bohn et al. 2019).

3.2.3 Biosyntéza karotenoidů

Prvním krokem biosyntézy karotenoidů je tvorba isopentenylpyrofosfátu (IPP) a jeho allylového izomeru dimethylallylpyrofosfátu (DMAPP). IPP je v rostlinách tvořen dvěma cestami: mevalonovou dráhou a methylerythritol-4-fosfátovou dráhou (MEP) (Rodriguez-Concepcion 2010). Cesta MEP využívá glycerinaldehyd-3-fosfát a pyruvát jako počáteční substráty pro vytvoření deoxy-D-xylulosa-5-fosfátu (DXP). Následným intramolekulárním přeskupením a redukcí DXP enzymem DXP reduktoisomerasou (DXR) vzniká methylerythritol fosfát (MEP). Poté se z DMAPP prostřednictvím fytoensyntasy (PSY) a geranylgeranyl pyrofosfát syntasy (GGPP) přes geranylpyrofosfát a geranylgeranylpyrofosfát vytvoří 15-*cis*-fytoen se skeletem karotenoidů C₄₀. Fytoen je bezbarvý karotenoid se třemi konjugovanými dvojnými vazbami. Fytoen je postupně fytoendesaturasou (PDS) a ζ -karotendesaturasou (ZDS) desaturován za vzniku lykopenu prostřednictvím fytofluenu, ζ -karotenu a neurosporenu. Lykopencyklasy produkují karotenoidy s cyklickými koncovými skupinami, jako jsou α -karoten a β -karoten. Z α - a β -karotenu mohou následnou hydroxylací vzniknout xanthofyly (Nisar et al. 2015). Schéma biosyntetické dráhy je znázorněno na obrázku 3.



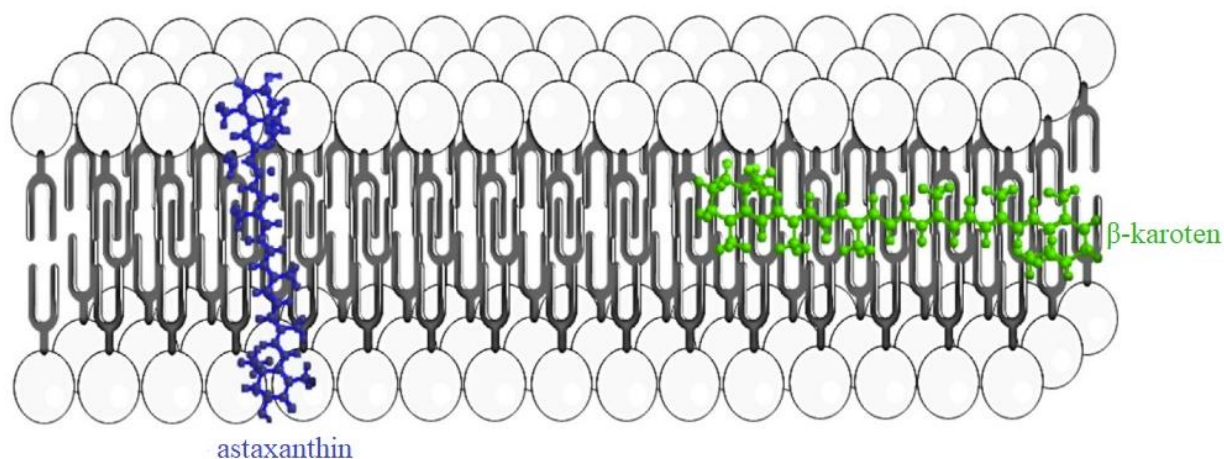
Obrázek 3 Biosyntéza karotenoidů (Carotenoid - Wikiwand. Wikiwand - home [online]. Dostupné z: <https://www.wikiwand.com/en/Carotenoid>; upraveno).

3.2.4 Karotenoidy v rostlinách

Karotenoidy se v buňkách vyskytují v různých typech plastidů. Ve velkém množství se hromadí v chloroplastech a chromoplastech, jež se nachází v pletivech zralého ovoce, zeleniny a květin. V chloroplastech jsou karotenoidy spojeny s proteiny v komplexech, které se nacházejí na thylakoidních membránách a zajišťují správné umístění a orientaci, což je nezbytné pro účinný přenos energie (Demmig-Adams et al. 1996). V chromoplastech jsou uloženy v lipoproteinových strukturách, jež se liší v závislosti na druhu rostliny a pletiva (Maiani et al. 2009; Paznocht et al. 2018).

V rostlinách se mohou karotenoidy vyskytovat esterifikované na mastné kyseliny (nejčastěji s kyselinou palmitovou a linolovou) nebo neesterifikované (Ribeiro et al. 2018). Esterifikace nijak neovlivňuje vlastnosti chromoforů (části molekul zodpovědné za absorpci záření), naopak chrání karotenoidy před degradací a zvyšuje se tak schopnost akumulace karotenoidů v rostlinných tkáních (Paznocht et al. 2018).

Karotenoidy jsou hydrofobní molekuly, které jsou spojeny s lipofilními místy v buňkách, jako jsou membránové dvojvrstvy. Polární funkční skupiny (např. hydroxylové skupiny) mohou měnit polaritu karotenoidů, což může ovlivnit jejich lokalizaci v buněčných membránách a jejich interakce s různými molekulami (Milani et al. 2017). Lykopen a β -karoten jsou uspořádány rovnoběžně s povrchem membrán za účelem udržení hydrofobního prostředí, zatímco polárnější xanthofyly, jako je lutein, jsou orientovány kolmo k povrchu membrán, aby udržely své hydroxylové skupiny v hydrofilnějším prostředí. Tyto rozdíly mohou ovlivnit fyzikální povahu membrány včetně její funkce (Burri 2013). Toto prostorové uspořádání zobrazuje obrázek 4.



Obrázek 4 Prostorové uspořádání karotenoidů v membránové dvojvrstvě (Ribeiro et al. 2018).

Obsah karotenoidů v jednotlivých druzích rostlin se však vlivem mnoha faktorů liší. Jedním z hlavních ukazatelů je barva dužniny a stupeň zralosti plodu, přičemž nejvyšší obsah karotenoidů je v plně zralém ovoci. Vliv mohou mít i další faktory jako místo a způsob pěstování a odrůda (Amorim-Carrilho et al. 2014; Carazo et al. 2021).

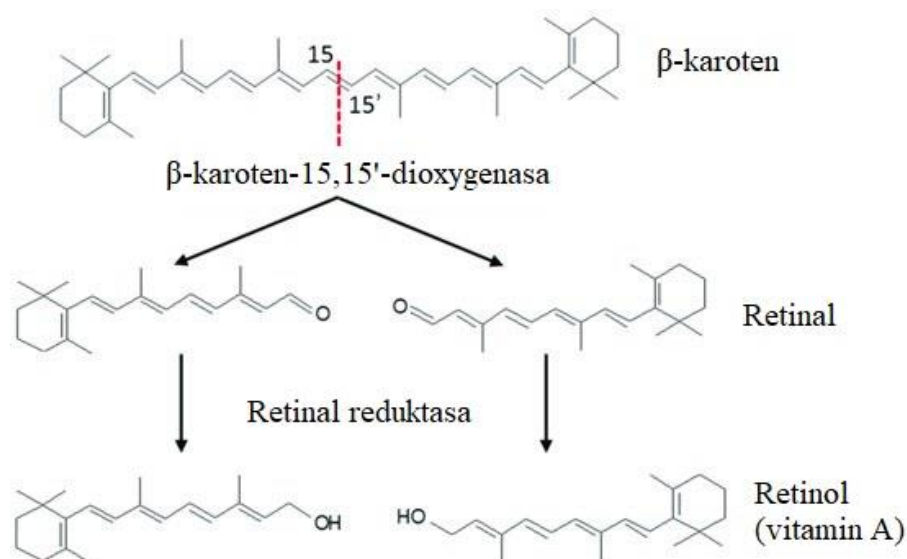
3.2.5 Karotenoidy ve výživě člověka

Lidské tělo není schopno si vitamin A syntetizovat *de novo*, a proto je nutné jej získávat ze stravy buď ve formě vitaminu A nebo ve formě karotenoidů provitaminu A. Ze všech karotenoidů se v lidské stravě nachází přibližně 50 druhů, které mohou být organismem absorbovány a metabolizovány, avšak pouze asi 20 druhů přijatých z potravy se nachází v krvi. Více než 90 % z nich jsou β -karoten, β -kryptoxanthin, α -karoten, lykopen, lutein a zeaxanthin (Maiani et al. 2009; Kelly et al. 2018; Maoka 2020). Tyto karotenoidy byly identifikovány ve všech skupinách fotosyntetických organismů, bakterií, hub a mnoha zvířat (Barbosa-Filho et al. 2008).

Potraviny živočišného původu jsou bohatým zdrojem vitaminu A ve formě retinyl esterů. Mezi nejvýznamnější zdroje vitaminu A živočišného původu patří mléko a mléčné výrobky, maso, játra a vejce (Beltrán-de-Miguel et al. 2015). Pouze část karotenoidů obsažených v ovoci a zelenině má schopnost tvořit vitamin A, přičemž karotenoidy provitaminu A jsou důležitými zdroji vitaminu A v lidské potravě (Carazo et al. 2021).

Karotenoidy přijaté ze stravy jsou vstřebávány v tenkém střevě. Estery xanthofylů jsou hydrolyzovány lipasou nebo esterásou a absorbovány. Část karotenoidů ze skupiny provitaminů A je přeměněna na retinal ve sliznici tenkého střeva prostřednictvím enzymu β -karoten-15,15'-dioxxygenasy. Vstřebané karotenoidy jsou zabudovány do chylomikronů a poté jsou krví prostřednictvím lipoproteinů VLDL, LDL a HDL transportovány do jater, kde mohou být částečně skladovány, a dalších orgánů (Maoka 2020; Tudor et Pintea 2020). Distribuce karotenoidů v lidských orgánech je specifická; lutein a zeaxanthin jsou přítomny v oku jako makulární pigmenty (Maoka 2020) a v esterifikované formě se nacházejí v povrchu kůže (Wingerath et al. 1998); xanthofyly jako β -kryptoxanthin, lutein a zeaxanthin se nachází v mozku (Craft et al. 2004).

Aktivita provitaminu A vyžaduje alespoň jeden nesubstituovaný β -jononový kruh, správný počet a orientaci methylových skupin podél polyenového hlavního řetězce a správný počet konjugovaných dvojných vazeb nejlépe *trans* izomerace. Nejdůležitějšími karotenoidy s aktivitou provitaminu A jsou β -kryptoxanthin, α -karoten a zejména β -karoten (Burri 2013). β -karoten má nejvyšší aktivitu provitaminu A, neboť má ve své molekule dva β -kruhy, a proto z něj mohou vzniknout dvě molekuly retinolu. β -kryptoxanthin a α -karoten mají ve své molekule pouze jeden β -kruh a mají tedy oproti β -karotenu poloviční provitaminovou aktivitu (Tang 2010). β -karoten-15,15-dioxygenasa katalyzuje centrální štěpení β -karotenu, který poskytne dvě molekuly retinalu. Retinal reduktasa poté katalyzuje redukci retinalu na retinol (Trono 2019). Přeměna β -karotenu na retinol je zobrazena na obrázku 5.



Obrázek 5 Přeměna β -karotenu na retinol (Igreja et al. 2021, upraveno).

Vitamin A se na rozdíl od vitaminů rozpustných ve vodě snadno akumuluje v těle, zejména v játrech a v tukové tkáni, což může představovat výhodu, neboť dočasný deficit vitaminu A není spojen s klinickými příznaky, avšak při nadměrném příjmu může dojít k akumulaci s následnou toxicitou. Retinol a jeho deriváty mají v lidském organismu nenahraditelnou funkci, účastní se genetické regulace, podílí se na správné funkci vidění, spermatogeneze, regulace růstu a diferenciaci buněk (Carazo et al. 2021).

Karotenoidy hrají důležitou roli v lidském zdraví svou antioxidační aktivitou, chrání buňky a tkáně před škodlivými účinky volných radikálů a singletového kyslíku (Maiani et al. 2009). Xanthofyly lutein a zeaxanthin jsou hlavními složkami makulárních pigmentů (pigmenty žluté skvrny). V oku reagují jako antioxidanty s volnými radikály a reaktivními formami kyslíku, čímž ochraňují sítnici před oxidací a fotopoškozením a brání nástupu věkem podmíněné makulární degenerace, která je hlavní příčinou slepoty v západním světě (Gale et al. 2003). Adekvátní příjem karotenoidů provitaminu A může zabránit i dalším degenerativním poškozením očí, jako je šeroslepost, xerofthalmie (vysychání rohovky) či Bitotovy skvrny (Faustino et al. 2016). Byla také popsána souvislost mezi příjmem potravin bohatých na karotenoidy a sníženým rizikem vzniku diabetu 2. typu (Sluijs et al. 2015), kolorektálního karcinomu (Jung et al. 2013) a obezity (Bonet et al. 2015).

3.2.6 Stabilita karotenoidů při zpracování

Na celém světě jsou obiloviny sklizeny během velmi krátké doby, ale konzumovány jsou v průběhu celého roku. Zásoby zrn a mouky jsou skladovány po delší dobu, avšak při dlouhodobém skladování však může docházet ke změnám obsahu či spektra karotenoidů vlivem vyšších teplot, vlhkosti, vystavení světlu nebo přítomnosti kyslíku. Před konzumací je potřeba obilná zrna zpracovat, avšak průmyslové zpracování i metody domácí úpravy, jako jsou máčení, vaření, pečení, extruze nebo smažení, vystavují potraviny velmi vysokým teplotám, které mohou snižovat obsah karotenoidů (Trono 2019). Zároveň však zpracování

může být prospěšné narušením struktury potraviny, což usnadní uvolnění a rozpuštění karotenoidů. To vede ke zvýšené biologické dostupnosti volných a esterových karotenoidů (Maiani et al. 2009).

Karotenoidy jsou náchylné k oxidační degradaci a izomeraci v důsledku podmínek skladování a zpracování. Tyto reakce mohou mít za následek ztrátu barvy, snížení či úplnou ztrátu biologické aktivity nebo tvorbu nežádoucích těkavých sloučenin. Degradace je urychlována přítomností kovů, enzymů a prooxidantů. Zahříváním může docházet k izomeraci přirozeně se vyskytujících *all-trans* izomerů na *cis* izomery, což může zvýšit biodostupnost (Burri 2013; Trono 2019).

Biologická dostupnost³ a účinek karotenoidů závisí na různých faktorech jako jsou např. složení potravy (obsah tuku a vlákniny), množství karotenoidů v porci, jejich umístění v rostlinné tkáni, tepelné zpracování, velikost částic potravy, typ a izomerace karotenoidů, ale i na konzumentovi - vliv na biodostupnost mají genetické faktory, celkový stav výživy, pohlaví a věk. Kvůli těmto vlivům tedy nemusí mít konzumace karotenoidů významný biologický význam i přes velké množství karotenoidů v rostlinných potravinách (Ribeiro et al. 2018).

³ Biologická dostupnost je definována jako část dietní složky, jež může být absorbována a je dostupná pro použití nebo skladování (Maiani et al 2009).

4 Metodika

4.1 Rostlinný materiál

K analýze vlivu technologického zpracování (vločkování) zrna pšenice na obsah karotenoidů bylo vybráno 10 genotypů pšenice (*Triticum aestivum* L.) s různými barvami zrna, jež shrnuje tabulka 3.

Tabulka 3 Přehled genotypů pšenic použitých k analýze.

Genotyp	Forma	Barva zrna*
Bohemia	Ozimá	Red (standard)
Tobak	Ozimá	Red (standard)
UC66049	Jarní	Ba
Skorpion	Ozimá	Ba
AF Zora	Ozimá	Ba+Pp
V1-299-21	Ozimá	Ba+Pp
AF Jumiko	Ozimá	Pp
V1-289-21	Ozimá	Pp
Citrus	Ozimá	Ye
Bona Vita	Ozimá	Ye

* Red (standard): červená; Ba: modrý aleuron; Ba+Pp: modrý aleuron + purpurový perikarp, Pp: purpurový perikarp; Ye: žlutý endosperm

4.2 Technologická úprava zrn před analýzou

Ze vzorků vybraných genotypů pšenice byla část odebrána a ponechána pro stanovení výchozích hodnot obsahu karotenoidů v syrovém stavu. Zrno bylo dále na vločky zpracováno dvěma odlišnými způsoby, jak je uvedeno níže.

4.2.1 Příprava vloček zahrnující povaření

Dvě stě gramů zrna bylo naváženo do 600ml kádinek a povařeno v 400 ml vody po dobu 5 minut na elektrickém vařiči. Po uvaření byla pšenice scezena přes síto a zrna byla předsušena v horkovzdušné troubě po dobu 5 minut při teplotě 80 °C a poté byla část zrn odebrána k analýze. Ze zbylé části zrn byly připraveny vločky na ručním vločkovači a hotové vločky byly dosušeny v horkovzdušné troubě po dobu 1 hodiny při teplotě 80 °C na konečnou vlhkost 10 %.

4.2.2 Příprava vloček zahrnující máčení

Pro druhý způsob přípravy bylo 200 g zrn a zalito 400 ml vody. Vzorky zrna byly ponechány nadouvat při laboratorní teplotě po dobu 16 hodin a po uplynutí této doby byla nadbytečná voda scezena přes síto. Zrna byla dále předsušena v horkovzdušné troubě po dobu 5 minut při teplotě 80 °C a poté byla část zrn odebrána k analýze. Ze zbylé části zrn byly na ručním vločkovači připraveny vločky, které byly dosušeny v horkovzdušné troubě po dobu 1 hodiny při teplotě 80 °C na konečnou vlhkost 10 %. Veškeré vzorky byly po zchladnutí zamrazeny v polyethylenových sáčcích a následně lyofilizovány. Fotografie syrových zrn a finálních produktů jsou v příloze 1.

4.3 Analýza

4.3.1 Chemikálie

Pro analýzu byly použity následující chemikálie:

- Methanol (HPLC grade), aceton (p.a.), ethanol (p.a.), hexan (p.a.) (Lachner, Česká republika)
- Analytické standardy luteinu a zeaxanthinu (Extrasynthese, Francie)
- Butylovaný hydroxytoluen (BHT, Ph.Eur.) a *tert*-butyl methyl ether (HPLC grade) (Sigma-Aldrich, USA)
- Ultra čistá HPLC voda byla připravena pomocí přístroje Simplicity UV (Merck Millipore, Německo)

4.3.2 Přístrojové vybavení

Pro analýzu byly použity následující nástroje a přístroje:

- Elektrický vařič EP 11 W (Hyundai, Korea)
- Mlýnek A 11 basic (IKA Werke, Německo)
- Analytické váhy Kern 770 (Kern & Sohn, Německo)
- Vortex Basic 3, (IKA Werke, Německo)
- Ultrazvuková lázeň PS 04 (Powersonic-Notus, Slovensko)
- Centrifuga 5810R (Eppendorf, Německo)
- Vakuová rotační odparka Rotavapor R-200, (Büchi Labortechnik, Švýcarsko)
- HPLC Ultimate 3000 (Thermo Fisher Scientific, USA)
- Demineralizátor vody Simplicity UV (Merck Millipore, Německo)
- Membránový filtr Agilent (nylon, póry 0,22 µm)
- Lyofilizátor Lyovac GT 2 (Steris, Německo)
- Odparné baňky, vialky, pipety a další běžné laboratorní sklo
- Jednorázové plastové kyvety 50 ml
- Automatické pipety Socorex
- Síto, varná konvice

- Ruční vločkovač Waldner Biotech Flocker
- Horkovzdušná trouba Venticell 111 (BMT Medical Technology, Česká republika)
- Spektrofotometr (Spectronic Helios γ , Thermo Fisher Scientific, USA)

4.3.3 Extrakce vzorku

Extrakce a analýza obsahu karotenoidů byla provedena dle Paznochta et al. (2019). Po zhomogenizování vzorku zrn bylo naváženo vždy ve třech opakováních 2,0 g vzorku do plastových a uzavíratelných kyvet. Do kyvet ke vzorku bylo přidáno 12 ml extrakční směsi ethanol:aceton:hexan v objemovém poměru 1:1:2. Tato směs byla promíchána na vortexu a na 24 hodin uložena v lednici při teplotě 4 °C. Poté byly vzorky promíchány na vortexu a na 10 minut vloženy do ultrazvukové lázně za účelem podpory homogenizace a rozpustnosti částic. V dalším kroku byly vzorky odstředěny po dobu 5 minut při 5000 *ref*. Devět ml supernatantu bylo převedeno do 50 ml odparných baněk a ke zbylému sedimentu bylo přidáno dalších 12 ml extrakční směsi a celý proces extrakce (vortex, ultrazvuková lázeň, odstředění, převedení do odparných baněk) byl proveden ještě jednou. Spojené supernatanty byly odpařeny do sucha při 40 °C na vakuové rotační odparce (Rotavapor R-200, Büchi, Švýcarsko). Následovala rekonstituce organického residua obsahujícího karotenoidy přidáním 2 ml směsi ethanol:aceton v objemovém poměru 3:2 s přídatkem 0,2% BHT a vzorek byl následně přefiltrován přes 0,22 μ m nylonový membránový filtr do tmavých vialek. Všechny vzorky byly analyzovány pomocí HPLC-DAD.

4.3.4 Stanovení obsahu sušiny

Pro přepočet množství karotenoidů v suchém vzorku bylo stanoveno procentuální zastoupení sušiny na jeho celkové hmotnosti, a to výpočtem ze ztráty vody po sušení homogenizovaných vzorků v horkovzdušné troubě při teplotě 105 °C do konstantní hmotnosti.

4.3.5 Chromatografická separace HPLC-DAD

Analýza karotenoidů ve vzorcích byla provedena na kapalinovém chromatografu Ultimate 3000 (Thermo Scientific, USA) vybaveném kvartérním čerpadlem, automatickým samplerem, kolonovou jednotkou s termostatem a detektorem diodového pole. Analyty byly separovány gradientovou elucí na analytické koloně YMC Carotenoid Column C30, 150 mm \times 3,0 mm, S-3 μ m (Kjóto, Japonsko) s použitím tří mobilních fází: methanolu (A), vody (B) a *tert*-butylmethyletheru (C). Složení mobilní fáze v průběhu analýzy je znázorněn v tabulce 4.

Pracovní podmínky byly následující: průtok 0,6 ml/min, teplota kolony 25 °C, teplota autosampleru 10 °C, objem nástřiku 10 μ l, detekce při $\lambda_1=445$ nm a $\lambda_2=480$ nm.

Tabulka 4 Složení mobilní fáze v průběhu analýzy.

čas [min]	průtok [ml/min]	A [%]	B [%]	C [%]
0-1	0,6	90	10	0
1-6	0,6	90	0	10
6-22	0,6	40	0	60
22-24	0,6	20	0	80
24-26	0,6	20	0	80
26-30	0,6	90	10	0
30-33	0,6	90	10	0

4.3.6 Identifikace a kvantifikace

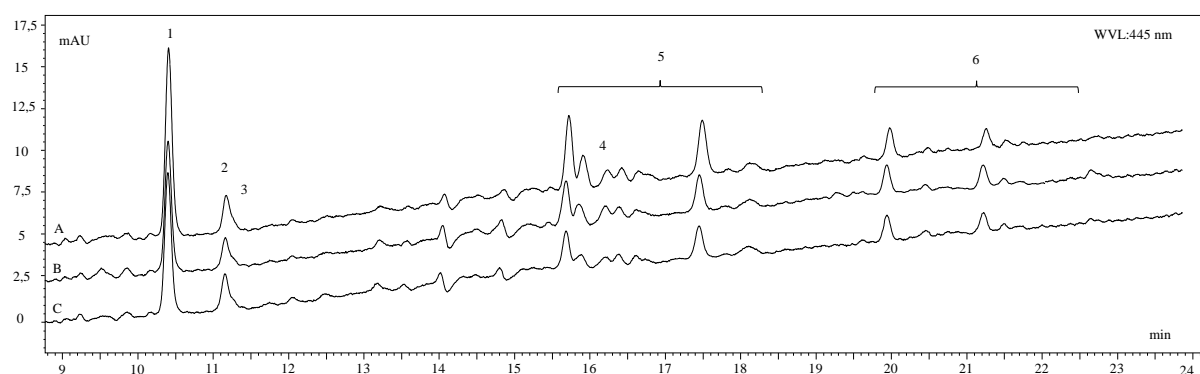
Karotenoidy lutein, zeaxanthin a β -karoten byly ve vzorcích identifikovány na základě porovnání retenčních časů a absorpčních spekter jednotlivých vzorků se zakoupenými standardy. Kvantifikace karotenoidů ve vzorcích byla provedena metodou externí kalibrace v koncentračním rozmezí 0,05-10 $\mu\text{g/ml}$. Koncentrace karotenoidů v zásobních roztocích byla stanovena spektrofotometricky za použití extinkčních koeficientů (L/g/cm): lutein (255; $\lambda_{\text{max}} = 445 \text{ nm}$) v etanolu; zeaxanthin (234; $\lambda_{\text{max}} = 452 \text{ nm}$) v acetonu; β -karoten (259,2; $\lambda_{\text{max}} = 453 \text{ nm}$) v hexanu. Esterifikované xanthofyly byly kvantifikovány s použitím kalibrační závislosti pro lutein, jelikož většina z nich je právě esterovanou formou luteinu, jak uvádí Paznocht et al. (2018). Obsah karotenoidů ve vzorcích byl vyjádřen jako průměrná hodnota ze tří opakování v μg příslušného zástupce karotenoidů na gram suché hmoty zrna (DW).

4.4 Statistická analýza

Naměřená data byla zpracována v programu Chromeleon (Thermo Fisher Scientific, Inc., Waltham, MA, USA) a Excel (Microsoft, Redmond, WA, USA). Statistická analýza byla provedena v programu Statistica (ver. 12; StatSoft, Inc., Tulsa, OK, USA).

5 Výsledky a diskuse

Uskutečněný pokus byl zaměřen na stanovení obsahu karotenoidů v deseti genotypech pšenice v různých stupních technologického zpracování na vločky. Analyzovány byly genotypy běžných červených pšenic (Red) a genotypy pšenic s barevným zrnem, tedy s modrým aleuronem (Ba), modrým aleuronem a purpurovým perikarpem (jinak také označované jako černé pšenice; Ba + Pp), purpurovým perikarpem (Pp) a žlutým endospermem (Ye). V jednotlivých genotypech byl sledován celkový obsah karotenoidů (CK), jenž byl stanoven jako suma jednotlivých karotenoidů, v závislosti na genotypu, barvě zrna a technologických krocích, a to v syrovém zrně (SZ), máčeném zrně (MZ), vařeném zrně (VZ), máčených usušených vločkách (MV) a vařených usušených vločkách (VV). Výsledné hodnoty jsou vyjádřeny jako průměrné hodnoty ze tří opakování. Obrázek 6 znázorňuje chromatogram žlutě zbarveného genotypu Bona Vita.



Obrázek 6 Chromatogram genotypu Bona Vita při vlnové délce 445 nm.

A - Syrové zrně, B - Považené zrně, C - Vařené vločky; 1 - Lutein, 2 - Zeaxanthin, 3 - 9-Z lutein, 4 - β -karoten, 5 - monoestery xanthofylů, 6 - diestery xanthofylů

5.1 Vliv genotypu na obsah a spektrum karotenoidů v syrovém zrně

Celkový obsah karotenoidů v zrně analyzovaných genotypů pšenice byl v průměru 2,03 $\mu\text{g/g}$ a pohyboval se v hodnotách od 1,10 do 3,64 $\mu\text{g/g}$. Nejnižší celkový obsah karotenoidů byl naměřen v genotypě UC 66049 a Bohemia (1,10 a 1,53 $\mu\text{g/g}$). Naopak nejvyšší obsah byl naměřen u genotypů Citrus a V1-289-21 (3,64 a 2,35 $\mu\text{g/g}$). Průměrný celkový obsah karotenoidů u jednotlivých genotypů shrnuje tabulka 5.

Paznocht et al. (2019) ve své studii zaměřené na změny obsahu karotenoidů v moukách z pšenice s barevným zrnem při pečení uvádí průměrný celkový obsah karotenoidů 1,05 $\mu\text{g/g}$ a pohyboval se v rozmezí od 0,38 (Bohemia) do 2,24 $\mu\text{g/g}$ (Citrus). Stejně jako v této diplomové práci pozorovali nejvyšší obsah karotenoidů ve žlutě zbarvených pšenicích Citrus a Bona Vita (2,24 a 2,11 $\mu\text{g/g}$) a zvýšený obsah u purpurově zbarvených pšenice (Konini 1,53 $\mu\text{g/g}$, AF Jumiko 0,79 $\mu\text{g/g}$). Mírně vyšší hodnoty než v této diplomové práci zjistili Ndolo

a Beta (2013) při analýze čtyř genotypů pšeníc, jejichž průměrný obsah CK byl 2,57 µg/g a rozsah obsažených karotenoidů činil 2,11-2,84 µg/g. Konopka et al. (2006) analyzovali 11 druhů jarních a ozimých pšeníc s průměrným obsahem karotenoidů 2,97 µg/g. Hussain et al. (2015) zkoumali 33 genotypů ekologicky pěstovaných pšeníc a uvádí rozsah obsahu karotenoidů od 0,94 do 4,08 µg/g, přičemž u pšenice špaldy byl průměrný obsah CK 1,72 µg/g. Hidalgo et al. (2017) analyzovali dva druhy jednozrnky a dva druhy běžné chlebové, konvenčně pěstované, pšenice a uvádí obsah karotenoidů od 1,05 do 7,12 µg/g. Průměrný obsah v chlebové pšenici činil 1,41 µg/g, což je přibližně o jednu čtvrtinu méně než průměrný obsah CK u červených pšeníc v této práci, a v jednozrnce 5,74 µg/g.

Tyto rozdíly v celkovém obsahu karotenoidů mohou být způsobeny jinými použitými genotypy pšenice či odlišnými podmínkami pěstování, což potvrzuje studie Paznochta et al. (2018), která porovnávala obsah karotenoidů ve stejných genotypch pšeníc s barevným zrnem ve dvou po sobě jdoucích pěstebních sezónách. Všechny experimentální podmínky zůstaly v průběhu studie stejné, přesto byl obsah CK u deseti ze čtrnácti analyzovaných genotypů pšeníc vyšší v roce s nižšími srážkami a vyššími teplotami.

Tabulka 5 Celkový obsah karotenoidů v jednotlivých genotypch [µg/g sušiny].

Genotyp	Barva zrna	Celkový obsah karotenoidů
Bohemia	Red (standard)	1,53±0,08f
Tobak	Red (standard)	2,17±0,05bc
UC66049	Ba	1,10±0,06g
Skorpion	Ba	2,13±0,07c
AF Zora	Ba+Pp	1,99±0,03cd
V1-299-21	Ba+Pp	1,91±0,01d
AF Jumiko	Pp	1,65±0,00ef
V1-289-21	Pp	2,35±0,02b
Citrus	Ye	3,64±0,02a
Bona Vita	Ye	1,80±0,16de
Průměr	-	2,03±0,67

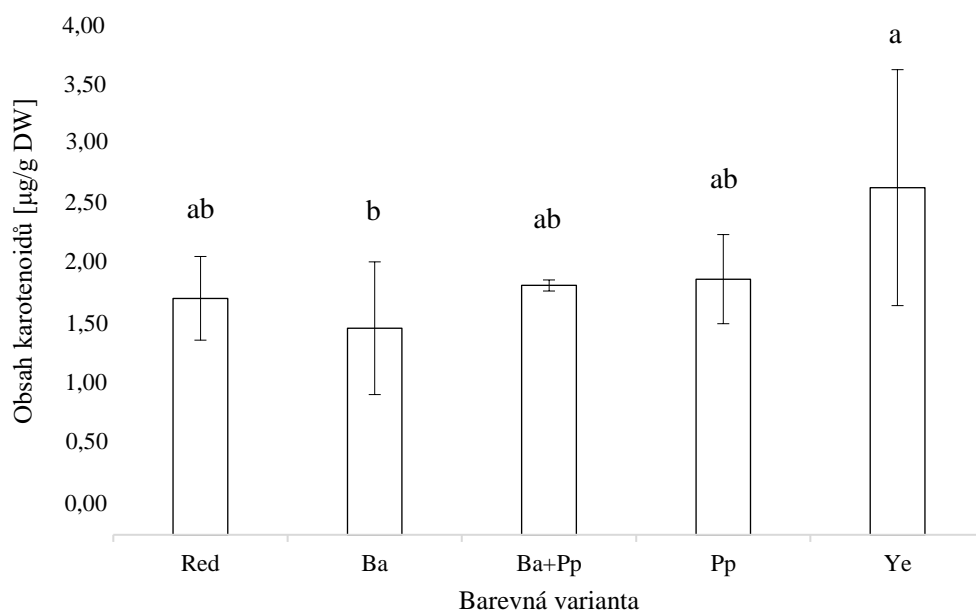
Hodnoty označené různými písmeny jsou statisticky odlišné na $p < 0,05$.

Průměrné hodnoty celkového obsahu karotenoidů se u jednotlivých barevných skupin genotypů pohybovaly následovně. Nejnižší obsah byl naměřen u modrých a červených pšeníc (1,62 a 1,85 µg/g), černé pšenice obsahovaly 1,95 µg/g, purpurové pšenice obsahovaly 2,00 µg/g a nejvyšší obsah (2,72 µg/g) měly žlutě zbarvené pšenice.

Obdobných výsledků dosáhli i Paznochta et al. (2019) při analýze karotenoidů v pšenících s barevným zrnem. Ti naměřili nejnižší hodnoty taktéž u červených a modrých pšeníc (0,53 a 0,57 µg/g), ačkoli průměrný obsah CK u takto zbarvených pšeníc byl více než 3× nižší oproti CK naměřeným v této práci. Nejvyšší hodnoty pak byly také zjištěny u purpurových

a žlutých pšeníc (0,98 a 2,17 $\mu\text{g/g}$). Stejně tak uvádí nejvyšší pozorovaný obsah CK u pšeníc se žlutým endospermem (6,88 $\mu\text{g/g}$) i Burešová et al. (2021), ovšem tyto hodnoty byly více než dvojnásobné oproti této práci. Naopak Ndolo a Beta (2013) ve své studii nezaznamenali výrazný rozdíl CK purpurové pšenice (2,62 $\mu\text{g/g}$) oproti běžným (2,56 $\mu\text{g/g}$). Mírně vyšší obsah v červené pšenici (1,94 $\mu\text{g/g}$) zjistili Abdel-Aal a Hucl (2014).

Průměrné hodnoty celkových karotenoidů v sušině v závislosti na barevných skupinách pšeníc zobrazuje obrázek 7.



Obrázek 7 Průměrný obsah celkových karotenoidů v barevných skupinách pšeníc [$\mu\text{g/g DW}$]. Hodnoty označené různými písmeny jsou statisticky odlišné na $p < 0,05$.

Nejhojněji zastoupeným karotenoidem ve vzorcích byl lutein, jenž byl stanoven jako suma jeho detekovaných *trans*-izomerů. V syrovém zrně byl jeho průměrný obsah 1,36 $\mu\text{g/g}$, což odpovídá 67 % celkového obsahu karotenoidů. Nejvyšší hodnoty luteinu byly naměřeny v genotypě Citrus a V1-289-21 (2,92 a 1,88 $\mu\text{g/g}$), naopak nejnižší obsah měly genotypy UC 66049 a Bona Vita (0,43 a 0,58 $\mu\text{g/g}$).

Podobných výsledků dosáhli i Paznocht et al. (2018), v jejichž studii představoval lutein průměrně 74 % celkových karotenoidů v pšenicích s barevným zrnem a Konopka et al. (2006) s průměrným obsahem luteinu 76 %. Vyšší hodnoty zastoupení luteinu zjistili Hussain et al. (2015) při analýze 33 genotypů pšeníc, v nichž lutein představoval 70-90 % všech karotenoidů. Ve studii Mellado-Ortega et al. (2015) uvádí průměrný obsah luteinu přes 85 %. Vysoké zastoupení luteinu (77-83 %) má i pšenice jednozrnka, jak uvádí Abdel-Aal a Hucl (2014). Obsahem luteinu se ve své publikaci zabírali rovněž autoři Giordano et al. (2017), kteří měřili jeho zastoupení v pšenicích s barevným zrnem. V běžné pšenici naměřili 2,18 $\mu\text{g/g}$, což je téměř dvojnásobek průměrné hodnoty naměřené v této práci. Podstatně vyšší hodnoty luteinu byly naměřeny i u žlutě zbarvené pšenice Bona Vita, které dosahovaly

3,62 µg/g, což je více než šestinásobek hodnoty naměřené v této práci. Podobně však vyšly výsledky obsahu luteinu v purpurové pšenici, které byly 1,67 µg/g. Rozdíly v naměřených hodnotách mohly být způsobeny odlišným místem a průběhem pěstování, ale zejména způsobem analýzy, neboť Giordano et al. (2017) vzorky hydrolyzovali, čímž dochází k uvolnění esterově vázaného luteinu, který byl v této práci stanovován zvlášť.

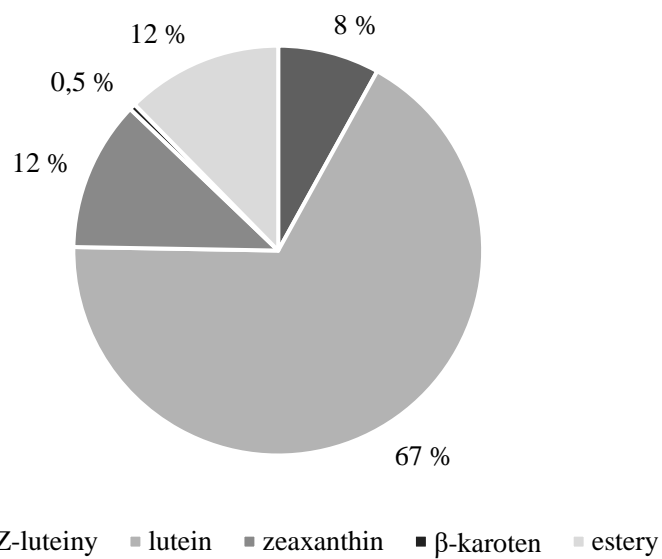
Druhým nejzastoupenějším karotenoidem v syrovém zrna byl zeaxanthin s průměrným zastoupením 12 % z celkového obsahu karotenoidů a průměrnou hodnotou 0,24 µg/g. Nejvyšší hodnoty zeaxanthinu byly naměřeny v genotypech Citrus (0,34 µg/g), Skorpion a AF Zora (shodně 0,29 µg/g). Nejmenší obsah byl zaznamenán u genotypu Tobak (0,15 µg/g).

Srovnatelný průměrný obsah zeaxanthinu naměřili také Burešová et al. (2023), zaznamenali také obdobný rozsah (0,13-0,37 µg/g). Podobné zastoupení potvrzuje studie Mellado-Ortega et al. (2015), kde byl průměrný obsah zeaxanthinu 10,7 % a studie Konopky et al. (2006), kde autoři naměřili průměrně 13,9 %. Studie Paznocha et al. (2018) zjistila hodnoty zeaxanthinu v rozmezí 11,8-19,8 % v purpurové a modře zbarvených pšenicích, přičemž hodnoty kolísaly okolo 0,56 µg/g a průměrný obsah zeaxanthinu byl více než dvojnásobný oproti naměřené v této práci. Giordano et al. (2017) v běžné pšenici zjistili 0,15 µg/g, ve žluté a purpurové shodně 0,34 µg/g a u modré pšenice 0,29 µg/g, což je obsah srovnatelný s daty naměřenými v této práci. V pšenici jednozrnce zastoupení zeaxanthinu odpovídá pšenicím s barevným zrnem, zaujímá srovnatelně 9-13 % CK (Abdel-Aal et Hucl 2014). To nasvědčuje tomu, že spektrum karotenoidů je oproti celkovému množství více determinováno geneticky a různé abiotické faktory jako srážky, teploty aj. na samotné složení mají podstatně menší vliv.

Estery xanthofylů měly stejně jako zeaxanthin 12% zastoupení a průměrný obsah 0,25 µg/g. Schopnost syntézy a skladování esterovaných forem karotenoidů je geneticky podmíněna (Ahmad et al. 2015) a estery tedy byly zjištěny pouze u čtyř genotypů majících tuto schopnost, a to UC 66049, Skorpion, V1-299-21 a Bona Vita. U posledního zmíněného genotypu byly estery dominantním skupinou, byly naměřeny hodnoty 0,96 µg/g z celkových 1,80 µg/g. To potvrzuje studie Burešové et al. (2023), ve které byly estery xanthofylů u genotypu Bona Vita taktéž nejvíce zastoupenou skupinou karotenoidů. Naměřený průměrný obsah esterů byl však mírně vyšší (0,31 µg/g). V předchozí studii Burešové et al. (2021) dosahovaly estery xanthofylů v průměru třikrát větších hodnot (0,76 µg/g) oproti této práci. Rozdíl může být způsoben výběrem genotypů pšenic schopných tvorby esterů.

Z-izomery luteinu měly průměrné zastoupení 8 % s průměrným obsahem 0,17 µg/g, což je stejný výsledek jako uvedli Burešová et al. (2021). Nejméně zastoupeným měřeným karotenoidem ve vzorcích byl β-karoten, jenž byl nalezen pouze v genotypech se žlutým endospermem a jeho průměrné zastoupení ve všech vzorcích syrového zrna bylo pouhých 0,5 %. Ve žlutých pšenicích byl jeho průměrný obsah 1,8 % v rozmezí 0,03-0,05 µg/g. Fares et al. (2008) se zabývali obsahem karotenoidů v tetraploidních pšenicích, ve kterých byl průměrný obsah β-karotenu shodně 0,05 µg/g. Abdel-Aal a Hucl (2014) zjistili průměrný obsah β-karotenu u jednozrnky, kamutu, tvrdé a běžné pšenice 0,09 µg/g s průměrným zastoupením 1 % CK, tedy zhruba 2× více než bylo naměřeno v této práci. Obdobné hodnoty naměřili Paznocht et al. (2018), v jejichž studii průměrný obsah β-karotenu činil taktéž 0,09 µg/g, avšak ve větším rozsahu (0,03-0,24 µg/g).

Průměrné zastoupení karotenoidů v syrovém znu je znázorněno na obrázku 8.



Obrázek 8 Průměrné zastoupení karotenoidů syrovém znu.

5.2 Vliv technologického zpracování na obsah a složení karotenoidů

5.2.1 Příprava vloček zahrnující vaření

Vaření syrového zrna vedlo u všech genotypů ke snížení obsahu celkového obsahu karotenoidů, avšak obsah izomerů Z-luteinů se ve více než polovině genotypů (Bohemia, Tobak, Skorpion, AF Zora, V1-289-21 a Citrus) zvýšil průměrně o 18 %, což mohlo být zapříčiněno izomerací při záhřevu. Celkový obsah karotenoidů jednotlivých genotypů v průběhu přípravy vařením shrnuje tabulka 6.

V průměru bylo po vaření zrn zachováno 83 % karotenoidů. Nejnižší procentuální ztráty byly zjištěny u genotypů Bohemia a UC 66049, kde bylo shodně zachováno 92 % původního obsahu karotenoidů. Největší ztráty byly zaznamenány u genotypů Bona Vita a Skorpion (zachováno 75 a 78 % původního obsahu). Nejvíce degradujícími karotenoidy vařeného zrna byly Z-luteiny u genotypu UC 66049 a zeaxanthin u Bona Vita, v nichž bylo zachováno pouze 63, resp. 64 % z původní hodnoty.

Po vločkování a vysušení vařeného zrna došlo vlivem vyšších teplot a mechanického zpracování k dalšímu úbytku obsahu karotenoidů. Průměrná ztráta činila 13 %, přičemž k nejvyšším ztrátám došlo u genotypů Bohemia a AF Zora, které při tomto zpracování ztratily dalších 22 % celkového obsahu karotenoidů a Skorpion se ztrátou 15 %. Nejmenší ztráty (2, 4 a 5 %) byly zjištěny u genotypů V1-289-21, Bona Vita a Citrus.

V průběhu celého zpracování syrového zrna na vařené vločky došlo k průměrným ztrátám 29 % celkového obsahu karotenoidů. K největším ztrátám došlo u genotypu UC 66049, kde zůstalo pouze 48 % původního obsahu karotenoidů, dále u AF Zora se zachováním 66 % CK a Tobak se 71 %. Nejvíce karotenoidů (80 a shodně 79 %) bylo zachováno u genotypů AF Jumiko, V1-289-21 a Citrus.

Vařením zrna se zabývali Burešová et al. (2023). V průběhu experimentu bylo zrno vařeno po dobu 30 minut. Obsah CK klesl z počátečních 1,59 na 1,15 $\mu\text{g/g}$, což představuje 73 % počáteční hodnoty. To je o 10 % méně než v této práci, kdy zrno bylo vařeno pouze po dobu pěti minut. Lze tedy usuzovat, že delší doba varu způsobuje větší ztráty karotenoidů.

Jati et al. (2022) se ve své studii zabývali výrobou vloček z batátů a červené rýže, které jsou dobrým zdrojem β -karotenu. Příprava produktů probíhala v případě batátů varem po dobu 20 minut a následným sušením po dobu 6 hodin při teplotě 60 °C. Rýže byla připravována varem po dobu 45 minut a následným sušením po dobu 1 hodiny při 60 °C. Vločky poté byly vyráběny za využití šesti různých poměrů batátů a rýže, přičemž směs byla zahřívána při 75 °C po dobu 1 minuty a lisována při 170 °C po dobu 1 minuty na stroji pro lisování vloček. Takto vyrobené vločky následně byly vysušeny v horkovzdušné sušárně při 125 °C po dobu 5 minut. Samotný proces vaření snížil obsah β -karotenu v batátech o 48 % a v červené rýži o 56 % a po následné výrobě vloček došlo k dalšímu úbytku. Ve výsledném produktu zbylo z původního obsahu β -karotenu 17,5 % v případě batátů a u červené rýže 23,7 %. Tento významný úbytek mohl být způsoben delší dobou vystavení vyšším teplotám, batáty byly vařeny 4× déle a sušeny 6× než pšenice při experimentu v rámci této práce a k další degradaci mohlo přispět i lisování při velmi vysokých teplotách.

Cueto et al. (2017) ve své studii hodnotili vliv zpracování na ztráty karotenoidů v tradičně připravovaných kukuřičných lupíncích (povařením kukuřičné krupice). Při povaření krupice v tradičním procesu došlo k 60% snížení obsahu luteinu a 40% snížení obsahu zeaxanthinu, což prokázalo větší náchylnost luteinu k izomeraci a rozkladu. Závěrečné opékání lupínek při velmi vysokých teplotách (230 °C) po dobu několika minut vedlo k celkové průměrné ztrátě 80 % luteinu i zeaxanthinu. Oproti postupu použitému v této práci volili autoři násobně vyšší teplotu, což mohlo přispět vyšší degradaci karotenoidů, avšak vliv mohlo mít i použití jiné suroviny k výrobě lupínek.

5.2.2 Příprava vloček zahrnující máčení

Průměrně bylo po máčení syrového zrna zachováno 87 % původního obsahu karotenoidů, což je o 4 % více než po povaření. Nejnižší procentuální ztráty byly zjištěny u genotypů AF Jumiko, u které došlo k poklesu CK pouze o 4 %, Citrus a Tobak s (7 a 10 %). K nejvyššímu úbytku došlo u genotypů UC 66049, již máčením ubylo 35 % původního obsahu karotenoidů, a dále u Bona Vita, V1-289-21 a Skorpion, kde ubylo 16, 17 a 18 %.

V průběhu procesu vločkování a vysušení došlo k dalším ztrátám celkového obsahu karotenoidů, nicméně další ztráty v případě máčeného zrna nebyly tak velké jako u přípravy vařením. Průměrná ztráta byla 7 % (u vaření 13 %). U genotypu Bona Vita nebyly zaznamenány prokazatelné ztráty a u V1-299-21, AF Zora a UC 66049 pouze nepatrné ztráty (2-3 %). Nejvíce karotenoidů v tomto kroku ubylo u genotypů Citrus a Tobak (ztráta 12 a 16 %).

V průběhu celého zpracování syrového zrna na máčené vločky došlo k průměrným ztrátám 19 %, což je o 10 % méně než v případě vařených vloček a lze tedy usuzovat, že příprava vloček máčením je šetrnější. K největším ztrátám původního obsahu karotenoidů došlo u genotypů UC 66049, u které bylo detekováno pouze 63 % původního celkového obsahu karotenoidů, a Tobak, kde bylo zachováno 76 % původní hodnoty.

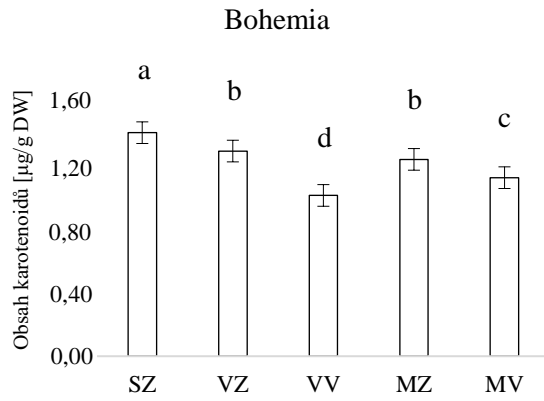
Ztráty celkového obsahu karotenoidů a jejich procentuální hodnoty v průběhu jednotlivých kroků technologického zpracování jsou znázorněny na obrázku 9.

Tabulka 6 Obsah jednotlivých karotenoidů v pšenicích v závislosti na technologickém zpracování.

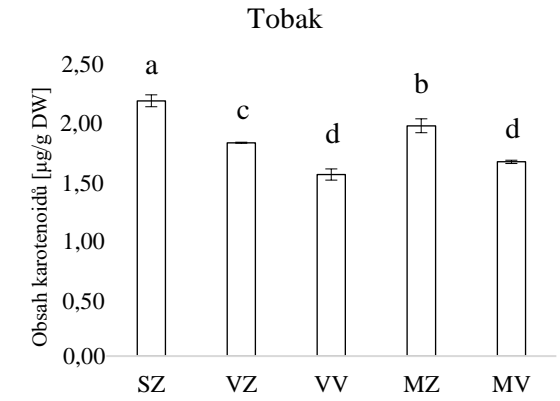
		Suma Z-luteiny	Lutein	Zeaxanthin	β-karoten	Estery
Bohemia	SZ	0,16±0,02b	1,14±0,03a	0,23±0,03a	n.a.	n.a.
	VZ	0,20±0,01a	0,98±0,01b	0,22±0,00a	n.a.	n.a.
	VV	0,10±0,01c	0,86±0,01c	0,14±0,01b	n.a.	n.a.
	MZ	0,14±0,01bc	1,09±0,02a	0,12±0,00b	n.a.	n.a.
	MV	0,14±0,01b	0,92±0,02c	0,16±0,01b	n.a.	n.a.
Tobak	SZ	0,22±0,01b	1,79±0,04a	0,15±0,01a	n.a.	n.a.
	VZ	0,28±0,00a	1,40±0,02c	0,14±0,02a	n.a.	n.a.
	VV	0,15±0,01d	1,25±0,04d	0,15±0,00a	n.a.	n.a.
	MZ	0,19±0,01c	1,68±0,02b	0,09±0,02b	n.a.	n.a.
	MV	0,16±0,02cd	1,41±0,02c	0,09±0,02b	n.a.	n.a.
UC 66049	SZ	0,10±0,01a	0,43±0,01a	0,21±0,01a	n.a.	0,36±0,07a
	VZ	0,06±0,01b	0,35±0,01b	0,22±0,03a	n.a.	0,15±0,01b
	VV	0,03±0,00c	0,25±0,01c	0,13±0,00bc	n.a.	0,12±0,01b
	MZ	0,06±0,01b	0,37±0,01b	0,09±0,02c	n.a.	0,19±0,01b
	MV	0,04±0,01bc	0,35±0,02b	0,15±0,01b	n.a.	0,16±0,01b
Skorpion	SZ	0,12±0,01ab	1,06±0,01a	0,29±0,02a	n.a.	0,66±0,04a
	VZ	0,14±0,02a	0,84±0,02c	0,30±0,02a	n.a.	0,38±0,02c
	VV	0,09±0,01c	0,68±0,01d	0,22±0,02b	n.a.	0,43±0,04c
	MZ	0,11±0,00bc	0,91±0,01b	0,19±0,02b	n.a.	0,55±0,04b
	MV	0,08±0,00c	0,83±0,01c	0,22±0,01b	n.a.	0,56±0,00b
AF Zora	SZ	0,17±0,01ab	1,53±0,03a	0,29±0,01a	n.a.	n.a.
	VZ	0,22±0,03a	1,18±0,03c	0,29±0,00a	n.a.	n.a.
	VV	0,15±0,02b	0,95±0,02d	0,21±0,02b	n.a.	n.a.
	MZ	0,17±0,01ab	1,34±0,01b	0,19±0,05b	n.a.	n.a.
	MV	0,16±0,02b	1,25±0,04c	0,25±0,02ab	n.a.	n.a.
V1-299-21	SZ	0,20±0,01a	0,99±0,02a	0,22±0,00a	n.a.	0,50±0,01a
	VZ	0,17±0,00b	0,86±0,01b	0,21±0,01ab	n.a.	0,41±0,01b
	VV	0,13±0,01c	0,68±0,01c	0,16±0,05b	n.a.	0,49±0,02a
	MZ	0,17±0,01b	0,88±0,01b	0,20±0,01ab	n.a.	0,50±0,03a
	MV	0,15±0,01bc	0,89±0,02b	0,18±0,01ab	n.a.	0,50±0,02a
AF Jumiko	SZ	0,12±0,01bc	1,32±0,01a	0,21±0,01a	n.a.	n.a.
	VZ	0,11±0,01c	1,14±0,02b	0,16±0,02b	n.a.	n.a.
	VV	0,13±0,02abc	1,02±0,08c	0,16±0,02b	n.a.	n.a.
	MZ	0,16±0,02a	1,29±0,01a	0,14±0,00b	n.a.	n.a.
	MV	0,14±0,00ab	1,17±0,01b	0,17±0,01b	n.a.	n.a.
V1-289-21	SZ	0,22±0,02a	1,88±0,01a	0,25±0,01ab	n.a.	n.a.
	VZ	0,23±0,03a	1,44±0,03cd	0,22±0,01bc	n.a.	n.a.
	VV	0,20±0,02a	1,39±0,03d	0,26±0,02a	n.a.	n.a.
	MZ	0,19±0,01a	1,57±0,02b	0,18±0,01d	n.a.	n.a.
	MV	0,19±0,01a	1,47±0,02c	0,21±0,01cd	n.a.	n.a.

Citrus	SZ	0,35±0,02b	2,92±0,01a	0,34±0,01a	0,03±0,00a	n.a.
	VZ	0,44±0,02a	2,30±0,05c	0,28±0,00b	0,02±0,01a	n.a.
	VV	0,32±0,02b	2,20±0,03d	0,32±0,01ab	0,03±0,01a	n.a.
	MZ	0,34±0,05b	2,76±0,02b	0,28±0,04b	0,02±0,01a	n.a.
	MV	0,37±0,00ab	2,33±0,03c	0,27±0,02b	0,02±0,00a	n.a.
Bona Vita	SZ	0,03±0,01b	0,58±0,01a	0,17±0,02a	0,05±0,01a	0,96±0,14a
	VZ	0,03±0,00b	0,48±0,00c	0,11±0,01b	0,05±0,00a	0,68±0,06ab
	VV	0,01±0,00c	0,42±0,01d	0,16±0,04ab	0,05±0,02a	0,66±0,08b
	MZ	0,03±0,00b	0,52±0,02b	0,12±0,01ab	0,05±0,00a	0,80±0,15ab
	MV	0,05±0,01a	0,47±0,01c	0,13±0,01ab	0,05±0,01a	0,81±0,07ab

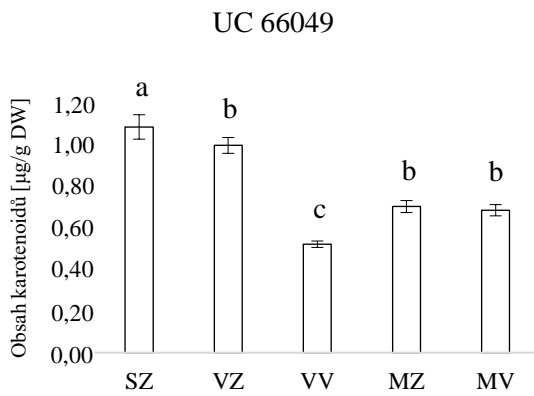
n.a. = not analysed. Hodnoty označené různými písmeny jsou statisticky odlišné na $p < 0,05$.



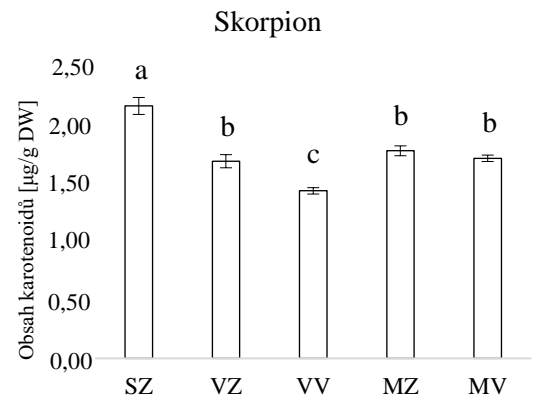
	SZ	VZ	VV	MZ	MV
% původní hodnoty	100 %	92 %	72 %	88 %	80 %



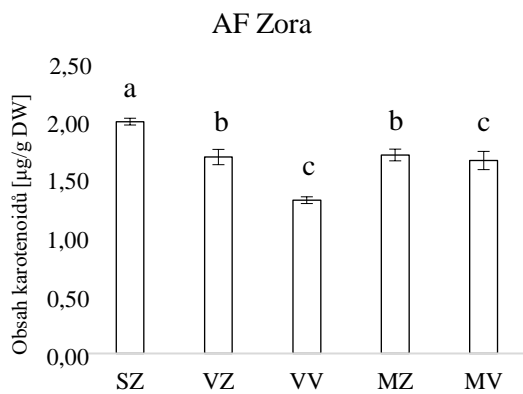
	SZ	VZ	VV	MZ	MV
% původní hodnoty	100 %	84 %	71 %	90 %	76 %



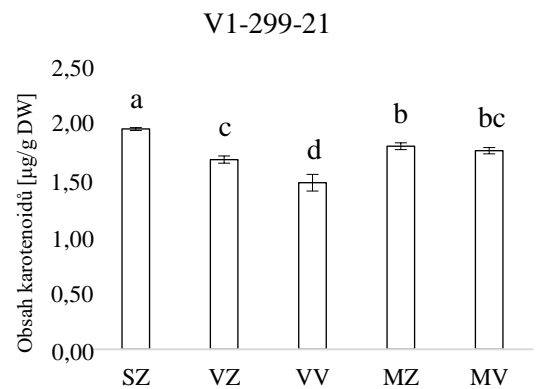
	SZ	VZ	VV	MZ	MV
% původní hodnoty	100 %	92 %	48 %	65 %	63 %



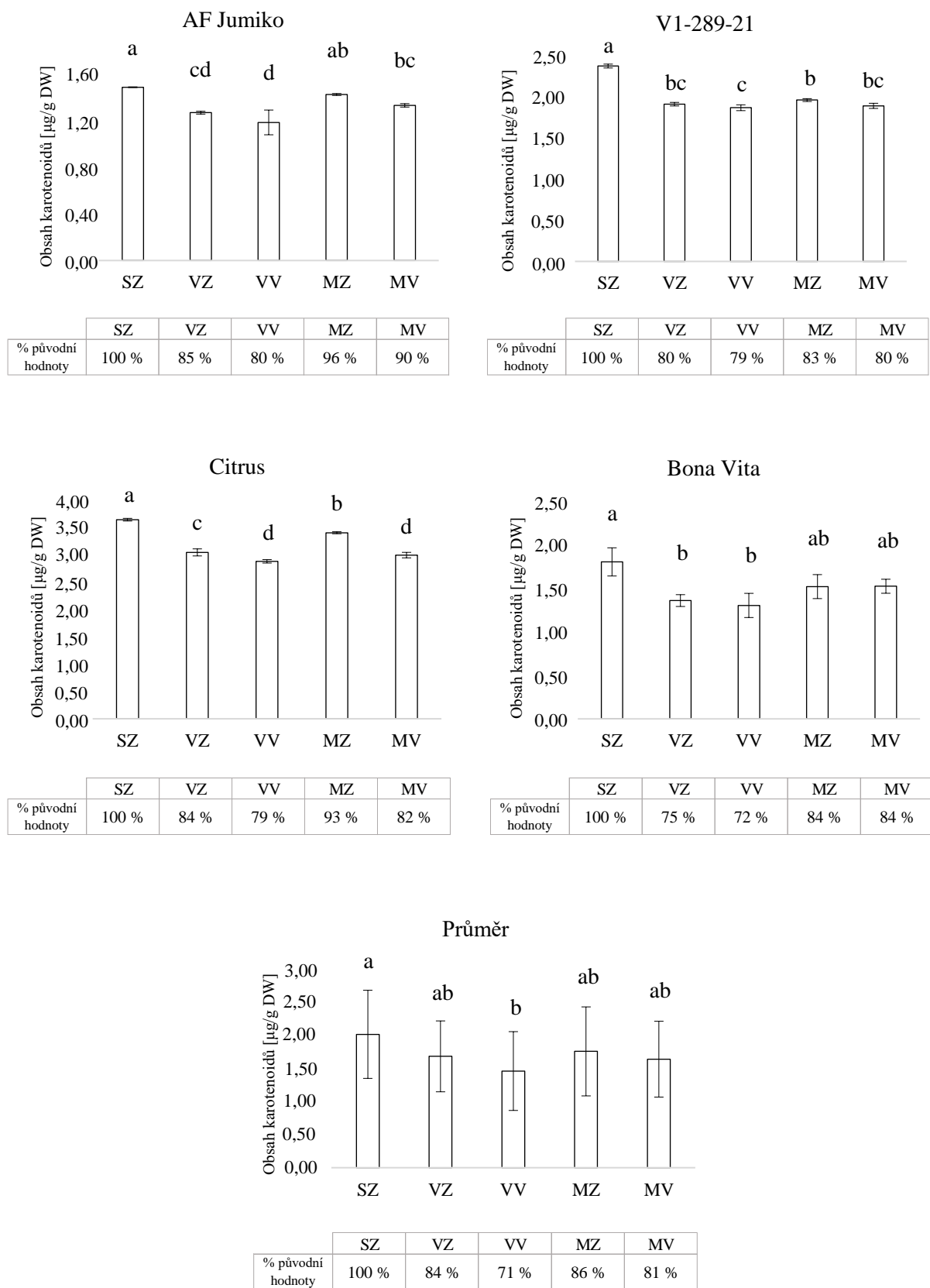
	SZ	VZ	VV	MZ	MV
% původní hodnoty	100 %	78 %	66 %	82 %	79 %



	SZ	VZ	VV	MZ	MV
% původní hodnoty	100 %	85 %	66 %	86 %	83 %

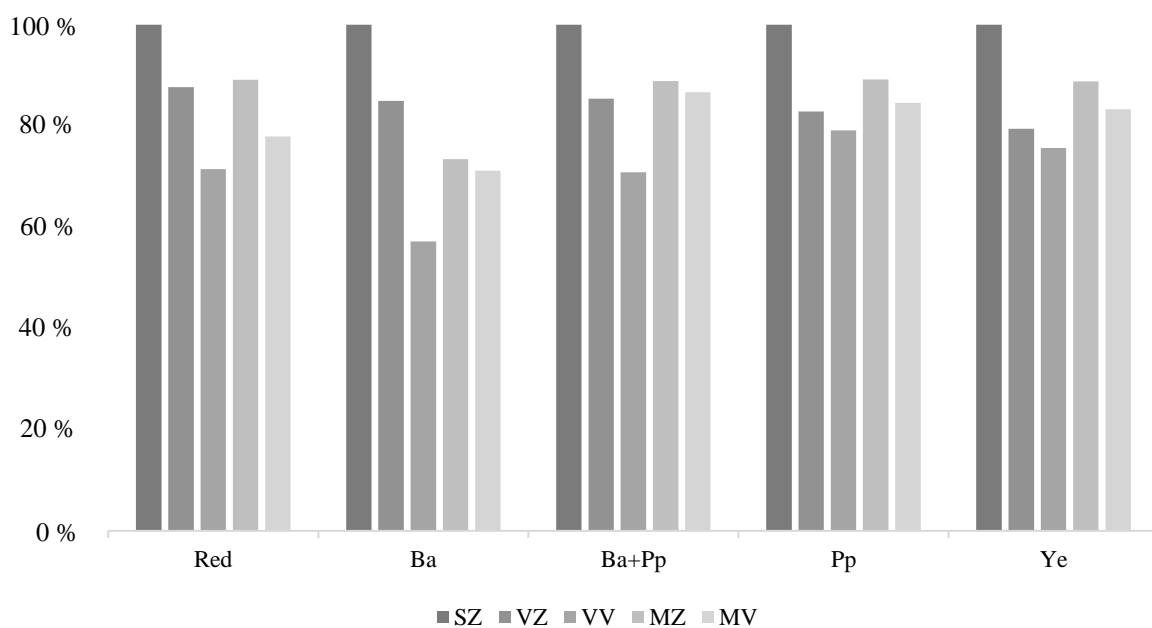


	SZ	VZ	VV	MZ	MV
% původní hodnoty	100 %	86 %	76 %	92 %	90 %



Obrázek 9 Změny celkového obsahu karotenoidů v průběhu technologického zpracování v jednotlivých použitých genotypech. Hodnoty označené různými písmeny jsou statisticky odlišné na $p < 0,05$.

Obrázek 10 zobrazuje průměrné procentuální ztráty v barevných skupinách pšenic. K nejvyšším ztrátám celkových karotenoidů došlo v průběhu přípravy vařením pšenic s modrým aleuronem a pšenic černých a při přípravě máčením pšenic s modrým aleuronem. Nejvíce bylo celkových karotenoidů zachováno při přípravě máčením pšenic černých, pšenic s purpurovým perikarpem a žlutým endospermem.



Obrázek 10 Porovnání ztrát CK v barevných skupinách.

5.3 Srovnání s dalšími technologickými procesy

5.3.1 Extruze

Extruze je technologický proces využívaný k úpravě fyzikálních vlastností potravin, zejména textury a chuti. Dochází při něm ke stlačování suroviny v extrudéru pomocí otáčivé šnekovnice při řízené sekvenci teplot a následnému protlačování dýzou na konci zařízení. Extruze je využívána při výrobě cukrovinek a cereálií, zejména pak knäckebrotů, kukuřičných lupínků nebo různých křupek (Šárka et al. 2013).

Paznocht et al. (2021) se ve své studii věnovali sledování obsahu karotenoidů v 10 genotypech pšeníc s barevným zrnem v průběhu technologického zpracování extruzí. Extruze byla provedena rozemletím zrna na velikost menší než 2 mm, úpravou vlhkosti na 20 % a takto upravená směs byla vytlačována na extrudéru při teplotě 130 °C. Při extruzi došlo k výraznému průměrnému úbytku CK na 25,7 % původního obsahu (z 1,99 na 0,51 µg/g). U genotypu Bohemia došlo v důsledku extruze k poklesu CK na 37,7 % (z 1,22 na 0,51 µg/g) původní hodnoty a u genotypu Citrus na 20,3 % (z 4,16 na 0,84 µg/g). V procesu vločkování v této diplomové práci došlo u genotypu Citrus u VV k poklesu na 79 % CK a v případě MV 82 % CK. Výrazný pokles byl při extruzi zjištěn i u Bona Vita, kde obsah CK klesl na 23,4 % (z 5,02 na 1,17 µg/g). Při vločkování této odrůdy byl zjištěn průměrný úbytek 22 %, tj. bylo zachováno 78 % CK. Proces vločkování je v tomto případě výrazně šetrnější, neboť došlo k zachování až 4× více karotenoidů než v případě extruze. Extruzní výrobě semolinových těstovin se ve své studii věnovali také Fares et al. (2008), kteří došli k výsledku podobnému jako Paznocht et al. (2021), neboť zaznamenali pokles CK na 22 % původní hodnoty.

5.3.2 Pufování

Pufování je výrobní proces založený na stlačení suroviny za vysoké teploty a tlaku a následném rychlém vypuštění do okolní atmosféry. Expanzí vodní páry dojde k násobnému zvětšení zrna (Dostálová 2008; Barna et al. 1997).

V druhé části studie Paznocha et al. (2021) byl porovnáván proces pufování. Před zpracováním pufováním bylo zrno navlhčeno na 17,5 % vlhkosti a ponecháno po dobu 24 hodin při pokojové teplotě. Pufování bylo prováděno při teplotě 270-280 °C po dobu 6 sekund. Pufování vedlo k průměrnému snížení CK o více než dvě třetiny na 31,6 % původní hodnoty (z 1,56 na 0,49 µg/g), tedy došlo k degradaci více než 2,5× vyššího obsahu karotenoidů než při výrobě vařených vloček a přibližně dvojnásobku CK oproti výrobě máčených vloček. U žlutě zbarvených genotypů Citrus a Bona Vita došlo při pufování k degradaci CK na 30,5 a 28,5 % (z 3,61 na 1,10 µg/g a z 4,06 na 1,14 µg/g). I přes výrazný úbytek CK pšeníc s Ye byl obsah karotenoidů ve výsledném produktu 2-5× větší v porovnání s jinými barevnými variantami. Přestože v průběhu procesu pufování byla zrna vystavena vysoké teplotě pouze krátkou dobu, i tak došlo k výrazné degradaci CK, oproti extruzi se však jedná o šetrnější proces.

5.3.3 Pečení

V další publikaci se Paznocht et al. (2019) věnovali vlivu přípravy kynutého pekařského produktu z pšeníc s barevným zrnem na degradaci karotenoidů. Sledován byl obsah karotenoidů v celozrnné mouce, těstu, produktu a produktu skladovaném po dobu 24 hodin. Průměrný celkový obsah karotenoidů v celozrnné mouce byl 1,05 µg/g DW. Nejnižší obsah měl genotyp Bohemia (0,38 µg/g) a nejvyšší Citrus (2,24 µg/g). Po přípravě těsta se obsah karotenoidů snížil v průměru o 61,5 %. Po procesech přípravy těsta, pečení a skladování po dobu 24 hodin při pokojové teplotě došlo k poklesu CK o tři čtvrtiny na 24,9 % původní hodnoty, přibližně tedy došlo ke ztrátám 3× větším než při vločkování. K podobným výsledkům došli i Leenhardt et al. (2006), kteří ve své studii pozorovali velké ztráty CK (66 %) v průběhu přípravy těsta a po upečení došlo k dalším ztrátám o 36 %. Hidalgo et al. (2010) během výroby chleba po přípravě těsta pozorovali pouze 15% úbytek karotenoidů, nicméně po upečení došlo k dalším ztrátám v kůrce (o 29 %), zatímco ve střídě došlo k podstatně menšímu úbytku (3 %). Vyšší ztráty karotenoidů při přípravě těsta mohou být způsobovány přítomností enzymů lipoxygenasy či peroxidasy, které jsou aktivovány přidáním vody a začleněním kyslíku do těsta, což usnadňuje lipoxygenasou katalyzovanou oxidaci polynenasycených mastných kyselin, která může vést k oxidaci karotenoidů (Leenhardt et al. 2006).

Degradaci karotenoidů v průběhu pečení nekynutého výrobku sledovali Burešová et al. (2021). V této studii byl přeskočen proces kynutí těsta a po hnětení ihned následovalo pečení. Průměrně bylo zachováno 26 % CK, o zhruba 1 % více než v případě výroby kynutého výrobku. Nejvíce karotenoidů bylo zachováno v červeně zbarvených pšenicích (44 %) a nejméně u modrých a žlutých pšeníc (20 a 22 %). Přestože u pšeníc se žlutým endospermem byl pozorován velký úbytek, vzhledem k vysokému obsahu karotenoidů v syrovém zrně (6,82 µg/g) byl obsah karotenoidů i po ztrátách způsobených technologickým zpracováním stále vysoký (1,52 µg/g). V této diplomové práci byl oproti studii Burešové et al. (2021) sice obsah CK v syrovém zrně u žlutých pšeníc nižší (2,72 µg/g), avšak vlivem šetrnějšího zpracování došlo k menší degradaci CK (20 %) a ve finálních výrobcích (MV, VV) bylo průměrně zachováno 2,17 µg/g.

Extruze, pufování a pečení oproti vločkování způsobují značné snížení obsahu karotenoidů. Dle dostupných dat docházelo k největší degradaci karotenoidů při pečení (Burešová et al. 2021; Paznocht et al. 2019), kdy došlo k zachování 24,9 % CK. K podobným ztrátám došlo i v případě extruze (Paznocht et al. 2021) při zachování 25,7 % CK. Šetrnější než pečení a extruze je pufování (Paznocht et al. 2021), při tomto procesu došlo k degradaci 68,4 % CK, tj. bylo zachováno 31,6 % CK. Při výrobě vloček povařením došlo k zachování 71 % CK, což je téměř třikrát více než při využití pečení či extruze a 2,2× více než při pufování. Nejlepších výsledků dosáhla výroba vloček zahrnující máčení zrna, při které bylo degradováno pouhých 19 % CK, tj. bylo zachováno 81 % CK, což potvrzuje hypotézu o šetrnosti zpracování pšeničných zrn na vločky z pohledu degradace karotenoidů.

6 Závěr

Pšenice je jedním z hlavních zdrojů potravy pro lidi na celém světě a je dobrým zdrojem energie a živin. Je základní složkou velkého množství potravin, jako je chléb, těstoviny a další pekařské výrobky. Z tohoto důvodu je pšenice předmětem dalšího výzkumu mnoha odborníků a šlechtitelů, jejichž cílem je vylepšení nutričních vlastností pšenice.

V experimentální části diplomové práce byly z deseti genotypů pšeníc s barevným zrnem vyráběny vločky dvěma různými způsoby, zahrnujícími buď máčení nebo povaření zrna. Pomocí HPLC-DAD byly detekovány a kvantifikovány karotenoidy v syrovém zrně a následujících technologických krocích: máčeném zrně, máčených vločkách, vařeném zrně a vařených vločkách. Průměrný obsah karotenoidů v syrovém zrně byl 2,03 $\mu\text{g/g}$. Nejvyšší obsah karotenoidů byl zjištěn u žlutých a purpurových pšeníc s průměrnými obsahy 2,72 a 2,00 $\mu\text{g/g}$. Nejnižší hodnoty dosahovaly 1,62 $\mu\text{g/g}$ u pšeníc s modrým aleuronem.

Porovnáním několika druhů zpracování (extruze, pufování a pečení) s procesem vločkování bylo zjištěno, že nejméně šetrnými procesy jsou pečení a extruze, při kterých došlo k zachování pouze 24,9 % a 25,7 % celkových karotenoidů. Pufování je šetrnější než předchozí procesy, bylo při něm zachováno 31,6 % karotenoidů. Při vločkování bylo průměrně zachováno 76 % celkového obsahu karotenoidů, což potvrzuje stanovenou hypotézu „Technologické zpracování pšeničných zrn na vločky je z pohledu degradace obsažených karotenoidů šetrnější oproti pečení, extruzi a pufování“.

Ve vločkách, jejichž příprava zahrnovala krok povaření, bylo zachováno 71 % celkového obsahu karotenoidů a ve vločkách, jejichž příprava zahrnovala máčení, došlo k zachování 81 % celkového karotenoidů, tedy o 10 % více než při procesu zahrnujícím povaření zrna. Hypotéza „Výroba vloček zahrnující krok namáčení způsobuje nižší degradaci karotenoidů oproti výrobě, kdy je zrna povařeno“ byla tedy potvrzena.

Obsah karotenoidů a dalších nutričně žádoucích látek může být ovlivněn mnoha faktory, mezi které patří i způsob skladování či proces technologického zpracování na finální produkt. Je tedy důležité, aby úsilí při šlechtění odrůd s vysokým obsahem těchto látek bylo doplněno šetrnými procesy s cílem zamezení dalších ztrát během zpracování.

7 Literatura

- Abdel-Aal EM, Hucl PJ. 2014. Einkorn: A Functional Wheat for Developing High-Lutein Whole Grain Baked Products. *Cereal Foods World* **59**:5-10.
- Ahmad FT, Mather DE, Law HY, Li M, Yousif SAJ, Chalmers KJ, Asenstorfer RE, Mares DJ. 2015. Genetic control of lutein esterification in wheat (*Triticum aestivum* L.) grain. *Journal of Cereal Science* **64**:109-115.
- Amorim-Carrilho KT, Cepeda A, Fente C, Regal P. 2014. Review of methods for analysis of carotenoids. *Trends in Analytical Chemistry* **56**:49-73.
- Archana P. 2019. An analytical study of Indian agriculture crop production and export with reference to wheat. *Advances in Management* **12**:75-78.
- Aziz E, Batool R, Akhtar W, Rehman S, Shahzad T, Malik A, Shariati MA, Laishevtcev A, Plygun S, Heydari M, Rauf A, Arif SA. 2020. Xanthophyll: Health benefits and therapeutic insights. *Life Sciences* **240**:117104.
- Balyan HS, Gupta PK, Kumar S, Dhariwal R, Jaiswal V, Tyagi S, Agarwal P, Gahlaut V, Kumari S. 2013. Genetic improvement of grain protein content and other health-related constituents of wheat grain. *Plant Breeding* **132**:446-457.
- Barbosa-Filho J, Alencar A, Nunes XP, Tomaz AA, Sena-Filho JG, Athayde-Filho P, Silva ME, Souza MDFV, da-Cunha EV. 2008. Sources of alpha-, beta-, gamma-, delta- and epsilon-carotenes: A twentieth century review. *Revista Brasileira De Farmacognosia-brazilian Journal of Pharmacognosy* **18**:135-154.
- Barna E, Léder F, Dworschák E. 1997. Changes in the vitamin content of cereals during hydrothermal processes (flaking, puffing, extrusion). *Nahrung* **41**:243-244.
- Beltrán-de-Miguel B, Estévez-Santiago R, Olmedilla-Alonso B. 2015. Assessment of dietary vitamin A intake (retinol, α -carotene, β -carotene, β -cryptoxanthin) and its sources in the National Survey of Dietary Intake in Spain (2009-2010). *International Journal of Food Sciences and Nutrition* **66**:706-712.
- Bohn T, Desmarchelier C, El SN, Keijer J, van Schothorst E, Rühl R, Borel P. 2019. β -Carotene in the human body: metabolic bioactivation pathways - from digestion to tissue distribution and excretion. *The Proceedings of the Nutrition Society* **78**:68-87.
- Bonet ML, Canas JA, Ribot J, Palou A. 2015. Carotenoids and their conversion products in the control of adipocyte function, adiposity and obesity. *Archives of Biochemistry and Biophysics* **572**:112-125.
- Burešová B, Paznocht L, Kotíková Z, Giampaglia B, Martinek M, Lachman J. 2021. Changes in carotenoids and tocopherols of colored-grain wheat during unleavened bread preparation. *Journal of Food Composition and Analysis* **103**:104108.

- Burešová B, Paznocht L, Jarošová V, Doskočil I, Martinek P. 2023. The effect of boiling and in vitro digestion of the carotenoid content of colored-grain wheat. *Journal of Food Composition and Analysis* **115**:105022.
- Burešová I, Trojan V, Helis M. 2019. Characteristics of flour and dough from purple and blue wheat grain. *Potravinárstvo Slovak Journal of Food Sciences* **13**:163-166.
- Burri BJ, La Frano MR, Zhu C. 2016. Absorption, metabolism, and functions of β -cryptoxanthin. *Nutrition reviews* **74**:69-82.
- Burri BJ. 2013. Carotenoids: Chemistry, Sources and Physiology. Pages 283-291 in Caballero B, Allen L, Prentice A, editors. *Encyclopedia of Human Nutrition*. Academic Press.
- Carazo A, Macáková K, Matoušová K, Krčmová LK, Protti M, Mladěnka P. 2021. Vitamin A Update: Forms, Sources, Kinetics, Detection, Function, Deficiency, Therapeutic Use and Toxicity. *Nutrients* **13**:1703.
- Carotenoid - Wikiwand. Wikiwand - home [online]. Dostupné z: <https://www.wikiwand.com/en/Carotenoid>
- Craft NE, Haltema TB, Garnett KM, Fitch KA, Dotey CK. 2004. Carotenoid, tocopherol, and retinal concentration in elderly human brain. *Journal of Nutrition, Health and Aging* **8**:156-162.
- Cueto M, Farroni A, Schoenlechner R, Schleining G, Buera P. 2017. Carotenoid and color changes in traditionally flaked and extruded products. *Food Chemistry* **229**:640-645.
- Davinelli S, Nielsen ME, Scapagnini G. 2018. Astaxanthin in Skin Health, Repair, and Disease: A Comprehensive Review. *Nutrients* **10**:522.
- de Punder K, Pruijboom L. 2013. The dietary intake of wheat and other cereal grains and their role in inflammation. *Nutrients* **53**:771-787.
- Demmig-Adams B, Gilmore AM, Adams WW III. 1996. Carotenoids 3: In vivo function of carotenoids in higher plants. *FASEB journal: official publication of the Federation of American Societies for Experimental Biology* **10**:403-412.
- DOSTÁLOVÁ, Jana. Co se děje s potravinami při přípravě pokrmů: Stručné informace pro pacienty. Praha: Forsapi, 2008.
- Dubcovsky J, Dvorak J. 2007. Genome plasticity a key factor in the success of polyploidy wheat under domestication. *Science* **316**:1862-1866.
- Eggersdorfer M, Wyss A. 2018. Carotenoids in human nutrition and health. *Archives of Biochemistry and Biophysics* **652**:18-26.

- Fares C, Codianni P, Nigro F, Platani C, Scazzina F, Pellegrini N. 2008. Processing and cooking effects on chemical, nutritional and functional properties of pasta obtained from selected emmer genotypes. *Journal of the Science of Food and Agriculture* **88**:2435-2444.
- Faustino JF, Ribeiro-Silva A, Dalto RF, Souza MM, Furtado JM, de Melo Rocha G, Alves M, Rocha EM. 2016. Vitamin A and the eye: An old tale for modern times. *Arquivos Brasileiros de Oftalmologia* **79**:56-61.
- Ficco DBM, Mastrangelo AM, Trono D, Borrelli GM, DeVita P, Fares C, Beleggia R, Platani C, Papa R. 2014. The colours of durum wheat: A review. *Crop and Pasture Science* **65**:1-15.
- Gajdošová A, Šturdík E. 2004. Biologické, chemické a nutrično zdravotné charakteristiky pekárských cereálií. *Nova Biotechnologica* **4**:133-154.
- Gale CR, Hall NF, Phillips DI, Martyn CN. 2003. Lutein and zeaxanthin status and risk of age-related macular degeneration. *Investigative Ophthalmology & Visual Science* **44**:2461-2465.
- Garg M, Chawla M, Chunduri V, Kumar R, Sharma S, Sharma NK, Kaur N, Kumar A, Munday JK, Saini MK, Singh SP. 2016. Transfer of grain colors to elite wheat cultivars and their characterization. *Journal of Cereal Science* **71**:138-144.
- Garg M, Kaur S, Sharma A, Kumari A, Tiwari V, Sharma S, Kapoor P, Sheoran B, Goyal A, Krishania M. 2022. Rising Demand for Healthy Foods-Anthocyanin Biofortified Colored Wheat Is a New Research Trend. *Frontiers in Nutrition* **9**:878221.
- Geng P, Harnly JM, Chen P. 2015. Differentiation of Whole Grain from Refined Wheat (*T. aestivum*) Flour Using Lipid Profile of Wheat Bran, Germ, and Endosperm with UHPLC-HRAM Mass Spectrometry. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* **63**:6189-6211.
- Giordano D, Locatelli M, Travaglia F, Bordiga M, Reyneri A, Coisson JD, Blandino M. 2017. Bioactive compound and antioxidant activity distribution in roller-milled and pearled fractions of conventional and pigmented wheat varieties. *Food Chemistry* **233**:483-491.
- González-Thuillier I, Salt L, Chope G, Penson S, Skeggs P, Tosi P, Powers SJ, Ward JL, Wilde P, Shewry PR, Haslam RP. 2015. Distribution of Lipids in the Grain of Wheat (cv. Hereward) Determined by Lipidomic Analysis of Milling and Pearling Fractions. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 2015 **63**:10705-10716.
- Heun M, Schaefer-Pregl R, Klawan D, Castagna R, Accerbi M, Borghi B, Salamini F. 1997. Site of einkorn wheat domestication identified by DNA fingerprinting. *Science* **278**:1312-1314.

- Hidalgo A, Brandolini A, Pompei C. 2010. Carotenoids evolution during pasta, bread and water biscuit preparation from wheat flours. *Food Chemistry* **121**:746-751.
- Hidalgo A, Fongaro L, Brandolini A. 2017. Colour screening of whole meal flours and discrimination of seven *Triticum* subspecies. *Journal of Cereal Science* **77**:9-16.
- Himi E, Maekawa M, Miiura H, Noda K. 2011. Development of PCR markers for *Tamyb10* related to *R-1*, red grain color gene in wheat. *Theoretical and Applied Genetics* **122**:1561-1576.
- Horbowicz M, Kosson R, Grzesiuk A, Dębski H. 2008. Anthocyanins of Fruit and Vegetables - Their Occurrence, Analysis and Role in Human Nutrition. *Vegetable Crops Research Bulletin* **68**:5-22.
- Hussain A, Larsson H, Kuktaite R, Olsson ME, Johansson E. 2015. Carotenoid Content in Organically Produced Wheat: Relevance for Human Nutritional Health on Consumption. *International Journal of Environmental Research and Public Health* **12**:14068-83.
- Igreja WS, Maia FA, Lopes AS, Chisté RC. 2021. Biotechnological Production of Carotenoids Using Low Cost-Substrates Is Influenced by Cultivation Parameters: A Review. *International Journal of Molecular Sciences* **22**:8819.
- Iji P, Omede A, Abdallah M, Ahiwe E. 2019. The role of specific cereal grain dietary components in poultry gut function Page 8 in Ricke SC, editor. *Improving gut health in poultry*, Ricke. Burleigh Dodds Science Publishing, Cambridge.
- Jacques PF, Lyass A, Massaro JM, Vasan RS, D'Agostino RB Sr. 2013. Relationship of lycopene intake and consumption of tomato products to incident CVD. *The British Journal of Nutrition* **110**:545-551.
- Jati IRAP, Darmaatmodjo LMYD, Suseno TIP, Ristiarini S, Wibowo C. 2022. Effect of Processing on Bioactive Compounds, Antioxidant Activity, Physicochemical, and Sensory Properties of Orange Sweet Potato, Red Rice, and Their Application for Flake Products. *Plants* **5**:440.
- Jung S, Wu K, Giovannucci E, Spiegelman D, Willett WC, Smith-Warner SA. 2013. Carotenoid intake and risk of colorectal adenomas in a cohort of male health professionals. *Cancer Causes & Control* **24**:705-717.
- Kadlec P, Melzoch K, Voldřich M. 2012. *Přehled tradičních potravinářských výrob: technologie potravin*. Key Publishing, Ostrava.
- Kelly ME, Ramkumar S, Sun W, Colon Ortiz C, Kiser PD, Golczak M, von Lintig J. 2018. The Biochemical Basis of Vitamin A Production from the Asymmetric Carotenoid β -Cryptoxanthin. *ACS Chemical Biology* **13**:2121-2129.

- Kennedy LE, Abraham A, Kulkarni G, Shettigar N, Dave T, Kulkarni M. 2021. Capsanthin, a Plant-Derived Xanthophyll: a Review of Pharmacology and Delivery Strategies. *AAPS PharmSciTech* **22**:203.
- Khan UM, Sevindik M, Zarrabi A, Nami M, Ozdemir B, Kaplan DN, Selamoglu Z, Hasan M, Kumar M, Alshehri MM, Sharifi-Rad J. 2021. Lycopene: Food Sources, Biological Activities, and Human Health Benefits. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity* **27**:13511.
- Konopka I, Czaplicki S, Daniela Rotkiewicz D. 2006. Differences in content and composition of free lipids and carotenoids in flour of spring and winter wheat cultivated in Poland. *Food Chemistry* **95**:290-300.
- Lachman J, Martinek P, Kotíková Z, Orsák M, Šulc M. 2017. Genetics and chemistry of pigments in wheat grain - A review. *Journal of Cereal Science* **74**:145-154.
- Leenhardt F, Lyan B, Rock E, Boussard A, Potus J, Chanliaud E, Remesy C. 2006. Wheat lipoxigenase activity induces greater loss of carotenoids than vitamin E during breadmaking. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* **54**:1710-1715.
- Lin BW, Gong CC, Song HF, Cui YY. 2017. Effects of anthocyanins on the prevention and treatment of cancer. *British Journal of Pharmacology* **174**:1226-1243.
- Liu M, Li W, Chen Y, Wan X, Wang J. 2020. Fucoxanthin: A promising compound for human inflammation-related diseases. *Life Sciences* **255**:117850.
- Luthria DL, Lu Y, John KMM. 2015. Bioactive phytochemicals in wheat: Extraction, analysis, processing, and functional properties. *Journal of Functional Foods* **18**:910-925.
- Maiani G, Castón MJ, Catasta G, Toti E, Cambrodón IG, Bysted A, Granada-Lorencio F, Olmedilla-Alonso B, Knuthsen P, Valoti M, Böhm V, Mayer-Miebach E, Behnlian D, Schlemmer U. 2009. Carotenoids: actual knowledge on food sources, intakes, stability and bioavailability and their protective role in humans. *Molecular Nutrition & Food Research* **53**:194-218.
- Maoka T. 2020. Carotenoids as natural functional pigments. *Journal of Natural Medicines* **74**:1-16.
- Martín-Gómez JJ, Rewicz A, Goriewa-Duba K, Wiwart M, Tocino Á, Cervantes E. 2019. Morphological Description and Classification of Wheat Kernels Based on Geometric Models. *Agronomy* **9**:399.
- Mellado-Ortega E, Atienza SG, Hornero-Méndez D. 2015. Carotenoid evolution during postharvest storage of durum wheat (*Triticum turgidum* conv. *durum*) and tritordeum (*×Tritordeum Ascherson et Graebner*) grains. *Journal of Cereal Science* **62**:134-142.

- Milani A, Basirnejad M, Shahbazi S, Bolhassani A. 2017. Carotenoids: biochemistry, pharmacology and treatment. *British Journal of Pharmacology* **174**:1290-1324.
- Mitra S, Rauf A, Tareq AM, Jahan S, Emran TB, Shahriar TG, Dhama K, Alhumaydhi FA, Aljohani ASM, Rebezov M, Uddin MS, Jeandet P, Shah ZA, Shariati MA, Rengasamy KR. 2021. Potential health benefits of carotenoid lutein: An updated review. *Food and Chemical Toxicology: an international journal published for the British Industrial Biological Research Association* **154**:112328.
- Moshawih S, Abdullah Juperi RNA, Paneerselvam GS, Ming LC, Liew KB, Goh BH, Al-Worafi YM, Choo CY, Thuraisingam S, Goh HP, Kifli N. 2022. General Health Benefits and Pharmacological Activities of *Triticum aestivum* L. *Molecules* **27**:1948.
- Nagao A. 2004. Oxidative Conversion of Carotenoids to Retinoids and Other Products. *The Journal of Nutrition* **34**:237-240.
- Ndolo VU, Beta T. 2013. Distribution of carotenoids in endosperm, germ, and aleurone fractions of cereal grain kernels. *Food Chemistry* **139**:663-671.
- Nisar N, Li L, Lu S, Khin NC, Pogson BJ. 2015. Carotenoid metabolism in plants. *Molecular Plant* **8**:68-82.
- Paznocht L, Burešová B, Kotíková Z, Martinek P. 2021. Carotenoid content of extruded and puffed products made of colored-grain wheats. *Food Chemistry* **340**:127951.
- Paznocht L, Kotíková Z, Orsák M, Lachman J, Martinek P. 2019. Carotenoid changes of colored-grain wheat flours during bun-making. *Food Chemistry* **277**:725-734.
- Paznocht L, Kotíková Z, Šulc M, Lachman J, Orsák M, Eliášová M, Martinek P. 2018. Free and esterified carotenoids in pigmented wheat, tritordeum and barley grains. *Food Chemistry* **240**:670-678.
- Ribeiro D, Freitas M, Silva AMS, Carvalho F, Fernandes E. 2018. Antioxidant and pro-oxidant activities of carotenoids and their oxidation products. *Food and Chemical Technology* **120**:681-699.
- Rodriguez-Amaya DB. 2016. Natural food pigments and colorants. *Current Opinion in Food Science* **7**:20-26.
- Rodríguez-Concepción M. 2010. Supply of precursors for carotenoid biosynthesis in plants. *Archives of biochemistry and biophysics* **504**:118-122.
- Saini P, Kumar N, Kumar S, Mwaurah PW, Panghal A, Attkan AK, Singh VK, Garg MK, Singh V. 2021. Bioactive compounds, nutritional benefits and food applications of colored wheat: a comprehensive review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* **61**:3197-3210.

- Shewry PR, Hey SJ. 2015. The contribution of wheat to human diet and health. *Food and Energy Security* **4**:178-202.
- Shewry PR. 2009. Wheat. *Journal of Experimental Botany* **60**:1537-53.
- Siebenhandl S, Grausgruber H, Pellegrini N, Del Rio D, Fogliano V, Pernice R, Berghofer E. 2007. Phytochemical profile of main antioxidants in different fractions of purple and blue wheat, and black barely. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* **55**:8541-8547.
- Sluijs I, Cadier E, Beulens JW, van der A DL, Spijkerman AM, van der Schouw YT. 2015. Dietary intake of carotenoids and risk of type 2 diabetes. *Nutrition, Metabolism, and Cardiovascular Diseases* **25**:376-381.
- Stevenson L, Phillips F, O'Sullivan K, Walton J. 2012. Wheat bran: its composition and benefits to health, a European perspective. *International Journal of Food Sciences and Nutrition* **63**:1001-1013.
- Šárka E, Čopíková J, Smrčková P. 2013. Extrusion Process in Cereal and Confectionery Technologies. *Listy cukrovarnické a řepařské* **129**:350-354.
- Šramková Z, Gregorová E, Šturdík E. 2009. Chemical composition and nutritional quality of wheat grain. *Acta Chimica Slovaca* **2**:115-138.
- Tang G. 2010. Bioconversion of dietary provitamin A carotenoids to vitamin A in humans. *The American Journal of Clinical Nutrition* **91**:1468-1473.
- Tian SQ, Chen ZC, Wei YC. 2018. Measurement of color-grained wheat nutrient compounds and the application of combination technology in dough. *Journal of Cereal Science* **83**:63-67.
- Trono D. 2019. Carotenoids in Cereal Food Crops: Composition and Retention throughout Grain Storage and Food Processing. *Plants* **8**:551.
- Tudor C, Pinteá A. 2020. A Brief Overview of Dietary Zeaxanthin Occurrence and Bioaccessibility. *Molecules* **25**:4067.
- Velimirovic A, Jovovic Z, Pržulj N. 2021. From neolithic to late modern period: Brief history of wheat. *Genetika* **53**:407-417.
- Velíšek J, Hajšlová J. 2009. *Chemie potravin II. Rozšířené a přepracované 3. vyd.* OSSIS, Tábor.
- Wieser H, Koehler P, Scherf KA. 2020. The Two Faces of Wheat. *Frontiers in Nutrition* **7**: 517313.
- Wingerath T, Sies H, Stahl W. 1998. Xanthophyll esters in human skin. *Archives of Biochemistry and Biophysics* **355**:271-274.

Zhu Y, Sang S. 2017. Phytochemicals in whole grain wheat and their health-promoting effects. *Molecular Nutrition & Food Research* **61**:7.

8 Seznam použitých zkratek a symbolů

Ba + Pp modrý aleuron + purpurový perikarp

Ba modrý aleuron

CK celkový obsah karotenoidů

DMAPP dimethylallyldifosfát

DW sušina

DXP deoxy-5-xylulosa-5-fosfát

DXR deoxy-5-xylulosa-5-fosfát-reduktoisomerasa

FODMAPs fermentovatelné oligosacharidy, disacharidy, monosacharidy a polyoly

GGPP geranylgeranylpyrofosfát syntasa

HDL high density lipoprotein (lipoprotein s vysokou hustotou)

IPP isopentyldifosfát

LDL low density lipoprotein (lipoprotein s nízkou hustotou)

MEP methylerythritol

MV máčené vločky

MZ máčené zrno

PDS fytoendesaturasa

Pp purpurový perikarp

PSY fytoensyntasa

SZ syrové zrno

VLDL very low density lipoprotein (lipoprotein s velmi nízkou hustotou)

VV vařené vločky

VZ vařené zrno

Ye žlutý endosperm

ZDS ζ-karotendesaturasa

9 Seznam tabulek

Tabulka 1 Obsah mikronutrientů v pšenici.....	15
Tabulka 2 Porovnání obsahu nutrientů v sušině v různých typech pšenice	16
Tabulka 3 Přehled genotypů pšenic použitých k analýze.	26
Tabulka 4 Složení mobilní fáze v průběhu analýzy.....	29
Tabulka 5 Celkový obsah karotenoidů v jednotlivých genotypech.	31
Tabulka 6 Obsah jednotlivých karotenoidů v pšenicích v závislosti na technologickém zpracování.....	37

10 Seznam obrázků

Obrázek 1 Anatomická stavba pšeničného zrna	12
Obrázek 2 Izomery β -karotenu	18
Obrázek 3 Biosyntéza karotenoid	21
Obrázek 4 Prostorové uspořádání karotenoidů v membránové dvojvrstvě	22
Obrázek 5 Přeměna β -karotenu na retinol.	24
Obrázek 6 Chromatogram genotypu Bona Vita při vlnové délce 445 nm.....	30
Obrázek 7 Průměrný obsah celkových karotenoidů v barevných skupinách pšeni.....	32
Obrázek 8 Průměrné zastoupení karotenoidů syrovém zrně.	34
Obrázek 9 Změny celkového obsahu karotenoidů v průběhu technologického zpracování v jednotlivých použitých genotypech	40
Obrázek 10 Porovnání ztrát CK v barevných skupinách.....	41

11 Samostatné přílohy

Příloha 1 Fotografie syrového zrna, vařených vloček a máčených vloček z použitých genotypů.



1. Bohemia



2. Tobak



3. UC 66049



4. Skorpion



5. AF Zora



6. V1-299-21



7. AF Jumiko



8. V1-289-21



9. Citrus



10. Bona Vita